

# **l'actualité chimique**

Mensuel - Décembre 2008 - N° 325

**Les chimistes se mobilisent pour  
le développement durable**

**Et aussi :  
De la farine de blé contre la pollution  
D'infinies manières de cuisiner l'œuf !**



# Opportunities for Synthetic Organic Chemists



## Opportunities for Synthetic Organic Chemists:

We have a number of opportunities available for organic chemists within our Research Centres located in Monheim and Frankfurt (Germany) as well as in Lyon (France). We are looking for motivated people who wish to work in a dynamic and exciting international environment.

Successful candidates, with a minimum of 2 years' experience in synthetic chemistry, would be interested by working in various countries. Together with a scientific background in organic chemistry, candidates should be able to demonstrate excellent communication and team skills.

Bayer CropScience is an innovative world-leading company in the areas of crop protection, plant biotechnology and seeds, as well as non-agricultural pest control. A subsidiary of Bayer AG, with annual sales of EUR 5.8 billion (2007), Bayer CropScience has a global workforce of 17,800 and is represented in more than 120 countries.

Our outstanding innovation excellence is built around an R&D budget which is one of the highest in the industry (637M€), with an extensive network of R&D facilities that span the globe. An international team of researchers, using cutting-edge technologies, ensure that innovation is always aligned to market needs in order to enrich an already extensive development pipeline.



Please apply via:

*recrutement@bayercropscience.com*  
or *http://www.mybayerjob.de/en*

Bayer CropScience SA  
Human Resources Department  
14-20 rue Pierre Baizet, 69009 Lyon, France

[www.bayercropscience.com](http://www.bayercropscience.com)

#### RÉDACTION

**Rédacteur en chef** : Paul Rigny  
**Rédactrice en chef adjointe** :  
 Séverine Bléneau-Serdel  
**Secrétaire de rédaction** : Roselyne Messal  
**Chef de rubrique, Collection « L'Actualité Chimique - Livres »** : Minh-Thu Dinh-Audouin  
**Webmestre** : Jérémie Meyer de Ville  
<http://www.etage-13.com>

#### Comité des rubriques :

Recherche et développement : Paul Rigny,  
 Industrie : Gilbert Schorsch, Enseignement et formation : Michel Boyer et Katia Fajerweg,  
 TP : Xavier Bataille et Nicolas Cheymol, Histoire de la chimie : Marika Blondel-Mégrelis, Comment ça marche ? : Véronique Nardello-Rataj, Chimie des aliments et du goût : Hervé This, A propos de : Bernard Sillion, En bref : Séverine Bléneau-Serdel, Roselyne Messal, Actualités de la SCF et Agenda : Roselyne Messal, Livres et médias : Yves Dubosc

#### Comité de rédaction :

P. Arpino, H. Belhadj-Tahar, J. Belloni, E. Bordes-Richard, D. Bouveresse, J. Buendia, N. Capron-Joubert, C. Cartier dit Moulin, J.-C. Daniel, R.-E. Eastes, E. Florentin, J.-P. Foulon, J. Fournier, F. Lafuma, J.-F. Lambert, V. Lucas, N. Moreau, A. Ouali, P. Pichat, A. Picot, M. Poite, M. Quarton, E. Soulié, H. Toulhoat, M. Verdagner, P. Vermeulin, D. von Euw

**Partenariat** : CNRS, Fondation Internationale de la Maison de la Chimie

Publication analysée ou indexée par :  
 Chemical Abstracts, base de données PASCAL

#### ÉDITION

Société Chimique de France  
 250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris  
 Tél. : 01 40 46 71 64 - Fax : 01 40 46 71 61  
[redaction@lactualitechimique.org](mailto:redaction@lactualitechimique.org)  
<http://www.lactualitechimique.org>

**Directeur de la publication** : Olivier Homolle, président de la Société Chimique de France  
**Imprimerie** : SPEI, BP 26, 54425 Pulnoy  
**Maquette articles** : e-Press, Casablanca Technopark, Route de Nouaceur, Casablanca (Maroc)

**Maquette hors articles** : Mag Design  
<http://www.magdesign.info>

ISSN 0151 9093

#### PUBLICITÉ

EDIF, Le Clemenceau, 102 avenue Georges Clemenceau, 94700 Maisons-Alfort  
 Tél. : 01 43 53 64 00 - Fax : 01 43 53 48 00  
[edition@edif.fr](mailto:edition@edif.fr), <http://www.edif.fr>  
 Index des annonceurs : p. 1

© SCF 2008 - Tous droits réservés

Dépôt légal : décembre 2008

Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, fait sans le consentement de l'auteur, ou des ayants droits, ou ayant cause, est illicite (loi du 11 mars 1957, alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal. La loi du 11 mars 1957 n'autorise, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, que les copies et les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective d'une part, et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration.

#### TARIFS 2008 - L'ACTUALITÉ CHIMIQUE

(11 numéros par an)

**Particuliers** : France 95 € - Étranger 100 €

**Institutions** : France 195 € - Étranger 205 €

**Lycées** : France 110 € - Étranger 130 €

**Membres de la SCF (hors membres associés)** :

abonnement inclus dans la cotisation

**Abonnement** : SCF, Nadine Colliot  
 250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris  
 Tél. : 01 40 46 71 66 - Fax : 01 40 46 71 61  
[adhesion@sfc.fr](mailto:adhesion@sfc.fr)

Prix de vente au numéro : 20 € (port inclus)

<b>Éditorial</b>	<b>2</b>
Quel CNRS pourrait-on avoir ?, par <b>P. Rigny</b>	2
<b>Chroniques</b>	<b>3</b>
<i>Communication de la chimie</i>	
Naturel ET chimique, par <b>R.-E. Eastes</b>	3
<b>À propos de</b>	<b>4</b>
Pour réconcilier chimie et grand public : la chimie s'invite au marché, par <b>L. Valade, M.-C. Vitorge</b> et <b>A. Marquet</b>	4
<b>Chimie des aliments et du goût</b>	<b>5</b>
Réinventons la tradition, par <b>H. This</b>	5
<b>Recherche et développement</b>	<b>8</b>
De la farine de blé pour décolorer des effluents papetiers pollués, par <b>G. Crini, P.-M. Badot, N. Morin-Crini, B. Jolibois, E. Comte, B. Fahys, E. Gravier</b> et <b>G. Torri</b>	8
<b>Enseignement et formation</b>	<b>14</b>
<i>MIEC-JIREC 2007</i>	
Chimie et développement durable. Retour sur les MIEC-JIREC 2007, par <b>C. Eskenazi</b>	14
Développement durable, « avenir incertains », par <b>C. Lévêque</b>	16
La chimie et le développement durable, par <b>A. Lattes</b>	18
La chimie et le développement durable à la FFC : le projet « Chimie pour un Développement Durable® », par <b>M. Azémar</b>	21
Stratégie d'action pour l'environnement et le développement durable au CNRS, par <b>G. Chambaud</b> et <b>B. Delay</b>	24
Le pôle Environnement et développement durable de l'Université de La Rochelle, par <b>S. Lamare</b> et <b>G. Blanchard</b>	26
La pollution atmosphérique particulaire sème le trouble, par <b>P.-C. Maria</b>	30
La pollution marine. Quelles politiques pour une protection durable de l'océan et des mers côtières ?, par <b>M. Marchand</b>	35
Le stockage électrochimique de l'énergie : apport des batteries lithium-ion, par <b>S. Franger, C. Benoit</b> et <b>R. Saint-Martin</b>	41
Une démarche de progrès pour un développement durable : expérience de la branche chimie de Total, par <b>A. Grosmaître</b>	45
L'Université Virtuelle Environnement et Développement durable, par <b>D. Pommeray</b> et <b>L. Aquilina</b>	49
Travail collaboratif, un exemple avec les notions associées à l'équilibre chimique, par <b>J. Randon</b>	52
<b>En bref</b>	<b>54</b>
<b>Livres et médias</b>	<b>57</b>
<b>Agenda</b>	<b>59</b>
<b>Index 2008</b>	<b>60</b>

#### Index des annonceurs

Bayer	2 <sup>e</sup> de couv.	EDP Sciences	p. 53 + encart
Cermav	p. 51	Hexion	p. 48
CNRS	p. 56	Prolea	3 <sup>e</sup> et 4 <sup>e</sup> de couv.
Cognis	p. 34		



## Quel CNRS pourrait-on avoir ?

Le troisième opus d'une série annuelle, « La recherche et l'innovation en France », vient de paraître<sup>(1)</sup>. Cet ouvrage analyse les changements à l'œuvre dans le système français de recherche et d'innovation (SFRI). Où sont nos nouveaux repères au milieu de toutes ces structures ou sigles nouveaux<sup>(2)</sup> (pôles de compétitivité, fondations, ANR, AERES, PRES, RTRA...) que le « Pacte pour la recherche » de 2006 a fait apparaître ? Quels genres d'acteurs nouveaux seront ces « universités autonomes » dont la « Loi d'autonomie des universités » de 2007 prépare l'avènement ?

Ces réformes passent sous silence le rôle du CNRS. Certes, il est évident que sans transformations, il serait condamné : un organisme dont 80 % du budget est consacré aux dépenses de personnels est paralysé – réactivité handicapée, capacité d'entreprendre amoindrie. Pas besoin de discours pour fuir cette réalité : il s'agit d'une loi aussi forte qu'une loi physique. Cet organisme qui a tant apporté au cours de ses 70 ans d'existence, s'il doit être refondu pour une mission de première importance, il ne faut surtout pas le dégrader.

S'il y a une constante dans l'histoire du CNRS, c'est bien qu'il est trop couplé aux universités pour se réformer si elles ne se réforment pas. Tournons donc le projecteur vers les universités. Le contexte d'aujourd'hui, de réformes « révolutionnaires », est « unique » et la réforme récente du SFRI introduit les universités à un formidable bouleversement. La « logique contractuelle » doit se substituer à la logique centralisée si profondément ancrée : le soutien de l'État (mais total : personnel et immobilier, comme recherche et enseignement) sera totalement réévalué tous les quatre ans et se construira à chaque examen autour d'une politique scientifique, d'une politique de ressources humaines et d'une politique financière. Cette logique rendra possibles des initiatives originales de regroupements institutionnels, géographiques ou thématiques ; des financements vont se différencier ; des hiérarchies apparaître entre établissements. Quels changements culturels ! Des moyens devront être réalloués en fonction des évaluations : comment faire ?

Les universités devront donc devenir « opérateurs de recherche » et là, toute une génération s'esclaffe. « *Elles n'en sont pas capables !* » dit-on (à l'université comme ailleurs). Alors, ce « nouveau SFRI » : totalement irréaliste ? Si l'on s'en tient à l'observation de ses premiers pas, on pourrait le craindre : décisions parfois atterrantes des « commissions d'experts » dans l'attribution des moyens, inquiétudes devant le recrutement de

chercheurs de statuts précaires (on en compterait aujourd'hui près de 10 000) que chaque année rapproche d'une galère, confiscation de la responsabilité d'orientation et d'évaluation de la recherche fondamentale par des agences très contestées.

Mais faisons la prévision (certains diraient « le rêve ») que les réformes des établissements vont réussir. Qui ne voit pas que reste un manque béant : celui d'un opérateur national en recherche fondamentale ? C'est là la place qui revient « naturellement » à un CNRS du futur. Ses relations avec les universités devenues autonomes seront complètement redéfinies car il n'aura plus la responsabilité d'accompagner dans le détail la conduite de leurs laboratoires. Par le transfert des personnels et des charges correspondantes aux universités devenues « opérateurs de recherche », il retrouvera une structure financière assainie. Le gouvernement, attaché au succès du SFRI, affectera là la part nécessaire des crédits dégagés pour la réforme. Le CNRS sera alors en mesure de se consacrer à une politique nationale : harmonisation des politiques des acteurs universitaires ; création et mise à jour des infrastructures scientifiques lourdes d'intérêt national – tant il est vrai que le soutien de la recherche par projet sollicite les laboratoires existants mais n'en crée pas s'il en manque ; opération scientifique d'un nombre restreint de laboratoires (propres) ou centres de recherche stratégiques par leurs thématiques, leurs partenariats ou leurs collaborations. En chimie, par exemple, il pourrait s'agir d'opérations communes avec des acteurs industriels ou d'instituts européens.

Un CNRS du futur autour d'une telle mission naîtra-t-il réellement des réformes actuelles ? La publication, en octobre 2008, d'un nouveau logo pour le CNRS (qui apparaît sur la couverture de *L'Actualité Chimique*) est à cet égard dérangeante puisqu'on ne doit plus le « décliner » (ce n'est plus « Centre National de la Recherche Scientifique », c'est « CNRS »). La condition pour que cette renaissance voie le jour, alors que les principes futurs imposés au milieu académique sont aux antipodes de ceux qui l'imprègnent aujourd'hui ? Laisser du temps pour la maturation des acteurs – beaucoup d'années – avec patience, respect, continuité.

**Paul Rigny**

Rédacteur en chef

<sup>(1)</sup> J. Lesourne, D. Randet, *FutuRIS 2008, La recherche et l'innovation en France*, Odile Jacob, 2008.

<sup>(2)</sup> Agence Nationale de la Recherche (ANR), Agence d'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur (AERES), Pôles de Recherche et d'Enseignement Supérieur (PRES), Réseau Thématique de Recherche Avancée (RTRA).

## Communication de la chimie

## Naturel ET chimique ?

Dans notre dernière chronique, nous proposons de distinguer différentes « manières d'être chimique » et annonçons que cette clarification nous permettrait de dépasser les difficultés liées aux ambiguïtés du mot « chimique », elles-mêmes évoquées dans les chroniques précédentes<sup>(1)</sup>. Qu'en est-il exactement et dans quelle mesure ces promesses peuvent-elles être tenues ? L'analyse d'un petit livre édité en 2006 par les éditions Le Pommier en collaboration avec le CEA, *Tout est chimie*<sup>(2)</sup>, va nous aider à le préciser. Car il contient, selon nous, autant de bonnes idées (figures 1 à 3) que d'exemples de ces formulations équivoques qu'au fil de nos chroniques nous nous attachons à dénoncer.

Revenons donc à l'expression « Tout est chimique » et à ses variantes, telles que le titre de cet opuscule ou cette phrase que l'on trouve à la page 22 : « *Tout n'est-il pas produit chimique ? [...] Quand on parle de « produits chimiques », on désigne toutes les molécules qui sont dans les gaz, les liquides ou la matière solide qui nous entourent.* »

« *Les produits naturels sont donc chimiques* » ajouteraient très certainement les auteurs, à l'instar de nombre de nos collègues. Qu'entendraient-ils par là ? Simplement, et ils n'auraient pas tort, que les produits de la nature sont composés de molécules, pour la plupart identifiées par les chimistes ; que l'ensemble de ces produits appartient donc aux champs de conceptualisation et d'étude de la chimie (les deuxième et troisième niveaux d'appartenance que nous identifions le mois dernier) ; et qu'à ce titre, on peut les qualifier de « chimiques ». Preuve en est que dans la phrase citée en exergue, le « produit chimique » est défini par la notion de « molécule », c'est-à-dire de manière conceptuelle<sup>(3)</sup>.

Mais comment le non-chimiste perçoit-il, lui, le « produit chimique » ? Nous l'avons précisé dans la chronique du

mois de février 2008 : comme une substance à la fois « synthétique et réactive ». C'est-à-dire qu'il considère l'adjectif « chimique », parce que c'est ainsi qu'on lui a appris à le faire à l'école, dans le premier sens de notre classification ; et non pas dans le deuxième ou le troisième. Terrible hiatus alors, entre l'auteur du message et son interlocuteur... Et incompréhension de ce dernier, doublée d'une sourde inquiétude, à l'idée qu'il puisse être entouré de « produits chimiques ». Or de cette inquiétude à la défiance, il n'y a qu'un pas. Et voilà que la plus belle entreprise de communication de la chimie risque de se retourner contre les objectifs de son auteur, s'il n'a pas su prendre conscience de ce décalage.

Que faire ? Commencer par réaliser qu'il est moins risqué, en vertu de la prégnance des valeurs naturalistes que nous évoquions dans la chronique du mois de mai 2008, d'expliquer en quoi la chimie procure une compréhension de la nature plutôt que de se l'approprier en la qualifiant de chimique. Ce qui amènera par exemple à remplacer l'expression « *Tout est chimique* » par « *La chimie permet de comprendre la structure et les transformations de la matière, qu'elle soit synthétique ou naturelle* ». Alors, l'impérialiste expression de « produit chimique naturel » cèdera la place à celle de « *substance naturelle* », en levant l'ambiguïté du terme « chimique » et sans rien perdre du message, le concept de « substance » véhiculant implicitement l'idée que l'objet dont il est question est à la fois identifié et compris par la chimie.

D'autres prescriptions pourront sans peine être tirées de cette grille d'analyse. En attendant la prochaine chronique, également inspirée de ce petit livre, le lecteur saura-t-il par exemple prévoir ce qui pourra être dit de la notion de « pollution chimique » ?

Richard-Emmanuel Eastes,  
le 31 octobre 2008



Photo : S. Querbes

**Richard-Emmanuel Eastes** est agrégé de chimie, responsable du programme Communication-Éducation-Valorisation-Éthique du Département d'Études cognitives à l'École normale supérieure, Président de l'association Les Atomes Crochus et membre du Bureau de la Commission Chimie et Société.



Figures 1 à 3 - *Tout est chimie !* Deux exemples d'illustrations à la fois drôles et efficaces<sup>(2)</sup>.

- (1) Retrouvez l'intégralité de ces chroniques sur le blog *Parlez-vous chimie ?* : [www.sfc.fr/blogs.php](http://www.sfc.fr/blogs.php)
- (2) Jousso-Dubien C., Rabbe C., Illustrations de Y. Fastier, *Tout est chimie !* Les minipommes, Le Pommier, Paris, 2006.
- (3) Notons que, compte tenu de l'incommensurabilité de ces niveaux de description, la formulation est en outre un peu maladroite du point de vue pédagogique.

# Pour réconcilier chimie et grand public : la chimie s'invite au marché

Lydie Valade, Marie-Claude Vitorge et Andrée Marquet

Les colloques nationaux de Chimie et Société<sup>(1)</sup> s'adressent aux jeunes et au grand public. La première édition intitulée « Chimie & Bien-Être » s'est tenue à Lyon en 2005. La deuxième, « Chimie & Terroir », organisée fin mai 2008 à Brive-La Gaillarde (Corrèze), s'est déroulée sur trois journées de fin de semaine et a privilégié la communication sous forme de démonstrations construites autour de trois thématiques directement liées à l'environnement des visiteurs : Chimie et Plantes, Chimie et Gastronomie et Chimie et Géologie<sup>(2)</sup>.

Pendant trois jours, une quarantaine d'intervenants – chercheurs, enseignants chercheurs, techniciens, ingénieurs, enseignants, étudiants<sup>(3)</sup> de toute la France et industriels locaux – s'étaient donné rendez-vous au marché Georges Brassens de Brive-la-Gaillarde pour tenir des stands de chimie sur lesquels ils expliquaient l'origine de la saveur des pommes, de l'amertume de la gentiane, de la couleur des fruits rouges, du grès de Collonges, de la valeur nutritive des noix, des céréales, des vertus cosmétiques et pharmacologiques des plantes... L'organisation dans une ville moyenne éloignée des centres de recherche permet de rencontrer un public différent de celui qui visite les laboratoires pendant la « Fête de la Science » et de convaincre les plus jeunes de s'engager dans des études scientifiques.

Plus de mille jeunes sont venus jeudi 29 et vendredi 30 mai au rendez-vous de « Chimie & Terroir » et le samedi 31 mai, entre l'achat de figues confites farcies au foie gras et de fraises sans oublier les confits, les familles venaient, entraînés par les enfants, voir ou revoir les expériences, se renseigner sur le CNRS et bien sûr, découvrir la SCF. Ils sont aussi venus écouter Hervé This, Hubert Bril et Armand Lattes leur parler de gastronomie, de géologie et de plantes lors de conférences et le samedi soir, ils furent passionnés par le spectacle clownesque et chimique proposé par les Atomes Crochus : *Ursule Fabulle*. Lors de l'inauguration, Patachou et

Tartiflette ont régalé l'assistance d'un apéritif très dynamique et coloré.

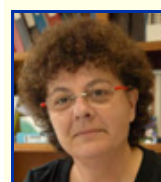
Le vif succès rencontré par la formule de « Chimie & Terroir » auprès des jeunes et du public a réjoui les intervenants. Ceux-ci, en majorité membres de Chimie et Société, ont apprécié l'opportunité d'effectuer une action commune de la Commission et de partager cette expérience avec leurs collègues d'autres régions. Chimie et Société souhaite que « Chimie & Terroir » essaime dans d'autres régions car l'expérience de Brive a montré que **lorsque le chimiste va au marché, il rencontre le citoyen et peut lui faire partager sa passion**.



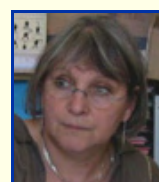
Après le marché... © F. Viala.



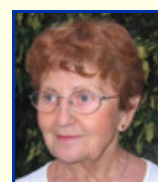
Amidon et cellulose : des oses aux polysaccharides. © F. Viala.



L. Valade



M.-C. Vitorge



A. Marquet

#### Lydie Valade

est directrice de recherche au CNRS et correspondante Midi-Pyrénées de Chimie et Société\*.

#### Marie-Claude Vitorge

est chargée de la communication de la Société Chimique de France (SCF) et correspondante Île-de-France de Chimie et Société.

#### Andrée Marquet

est professeur émérite, membre de l'Académie des sciences et présidente de Chimie et Société.

\* Courriels : lydie.valade@lcc-toulouse.fr ; marie-claude.vitorge@sfc.fr ; andree.marquet@upmc.fr

# Réinventons la tradition

Hervé This

## Un peu de systématisme ne messied pas en cuisine

La question de la tradition (culinaire, puisque cette rubrique est consacrée à l'alimentation) est terrible : nous y sommes attachés, mais est-elle la garantie d'une voie souhaitable ? Ce n'est pas certain : l'esclavage était traditionnel ! En cuisine, nous questionnons rarement nos aliments : nous mangeons nos poulets rôtis, nos cassoulets, nos choucroutes... sans nous poser de questions sur leur « légitimité ». Nous faisons nôtre la devise du philosophe grec Protagoras : « *l'Homme est la mesure de toute chose* ». En l'occurrence, l'Homme c'est nous, enfant : c'est bien dans l'enfance que nous apprenons à « connaître » ce qui est bon et ce qui est mauvais, ce qui est toxique et ce qui est comestible. Pas étonnant que la cuisine de nos « grand-mères » soit toujours la meilleure : en réalité, c'est la seule admissible, par la suite. Nos idées alimentaires, justes ou fausses, perdurent à l'âge adulte : oui, nous sommes conditionnés parce que nous avons mangé quand nous étions petits. L'Alsacien voudra sa choucroute d'enfance, le Toulousain son cassoulet d'enfance, le Breton sa galette de blé noir, le Normand sa crème et ses pommes...

Pourtant, quelle est la « légitimité » de la choucroute ? Les Alsaciens la disent bonne, mais l'est-elle vraiment ? Après tout, il y a de bonnes et de mauvaises choucroutes, et évidemment, seules les bonnes choucroutes sont bonnes ; les mauvaises ne sont pas bonnes. Par conséquent, il y a faute « platonicienne » à déclarer que la choucroute est bonne ; Aristote avait raison de distinguer les bonnes et mauvaises choucroutes (oui, Aristote ne parlait pas de choucroute, mais on a compris que je ne m'interdis pas de sourire, même dans les pages de cette revue sérieuse).

Pourquoi cette introduction ? Parce qu'il est utile de reconnaître que nos aliments sont contingents : ce sont le résultat de siècles d'empirisme et de très lentes évolutions. Au Moyen Âge, on mangeait des choucroutes ; on a continué à en manger au siècle suivant, et au siècle suivant... chaque génération portant la suivante sur les traces du même mets... La choucroute est-elle alors là pour l'éternité ? La question se pose pour l'ensemble des plats que nous mangeons aujourd'hui, et elle semble condamner l'innovation culinaire – on le voit : il s'agit d'innovation, donc de technologie.

## Au commencement était l'œuf

Commençons par le plus simple... et par le commencement : l'œuf. Nous l'avons déjà évoqué dans cette rubrique, mais il y a des raisons chimiques à cela : l'œuf est simple, chimiquement, surtout si l'on considère sa composition au premier ordre. En effet, le blanc d'œuf est une solution à 10 % de protéines, et le jaune d'œuf est composé de 50 % d'eau, 15 % de protéines et 35 % de lipides. Évidemment les choses sont plus compliquées, mais cette table de composition simple suffira pour commencer. Donc au début, il y a l'œuf. Qu'en faire en cuisine ?

Bien sûr, nous pouvons prendre des livres de cuisine et suivre les recettes : œuf à la coque, œuf dur, mollet, frit, sur le plat... Toutefois cette cuisine est non seulement contingente, comme nous l'avons vu, mais également « anecdotique » : pourquoi l'œuf dur ? Pourquoi l'œuf mollet ? Allons, raisonnons, et puisque nous n'avons qu'une vie, jusqu'à plus ample informé, autant que cette vie soit souriante : amusons-nous donc en imaginant que les Martiens ont débarqué sur la Terre et que, jaloux de ce qu'ils considèrent comme notre « belle cuisine », ils ont supprimé toute connaissance culinaire. Que ferions-nous ?

Ayant oublié jusqu'au nom de l'œuf, nous avons toutefois conservé nos capacités de calcul, puisque nous sommes scientifiques pour les uns, ingénieurs pour les autres. Nous avons donc compté, et c'est ainsi que l'œuf recevra le numéro 1, puisqu'il est au commencement de toutes choses. Il n'est pas difficile, surtout pour un enfant que nous sommes peut-être restés, d'ouvrir cet œuf et de découvrir qu'il est constitué d'une coquille, d'un blanc et d'un jaune. Numérotions les différentes parties, en ajoutant le numéro de la partie derrière le numéro 1 de l'œuf : 1.1 sera l'œuf entier (rappelons que l'ensemble des parties d'un ensemble contient l'ensemble vide et l'ensemble tout entier), 1.2 sera la coquille, 1.3 sera l'œuf entier sorti de la coquille, 1.4 sera le jaune et le blanc mélangés et battus comme en préparation d'une omelette, 1.5 sera le jaune seul, et 1.6 désigne le blanc seul. Cette façon de renommer les parties de l'œuf est en réalité bienvenue, puisque je ne comprends toujours pas pourquoi nous nommons blanc d'œuf quelque chose qui est jaune, et jaune d'œuf quelque chose qui est orange.

Ayant ces parties, qu'en ferons-nous ? Je propose de numéroter maintenant les transformations que nous pouvons faire subir à ces parties. Numérotions 1 l'action nulle, 2 l'ajout d'un gaz, 3 l'ajout d'eau, 4 l'ajout d'huile, 5 l'ajout d'un solide, 6 l'ajout d'éthanol, 7 l'ajout d'un acide, 8 l'ajout d'une base, 9 le chauffage.

Un gaz ? Ce peut être l'air, le dioxyde de carbone, l'hélium... De l'eau ? En cuisine, l'eau doit avoir du goût : la solution aqueuse utilisée peut être du bouillon, du café, du thé, du jus d'orange, ou toute autre solution aqueuse où sont dissoutes des molécules sapides et peut-être odorantes. De l'huile ? Évidemment nous pouvons utiliser de l'huile, c'est-à-dire un ensemble de triglycérides, mais nous pouvons choisir cet ensemble : huile de noix, de noisette, de sésame, de café, d'olive, beurre fondu, fromage fondu, chocolat fondu, foie gras fondu... Les solides ? Il suffit qu'ils soient... solides : pensons au sel, au sucre, à l'acide tartrique... Pour l'éthanol, pas besoin de commentaires. Les acides ? En cuisine, l'acide acétique en solution dans l'eau est le plus courant, mais nous avons le choix, puisque le jus de citron est une solution d'acide citrique (qui contient également l'acide ascorbique), et que l'acide tartrique, cher à Louis Pasteur, à une acidité élégante, qui mérite que nous l'utilisions davantage en cuisine. Des bases ? Le bicarbonate est dans toutes les bonnes épicereries, car il accélère la cuisson des légumes et conserve le vert des végétaux verts en cours de cuisson...

mais c'est là une autre histoire qu'il faudra évoquer dans un texte ultérieur. Enfin, la chaleur est bien connue des cuisiniers... et des chimistes d'ailleurs. Toutefois, on le voit à ce dernier propos que la description des possibilités de transformation que je propose de considérer ici est très simpliste, voire métaphorique seulement, et l'on pourrait raffiner : entre le chauffage à 50 °C, ou la pyrolyse, il y a un monde de possibilités ! Ici je veux proposer une méthode plutôt que d'entrer dans les détails, et je laisse aux explorateurs du goût tentés par la technologie de la possibilité de s'amuser beaucoup et longtemps.

## L'exploration d'un long tableau

Nous avons donc l'œuf, associé au numéro 1. Plaçons ce code dans une première ligne d'un tableau, puisque nous n'avons qu'un chiffre. Puis nous avons eu l'œuf entier dans sa coquille, la coquille seule, etc., c'est-à-dire un ensemble de codes : 1.1, 1.2, 1.3... 1.6, dans la deuxième ligne du tableau en constitution. À partir de cette ligne, nous sommes passés à la ligne suivante en ajoutant les codes des transformations : la ligne suivante contient les résultats de transformations, notés 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3... 1.1.9, et 1.2.1... 1.2.9, et 1.3.1... jusqu'à 1.6.9. À quoi correspondent ces résultats ? Étaient-ils connus ? Examinons quelques exemples. 1.1.1 décrit l'œuf entier dans sa coquille auquel on n'a rien fait subir : ce n'est pas très intéressant. 1.1.2 décrit l'œuf entier dans sa coquille auquel on ajoute un gaz : il ne se passe rien, et ce n'est pas très intéressant non plus. De même pour 1.1.3, 1.1.4 et 1.1.5.

En revanche avec l'ajout d'éthanol, une transformation merveilleuse se produit... quand on est patient ; le protocole est le suivant : mettons dans l'éthanol un œuf entier, dans sa coquille, et attendons quelques semaines. Quand on ouvre l'œuf, on observe qu'il a coagulé, pour des raisons qu'il faudra bien considérer plus loin ; il prend en outre une légère teinte rosée que je ne comprends pas pour l'instant. Observons que, à ma connaissance, ce produit n'est pas traditionnel : je n'en ai pas trouvé la recette dans des livres de cuisine anciens ou modernes... du moins en langue française. Il faut donc le nommer, puisqu'au royaume des êtres humains, seul ce qui a un nom « existe ». Honorons les grands chimistes du passé en leur dédiant des mets : j'ai proposé le nom de baumé pour désigner cet œuf cuit dans l'éthanol, entier – du nom d'Antoine Baumé (1728-1804). Évidemment, un baumé à l'éthanol pur n'a pas grand intérêt, mais prenons donc une excellente vodka, un excellent rhum, un excellent cognac !

Le mécanisme ? Il est certain que les protéines sont solubles dans l'eau, mais pas dans l'éthanol. C'est pour cette même raison qu'il est bien difficile de faire des gels de whisky quand on utilise la gélatine comme agent gélifiant. De là à penser que l'éthanol modifie la conformation des protéines globulaires en solution dans l'eau, ce qui exposerait les groupes thiols, et conduirait à une coagulation par formation de ponts disulfures...

Passons maintenant à la recette 1.7. J'ai bien dit « recette » : en effet, notre codification est une façon de stipuler une transformation culinaire à partir d'un ingrédient (faut-il dire plutôt « réactif » ?). Pour savoir ce que recouvre la recette, il suffit de lire les chiffres successifs du code : 1, un œuf ; 1, entier dans sa coquille ; 7, acide. Il s'agit donc ici de mettre un œuf entier dans un acide. Prenons par exemple du vinaigre cristallin et attendons en observant : nous voyons d'abord le vinaigre attaquer la coquille, dissoudre le carbonate. Nous récupérons l'œuf sans sa coquille, ce qui

nous permet au passage de voir que le jaune flotte dans le blanc – pas étonnant puisque le jaune contient des lipides et que le blanc est une solution aqueuse de protéines. Attendons un peu, comme nous avons attendu pour la recette précédente 1.1.6, où l'œuf était mis dans l'éthanol. D'abord, nous voyons l'œuf grossir : c'est l'osmose qui fait passer l'eau du vinaigre vers la solution assez concentrée que constitue le blanc d'œuf. La membrane externe, élastique, laisse ainsi l'œuf gonfler. Attendons encore : progressivement l'œuf s'opacifie. Ouvrons : cette fois encore, nous observons une coagulation.

Rien d'étonnant, puisque les protéines du blanc d'œuf ont été mises en milieu acide, et que, ainsi « tombées » du côté acide du point isoélectrique, elles se sont chargées électriquement, grâce à certains de leurs groupes latéraux, ce qui a conduit à leur dépliement, à l'exposition de leurs groupes thiols, et donc à leur coagulation. Pour les mêmes raisons, la recette 1.1.8 conduira à un résultat analogue, à la différence toutefois que la coquille n'aura pas été attaquée par la base et que, par conséquent, l'œuf n'aura pas gonflé. On obtient ici l'œuf de longévité, encore nommé œuf de cent ans, des populations asiatiques.

Passons maintenant à 1.1.9 : il s'agit de prendre un œuf entier, dans sa coquille, et à le chauffer. Je ne reviendrai pas sur ce sujet, puisqu'il a été évoqué en février 2008 [1]. Au code 1.1.9 correspond l'œuf dur, mais aussi les œufs cuits à différentes températures inférieures à 100 °C.

Passons à la colonne 1.2. Cette fois le code désignait la coquille. Qu'en faire ? Pas grand-chose *a priori*... Quoiqu'il ne soit pas inintéressant de considérer que la coquille est constituée de carbonate de calcium et de molécules organiques. La dissolution du carbonate par l'acide conduit à la récupération d'ions calcium en solution. Pour ceux d'entre nous qui auraient peur des « produits chimiques » en cuisine, voici donc des ions calcium « naturels » (jusqu'où ne faut-il pas aller pour rassurer le public craintif ?), que nous pourrions utiliser pour affermir des confitures (voir l'article consacré à ces dernières [2]). Les protéines ? Les autres molécules organiques enchâssées dans la coquille ? Et pourquoi ne ferions-nous pas comme pour les carapaces de crevettes, composées également d'une partie minérale, de protéines et de chitine ? Quand on chauffe fortement les carapaces, elles brunissent, en raison de la pyrolyse de ces molécules organiques ; puis quand on chauffe ces carapaces brunies avec de l'eau, on extrait les produits de la pyrolyse et on obtient... une bisque ! Pourquoi ne pas faire de même avec la coquille de l'œuf ?

Avec le jaune et le blanc non mélangés, mais sortis de la coquille, plusieurs possibilités se présentent. Le code 1.3.9 est connu : il s'agit de l'œuf sur le plat, ou de l'œuf cocotte, ou de l'œuf poché, mais on aura compris à la lecture du texte sur l'œuf dur parfait que, là encore, bien d'autres possibilités se présentent. Et puis, dans cette colonne, ne trouve-t-on pas aussi l'alcool, l'acide, la base, respectivement associés aux codes 1.3.6, 1.3.7, 1.3.8 ? Je vous laisse expérimenter. De même, je vous laisse explorer la colonne correspondant au code 1.4, qui correspond au mélange de jaune et blanc, comme pour la préparation des omelettes. Là encore, des possibilités, anciennes et nouvelles. Passons à la colonne 1.5, celle du jaune d'œuf. Le code 1.5.4 correspond évidemment à la mayonnaise. Le code 1.5.6 qui décrit l'ajout d'éthanol à un jaune d'œuf produit un résultat intéressant, nouveau, auquel il fallait donc donner un nom : j'ai choisi thenard, de Louis Jacques Thenard (1777-1857). Puis pour la colonne 1.6, celle du blanc seul, il y a encore de nombreuses possibilités.



Par exemple, pour 1.6.2, on obtient le blanc en neige. Mais pour ce simple blanc en neige, il y a beaucoup de variations, de possibilités d'innovation. Ne pourrions-nous nommer blanc en neige une seule bulle entourée d'une mince pellicule liquide ? Quel serait le volume ? Je vous invite à faire le calcul, car il conduit au résultat amusant suivant : selon les hypothèses du calcul, la bulle aurait entre 3 et 300 mètres de rayon ! Avec le code 1.6.6, on récupère évidemment encore du thenard, mais cette fois-ci, du thenard de blanc.



Cristaux de vent.

## Plus complexe

Passons à la quatrième ligne du tableau que nous sommes en train de constituer, en remarquant que ce tableau n'a pas de raison de s'achever, qu'il est infini. Observons aussi qu'avec six produits, neuf transformations, la troisième ligne comptait 54 entrées, et que la quatrième ligne en compte environ 500 ! Cette fois, bien que toutes les possibilités soient décrites, nous n'aurons plus la place, ici en tout cas, d'explorer systématiquement. Nous devons nous rabattre sur quelques exemples.

Par exemple, cette quatrième ligne contient le code 1.4.3.9, qui correspond à un mets que j'ai nommé lavoisier (faut-il vraiment présenter l'homme ?) puisqu'il s'agit de « royale de l'extrême ». Une royale classique, en cuisine, c'est du blanc et du jaune battus, éventuellement avec un peu de liquide, puis chauffés. La question était de savoir quelle quantité maximale de liquide on pourrait ajouter à un œuf de telle sorte qu'il prenne encore en une masse homogène, lors du chauffage. Le calcul, corroboré par l'expérience, a montré qu'un œuf entier coagule facilement un demi-litre de liquide ; on obtient donc une royale, mais une royale qui n'est pas traditionnelle, un lavoisier...

1.6.3.2 ? On lit dans le code qu'il s'agit de prendre un blanc d'œuf, d'ajouter un liquide et de fouetter. Cette fois, sans modifier la taille des bulles de gaz, on obtient un volume considérable de blanc en neige, qui n'est finalement limité que par la quantité de protéines présentes. Évidemment, cette mousse tient mal, car la viscosité de la phase aqueuse est réduite (on se souvient que la tenue d'une mousse liquide dépend à la fois de la viscosité de la phase liquide, qui doit drainer aussi lentement que possible, et de la taille des bulles, de petites bulles étant associées à de fortes tensions superficielles, qui retiennent donc le liquide entre les bulles) [3]. Il vaut donc mieux alterner le battage, puis l'ajout d'une petite quantité de liquide, le battage, une petite quantité de liquide, et ainsi de suite. Le volume maximal que nous ayons obtenu ainsi est de 27 litres, à Montréal : nous nous sommes arrêtés à ce stade parce que nous avons utilisé un fouet manuel et que nous étions fatigués. Le goût ? Celui du liquide qui aura été utilisé. Par exemple, si le liquide est du jus d'orange, on obtient une mousse d'orange ; si le liquide est du thé, on obtient une mousse de thé... Tous ces produits ont été nommés des chaptals, de Jean-Antoine Chaptal (1756-1832).

1.6.4.9 : cette fois, on prend un blanc d'œuf, on ajoute de l'huile, puis un solide. Une façon de s'y prendre consiste à fouetter de l'huile dans un blanc d'œuf, ce qui produit une émulsion, puis à chauffer cette dernière, par exemple au four à micro-ondes, jusqu'à coagulation des protéines. Le résultat est une sorte de gâteau plein d'huile que j'ai

nommée un gibbs, de l'Américain Josiah-Willard Gibbs (1839-1903). En réalité, nous obtenons un système qui est une émulsion piégée dans un gel, ce que, avec le formalisme CDS/NPOS décrit dans un numéro précédent [4], nous pouvons noter (O/W)/S. Au fait, cela n'a pas été dit, mais (évidemment) les noms des chimistes honorés par l'attribution de leur nom à un mets nouveau a évidemment une raison. Lavoisier : un des derniers savants de la royauté française, d'où le nom. Baumé ? Gibbs ? Je vous laisse essayer de deviner.

Descendons encore d'une ligne. Avec le code 1.6.3.2.9, on obtient plusieurs résultats intéressants. Quand on fouette un blanc d'œuf en lui ajoutant un liquide, on obtient, comme on l'a vu précédemment, une grande quantité de mousse, éventuellement très légère. Signalons d'ailleurs que si l'on ajoutait du sucre (un solide), celui-ci viendrait se dissoudre dans le liquide, augmentant la viscosité de la phase liquide, et donc la tenue de la mousse... Si nous cuisons au four à micro-ondes le résultat obtenu (1.6.3.2), juste le temps de coaguler les protéines du blanc, nous obtenons un vauquelin, du nom de Nicolas Vauquelin (1763-1829). En revanche, si nous cuisons comme une meringue, nous obtenons une meringue extrêmement légère, pour laquelle je n'avais pas donné le nom de chimiste, hélas. J'avais nommé ce résultat un cristal de vent, parce que... il est vraiment ainsi. Essayez donc, par exemple, un cristal de vent au jus de citron (Photo).

Arrêtons-nous là : les pages de *L'Actualité Chimique* ne suffiraient pas à décrire l'infinitude du tableau que nous sommes en train de construire. Deux remarques seulement pour terminer. Tout d'abord, je dois signaler que tout ce qui précède ne relève pas de la gastronomie moléculaire, puisque celle-ci est science, et donc invention, non découverte ou innovation. D'autre part, alors que la rédaction de la revue se plaint régulièrement du nombre de références excessives que je donne pour les textes de cette rubrique, il y en a très peu cette fois-ci. C'est que la vraie référence que je vous propose est... l'expérience.

## Références

- [1] This H., L'œuf dur : un festin de réactions chimiques, *L'Act. Chim.*, **2008**, 316, p. 5.
- [2] This H., Histoire d'une pièce d'argent, *L'Act. Chim.*, **2008**, 315, p. 9.
- [3] De Gennes P.-G., Brochard-Wyart F., Quéré D., *Gouttes, bulles, perles et ondes*, Belin, **2005**.
- [4] This H., Descriptions formelles pour penser... et pour la formulation, *L'Act. Chim.*, **2008**, 322, p. 11.



### Hervé This

est physico-chimiste INRA\* et directeur scientifique de la Fondation « Science et culture alimentaire » de l'Académie des sciences.

\* Équipe de gastronomie moléculaire, UMR 214, INRA/Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech), 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris.

Courriel : herve.this@paris.inra.fr

www.inra.fr/la\_sciences\_et\_vous/apprendre\_experimenter/gastronomie\_moleculaire  
www.inra.fr/fondation\_sciences\_culture\_alimentaire

Photo : L. Monier

# De la farine de blé pour décolorer des effluents papetiers pollués

Grégorio Crini, Pierre-Marie Badot, Nadia Morin-Crini, Brigitte Jolibois, Emmanuel Comte, Bernard Fahys, Éric Gravier et Giangiacomo Torri

## Résumé

De nombreuses méthodes de traitement physique (membranes, adsorption sur des matériaux carbonés), physico-chimique (coagulation/floculation), chimique (oxydation) ou biologique (biodégradation) des eaux usées ont été reportées dans la littérature pour l'élimination de polluants issus des effluents de l'industrie des pâtes et papiers. Cependant, la plupart de ces méthodes ne sont pas utilisées à l'échelle industrielle par la filière papetière, pour des raisons économiques notamment. Il y a un besoin de développer de nouvelles méthodes de décontamination, à la fois efficaces et acceptables par la filière, notamment en raison d'une législation de plus en plus stricte. Aussi des études sont menées sur l'utilisation de farines de blé modifiées chimiquement comme matériaux adsorbants dans le traitement des eaux polluées. Ces matériaux à faible coût sont efficaces pour abattre la charge organique et présentent de fortes capacités d'adsorption vis-à-vis de molécules de colorants. Cet article présente la problématique industrielle et décrit le nouveau procédé et les résultats obtenus.

## Mots-clés

**Farine, adsorption, adsorbants, colorants, traitement des eaux usées.**

## Abstract

### Flour of corn for dye removal from pulp and paper effluents

Numerous wastewater treatment methods including physical (membranes, adsorption on carbons), physico-chemical (coagulation/flocculation), chemical (oxidation) and biological (biodegradation) have been reported in the literature for the removal of pollutants (in particular dyes) from the pulp and paper mill effluents. However, because of the high costs, many of these methods for treating dyes in wastewater have not been widely applied on a large scale in the paper industry. Thus, there is a need to develop new decontamination methods that are effective and acceptable in industrial use. A series of experiments is being conducted to evaluate the possibility of the use of chemically modified starch-enriched flour as adsorbents in wastewater treatment. These low-cost materials are effective and exhibit high adsorption capacities toward dye molecules. This article presents the industrial problematic and describes the new process used.

## Keywords

**Flour, adsorption, adsorbents, dyes, waste water treatment.**

Les problèmes liés aux pollutions chimique et biologique de l'eau sont devenus une préoccupation majeure pour l'ensemble de la population et une priorité pour les autorités publiques. De plus, les règlements en matière de rejet d'eaux industrielles usées (nature, normes...) sont sévères et obligent les industriels à traiter leurs effluents. Les nouvelles directives européennes sont de plus en plus draconiennes : on parle de rejet zéro d'ici 2020. De nombreuses filières industrielles (papetière, agroalimentaire, textile, traitement de surfaces...) sont grandes consommatrices d'eau. Or utiliser l'eau, c'est accepter de la polluer. Toute activité, qu'elle soit industrielle, agricole ou encore domestique, engendre des rejets polluants indésirables, plus ou moins toxiques. Prenons par exemple l'industrie du papier : de nombreux colorants synthétiques sont utilisés par cette filière. En l'état actuel des procédés de fabrication, certains types de colorants ne sont pas fixés intégralement sur le papier malgré l'emploi d'agents fixants. Il en résulte alors des eaux de rejet colorées qu'il est nécessaire de traiter, les problèmes de coloration ayant un impact psychologique important sur la population. En effet, un effluent coloré est perçu par l'opinion publique comme pollué et dangereux, alors que cette couleur n'est généralement pas toxique. Ces problèmes de coloration font débat [1-2] et peuvent donner

lieu à des plaintes d'associations de protection de la nature. La réutilisation des eaux usées traitées est également un autre aspect qui commence à être de plus en plus pris en compte par les industriels dans le cadre du développement durable (protection de l'environnement), de gestion améliorée de l'eau (économiser l'eau et la recycler) et des problèmes sur les risques sanitaires (problèmes de santé). Ainsi pour le monde industriel, en particulier pour la filière papetière, le traitement des effluents est devenu une priorité.

## Le problème de la décoloration des eaux de la filière papetière

Aujourd'hui encore, l'industrie du papier est considérée comme l'une des deux filières les plus polluantes avec le secteur agroalimentaire. Des efforts considérables en matière d'amélioration des procédés industriels ont été réalisés depuis vingt ans par la filière, mais la charge organique et la coloration des effluents papetiers demeurent une source de préoccupations. On entend souvent dire que cette industrie détruit nos forêts, et qu'elle pollue aussi notre atmosphère et nos cours d'eau. En fait, l'image de l'industrie papetière est aux antipodes de la réalité ; cette idée reçue est due à une méconnaissance de ce secteur industriel, secteur très bien



Figure 1 - Eaux usées issues de la fabrication de papier avant traitement.

représenté en Franche-Comté. En effet, les acteurs de cette filière se sont engagés dans la voie du développement durable et ont le souci d'améliorer les procédés de fabrication et d'innover pour relever les défis sociétaux, économiques, technologiques et environnementaux de façon intégrée.

Chaque étape de fabrication dans une usine de pâtes et papiers est responsable de la génération d'une partie de la pollution totale que l'on retrouve dans l'effluent final. En général, les deux principaux problèmes auxquels sont confrontés les industriels sont ceux de la charge organique et de la coloration des effluents issus de la production. En effet, ce sont les eaux de fabrication qui posent problème car ces rejets sont complexes et fortement chargés. De plus, les flux sont des mélanges hétérogènes non seulement en quantité mais également en qualité (figure 1). Ils contiennent des polluants de nature variable selon leur origine [3-5]. Le tableau I présente les différents types de polluants et les problèmes engendrés. D'une part, les effluents papetiers sont chargés de matières en suspension (MES) et de matières organiques (colloïdales et/ou dissoutes), caractérisées par des paramètres tels que la DCO (demande chimique en oxygène), la DBO (demande biochimique d'oxygène) et la turbidité. D'autre part, ils sont colorés : les rejets sont caractérisés par la présence de micropolluants organiques (dont les colorants) qui sont persistants et non biodégradables.

### Les procédés de décontamination des eaux polluées

Lorsqu'une eau est polluée et qu'une action de dépollution s'avère nécessaire, il s'agit de choisir la filière

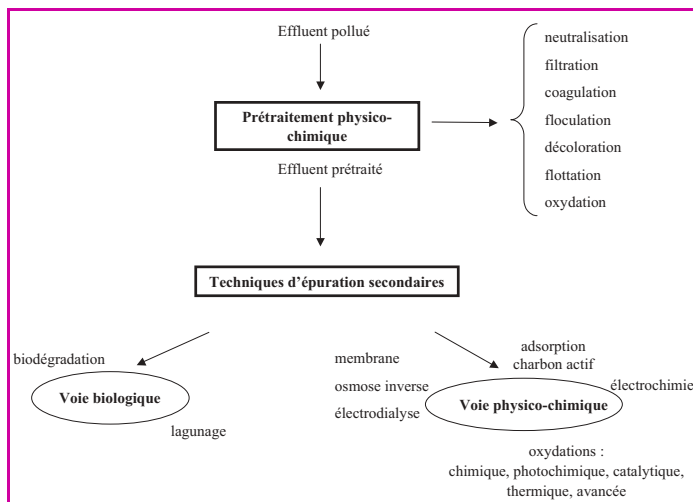


Figure 2 - Schéma général du traitement des eaux industrielles polluées.

d'épuration la plus adaptée pour atteindre les objectifs de décontamination. Un schéma général du traitement des eaux industrielles est proposé dans la figure 2. Il se décompose en deux grandes étapes : la première est le prétraitement physico-chimique qui permet d'éliminer la pollution particulaire (surtout) et/ou dissoute (afin d'abattre le maximum de pollution), et la seconde, l'épuration qui va assurer (et terminer) la dépollution chimique. Il existe dans la littérature une multitude de procédés de traitement et de dépollution des eaux contaminées [6-10], chacun ayant des avantages et des inconvénients (voir annexe I\*). En théorie, toutes ces méthodes de décontamination peuvent être envisagées pour épurer et décolorer un effluent. Il est évident qu'un traitement classique et complet s'effectuera en plusieurs étapes. Il est souvent judicieux d'associer plusieurs méthodes d'épuration afin d'obtenir une efficacité maximale. Une chaîne de traitements d'effluents industriels doit se construire en fonction des objectifs de qualité recherchés, en tenant compte de plusieurs problèmes comme le type d'effluent, la nature et la concentration du polluant, et le volume d'eau à traiter. Bien évidemment, les problèmes technologiques (taille des infrastructures...) et surtout économiques (coût de la méthode, entretien...) sont des facteurs importants dans le choix du procédé à mettre en œuvre. Cependant, beaucoup des procédés décrits dans l'annexe I\* ne sont pas exploitables à l'échelle industrielle (notamment par la filière papetière) pour des raisons technologiques, mais surtout économiques. La mise au point de méthodes à la fois économiques et efficaces fait encore l'objet d'une recherche considérable, comme le montrent les nombreuses publications qui paraissent chaque année.

Tableau I - Principaux types de polluants provenant de la filière papetière.

Type de polluant	Origine	Principaux problèmes
Gaz	dérivés soufrés (H <sub>2</sub> S, mercaptan...)	odeurs
Eaux usées	matières en suspension (fibres, charges) matière organique dissoute (colorants) dérivés chlorés	effluents colorés pollution organique importante pH
Déchets solides	composés inorganiques dissous (NaOH, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) particules solides diverses mélanges liquide/solide complexes	température gestion de boues

## Les méthodes de décoloration des eaux usées utilisées par la filière papetière

Dans l'arsenal des méthodes envisageables par la filière papetière pour traiter ses eaux usées, une combinaison de plusieurs procédés (mécaniques, physiques, chimiques et biologiques) est souvent indispensable pour des raisons liées à la nature différente des polluants et à des besoins spécifiques (rejet, réutilisation ou valorisation de l'effluent). En général, la méthode choisie par la filière consiste en une étape de traitement primaire par coagulation/décoloration/floculation/séparation qui consiste à éliminer toutes les MES surnageantes (taille > 2 µm), les substances colloïdales (taille 0,1-2 µm) présentes dans l'effluent et la couleur, suivie par un traitement secondaire par voie biologique qui assure la dépollution chimique des matières dissoutes (taille < 0,1 µm) (figure 3). Les principaux inconvénients du procédé sont l'utilisation de produits chimiques dont des sels métalliques (toxiques ?) et surtout une production importante de boues (chimiques et biologiques) qu'il faut éliminer.

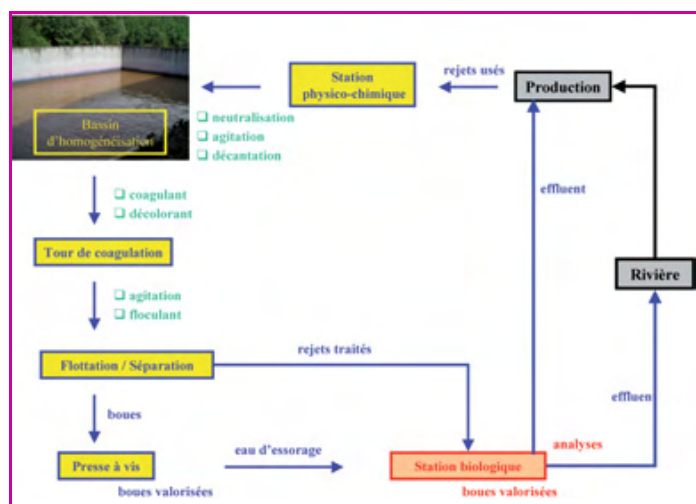


Figure 3 - Exemple de traitement d'épuration d'eaux usées issues de la fabrication de papier.

## La technique de l'adsorption sur charbon actif

Une autre méthode de traitement efficace des eaux colorées est l'adsorption sur charbon actif, peu utilisée par la filière papetière en raison de problèmes techniques mais surtout économiques. En effet, même si le fort pouvoir adsorbant des charbons actifs n'est plus à démontrer, ces derniers ont un coût relativement important. De plus, ils posent non seulement des problèmes d'élimination après usage, mais aussi et surtout, de saturation rapide, car l'efficacité des filtres diminue avec le temps. Il faut alors les changer ou les régénérer. Ces étapes de régénération effectuées par voie thermique, chimique, ou encore par régénération à la vapeur sont très coûteuses en énergie, induisant de réels problèmes économiques, et ne répondent pas aux exigences de développement durable. Ainsi ces dernières années, de nombreuses études ont été menées afin de remplacer les charbons actifs par d'autres matériaux adsorbants [6]. La mise au point de nouveaux adsorbants efficaces, en particulier à partir de ressources naturelles, est devenue un sujet d'actualité, faisant l'objet d'une recherche considérable. Il existe une grande variété de matériaux pouvant être utilisés comme systèmes adsorbants (ou

bioadsorbants). Il est bien connu que certains matériaux comme les zéolites, les argiles, les biomasses, les biopolymères (polysaccharides), les déchets forestiers (sciures) ou encore la tourbe possèdent d'excellentes capacités d'adsorption. Cependant, ils doivent encore faire leurs preuves à l'échelle industrielle. De plus, la question du devenir de l'adsorbant se pose : régénération, incinération ?

## Des farines de blé pour décolorer et dépolluer des eaux usées

Parmi les nouveaux bioadsorbants proposés, les polymères naturels comme la chitine et le chitosane (provenant de la carapace de crevettes, de crabes ou de divers mollusques), ou encore l'amidon (blé, maïs, pomme de terre), sont de plus en plus utilisés dans les domaines de la complexation et de la fixation de molécules polluantes (métaux lourds, colorants, dérivés aromatiques et phénoliques...) [11-13]. Dans notre équipe, des recherches sont menées depuis plusieurs années sur l'utilisation de farines de blé comme ressources de base pour la synthèse de nouveaux bioadsorbants pour le traitement des eaux contaminées [11, 14-15]. Pourquoi ces farines ?

## Participer au développement des matériaux de demain

La majorité des floculants, coagulants, décolorants et adsorbants (résines organiques) utilisés dans le domaine de la dépollution sont obtenus à partir de ressources pétrolières. Depuis plusieurs années, il règne un intérêt croissant pour utiliser des ressources renouvelables et non synthétiques, ayant peu ou pas d'impact sur notre environnement. Les biopolymères végétaux sont vraisemblablement l'un des matériaux de demain par excellence quand les ressources en pétrole commenceront à se tarir. Les farines que nous modifions sont des polysaccharides abondants et bon marché, issus de matières premières agricoles renouvelables, non toxiques (biocompatibles) et biodégradables. Il faut également ajouter que les amidons sont très utilisés par la filière papetière.

## Valoriser un coproduit industriel et répondre à des problématiques industrielles

Dans un contexte économique difficile, caractérisé par une concurrence accrue sur le marché des polysaccharides, les producteurs de céréales s'interrogent également, sur les possibilités de nouveaux débouchés pour les produits et sous-produits de ce secteur d'activité. La plupart des réponses qui leur sont faites évoquent des perspectives de développement dans les domaines de l'agroalimentaire et surtout des biotechnologies. Les produits à base d'amidon trouvent des applications dans de nombreux domaines industriels : secteurs alimentaire, pharmaceutique, colles ou bioplastiques. Cependant, l'amidon est peu utilisé dans le secteur de la dépollution en tant que système adsorbant. C'est ce dernier aspect qui motive le plus notre démarche.

## Participer au développement de la « chimie durable »

Les farines de blé que nous utilisons sont des fractions déprotéinées enrichies en amidon. Ces amidons présentent également une chimie de modification très intéressante.

D'un point de vue chimique, ce sont des polymères hydrophiles, possédant une structure particulière et des groupements réactifs qui permettent de les modifier en fonction des applications désirées. Cependant, l'amidon ne possède pas naturellement de bonnes capacités d'adsorption. Comme pour les charbons, il faut donc les transformer chimiquement pour leur conférer des propriétés de complexation ou de chélation.

## Une recherche originale : concilier valorisation et dépollution

Notre objectif est de mettre au point de nouveaux matériaux de types hydrogels amphotères (voir l'encadré) qui concurrencent les systèmes commerciaux existants. En particulier, notre thématique de recherche consiste à valoriser des farines d'amidon de blé déprotéinées, par transformation chimique, dans des conditions expérimentales douces, en matériaux adsorbants pour capter, piéger et transporter des molécules polluantes présentes dans des phases aqueuses. L'intérêt réside dans la possibilité de concilier valorisation et dépollution en associant recherche universitaire fondamentale et recherche industrielle appliquée. Ces activités de recherche font appel à différents domaines disciplinaires, à savoir la science des matériaux (transformation chimique de polymères), la chimie organique de synthèse (aménagements fonctionnels de sites actifs), la chimie analytique (complexation et dosage de polluants), le génie chimique (conception de technologie propre), le traitement des eaux usées (dépollution) et la biologie environnementale (problème de biodé-

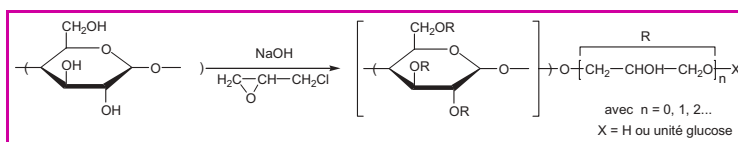


Figure 4 - Exemple d'une étape de réticulation de la farine par de l'épichlorhydrine.

gradabilité, gestion des boues, écotoxicité). Cette recherche, innovante et pluridisciplinaire a fait l'objet d'un dépôt de brevet effectué au nom de l'Université de Franche-Comté [16].

## Bioadsorbants macromoléculaires

Les bioadsorbants sont obtenus à partir de la farine brute en trois grandes étapes successives : une étape de réticulation en présence de réactifs de type époxy (1,4-butane-diol diglycidyl-éther, épichlorhydrine) (figure 4), suivie d'une double fonctionnalisation chimique par des ligands ioniques (acide chloroacétique, 2-chloro-éthylamine, 3-chloro-propylamine, chlorure de glycidyletriméthylamine), dans des conditions expérimentales douces (chimie dans l'eau à pH basique, basse température, pression atmosphérique, réactifs bon marché). L'étape de réticulation consiste à créer une structure réticulée à l'aide d'agents de pontage qui permettent de relier les chaînes d'amidon entre elles et de créer ainsi un réseau macromoléculaire tridimensionnel. Le cœur du matériau, constitué d'unités glucoses réticulées, est rigide et hydrophobe, alors qu'à la surface des polymères, des longues chaînes hydroxyalkyles mobiles confèrent au matériau des propriétés hydrophiles et des propriétés de gonflement. La fonctionnalisation permet d'introduire des ligands ioniques (cationiques et/ou anioniques), qui vont jouer le rôle de sites actifs en participant au mécanisme de piégeage. Les réseaux obtenus se présentent sous la forme de poudres ou de gels amphiphiles (fonction de la réticulation). La maîtrise des conditions opératoires permet d'obtenir différents polymères amphotères ayant à la fois d'important taux en ligands ioniques (fonction du greffage chimique) et de grandes surfaces spécifiques [17].

Ces matériaux sont alors utilisés soit comme systèmes adsorbants de polluants venant concurrencer les charbons actifs commerciaux, soit comme agents complexants naturels bon marché dans des procédés de traitement d'eaux usées pour remplacer les décolorants chimiques, ou encore comme agent fixant de colorants dans les pâtes à papier pour remplacer les amidons cationiques commerciaux et/ou les fixateurs chimiques.

Les polymères ont été testés et validés en laboratoire comme adsorbants et utilisés pour la décoloration de solutions aqueuses polluées (figure 5). Pour ce faire, la solution à décolorer, de concentration connue, est mise directement en

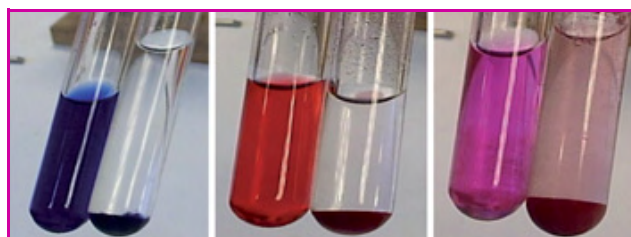


Figure 5 - Solutions préparées en laboratoire avant (solutions colorées en bleu, rouge et rose) et après traitement par le polymère.

### Qu'est-ce qu'un hydrogel ?

Un matériau de type hydrogel est un réseau tridimensionnel de macromolécules hydrophiles. Les hydrogels présentent à la fois les propriétés caractéristiques des liquides et des solides, propriétés intimement liées à leur structure moléculaire et aux concepts de connectivité et de réseau. La principale caractéristique d'un hydrogel est sa capacité à gonfler en présence d'eau. Il présente ainsi les propriétés cohésives d'un solide et les caractéristiques diffusionnelles d'un liquide. Cette propriété de gonflement est conditionnée par la nature chimique des chaînes du polymère et par leur densité d'enchevêtrement. Les structures peuvent être obtenues sous deux formes suivant un mécanisme chimique ou physique. La formation d'un réseau par établissement de liaisons covalentes (mécanisme chimique) conduit à la formation de gels irréversibles aux points de réticulation bien définis. Ces points de réticulation sont très stables lors de l'application de sollicitations ou de stimuli extérieures (application d'une contrainte, variation du pH ou de la température). Il est également possible de former des réseaux par des mécanismes physiques d'énergies de liaisons plus faibles (liaisons ioniques, interactions électrostatiques, force de van der Waals, liaisons hydrogène ou hydrophobes). La différence entre les deux matériaux réside donc dans la nature des liaisons constituant les nœuds du réseau. La classification des gels polymères est souvent effectuée selon la nature des nœuds de réticulation établis entre les différentes chaînes de polymères. C'est la stabilité et la nature de ces nœuds qui permettent en grande partie d'expliquer la cohésion des propriétés mécaniques du matériau. Les gels physiques sont caractérisés par la réversibilité des nœuds de réticulation qui s'établissent grâce à des interactions cohésives de type non covalentes. Ils ont des propriétés mécaniques plus faibles que les gels chimiques qui sont formés sur la base des nœuds de réticulation covalents. Les hydrogels trouvent de nombreuses applications industrielles.

Tableau II - Optimisation des paramètres expérimentaux pour obtenir un rendement de 100 % (AG 25 colorant vert, AB 25 colorant bleu).

Colorant	Polymère		Charbon actif	
	AB 25	AG 25	AB 25	AG 25
Concentration Colorant	$5 \cdot 10^{-4}$ mole/L	$10^{-5}$ mole/L	$5 \cdot 10^{-4}$ mole/L	$10^{-5}$ mole/L
Masse d'adsorbant	25 mg	25 mg	25 mg	50 mg
Volume de solution	100 mL	100 ml	100 ml	100 m/
pH	6,2	6,2	5	5
Température	ambiante	ambiante	ambiante	30 °C
Temps de contact	5 min	5 min	15 min	20 min
Adsorbant saturé	non	non	oui	oui

contact avec le polymère pendant un certain temps (dit temps de contact). Un dosage spectrophotométrique permet alors de déterminer l'efficacité du matériau après sédimentation. Tout le colorant est adsorbé en quelques minutes, voire quelques secondes dans certains cas. Le mécanisme d'adsorption est dû à la fois à des processus de physisorption (adsorption physique de surface) *via* la structure du polymère, de chimisorption (complexation, échange d'ions) à cause des sites actifs chargés et de diffusion dans le réseau de polymère. Les résultats ont été comparés avec ceux obtenus sur du charbon actif commercial (CAC) et sont comparables en terme de capacité d'adsorption, mais plus intéressants en termes de cinétique, de sélectivité et de saturation (*tableau II*). La structure réticulée particulière du matériau, sous forme de réseau à la fois hydrophile en surface et hydrophobe dans le cœur, favorise la diffusion du polluant vers l'intérieur du polymère et entraîne une adsorption et une fixation plus rapides que celles obtenues par des systèmes commerciaux. Les matériaux ont également une sélectivité que n'ont pas les systèmes CAC à faible concentration. À noter également, le fait que les résultats sont pratiquement indépendants du pH de la solution, comme dans le cas des CAC. Dans les études laboratoires, une fois saturé, le matériau (polymère + colorant) peut être récupéré (ainsi que le colorant) par simple régénération pour être réutilisé avec la même efficacité. Dans le cas des essais sur des solutions réelles prélevées sur site, le matériau obtenu après utilisation (polymère + colorant + charges = « boues ») pourrait également être utilisé comme charges dans les cartonneries qui recyclent les vieux papiers (essais en cours).

Les polymères peuvent également être utilisés comme systèmes décolorants en utilisant le pilote décrit dans la *figure 6*, qui permet de simuler le procédé physico-chimique dans des conditions réelles. Pour ce faire, la farine de blé modifiée est mise directement dans un réacteur de décoloration (c'est une tour classique de coagulation/floculation) contenant la solution à décolorer, puis le réacteur est agité quelques minutes. Une étape de flottation permet alors de récupérer le polymère et l'effluent propre. Des

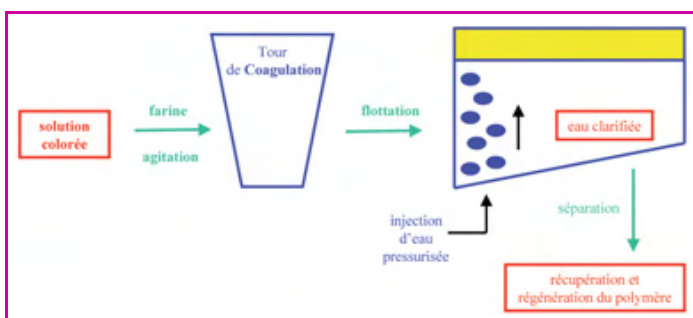


Figure 6 - Pilote permettant de simuler un procédé physico-chimique en laboratoire.



Figure 7 - Essai sur un effluent industriel avant (à droite) et après (à gauche) traitement par le polymère (juste avant l'étape de flottation).

prélèvements sont effectués (*figure 7*) et dosés (notamment par colorimétrie), afin de déterminer l'efficacité du procédé en fonction du temps de contact. La *figure 8* illustre les différentes étapes du procédé. Les solutions initiales turbides et colorées sont clarifiées en quelques minutes (*tableau III*). Les teneurs en DCO sont largement inférieures à la norme de rejet autorisée (135 mg/L). Le procédé est plus efficace que le traitement primaire par coagulation/floculation utilisé par la filière pour abattre la DCO et la couleur (voir *annexe II\**). Les résultats du *tableau III* montrent que le procédé permet également de diminuer la matière organique (AOX...) présente dans les effluents.

Les avantages du procédé sont :

- des rendements de décoloration de 100 % pour plusieurs types de colorant (acide, réactif, cationique, non-ionique...) dans une gamme étendue de pH et de concentration, sans adjonction de produits chimiques ;
- des résultats comparables, voire plus intéressants que dans le cas des charbons actifs et des décolorants utilisés par la filière papetière ;

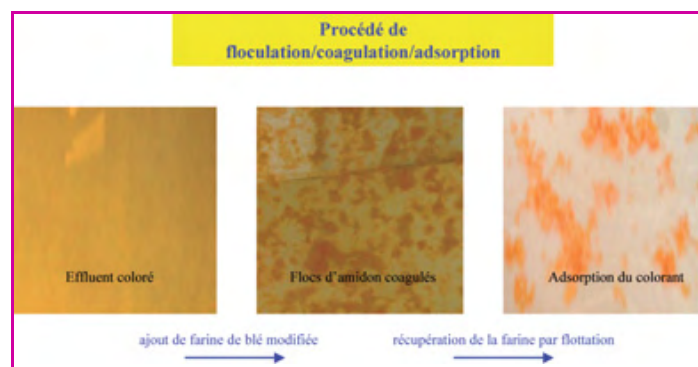


Figure 8 - Décoloration d'effluent industriel par bioadsorption.

Tableau III - Caractérisation de deux effluents papetiers avant et après bioadsorption sur de la farine de blé modifiée.

	Effluent 1		Effluent 2	
	Valeurs initiales	Valeurs finales	Valeurs initiales	Valeurs finales
<b>Échantillon</b>				
pH	6,8	7	7,1	7,2
température	32 °C	25 °C	28 °C	25 °C
MES	oui	non	oui	non
coloré	oui	non	oui	non
turbide	oui	non	oui	non
<b>Paramètre</b>				
COT (mg/L)	179	12	49	9
DCO (mg/L)	887	59	170	15
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	2,9	0	315	21
Ca <sup>+2</sup> (mg/L)			84	0
Mg <sup>+2</sup> (mg/L)			8	0
AOX (mg/L)	138	1,4	1,99	0
phénols (mg/L)	43	0,8	3,2	0

- des cinétiques rapides à la fois aux faibles et aux fortes concentrations ;
- une grande efficacité pour abattre la charge organique ;
- aucun apport de DCO ;
- une facile régénération du matériau saturé (sans apport d'énergie) et une réversibilité autorisant une réutilisation du polymère avec la même efficacité (études en laboratoire) ;
- et enfin, une récupération possible des colorants dans les solutions des tests effectués en laboratoire.

## Conclusion

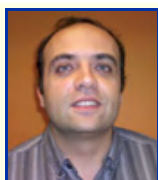
L'objectif principal de cette recherche est de valoriser des coproduits agricoles tels que les farines d'amidon de blé déprotéinées en matériaux ayant peu ou pas d'impact sur notre environnement, pour piéger et transporter des molécules polluantes. Ce projet répond à des besoins de l'industrie agroalimentaire en valorisant des produits d'origine végétale, tout en s'inscrivant dans une préoccupation environnementale durable comme la dépollution de l'eau. Les résultats décrits ici montrent que la transformation chimique de farines de blé conduit à des biomatériaux adsorbants capables de dépolluer des eaux usées. Les résultats obtenus en laboratoire sont encourageants : la farine de blé, une fois modifiée chimiquement, permet à la fois d'abattre la charge organique et de décolorer efficacement des effluents issus de la filière papetière. Le procédé est actuellement étudié à l'échelle industrielle et des autres essais sont en cours sur des effluents provenant d'autres filières industrielles (textile, imprimeries et encres...) avec des résultats également intéressants.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) pour l'aide qui a permis de démarrer l'étude il y a quelques années, l'Agence Nationale de Valorisation de la Recherche (OSEO/ANVAR de Franche-Comté), l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), la Minoterie Sauvin (Patornay, Jura), les papeteries de Mandeuire et de Novillars (Doubs) pour leur soutien financier, et l'Agence Régionale d'Information Stratégique et Technologique (ARIST de Franche-Comté) pour leurs nombreux conseils, ainsi que les thésards et stagiaires (Capucine Robert, Franck Delval, François Renault, Frédéric Gimbert, Harmel Peindy, Maud Bitchené, Olivier Adam, Pierre Emo, Sabrina Bertini, Vanessa Rot) qui ont travaillé et travaillent encore au développement de ce projet. Cette recherche a été réalisée grâce au soutien technique (mise à disposition de pilotes) de l'Institut de Chimie G. Ronzoni de Milan.

## Notes et références

- \* **Annexes** : les compléments à cet article sont téléchargeables librement (format pdf) sur le site [www.lactualitechimique.org](http://www.lactualitechimique.org), page liée à l'article.
- [1] Rana T., Gupta S., Kumar D., Rana M., Rathore V.S., Pereira B.M.J., Toxic effects of pulp and paper-mill effluents on male reproductive organs and some systemic parameters in rats, *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, **2004**, *18*, p. 1.
  - [2] Ali M., Sreekrishnan T.R., Aquatic toxicity from pulp and paper mill effluents: a review, *Adv. Environ. Res.*, **2001**, *5*, p. 175.
  - [3] Lacorte S., Latorre A., Barcelo D., Rigol A., Malmqvist A., Welander T., Organic compounds in paper-mill process waters and effluents, *Trends Anal. Chem.*, **2003**, *22*, p. 725.
  - [4] Savant D.V., Abdul-Rahman R., Ranade D.R., Anaerobic degradation of adsorbable organic halides (AOX) from pulp and paper industry wastewater, *Bioresour. Technol.*, **2006**, *97*, p. 1092.
  - [5] Pokhrel D., Viraraghavan T., Treatment of pulp and paper mill wastewater - a review, *Science of The Total Environment*, **2004**, *333*, p. 37.
  - [6] Crini G., Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review, *Bioresour. Technol.*, **2006**, *97*, p. 1061.
  - [7] Aksu Z., Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review, *Process Biochem.*, **2005**, *40*, p. 997.
  - [8] Chen G., Electrochemical technologies in wastewater treatment, *Sep. Purif. Technol.*, **2004**, *38*, p. 11.
  - [9] Thompson G., Swain J., Kay M., Forster C.F., The treatment of pulp and paper mill effluent: a review, *Bioresour. Technol.*, **2001**, *77*, p. 275.
  - [10] Fu Y., Viraraghavan T., Fungal decolorization of dye wastewaters: a review, *Bioresour. Technol.*, **2001**, *79*, p. 251.
  - [11] Crini G., Recent developments in polysaccharide-based materials used as adsorbents in wastewater treatment, *Progr. Polym. Sci.*, **2005**, *30*, p. 38.
  - [12] Guibal E., Interactions of metals with chitosan-based sorbents: a review, *Sep. Purif. Technol.*, **2004**, *38*, p. 43.
  - [13] Ravi Kumar M.N.V., A review of chitin and chitosan applications, *React. Funct. Polym.*, **2000**, *46*, p. 1.
  - [14] Crini G., Bertini S., Torri G., Naggi A.M., Sforzini D., Vecchi C., Janus L., Lekchiri Y., Morcellet M., Sorption of aromatic compounds in water using insoluble cyclodextrin polymers, *J. Appl. Polym. Sci.*, **1998**, *68*, p. 1973.
  - [15] Delval F., Crini G., Morin N., Vebrel J., Bertini S., Torri G., The sorption of textile dyes on crosslinked polysaccharides derivatives, *Dyes and Pigments*, **2002**, *53*, p. 79.
  - [16] Crini G., Brevet français n° 05051597, **2005**, PCT/FR2006/050549, WO 2006/134299.
  - [17] Des informations complémentaires peuvent être obtenues en contactant l'auteur correspondant.



G. Crini



P.-M. Badot



N. Morin-Crini



B. Jolibois



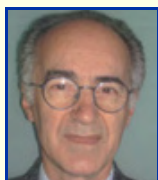
E. Comte



B. Fahys



E. Gravier



G. Torri

### Grégorio Crini (auteur correspondant)

est ingénieur d'études, habilité à diriger des recherches à l'Université de Franche-Comté et membre du Laboratoire de Chrono-Environnement<sup>1</sup>.

### Pierre-Marie Badot

est professeur à l'Université de Franche-Comté et directeur-adjoint du Laboratoire de Chrono-Environnement<sup>1</sup>.

### Nadia Morin-Crini et Brigitte Jolibois

sont techniciennes au Laboratoire de Chrono-Environnement<sup>1</sup>.

### Emmanuel Comte

est responsable Environnement à la papeterie de Mandeuire<sup>2</sup>.

### Bernard Fahys

est professeur à l'Université de Franche-Comté et directeur du LCMI<sup>3</sup>.

### Eric Gravier

est responsable Technique & Environnement à la papeterie de Novillars<sup>4</sup>.

### Giangiacomo Torri

est directeur de recherche et dirige l'Institut de Chimie G. Ronzoni de Milan<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> Université de Franche-Comté, Laboratoire de Chrono-Environnement, UMR 6249 UFC/CNRS USC INRA, Place Leclerc, 25030 Besançon Cedex.  
Courriel : [gregorio.crimi@univ-fcomte.fr](mailto:gregorio.crimi@univ-fcomte.fr)

<sup>2</sup> Papeterie de Mandeuire SA, 14 rue de la Papeterie, 25350 Mandeuire.

<sup>3</sup> Université de Franche-Comté, Laboratoire de Chimie des Matériaux et Interfaces, 16 route de Gray, 25000 Besançon.

<sup>4</sup> Papeterie du Doubs, BP 29, 25220 Novillars.

<sup>5</sup> Institut de Chimie G. Ronzoni, 81 via Giuseppe Colombo, 20133 Milan (Italie).

# Chimie et développement durable

## Retour sur les MIEC-JIREC 2007

Les MIEC-JIREC\* 2007 ont été organisées du 23 au 25 mai par l'Université de La Rochelle en partenariat avec la Société Française de Chimie, sous la responsabilité de Christian Eskenazi, autour du thème « Chimie et développement durable ».

Ces journées ont reçu le soutien de la région Poitou-Charentes, du ministère de la Recherche, du CNRS (Département de Chimie et Département du Développement durable), de la Communauté d'agglomération et de la ville de La Rochelle, du Conseil général de Charente-Maritime et de l'Université de La Rochelle.

Ce colloque a permis à environ 150 enseignants, enseignants-chercheurs et chercheurs des universités, grandes écoles, lycées, organismes de recherche et

représentants des entreprises, en France et dans les pays de langue francophone, de se rencontrer afin de partager leurs expériences pédagogiques et professionnelles pour présenter les avancées de la recherche et accompagner l'innovation dans l'enseignement de la chimie.

Les journées se sont déroulées sous forme de conférences d'actualité, suivies par des tables rondes permettant la confrontation des réalités professionnelles au niveau de l'industrie et de la recherche et des enjeux pédagogiques (voir encadré). Pour la partie JIREC, les thèmes développés ont été regroupés en trois domaines :

- l'image de la chimie dans la société et son rôle dans le développement durable (exemples choisis autour de la

### Compte-rendu des tables rondes

#### **Mercredi 23 avril : « Les nouvelles orientations de la chimie pour le développement durable en France et à l'étranger au niveau de la recherche et de l'enseignement »**

Les intervenants de ce débat ont oscillé entre la fierté d'appartenir à une discipline scientifique devenue incontournable et la mauvaise conscience d'être assimilés à un secteur qui porte en lui toutes les pollutions (ou presque). Cependant, ce problème de l'image négative de la chimie, ce sentiment d'être mal aimé, n'est pas partagé par les étudiants qui affichent un véritable enthousiasme pour leur matière. Ainsi dans les choix que présentent les élèves de prépas, les « âmes de chimistes » choisissent en priorité les grandes écoles de chimie.

Des différentes interventions venues de la salle, il ressort que cette image négative naît plus des usages que de la discipline elle-même.

Les concepts de chimie et de développement durable ne sont pas antithétiques. Mais le couple ne peut fonctionner que si le développement durable s'inscrit dans une vision globale, dans un projet de société. Dans ce cadre, la chimie ne peut se satisfaire de ses seules certitudes ; elle doit travailler en synergie avec d'autres disciplines, et pas seulement scientifiques *stricto sensu*.

#### **Judi 24 avril : « Pas de développement durable sans la chimie à l'interface des disciplines »**

Le développement durable ne se réduit pas à l'environnement. Cette simple affirmation implique que la chimie comme les autres disciplines concernées par le développement durable travaillent entre elles. Dans cette mesure, on peut parler de synergie de la chimie comme interface. Cette démarche implique un effort de communication de la part de tous les acteurs, spécialistes dans leur domaine. Il est indispensable que les concepts aient la même définition pour tous. L'extension conceptuelle peut naturellement être différenciée en fonction de la discipline. Cette obligation sous-tend une autre question : un enseignement pour qui ? Des spécialistes ou des généralistes ? Sans aucune ambiguïté, l'ensemble des participants au débat est tombé d'accord sur la préservation d'un enseignement pour des spécialistes... ouverts sur d'autres horizons. La chimie ne peut s'isoler dans la citadelle mentale de ses certitudes. Elle est contrainte à travailler avec d'autres disciplines qui interviendront à ses côtés.

#### **Vendredi 25 mai : « Quelle éducation au développement durable autour du concept chimie propre et dépollution »**

La présence d'industriels à la tribune a permis de confronter les attentes des entreprises et l'offre de l'Université. Premier constat, l'industrie chimique recrute pour effacer l'effet du « papy boom ». Seconde remarque, le spectre de la demande est large, du technicien à l'ingénieur. On pouvait s'y attendre, les entreprises recherchent des collaborateurs bien formés possédant un solide socle de connaissances. Elles jugent plutôt positivement la formation des étudiants et trouvent dans les cursus proposés les collaborateurs qu'elles recherchent. Les chefs d'entreprises se félicitent également de l'ouverture à la pluridisciplinarité.

Contrairement à des fonctions pour lesquelles il existe des fiches de poste, le responsable du développement durable n'est pas encore parfaitement identifié. Preuve en est les parcours disparates des personnes qui occupent cette fonction.

Le souci des enseignants est de pouvoir insérer leurs étudiants sur le marché du travail. Les liens entre le monde économique et les universités se resserrent à travers les stages, la mise à disposition de chercheurs pour des travaux communs etc. Mais dans ce rapprochement, chacun sait jusqu'où il peut aller.



Table ronde « Chimie propre et dépollution ».

Thierry Thomas, journaliste





Le « phare du bout du monde » : maquette réalisée pour les MIEC-JIREC 2007 par Jacques Collin, avec l'accord du concepteur du phare et de l'architecte. Elle sert à présent d'emblème à ces rencontres en « portant la lumière de la connaissance au bout du monde ».

Société Française de Chimie (SFC), de la Fédération Française pour les sciences de la Chimie (FFC), d'universités, du CNRS, de l'Ifremer et de l'INRA) ;

- la chimie, au cœur des disciplines, acteur essentiel dans le développement durable (exemples choisis autour de la chimie de haute atmosphère, la chimie de l'environnement, la chimie et le stockage de l'énergie...);
- la chimie pour un développement durable dans l'entreprise (exemples choisis autour des groupes BASF, Total et Rhodia).

Le colloque a également permis de confronter des innovations, des expériences et les pratiques en matière de pédagogie, d'enrichir la réflexion sur ce qu'apportent les TICE (Technologies de l'Information et de la Communication dans l'Enseignement) à l'enseignement de la chimie, et enfin d'informer sur les développements les plus récents de ce domaine en évolution rapide (partie MIEC).

Ce fut l'occasion en premier lieu de faire un point sur les universités numériques thématiques – Université Virtuelle de l'Environnement et du Développement durable (UVED), Université des Sciences En Ligne (UNISCIEL) – et sur l'Université Internationale du Développement Durable (UIDD). En second lieu, divers ateliers ou démonstrations ont été proposés au choix des participants (créations de contenus dans UNISCIEL, guidance en chimie sur WebCT, expériences pédagogiques, réflexions et expériences en didactique...).

D'autre part, Hervé Lemarchand, lauréat 2007 de la division Enseignement-Formation (DEF) de la SCF, a prononcé une conférence sur le thème « Les concepts

## MIEC-JIREC 2009

Mulhouse, du 3 au 5 juin

L'année 2009 marquera le 25<sup>e</sup> anniversaire des JIREC. Avec le soutien de l'Université de Haute-Alsace et de l'École Nationale Supérieure de Chimie de Mulhouse (ENSCMu, première école de chimie en France née en 1822), les Journées seront organisées par Jean-Charles Mougénel, maître de conférences et directeur des études à l'ENSCMu, sur le thème « **La sécurité au laboratoire de chimie** » pour la partie JIREC et « **Nouveaux outils informatiques, nouveaux comportements, nouvelles pratiques...** » pour la partie MIEC.

Par ailleurs, nous reviendrons dans nos colonnes au cours du 1<sup>er</sup> semestre 2009 sur les JIREC 2008 qui traitaient de « *Valorisation et cycle de vie de la matière minérale* ».

• [www.enscmu.uha.fr/jirec](http://www.enscmu.uha.fr/jirec)

Contact : Jean-Charles Mougénel, [jc.mougenel@uha.fr](mailto:jc.mougenel@uha.fr)

thermodynamiques : le point de vue du chimiste », avant de recevoir son prix des mains de Françoise Rouquérol, en tant que présidente de la DEF. L'article qu'il a écrit à la suite de cet exposé sera publié prochainement dans nos colonnes.

Chaque conférence a été filmée et complétée par un diaporama. L'ensemble des documents (programme, intervenants, vidéos, diaporamas, résumés des interventions, communication dans les médias, évaluation du colloque...) peut être consulté sur le site du colloque\*\*.

L'indice de satisfaction exprimé par les participants correspond à la note 17/20 sur la base des six critères suivants pondérés avec la même importance : accueil, intérêt des rencontres, intérêt des conférences et tables rondes, intérêt des ateliers, intérêt des démonstrations, prestations et animations.

Les articles qui suivent vous donneront une idée du contexte de ces journées.

**Christian Eskenazi**

*Coordinateur des MIEC-JIREC 2007*

\* JIREC : Journées d'Innovation et de Recherche dans l'Enseignement de la Chimie ; MIEC : Multimédia et Informatique dans l'Enseignement de la Chimie. Les JIREC sont un rendez-vous annuel, couplé tous les deux ans avec les MIEC.

\*\* [www.univ-lr.fr/MIEC-JIREC\\_2007](http://www.univ-lr.fr/MIEC-JIREC_2007)



**Christian Eskenazi**

est professeur de chimie, directeur du Département de chimie et ancien président de l'Université de La Rochelle\*.

\* Université de La Rochelle, Département de chimie, Pôle Sciences et Technologie, Bât. Marie Curie, Avenue Michel Crepeau, 17042 La Rochelle Cedex 1.  
Courriel : [ceskenaz@univ-lr.fr](mailto:ceskenaz@univ-lr.fr)

## « Comment ça marche ? »

Agroalimentaire, carburants, colles, cosmétiques, matériaux, peintures, pharmacie, produits d'entretien...

**La rubrique de L'Actualité Chimique qui répond à vos questions sur la chimie de votre quotidien.**

Proposez-nous vos sujets, vos projets d'articles...

Coordinatrice de la rubrique : Véronique Nardello-Rataj (Université de Lille)

Courriel : [veronique.rataj@univ-lille1.fr](mailto:veronique.rataj@univ-lille1.fr) - Tél./fax : 03 20 33 63 69.



# Développement durable, avenir incertains

Christian Lévêque

« Développement durable », que cache cette expression à la mode depuis deux décennies ? Les questions que les uns et les autres se posent sont pour le moins variées : est-ce une manière de repeindre le développement en vert ? Est-ce une utopie ? Ou une vision politique à long terme ? Est-ce une « coquille vide » ou un concept « valise » ? Pour certains, le développement durable est un oxymore, c'est-à-dire une figure de rhétorique consistant à juxtaposer deux mots contradictoires (« guerre propre » par exemple).

En réalité, il y a de nombreuses raisons pour s'inquiéter de l'avenir de la planète et se poser la question des conséquences de nos activités : problème de l'érosion de la biodiversité avec la disparition d'écosystèmes, d'espèces et de ressources naturelles ; interrogations sur le changement climatique, sur les conséquences des pollutions sur la santé, sur la pénurie annoncée d'énergie fossile, etc. Et puis aussi le constat de la persistance d'inégalités entre les hommes. Autant de raisons pour s'interroger sur la pertinence des choix techniques, économiques et politiques en matière de développement.

## Bienvenue dans l'anthropocène

Un prix Nobel de chimie a proposé de baptiser « anthropocène » cette ère géologique qui fait suite à l'holocène, caractérisée par l'émergence de l'Homme en tant que force au niveau planétaire. En gros, depuis la révolution industrielle. Grâce aux développements technologiques, l'Homme est maintenant capable de modifier les processus à l'échelle globale : climat, pollutions, érosion des terres, cycles biogéochimiques...

L'une des caractéristiques de l'anthropocène est la démographie galopante : 6 milliards d'humains aujourd'hui, 9 à 10 milliards en 2050 ? Autant de bouches à nourrir, donc autant de ressources à trouver, et autant de terres à coloniser.

## Une fuite en avant en matière d'utilisation des ressources

Mais la démographie n'explique pas tout. Dans nos sociétés, en matière économique, la course au profit reste l'objectif majeur. Or, les temps de l'environnement ne sont pas les mêmes que les temps de l'économie. L'économie privilégie le profit à court terme. L'environnement, au contraire, a besoin du temps long, celui nécessaire au renouvellement des ressources. Cette dualité est illustrée par la théorie de Hardin, ou « tragédie du libre accès » : une ressource en accès libre est l'objet de concurrence et de surenchère entre acteurs économiques. Dans ce contexte, la logique est de faire un maximum de profits dans un minimum de temps, en exploitant au plus vite la ressource. Ce qui conduit inéluctablement à la surexploitation. Les pêches marines illustrent tout à fait cette théorie. Des collègues canadiens ont d'ailleurs montré que si la pression de pêche se poursuivait au rythme actuel, il n'y aurait plus de poissons à pêcher d'ici 2050.

Bien d'autres facteurs liés au comportement humain peuvent également expliquer la situation actuelle. On pense notamment à la corruption qui touche presque tous les pays, à des degrés divers. On pense aussi aux subventions dont les effets pervers sont souvent dénoncés, que ce soit dans le domaine des pêches ou celui de l'agriculture.

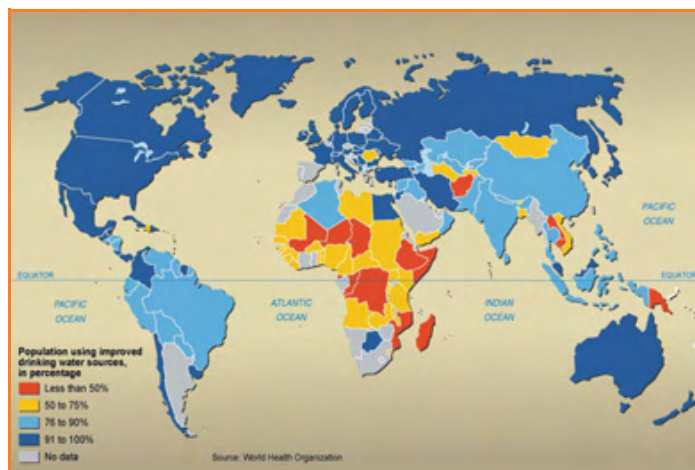
Dans le domaine industriel, « le prêt à jeter » est devenu de règle : mise sur le marché de produits à courte durée de vie destinés à être remplacés rapidement, de manière à faire tourner plus rapidement l'économie. Tout cela fortement encouragé par une publicité qui pousse au toujours plus en matière de consommation.

On peut aussi mentionner la course aux innovations et la mise sur le marché de produits non maîtrisés, dont l'impact sur l'environnement peut se révéler important. Toute innovation technologique, en effet, a sa face sombre et sa face claire. Si elle présente un intérêt immédiat pour la société, elle est commercialisée rapidement, voire trop rapidement... (on retrouve ici le profit). Mais l'expérience montre que l'on découvre en général un peu plus tard, parfois trop tardivement, des conséquences imprévues pour l'environnement et/ou la société...

Rappelons-nous par exemple que les CFC, responsables de l'affaiblissement de la couche d'ozone, étaient réputés être des gaz inertes ! Qu'en est-il des OGM et de nombreux produits chimiques ? Il y a de nombreux exemples d'effets non prévus dus à l'utilisation d'insecticides (DDT...), d'herbicides, d'engrais ou de produits industriels (amiante...). Sachant que 100 000 molécules synthétiques ont été répandues dans l'environnement, on peut s'interroger sur leur devenir. D'autant que l'on pense de plus en plus que l'exposition à de faibles doses sur le long terme peut être aussi dangereuse que l'exposition à de fortes doses sur le court terme...

## Le développement durable entre technique et comportement social

Aux racines du développement durable, il y a la notion de progrès, chère au siècle des Lumières. La croyance se développe alors que la science et la technique vont apporter des réponses à la misère, à la maladie, à la sous-alimentation, etc. Une démarche qui trouve son apogée dans le scientisme et le positivisme au XIX<sup>e</sup> siècle : la science aura réponse à tout... Les mouvements socialistes de la fin du XIX<sup>e</sup> donneront une grande place au scientisme et l'ex URSS a d'ailleurs accordé beaucoup d'importance à la recherche.



© World Health Organization.



© Millenium Ecosystem Assessment.

Aujourd'hui, il ne s'agit pas de rejeter la science mais d'en faire meilleur usage. Le développement durable ne peut reposer sur le seul progrès technique. On pourrait résumer en disant : oui aux innovations technologiques, non à leur usage inconsidéré, notamment lorsque les conséquences ne sont pas connues.

Par ailleurs, on récuse le fait que le développement ne soit abordé que sous le seul aspect de l'économie. Il faut aussi, et avant tout, prendre en compte le développement humain. La lutte contre la pauvreté est officiellement l'objectif central des politiques de développement énoncées dans la Déclaration du Millénaire (2000) des Nations Unies. Il ne s'agit pas seulement de la pauvreté monétaire, mais aussi de la « pauvreté d'accès » aux soins de santé, à l'éducation, aux emplois, etc.

Le développement durable n'est donc pas seulement une série de recettes techniques. Il implique aussi des changements en perspective dans nos comportements, nos modes de consommation et nos systèmes de valeurs.

## Le développement durable implique une approche systémique

On a longtemps privilégié la démarche sectorielle dans le domaine du développement : agriculture, approvisionnement en eau, énergie, santé, etc., sans se soucier des interactions possibles entre ces divers domaines. Or la création d'un barrage sur une rivière par exemple, pour l'énergie ou l'irrigation, a des conséquences sur les pêches, mais aussi sur la santé (réservoir de maladies parasitaires en zone tropicale), sur l'érosion des côtes, sur la qualité de l'eau et le régime des crues en aval, etc. Pour toute prise de décision, il faut considérer la question dans son contexte, et pas seulement par rapport à un objectif sectoriel. On a parfois schématisé cette démarche par le slogan « penser globalement, agir localement »...

## Quelques pistes pour agir

Nous faisons le constat que les causes profondes des problèmes que nous rencontrons actuellement en matière d'environnement résident dans la manière dont la société gère ses ressources et ses innovations technologiques. Les sciences et les techniques ne peuvent tout résoudre. Elles s'avèrent notamment souvent incapables de trouver des solutions à des problèmes qu'elles ont contribué à créer : réchauffement climatique, pollution généralisée, déplétion de la couche d'ozone, etc.

En réalité, une partie des solutions est à trouver dans le fonctionnement de la société elle-même (économie, partage des ressources, équité...) :

- Réduire le gaspillage, les déchets et consommer plus raisonnablement ? On parle de plus en plus de décroissance.
- Réduire les inégalités : chaque être humain peut-il avoir le même niveau de vie que celui des pays européens ?
- Redistribuer les pouvoirs et mieux impliquer les citoyens dans les choix et les prises de décision en matière d'innovation et de développement ?

Rappelons que le principe de précaution n'est pas fait pour empêcher les innovations comme on l'entend parfois. C'est un principe d'action qui demande que l'on s'interroge sur les conséquences possibles d'une innovation et que l'on prenne les dispositions pour les évaluer.

Comment prévoir, évaluer, anticiper les risques d'une décision ? L'une des méthodes de plus en plus utilisée consiste à élaborer des scénarios prospectifs pour éclairer les prises de décisions. Ils nécessitent des démarches multidisciplinaires dans le cadre d'une réflexion systémique. Les scénarios élaborés par le Millenium Ecosystem Assessment\* confirment qu'il vaut mieux être proactif et anticiper... qu'attendiste et seulement réactif !

## Comment se définit le développement durable ?

- « Le développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » (Commission Brundtland, 1987).
- « Améliorer les conditions d'existence des communautés, tout en restant dans les limites de la capacité des écosystèmes » (Programme des Nations Unies pour l'Environnement).
- « L'idée de développement [...] suppose de façon implicite que le développement techno-économique est la locomotive qui entraîne naturellement à sa suite un « développement humain » dont le modèle accompli et réussi est celui des pays réputés développés. [...] Cette vision suppose que l'état actuel des sociétés occidentales constitue le but et la finalité de l'histoire humaine. Le développement « durable » ne fait que tempérer le développement par considération du contexte écologique, mais sans mettre en cause ses principes » (Edgard Morin).
- Le concept de développement durable n'est rien moins qu'un projet de civilisation. Et depuis les débuts de l'humanité, la civilisation est un processus – encore largement inachevé – fondé sur la culture, c'est-à-dire le déploiement de savoir-faire, de rites, de coutumes, de croyances, de représentations du monde, de constructions, de fabrications, d'inventions, d'accumulations de connaissances empiriques puis théoriques, etc. (Jacques Testard).

\* Le Millennium Ecosystem Assessment (MEA) ou « Évaluation des écosystèmes pour le Millénaire » est une opération internationale d'évaluation et de prospective sur les écosystèmes qui s'est déroulée entre 2001 et 2005. Commanditée par l'ONU en 2000, cette opération ambitionnait de répondre à la demande des gouvernements de disposer d'informations sur la gestion des écosystèmes et la préservation de la biodiversité, mais était aussi destinée aux entreprises, aux organisations non gouvernementales et plus largement aux acteurs de la société civile. L'objectif était d'évaluer les conséquences de l'évolution des écosystèmes sur le bien-être humain, dans le but d'identifier les actions nécessaires pour une meilleure préservation et utilisation des écosystèmes au service de l'Homme.



### Christian Lévêque\*

est directeur de recherche émérite de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Il est l'auteur avec Yves Sciama de *Développement durable, Avenir incertains* et de *Développement durable, Nouveau bilan* (2<sup>e</sup> éd.) parus aux éditions Dunod, collection Quai des sciences, respectivement en 2005 et en 2008.

\* 1 rue de Marnes, 92410 Ville d'Avray.  
Courriel : cleveque@mnhn.fr

# La chimie et le développement durable

Armand Lattes

« C'est une triste chose de penser que la nature parle et que le genre humain ne l'écoute pas. »

Cette phrase de Victor Hugo semblait n'avoir aucun écho depuis que l'ère industrielle avait envahi notre civilisation. Réagissant à une situation inquiétante, Rachel Carson, dans son livre *Silent spring* (*Le printemps silencieux*), a réveillé les consciences au début des années 60. La chimie fit alors figure d'accusée et cette situation n'a fait qu'empirer malgré tous les bienfaits que cette discipline a apportés pour améliorer la qualité de la vie et la santé humaine.

Cela s'explique parce que, aux yeux du public, les substances chimiques sont responsables de dommages environnementaux et de santé. Gardons seulement deux exemples :

- **La diminution de la couche d'ozone**

À près de 20 km au-dessus du niveau de la mer, des radicaux hydrogénés HO·, HO<sub>2</sub>· ou contenant des halogènes ClO· et BrO· sont à l'origine de réactions qui détruisent l'ozone. En raison des grandes quantités d'halocarbures dispersés dans l'atmosphère ces dernières décennies, cette perte est due essentiellement aux radicaux halogénés. Le contrôle des émissions des halocarbures doit permettre d'arrêter cette évolution négative.

Cependant, l'interaction ozone/climat a aussi sa part dans ce scénario, comme cela a pu être observé en 2002 où le trou au-dessus de l'Antarctique était le plus petit enregistré depuis 1988. Mais l'explication résidait en un climat stratosphérique inhabituel et peu de temps après, le « trou d'ozone », plus grand que l'Europe entière, se reformait au-dessus de l'Antarctique et l'hémisphère sud.

En 2006 et 2007, nouvelle diminution illustrant ces oscillations. Quoiqu'il en soit, il semble qu'une quarantaine d'années soient nécessaires pour que l'on retrouve une situation normale.

- **Le changement climatique et les gaz à effet de serre**

Depuis 1880, la température moyenne de notre Terre n'a cessé d'augmenter avec une accélération notable à partir de 1990. La faute en incombe aux émissions de gaz dits à « effet de serre » : CO<sub>2</sub>, méthane, oxyde d'azote, chlorofluorocarbones, auxquels s'ajoutent les effets des aérosols –

surtout des particules de sulfates et de carbone (suie) – et des changements de couverts terrestres, etc.

La diminution de la surface des glaciers en témoigne et les spécialistes s'accordent sur une augmentation moyenne de 1,4 à 4 °C pendant ce siècle.

## Comment réduire ces émissions ?

De nombreux travaux visent à neutraliser ces émissions, par exemple en séquestrant le CO<sub>2</sub> dans des anciens gisements de pétrole ou de gaz, ou dans des aquifères salins (comme cela se pratique sur le gisement de Sleipner en mer du Nord).

Certains scientifiques pensent que les émissions de CO<sub>2</sub> ne pourront que croître et proposent des solutions inquiétantes, comme le Dr Crutzen, prix Nobel de chimie (1995), qui suggère d'envoyer dans la stratosphère des aérosols de soufre comme matériaux réfléchissants.

Les pouvoirs publics français, inquiets de cet état de fait et soucieux de respecter le protocole de Kyoto qui vise à revenir au seuil d'émissions observé en 1990, ont pris un certain nombre de mesures législatives et s'appuient sur les avis d'experts comme ceux du Comité de la Prévention et de la Précaution.

## Rôle du Comité de la Prévention et de la Précaution (CPP)

Ce Comité, qui assiste le ministre de l'Écologie, est à l'origine de nombreuses études et rapports analysant les problèmes les plus graves et faisant des propositions destinées à améliorer les conditions environnementales.

C'est ainsi qu'ont été examinés successivement le cas des pesticides, celui de la sécurité industrielle, des perturbateurs endocriniens, des incinérateurs d'ordures ménagères et des nanotechnologies. Des remarques pertinentes sont émises à l'issue de la rédaction de ces rapports. À titre d'exemple, on peut citer :

- les propriétés de perturbateurs endocriniens d'un produit aussi simple que le perchlorate d'ammonium, utilisé dans les airbags et dans les carburants de missiles et fusées ;
- les relations entre les incinérateurs d'ordures ménagères et l'émission de dioxine, amenant à proscrire toute installation qui ne serait pas munie d'un système brûlant les fumées à 900 °C.

D'autres exemples plus pointus peuvent trouver leur place dans d'autres instances, comme l'origine controversée de la présence de benzène dans certaines boissons – ce benzène provenant vraisemblablement de la décomposition photochimique d'additifs alimentaires comme les benzoates et non d'une pollution accidentelle.

## Risques et nouvelles technologies

Parmi les technologies émergentes, les nanotechnologies sont celles qui suscitent les plus fortes espérances, mais quelques-unes de leurs propriétés – réactivité de surface élevée, possibilité de traverser toutes les membranes – pourraient avoir une influence négative sur la santé et l'environnement.



Ballon auxiliaire stratosphérique pour l'étude de la couche d'ozone. Aire sur l'Adour (Landes). © CNRS Photothèque/Rigaud Pierre.

Ceci met en évidence le besoin d'établir des méthodologies appropriées pour tester la toxicité (ou la nocivité) des nanoparticules. À l'heure actuelle, on ne connaît pas quelles propriétés physiques de celles-ci doivent être mesurées pour les corrélées à leur toxicité.

En attendant l'établissement de règles précises, les producteurs observent la plus grande prudence lors des fabrications et s'entourent des mesures de sécurité les plus strictes.

Il est bien évident que l'intérêt de ces nanotechnologies justifie toutes les recherches dont elles sont l'objet et que ces recherches et ces développements, encadrés par des mesures de surveillance, doivent être poursuivis au risque de voir s'échapper des progrès considérables dans de nombreux domaines.

Rappelons à ce propos ce qu'avait écrit Pierre-Gilles de Gennes dans son livre *Les objets fragiles* (Plon, 1994) : « Dans l'élimination des polluants, l'avenir appartient à la chimie, pas à la mise en faillite d'un secteur industriel. C'est là encore une affaire de bon sens. »

## Impact réel de la chimie et de l'industrie chimique sur la santé et l'environnement

Devant les attaques que nous subissons, devant les critiques émises à l'encontre de l'industrie chimique, il est bon de rétablir certaines vérités.

### Rôle de l'industrie chimique dans l'émission des gaz à effet de serre

En 1998, le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA) a rapporté les pourcentages suivants concernant les émissions atmosphériques par l'industrie chimique en France, comparés aux émissions totales de toutes origines : 9,5 % d'oxydes de soufre, 4,5 % de CO<sub>2</sub>, 2,1 % d'oxydes d'azote, 2,4 % de COV (Composés organiques volatiles).

Les changements climatiques liés aux émissions de gaz à effet de serre doivent être surtout attribués aux autres sources de pollution : transports, usines d'incinération, habitats, les deux premières contribuant à elles deux pour environ 70 %, alors qu'en France, les transports seuls sont responsables de 38,6 % des émissions de gaz.

### Pollution chimique et augmentation du nombre de cancers

Une étude américaine parue en 2004 rapporte les causes réelles des décès aux États-Unis en l'an 2000. Cette année-là, 2 403 351 décès ont été enregistrés, soit 250 000 de plus qu'en 1990. Cette augmentation a deux explications : l'accroissement de la population et l'augmentation de l'espérance de vie. Parmi les causes les plus fréquentes des décès, on trouve l'usage du tabac (18,1 %), l'obésité et l'absence d'activité physique (16,1 %) ; les agents toxiques sont loin derrière avec 2,3 % du total des décès enregistrés.

Ce chiffre est très voisin de celui avancé par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) qui juge que la pollution par agent chimique est la source de 1 à 4 % de tous les cancers.

Deux grands spécialistes français, le professeur Maurice Tubiana, membre de l'Académie des sciences et de l'Académie de médecine, directeur honoraire de l'Institut Gustave Roussy (Villejuif) et le Dr Catherine Hill, chef du

département d'épidémiologie de ce même Institut, ont indiqué dans un article récent que 80 % des cancers sont dus au mode de vie et que « les décès par cancers des femmes ont diminué lentement depuis 1950 alors qu'ils diminuaient rapidement chez les hommes depuis 1990 », ajoutant que « si une proportion notable de cancers était liée à la pollution, cela n'explique pas pourquoi deux fois plus d'hommes que de femmes meurent de cancer. »

Concernant l'impact de la pollution sur l'incidence des cancers, les exemples donnés par ces deux spécialistes sont particulièrement démonstratifs : « En réalité, ceux qui enregistrent la plus grande progression en fréquence (cancers du sein et de la prostate) ne sont pas ceux pour lesquels un effet de la pollution doit être redouté. »

Pour terminer, retenons aussi : « Il est vrai que l'incidence des cancers augmente en France, mais la plupart de cette augmentation peut être expliquée par les progrès accomplis en matière de méthodes de diagnostic [...] Nous pouvons maintenant détecter de très petits cancers (quelques millimètres de diamètre), ce qui n'était pas possible il y a quinze ans [...] Ceci explique la plupart des désaccords entre le fait que la fréquence des cancers a augmenté tandis que les décès par cancers ont diminué. »

## Chimie et développement durable

Au cours des cinquante dernières années, les progrès de la chimie ont été considérables. Parallèlement à cette évolution, l'industrie chimique s'est appliquée à répondre aux deux impératifs suivants : demande sociétale et profits économiques.

Il en a résulté une croissance, parfois mal maîtrisée, mais qui correspondait à une demande politique très forte. Il suffit de comparer les affiches des candidats aux diverses élections pour constater un encouragement très fort à produire, en 1965, remplacé par une orientation rurale en 1981 ! Entre ces deux dates, on doit situer la prise de conscience écologique qui a suivi la parution du livre de Rachel Carson cité plus haut.

Dès lors, un troisième impératif est venu s'ajouter aux deux précédents, bouleversant les schémas classiques : le respect de l'environnement. Ce qui s'est traduit par la notion de développement, remplaçant celle de croissance : « la croissance c'est produire plus, le développement c'est produire autrement. »

## Le développement durable

La notion de développement durable a été introduite en 1987 par Madame Gro Harlem Brundtland, Premier Ministre de la Norvège, qui en donne la définition suivante : « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. »

Les Indiens d'Amérique se sentaient responsables de leurs descendants jusqu'à la 7<sup>e</sup> génération, et ce souci de l'avenir guidait leur comportement. Nous devons donc changer nos relations avec la nature et, comme Michel Serres l'a suggéré, imaginer un contrat naturel (analogue au contrat social du XVII<sup>e</sup> siècle).

### Principe de précaution

Destiné à accompagner le développement durable et intégré dans la Constitution française, on trouve le « principe

de précaution » dont l'application est désormais impérative « lorsque la réalisation d'un dommage, bien qu'incertaine en l'état des connaissances scientifiques, pourraient affecter de manière grave et irréversible l'environnement, les autorités veillent, par application du principe de précaution, à l'adoption de mesures provisoires et proportionnées afin d'éviter la réalisation du dommage, ainsi qu'à la mise en œuvre de procédures d'évaluation des risques courus », mais...

- seuls 19 % des parlementaires se déclarent d'accord sur la nécessité de ralentir le développement économique pour préserver l'environnement, contre 53 % de la population ;  
- 40 % des parlementaires s'en remettent aux progrès techniques pour compenser les effets du réchauffement climatique... contre 12 % des Français.

## Le règlement REACH

REACH (enRegistrement, Evaluation, Autorisation des substances CHimiques) est un règlement communautaire qui vise à l'identification des produits chimiques et, pour les plus dangereux, à leur élimination. Dans le cadre de ce règlement, tous les acteurs intéressés (producteurs, importateurs) ont l'obligation d'enregistrer les substances mises sur le marché à plus d'une tonne par an. Cela devrait représenter environ 30 000 produits.

Ce règlement a été adopté par le Conseil européen après cinq années de débat. Depuis le 1<sup>er</sup> juin 2007, il s'applique dans tous les pays de l'Union européenne.

Face à ces différentes contraintes, la solution qui est imposée a été, comme dit ci-dessus, de pratiquer la « bioéconomie » en intégrant l'écologie à l'économie et réciproquement. C'est au niveau même de la conception que les chimistes doivent agir, ce qui exige un effort de créativité car il faut sortir de la séquence classique :

**extraire-produire-distribuer-jeter,**  
pour appliquer, au minimum, la séquence des 3R :  
**réduire-réutiliser-recycler.**

Pour concevoir ce nouveau monde, et même aller plus loin dans les objectifs, dépasser l'éco-efficacité, pour atteindre l'écoconception, les chimistes ont énoncé les douze principes de la « green chemistry » ou « chimie pour le développement durable ».

Les chimistes et l'industrie chimique ont très vite adopté cette façon de travailler qui, de plus, constitue pour eux un défi à relever et, sans nul doute, le moyen de solliciter leur imagination.

## Les acteurs et programmes français

Le groupe stratégique pour l'avenir de l'industrie chimique à l'horizon 2015, mis en place par Patrick Devedjian et présidé par Daniel Garrigue, a repris ces éléments dans les recommandations qu'il a remises au ministre en mai 2004.

Les comités sectoriels du Conseil stratégique pour l'industrie chimique, initié par François Loos, les ont enrichi de leurs réflexions sur les ressources, les filières et les programmes.

L'industrie chimique et les sociétés savantes du domaine de la chimie, associées au sein de la Fédération Française pour les sciences de la Chimie (FFC), ont retenu « la chimie et le développement durable » comme thème pluriannuel de leurs travaux.

Le CNRS a créé un programme interdisciplinaire, « Chimie pour le développement durable », qui rassemble

900 chercheurs sur quatre axes principaux de façon à aider aux collaborations souhaitables dans ces domaines. Parallèlement, une expertise collective REACH menée en partenariat avec plusieurs ministères fait le point des conséquences de l'application du règlement REACH en matière de recherche.

Enfin, l'Agence nationale de la recherche (ANR) présente un programme « Chimie et procédés pour le développement durable », qui dispose d'un important budget pour inciter les chimistes à répondre nombreux aux appels d'offre.

C'est donc un mouvement de grande ampleur qui mobilise en ce moment tous les acteurs de notre discipline. L'intérêt qu'il suscite apparaît nettement dans l'audience que recueillent les colloques et congrès qui rassemblent industriels et universitaires sur les thèmes aussi importants que :

- Chimie, énergie et développement durables (École des Mines, Paris, 15 mars 2007) ;
- Chimie et écoconception (Montpellier, juin 2007) ;
- Matières premières du futur : de l'or noir à l'or vert (Lyon, 6-7 décembre 2007).

Les résultats de cet engagement de l'industrie française apparaissent aussi dans les dossiers de candidatures présentés en deux ans pour l'attribution du Prix Pierre Potier. Ce prix destiné à récompenser des entreprises pour leurs travaux et leurs réussites dans le domaine de l'innovation en chimie en faveur du développement durable est organisé par la FFC et l'Union des Industries Chimiques (UIC) et parrainé par le ministère de l'Industrie. Au total, en 2006 et 2007, c'est plus de 60 dossiers qui ont été examinés. La plupart des lauréats ont fait l'objet d'articles dans les quotidiens et hebdomadaires français les plus lus. Un label vient s'ajouter aux trophées et médailles, label montrant aux personnes intéressées par le produit, système ou matériel récompensé, le rôle important qu'a pris le développement durable dans la réalisation de ce projet.

## En conclusion

Il y a un message que doivent recevoir tous nos compatriotes pour qu'ils réalisent combien leurs préoccupations sont les nôtres et combien ils peuvent compter sur notre engagement.

Oui, nous produisons vos médicaments, vos vêtements, vos produits de beauté, vos téléphones mobiles, vos systèmes électroniques, les matériaux utilisés dans vos moyens de transport, mais nous gardons un œil sur votre environnement, votre nourriture et votre santé en développant, en particulier, des méthodes analytiques de grande performance. Ayez un regard objectif sur nos activités et réalisez que, puisque nous sommes présents dans chaque secteur de l'activité humaine, vous trouverez toujours quelque chose à nous reprocher mais vous pouvez être sûrs que les chimistes, comme vous, sont anxieux de laisser à leurs enfants et petits enfants et aux générations futures, une planète propre où il fera bon vivre.



**Armand Lattes**

est professeur émérite à l'Université Paul Sabatier\* et président de la Fédération Française pour les sciences de la Chimie.

\* Université Paul Sabatier, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex 9.  
Courriel : lattes@chimie.ups-tlse.fr

# La chimie et le développement durable à la FFC

## Le projet « Chimie pour un Développement Durable<sup>®</sup> »

Michel Azémar

<b>Résumé</b>	Depuis près de trois ans maintenant, la Fédération Française pour les sciences de la Chimie (FFC) conduit le projet « Chimie pour un Développement Durable <sup>®</sup> » dans le but de promouvoir le développement et la diffusion des connaissances correspondantes. Dans ce cadre, elle propose aux enseignants un outil de formation et d'information, basé sur de nombreux exemples de mise en œuvre d'une chimie durable.
<b>Mots-clés</b>	<b>Chimie, développement durable, projet, enseignement, formation.</b>
<b>Abstract</b>	<b>Chemistry and the sustainable development at FFC: the project "Chemistry for a Sustainable Development<sup>®</sup>"</b> For more than three years now, the « Fédération Française pour les sciences de la Chimie » (FFC) has been conducting the project "Chemistry for a Sustainable Development <sup>®</sup> " aiming to promote the development and dissemination of the necessary knowledge. As part of the project, the FFC proposes to teachers a tool for training and information based on numerous examples of implementation of sustainable chemistry.
<b>Keywords</b>	<b>Chemistry, sustainable development, project, teaching, training.</b>

Il ne semble plus nécessaire de rappeler le concept de « développement durable » : le texte fondateur, le rapport Brundtland, a déjà 20 ans et depuis, les médias se font largement l'écho des défis planétaires, justifiant cette approche. Ceci se traduit enfin par la volonté affichée des décideurs d'agir en ce sens et par des attentes manifestes du grand public.

Les acteurs de la chimie ont pris conscience de cette situation et se mobilisent de diverses manières. La Fédération Française pour les sciences de la Chimie (FFC), qui regroupe les sociétés savantes du domaine (voir encadré 1), a décidé d'être proactive en lançant dès mars 2006 le projet « Chimie pour un Développement Durable<sup>®</sup> » (voir *L'Act. Chim.*, 294, p. 4). Il concerne les trois composantes qui font l'originalité et l'intérêt des sociétés savantes, à savoir l'industrie, la recherche et l'enseignement. Cette dernière composante est essentielle car, dans tous les domaines, la mise en œuvre d'un vrai développement

durable requiert des connaissances de chimie : il faut donc améliorer l'image de cette science, élargir la diffusion des connaissances de chimie, et attirer les jeunes vers cette discipline. Les enseignants ayant un rôle majeur dans cette perspective, la FFC entend leur apporter une aide informative et reste à leur écoute pour répondre à leurs besoins dans ce domaine.

### Le projet « Chimie pour un Développement Durable<sup>®</sup> »

Comme le rappelle le professeur Jean-Marie Basset : « [...] pour des raisons diverses (économiques, sociétales et réglementaires, techniques...), l'Homme, a toujours su (dû) contrôler ses erreurs [...], a déjà largement devancé les préoccupations de développement durable, ...souvent, parfois... *via* la catalyse ! » (Exemples : réduction des pollutions au plomb, remplacement des chlorofluorocarbones, ...). Aussi, face aux enjeux du développement durable, la FFC a adopté une approche positive, collaborative et volontariste car :

- la chimie, ses procédés et ses applications devront se conformer aux exigences d'un développement durable ;
- quelle que soit l'approche envisagée, les connaissances de chimie (sciences chimiques, techniques, biotechnologies, génie des procédés...) sont indispensables pour l'avènement d'un développement durable.

Ce sont les raisons de la mise en place du projet « Chimie pour un Développement Durable<sup>®</sup> » qui mobilisent les différents acteurs de la chimie au sein de six groupes de travail (voir encadré 2). La motivation des équipes se concrétise déjà par des réalisations et la préparation de rencontres majeures visant à promouvoir le développement et la diffusion des connaissances des disciplines de la chimie, nécessaires à la mise en œuvre d'un développement durable (voir encadré 3).

#### Encadré 1

#### Fédération Française pour les Sciences de la Chimie



La Fédération Française pour les sciences de la Chimie (FFC) regroupe les cinq sociétés savantes reconnues mondialement dans le domaine : Société Chimique de France (SCF), Société Française de Génie des Procédés (SFGP), AdebioTech, Société Française de Métallurgie et des Matériaux (SF2M), Fondation Sciences et Culture alimentaire.

La FFC est un **lieu de rencontre et d'échanges** :

- diffusion d'information ([www.ffc-asso.fr](http://www.ffc-asso.fr)),
- prospective scientifique,
- organisation de séminaires, colloques et congrès,
- représentation d'organisations européennes,
- Influence

avec un projet majeur :

- « Chimie pour un Développement Durable<sup>®</sup> »

## Encadré 2

## Chimie pour un développement durable® Les réalisations des six groupes de travail (GT)

- **GT1 - Sciences chimiques et biotechnologiques**

Colloque « Les matières premières du futur : de l'or noir à l'or vert » (Lyon, 6-7 décembre 2007)

Colloque « Carbon dioxide: a waste, a raw material: fate or opportunity » (Toulouse, 16-17 décembre 2009)

Colloque « Chemical and Biochemical wood valorization: solution for new materials and products » (Épinal, 3-4 février 2009)

- **GT2 - Interactions des produits et des procédés avec l'Homme et l'environnement**

Réflexion sur les nanomatériaux

- **GT3 - Génie des procédés et génie industriel**

Journée de réflexion « Accroître l'efficacité énergétique des procédés » (Paris, 15 mars 2007)

Colloque « Stockage des énergies intermittentes par voie chimique » (Le Bourget-du-Lac, 19 mars 2009)

- **GT4 - Conception de produits et matériaux respectueux de l'Homme et de son environnement**

Colloque « Innover par l'éco-conception pour une chimie durable » (Montpellier, 14-15 juin 2007)

Colloque « Ecodesign & Chemistry » (Montpellier, 1-2 avril 2009)

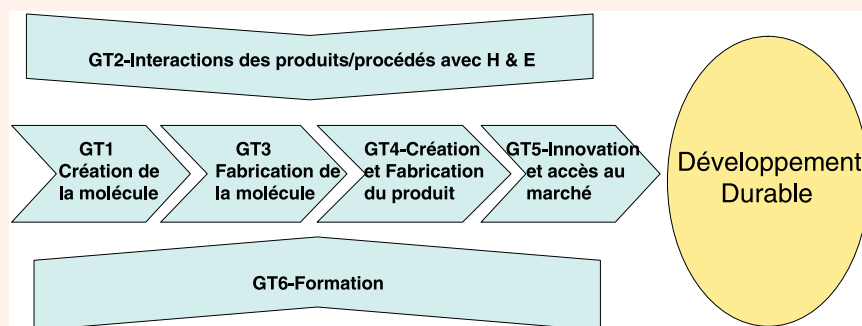
- **GT5 - Innovation et accès au marché**

Test d'appui à deux start-up

Matinée « Outils et solutions pour les PME/PMI (Paris, 4 novembre 2008)

- **GT6 - Formation**

Support de formation et d'information pour les universités et écoles d'ingénieurs : chimie durable, procédés durables...



## Encadré 3

## Le support de formation et d'information

- |   |   |
|---|---|
| <p><b>I</b> Introduction<br/>Mise en perspective du développement durable et de la chimie</p> <p><b>II</b> Analyse de cycle de vie<br/>Outil pour la conception et le choix des voies d'accès<br/>Exemples : boîtes de boisson, lessives, capot de la Smart, palettes, polymères biodégradables</p> <p><b>III</b> Économies d'atomes<br/>Avec de nombreux exemples industriels tels que celui de la synthèse de l'ibuprofène</p> <p><b>IV</b> Réduction des quantités de produits employés<br/>Avec notamment l'apport de la catalyse, comme par exemple l'utilisation de zéolites dans un procédé d'acétylation, les moyens d'éviter les étapes de protection/déprotection... et les recours à la catalyse enzymatique</p> <p><b>V</b> Solvants : élimination ou substitution<br/>Dans l'industrie des peintures, dans les réactions de synthèse...<br/>Ce chapitre présentera aussi des utilisations de nouveaux solvants : CO<sub>2</sub> supercritique, solvants ioniques</p> <p><b>VI</b> Intensification des procédés<br/>Il s'agit d'illustrer ce nouveau concept du génie des procédés qui vise à « utiliser beaucoup moins pour produire beaucoup plus et beaucoup mieux » en concevant des réacteurs chimiques et des séparateurs mieux adaptés aux phénomènes physico-chimiques. Exemples : micro-réacteurs, distillation réactive...</p> <p><b>VII</b> Les matières premières du futur : de l'or noir à l'or vert</p> | <p>Prise en compte du dilemme « matières premières renouvelables <i>versus</i> matières premières fossiles » et illustration de l'apport de la chimie pour la valorisation de la biomasse. Exemples : diester (procédé IFP), transformation du glycérol (épichlorhydrine par Solvay), plastifiant PVC...</p> <p><b>VIII</b> Risques et réglementations<br/>Typologie des risques : diffus et aigus<br/>Risques produits (REACH et ce qui en découle) et procédés (R &amp; D, contrôle)</p> <p><b>IX</b> La chimie face au développement durable et aux enjeux de la planète<br/>Protéger la couche d'ozone (remplacement des CFC)<br/>Réchauffement climatique (utilisation du CO<sub>2</sub>, énergies renouvelables)<br/>Biodiversité (analyses)<br/>Réduire les déchets, réemploi (époxydation du propène, procédé caprolactame sans sel...)<br/>Qualité de l'air (COV, soufre...)<br/>Ressources en eau (élimination des métaux lourds, désinfection simplifiée...)<br/>Préserver les sols (polymères dégradables...)<br/>Énergie (bâtiments économes, piles...)<br/>Ressources (§ VII)<br/>Santé/hygiène<br/>Alimentation (détection des mycotoxines, protection des cultures...)</p> <p><b>X</b> L'usine du futur</p> |
|---|---|



## Place de l'enseignement dans le projet

L'enseignement est plus particulièrement concerné par le « GT6-Formation », animé par Christine Roizard et Geneviève Roques, qui s'est donné comme objectifs de :

- créer un support pour la formation et l'information destiné aux universités et écoles d'ingénieurs (Fédération Gay Lussac et généralistes) : chimie durable, procédés durables...
- sensibiliser les jeunes : bilan et diagnostic des actions qui existent, test de sensibilisation de deux IUFM, rencontre des directeurs d'IUFM (formation des maîtres), support pour la formation et l'information pour les formateurs et leurs maîtres ;
- apporter un appui pédagogique aux autres groupes de travail.

## Création du support de formation et d'information

La première action du GT6-Formation est donc la création d'un support de formation et d'information illustrant les apports des sciences de la chimie pour un développement durable.

À partir d'un dossier réalisé par Bernard Sillion, le groupe a élaboré un CD-Rom et/ou un fichier téléchargeable sur la chimie durable. La première version est maintenant disponible.\*

L'objectif est de mettre à disposition un grand nombre d'exemples pertinents, chacun faisant l'objet d'un bref descriptif, avec deux ou trois transparents d'illustrations et des liens hypertextes.

L'ensemble est structuré selon dix chapitres, chacun avec un texte synthétique et des exemples, qui seront suivis d'un glossaire et d'une bibliographie.

Depuis le colloque MIEC-JIREC à La Rochelle, le groupe a enrichi ces fichiers avec de nombreux exemples, notamment pour les chapitres II et IV, et un dixième chapitre sur l'usine du futur.

La FFC espère que cet outil apportera une aide pratique aux enseignants et reste particulièrement à leur écoute pour améliorer et enrichir ce support, conformément à leurs attentes. Ils ont un rôle clef pour l'avènement d'un développement durable qui ne pourra émerger que sur des bases scientifiques, et notamment celles de la chimie. Les acteurs de la chimie souhaitent donc la participation active des enseignants pour contribuer à améliorer l'image de la chimie et renforcer l'intérêt et les connaissances des jeunes dans cette discipline incontournable pour faire face aux grands enjeux de la planète.

\* Le CD-Rom « Chimie pour un Développement Durable® » est disponible sur commande adressée à : [colas@ffc-asso.fr](mailto:colas@ffc-asso.fr). La commande donne droit au support CD ainsi qu'à l'espace réservé sur le site de la FFC sur lequel seront disponibles les mises à jour périodiques.



### Michel Azémar

est responsable du projet « Chimie pour un Développement Durable® » à la FFC\*.

\* Fédération Française pour les sciences de la Chimie, 28 rue Saint-Dominique, 75007 Paris.  
Courriel : [michelazemar@aol.com](mailto:michelazemar@aol.com)  
[www.ffc-asso.fr](http://www.ffc-asso.fr)



FONDATION DE LA MAISON DE LA CHIMIE

# CHIMIE ET ART

Le génie au service de l'Homme

28 janvier 2009

Maison de la Chimie – 28 rue Saint-Dominique, 75007 Paris

À l'occasion du 20<sup>e</sup> anniversaire  
de l'installation de l'accélérateur de particules AGLAE au LOUVRE

## Programme

**Introduction - Bernard BIGOT**

**Trésors de la mémoire et mode opératoire des œuvres - SARKIS**

**Chimie analytique, Art et Patrimoine : vers une vision commune - Christian AMATORE**

**Matériaux du patrimoine et altération : analyses par rayonnement synchrotron - Koen JANSSENS**

**Les couleurs originelles des Bronzes antiques - Sophie DESCAMPS**

**La chimie crée sa couleur... sur la palette du peintre - Bernard VALEUR**

**Atelier et athanors, rencontre avec un matériau - M.A. THEBAULT**

**Faïence et verre : de la protohistoire à l'histoire ancienne - Jean-Pierre MOHEN**

**L'art du verrier : des nanotechnologies depuis l'Antiquité ! - Jean-Claude LEHMANN**

**Soirée théâtrale : « Le système périodique » d'après Primo Levi**  
par Les Atomes Crochus et Les Attracteurs Étranges  
Richard- Emmanuel Eastes, Bérénice Collet

Ouvert à tous, notamment au public scolaire et universitaire, au-delà du cercle des spécialistes, afin de permettre à chacun de mesurer le rôle qu'a eu de tout temps la chimie dans la réalisation et dans la « vie » des œuvres artistiques.

Programme et inscription gratuite avant le 15 janvier : [www.maisondelachimie.asso.fr/colloques/chimie-et-art](http://www.maisondelachimie.asso.fr/colloques/chimie-et-art)












# Stratégie d'action pour l'environnement et le développement durable au CNRS

Gilberte Chambaud et Bernard Delay

**Résumé** Le CNRS a engagé une démarche concertée pluridisciplinaire pour participer à la construction de bases scientifiques solides afin de préserver l'environnement et de mettre en œuvre le développement durable. Les départements scientifiques « Chimie » et « EDD » sont des acteurs importants de cette politique. La présentation de leur politique scientifique et de leur interaction permet de comprendre comment peut se mettre en action une telle démarche et quelles peuvent en être les retombées scientifiques et pratiques.

**Mots-clés** Environnement, développement durable, chimie, CNRS.

**Abstract** The CNRS is engaged in a new interdisciplinary and concerted action aimed at the elaboration of strong scientific basis to preserve environment and to install sustainability. The scientific departments of "Chemistry" and "EDD" (Environment and Sustainability) are major actors of this politics. Their structure, their scientific policy and their interaction allow to understand how they deal with such a strategy and what can be the scientific and practical results.

**Keywords** Environment, sustainability, chemistry, CNRS.



L'environnement et le développement durable sont devenus aujourd'hui des enjeux stratégiques à l'échelle mondiale. Leur maîtrise implique l'acquisition de connaissances fondamentales et la compréhension du fonctionnement de systèmes environnementaux et sociétaux complexes dans lesquels la chimie est très

présente. Il est alors indispensable d'organiser la synergie entre toutes les disciplines académiques avec des allers et retours permanents entre recherche cognitive et recherche finalisée. Le CNRS, qui couvre un très vaste domaine scientifique, est particulièrement bien armé pour affronter ce nouveau type de challenge en s'appuyant sur la coordination, par ses départements scientifiques, de communautés scientifiques très diverses. Le Département Chimie est l'acteur et gestionnaire des différents aspects de la recherche en chimie. Sa stratégie est fortement inspirée par les demandes sociétales pour concilier l'acquisition de connaissances fondamentales nouvelles, le soutien aux indispensables enjeux économiques mondiaux et la mise en œuvre du développement durable. Pour cela, il interagit avec le Département « Environnement et Développement Durable » (EDD). Ce département transversal, créé en janvier 2006, a pour mission d'organiser la recherche sur l'environnement et pour le développement durable en coopérant avec l'ensemble des départements scientifiques et les deux instituts du CNRS (INSU et IN2P3).

## Le Département Chimie

La chimie du XXI<sup>e</sup> siècle doit faire face à un dilemme : elle est indispensable car elle accompagne et environne la vie quotidienne en s'efforçant de répondre à nos besoins, elle représente une force économique gigantesque parce qu'elle façonne toute la matière utilisée dans l'industrie, mais elle est redoutée car elle a la réputation de compromettre l'environnement et d'épuiser les ressources naturelles.

La politique scientifique et la stratégie d'action du Département Chimie du CNRS s'articulent dans un double

objectif de développement durable et d'amélioration des conditions de vie pour répondre aux cinq grands défis [1] auxquels les chimistes de ce millénaire sont confrontés : le respect de l'environnement, le partage des ressources, la maîtrise de l'énergie, la préservation de l'eau et l'amélioration de la santé.

Pour cela, nous favorisons la mise en place et l'organisation de recherches ciblées impliquant l'interdisciplinarité autour des trois thématiques suivantes.

### • Chimie du et pour le vivant

En étroite collaboration avec les chercheurs du domaine des « sciences du vivant », les chimistes synthétisent les molécules à vertu thérapeutique des médicaments de demain. Ils développent la modélisation et le biomimétisme pour créer les molécules les plus efficaces et les moins toxiques. Ils imaginent les vecteurs qui les amènent là où elles sont actives pour améliorer la santé.

### • Conception de nouveaux matériaux

La société se développe et consomme davantage pour ses besoins quotidiens en nourriture, habillement, habitation, transport, santé. Ceci nécessite de fabriquer de nouveaux objets et de concevoir et préparer les molécules ou matériaux pour les élaborer. Un souci majeur est maintenant de prévoir, dès la conception de ces objets, non seulement leurs propriétés, mais aussi leur vie après usage en les rendant soit dégradables, soit recyclables.

### • Chimie acteur du développement durable

Les chimistes développent de nouveaux outils pour l'analyse des polluants et des éléments traces pour prévenir les risques en repoussant les limites de détection. Ils proposent de nouvelles voies de synthèse pour faire mieux avec moins, ils miniaturisent la fabrication des matériaux de manière à produire plus en consommant moins de matière et d'énergie, réalisant ainsi, à moindre coût, la fonctionnalisation de la matière. Ils conçoivent de nouveaux matériaux plus performants, plus légers et plus résistants, pour les moyens de transports de demain, dans un souci d'économie d'énergie. Ils agissent dans le sens d'un développement durable en exploitant des matières premières renouvelables et en concevant de nouvelles réactions économes en atomes, en énergie et en déchets. Ils interviennent

dans tous les domaines des énergies renouvelables (piles à combustible, bio-piles, cellules photovoltaïques...). Ils doivent orchestrer le passage de la chimie du carbone à la chimie de l'hydrogène. Ils développent de nouvelles techniques analytiques pour l'étude des milieux très complexes : eau, sols, milieu vivant. Ils travaillent pour des conditions plus sûres pour la santé et l'environnement.

En France, une communauté d'environ 7 500 chimistes s'active pour faire avancer le front de la connaissance et répondre ainsi aux besoins actuels et futurs de la société et s'adapter aux nouveaux enjeux qui ne sont plus seulement économiques mais aussi environnementaux. Cette communauté de chimistes est répartie dans plus de 150 laboratoires de recherche – unités propres de recherche (UPR) ou unités mixtes de recherche (UMR) – contractualisés pour la plupart par le CNRS et les universités et distribués sur l'ensemble du territoire. En dehors de la région Île-de-France qui compte plus de 2 000 chimistes, on trouve d'importants sites où la chimie a une implantation historique, tels que les grands centres de Lyon, Strasbourg, Montpellier, Bordeaux, Marseille, Rennes, etc.

## Le Département « Environnement et Développement durable » (EDD)

La création du Département EDD puis du groupe de disciplines spécifique « Sciences de l'environnement » (SDE) en septembre 2006 a concrétisé la volonté du CNRS de mobiliser son potentiel humain et matériel sur les problématiques de l'environnement et du développement durable et de conférer aux champs de recherches correspondants un statut prioritaire. L'objectif est de faire émerger les sciences de l'environnement en tant que champ scientifique intégré, en associant toute une palette de recherches cognitives amont afin de jeter les bases de modalités nouvelles de développement durable et de gestion de l'environnement. Cela requiert un management scientifique ancré dans l'interdisciplinarité, à long terme, concerté au sein du CNRS et avec les partenaires institutionnels français et européens. Le département EDD dispose pour cela de moyens spécifiques dont il gère l'attribution et le suivi au bénéfice de toutes les unités de recherche du CNRS travaillant dans le domaine de l'environnement et du développement durable.

L'enjeu pour le Département EDD est de faciliter le développement de recherches fondamentales de haut niveau, inspirées par des questions sociétales, et la chimie est particulièrement concernée ; c'est aussi de mettre la recherche en situation d'éclairer la décision et de préparer l'action. Les questions posées par la société étant par nature complexes et relevant le plus souvent d'échelles de temps et d'espace multiples, le Département EDD promeut la recherche aux interfaces entre les grands champs disciplinaires que sont la chimie, l'écologie, les sciences de l'Homme et de la société, la physique, la biologie et les mathématiques. Il contribue également à doter la communauté scientifique des outils et des

démarches à long terme nécessaires pour l'élaboration des stratégies de développement durables et d'adaptation des changements planétaires. Il structure enfin cette même communauté afin d'améliorer les capacités du CNRS à répondre à court terme à des demandes sociétales urgentes. D'une manière générale, le Département EDD renforce la connexion entre la recherche et la société en s'alliant par convention avec des organismes de recherche finalisée et en développant le dialogue entre les chercheurs et les industriels, les collectivités locales, les bureaux d'étude.

Il est significatif de constater que les premières réalisations concrètes de cette nouvelle politique du CNRS relèvent de collaborations étroites entre les Départements EDD et Chimie. Il en est sorti le programme interdisciplinaire « Chimie pour le développement durable » créé en 2006 [2] et l'expertise collective concernant la réglementation REACH.

## Le nouveau défi pour la chimie : être formateur en développement durable

Lors de la grande campagne du passage au nouveau système de formation LMD (licence-master-doctorat) entre 2003 et 2005, ont été créés plus de 20 masters qui portent sur la chimie de l'environnement [3]. Pour une grande part, ces masters à finalité professionnelle ou recherche (ou les deux à la fois) se sont substitués à des formations antérieures de maîtrise de chimie ou chimie-physique et de DESS ou DEA dans les domaines de compétence des établissements porteurs des projets. La chimie de l'environnement y est généralement associée à d'autres champs, notamment le développement durable, les sciences de la Terre et la gestion de l'environnement. Les principaux domaines économiques concernés par ces masters impliquent la chimie de l'eau (marine ou continentale), de l'air, des sols (sciences de la Terre) et l'environnement industriel. S'il est incontestable que ces masters ont eu un très fort effet attractif sur les étudiants, il va devenir nécessaire d'en faire un premier bilan et d'analyser leurs débouchés professionnels.

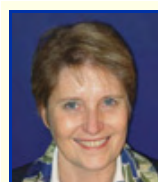
Une nouvelle étape dans la démarche des chimistes acteurs du développement durable est maintenant de mettre en œuvre les douze principes de la chimie verte dans l'enseignement et ce, dès les premières années d'étude de la chimie. Pour promouvoir cette idée, le Département Chimie du CNRS s'associe à la Division Enseignement-Formation de la SCF pour créer en 2008 un prix spécial récompensant des manipulations de travaux pratiques de chimie illustrant un ou plusieurs de ces douze principes. Un autre objectif est de renforcer les enseignements de chimie dans les cursus d'écologie et de géosciences ciblés sur l'environnement.

## Références

- [1] Cartier dit Moulin C., *L'Act. Chim.*, **2007**, 305, p. 3.
- [2] Cartier dit Moulin C., Rico-Lattes I., *L'Act. Chim.*, **2007**, 307, p. 54.
- [3] Bermond A., Chambaud G., Aaron J.-J., *L'Act. Chim.*, **2004**, 277-278, p. 80.

### Les douze principes de la chimie verte

- 1 Prévention avec la réduction des déchets
- 2 Conception de produits chimiques plus sûrs
- 3 Synthèses chimiques moins dangereuses
- 4 Utilisation de ressources renouvelables
- 5 Catalyse
- 6 Réduction des dérivés et auxiliaires
- 7 Économie d'atomes
- 8 Solvants et conditions de réactions plus sûres
- 9 Économie d'énergie
- 10 Conception d'un produit en fonction de sa dégradation
- 11 Analyse
- 12 Minimisation des accidents potentiels



G. Chambaud

### Gilberte Chambaud

est directrice scientifique du Département Chimie du CNRS et professeur de chimie à l'Université de Marne la Vallée<sup>1</sup>.

### Bernard Delay

est directeur scientifique du Département Environnement Développement durable du CNRS et directeur de recherche CNRS au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive de Montpellier<sup>2</sup>.



B. Delay

<sup>1</sup> Université Paris-Est, Laboratoire de Modélisation et Simulation Multi-Échelle, MSME, FRE-3160 CNRS Cité Descartes, Champs-sur-Marne, 77454 Marne-la-Vallée.

Courriel : Gilberte.Chambaud@cnrs-dir.fr

<sup>2</sup> Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive, CNRS, Route de Mende, 34095 Montpellier.

Courriel : Bernard.Delay@cnrs-dir.fr

# Le pôle

## « Environnement et développement durable » de l'Université de La Rochelle

Sylvain Lamare et Gérard Blanchard

### Résumé

Le développement durable et l'environnement constituent aujourd'hui une préoccupation constante affichée par tous les secteurs de la société. Dans ce contexte, l'Université de La Rochelle fédère aujourd'hui ses activités de recherche sur le développement de méthodologies et de technologies liées à ces domaines, au travers de recherches transdisciplinaires d'une grande partie de ses laboratoires. Cette restructuration importante, effectuée en partenariat avec le CNRS et discutée avec les collectivités territoriales, constitue un élément clé d'identification pour l'établissement et doit, par la mise en synergie des savoirs et savoir-faire au niveau de la recherche, favoriser par une approche volontairement multidisciplinaire une prise en compte plus globale des problématiques relatives à l'environnement et au développement durable, incluant tant l'approche scientifique que sociale et sociétale. Dans le cadre de son nouveau dispositif de recherche et de formations, des champs disciplinaires allant des sciences humaines et sociales, juridiques, de l'univers, du vivant, chimiques et des sciences pour l'ingénieur travaillent ensemble dans le cadre d'une fédération de recherche. Les sciences chimiques constituent un maillon important de ce nouveau dispositif de recherche.

### Mots-clés

**Recherche, formation, environnement, développement durable.**

### Abstract

**Structuring transdisciplinary research for environment and sustainable development at the University of La Rochelle**

Nowadays, sustainable development and environment are crucial topics because of the increasing pressure resulting from the societal demand. In this context, the University of La Rochelle carried out a profound mutation concerning its research potential resulting in the set up of a research federation involving most of the research unities of its campus. The mixing of different knowledges and know-how in transdisciplinary research actions, mixing people from very different scientific fields (starting from law, through geography, geology, biology, biochemistry, biotechnology, chemistry, mathematics, physics to civil engineering) will allow to have a more global approach of the problems that need to be solved, taking into account the different needs expressed by the different actors of the society on a single topic. In such a context, chemistry has an important role to play in the development of these transdisciplinary research actions.

### Keywords

**Research, education, environment, sustainable development.**

La problématique environnementale est inscrite au cœur de la démarche scientifique de l'Université de La Rochelle depuis sa création en 1993. D'abord essentiellement centrée sur les sciences de l'environnement à travers un prisme disciplinaire, elle a été progressivement reformulée et organisée thématiquement grâce à un travail transdisciplinaire pour la repositionner dans le champ de réflexion du développement durable, en y intégrant les sciences humaines et sociales ainsi que les sciences pour l'ingénieur et les sciences chimiques. Cette démarche intégrée est aujourd'hui revendiquée comme axe prioritaire du développement stratégique de l'établissement et elle s'est rapidement traduite par une meilleure structuration de la communauté universitaire rochelaise, lui apportant la dimension identitaire nécessaire à sa reconnaissance ; il en résulte une meilleure lisibilité de ses activités et une visibilité accrue dans le dispositif national de recherche.

Outre le besoin d'affirmer son identité, c'est aussi la volonté de participer aux grands débats de société, en tant qu'acteur de premier plan, qui a motivé l'Université de La Rochelle dans l'élaboration et la mise en place de son

pôle « Environnement et Développement Durable » : en se réappropriant ainsi le concept général EDD, elle lui apporte un contenu concret et explicite pour faire valoir toute sa spécificité. Par la même occasion, elle montre qu'une petite université, grâce à ses efforts de réorganisation et au développement d'une culture d'établissement, peut faire émerger un pôle de dimension nationale aussi bien sur le plan quantitatif que qualitatif.

À cet égard, le partenariat très étroit avec le CNRS a été déterminant, notamment par le travail mené en synergie avec son département scientifique « Environnement et développement durable » pour redimensionner les unités de recherche dans un esprit interdisciplinaire et en faire émerger les axes fédérateurs qui constituent le socle du pôle rochelais EDD.

Ce pôle rochelais s'est concrétisé à l'occasion de l'élaboration du contrat quadriennal Recherche de l'Université de La Rochelle (2008-2011), qui regroupe des composantes complémentaires de recherche et de formation autour d'une fédération de recherche, véritable outil politique et organisationnel.

## La Fédération de recherche en environnement pour le développement durable (FREDD)

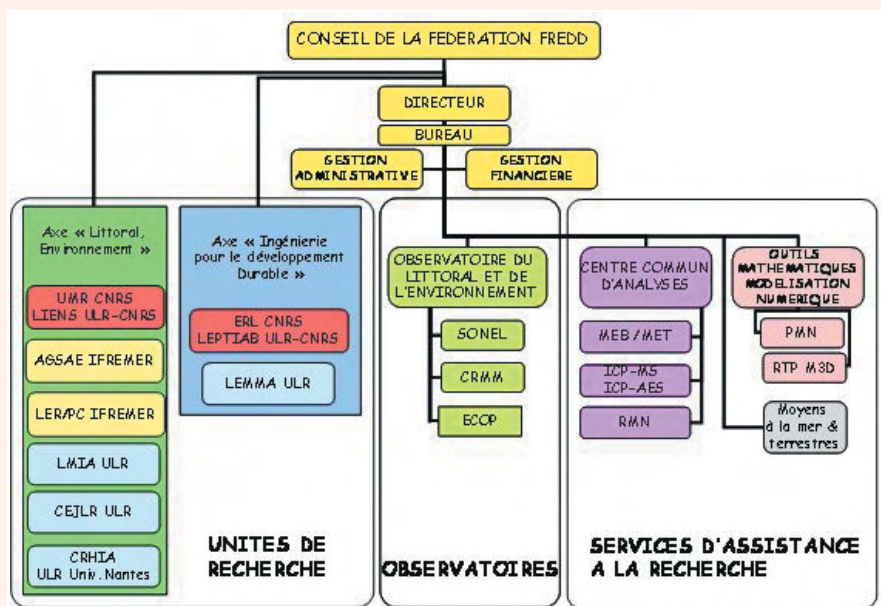
L'Université de La Rochelle et le CNRS ont travaillé conjointement pour faire émerger cette structure fédérative à visibilité nationale regroupant environ 350 personnes<sup>(1)</sup> et impliquant également les laboratoires de l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer) de la région Poitou-Charentes. Elle ne consiste pas seulement en un regroupement d'unités de recherche, mais vise aussi et surtout une réorganisation profonde de celles-ci avec des fusions pour asseoir et promouvoir l'approche

transdisciplinaire autour de deux axes transversaux : « Littoral, environnement » et « Ingénierie pour le développement durable ». Cette fédération accueille également un ensemble d'observatoires dans le domaine de la géophysique (la mesure de l'évolution du niveau de la mer dans un réseau international), de la biologie de la conservation (le suivi et la coordination d'un réseau national d'échouage des mammifères marins) et des sciences humaines et sociales (suivi de l'évolution des côtes et des pratiques sur le littoral). Enfin, c'est un ensemble très structuré de services d'aide à la recherche (centre commun d'analyses, outils mathématiques et modélisation numérique, plateforme de moyens à la mer). L'encadré 1 expose la structure fonctionnelle de la FREDD.

### Encadré 1

#### Structure fonctionnelle et organigramme de la Fédération de recherche en environnement pour le développement durable (FREDD)

- **Projet d'école doctorale « Sciences pour l'environnement et le développement durable » (SEDD)** : cette école s'appuie complètement sur la FREDD pour proposer une offre de formations disciplinaires, grâce à ses laboratoires de recherche, et de formations transversales.
- **Contrat de projets État/Régions (2007-2013)** : la concomitance des phases préparatoires du CPER et du contrat quadriennal Recherche a permis de mettre en œuvre une démarche globale très cohérente avec la négociation de deux grands projets fédérateurs et très structurants pour la FREDD : le projet « Littoral » propre à l'Université de La Rochelle et le projet « Éco-industries » développé en partenariat avec l'Université de Poitiers.
- **Mise en place d'un « Groupement de recherche sur la ressource en eau du bassin versant du marais poitevin et de sa zone littorale » (GREBE)** : il s'agit d'une collaboration pluri-organismes (Universités de La Rochelle et de Poitiers, CNRS, Ifremer, INRA, BRGM, Cemagref) sur la thématique de la ressource en eau pour l'identification d'une « zone atelier » couplant les bassins versants et leur zone littorale sur la façade maritime de la région Poitou-Charentes. Ce projet réunit des géologues, hydrogéologues, biologistes, physiologistes, biochimistes, chimistes analytiques, géochimistes, mais aussi les gestionnaires, producteurs, utilisateurs et décideurs impliqués dans la gestion de la ressource. Les objectifs de ce groupe concernent la connaissance précise et complète de la ressource en eau et de sa gestion sur la zone atelier, couplée à l'analyse de la perturbation des différents écosystèmes et de l'impact économique de l'utilisation et de la pollution dues aux activités humaines.
- **Mise en réseau du pôle rochelais avec les autres grands pôles métropolitains à l'échelle du « Littoral Atlantique »** pour mettre en adéquation et en synergie aux niveaux interrégional, national et européen les démarches des Universités de La Rochelle, de Nantes, de Bordeaux I et du Centre Ifremer de Nantes.



LIENS : Littoral Environnement Sociétés (unité mixte de recherche résultant de la fusion de quatre unités préexistantes) ; AGSAE : Amélioration Génétique Santé Animale Environnement (Département de l'Ifremer) ; LER/PC : Laboratoire Environnement Ressources/Poitou-Charentes (structure de l'Ifremer) ; LMIA : Laboratoire de Mathématiques Image et Applications ; CEJLR : Centre d'Études Juridiques de La Rochelle ; CRHIA : Centre de Recherche Historique Internationale Atlantique ; LEPTIAB : Laboratoire d'Étude des Phénomènes de Transfert et de l'Instantanéité : Agroressources et Bâtiment ; LEMMA : Laboratoire d'Étude des Matériaux en Milieux Agressifs ; SONEL : Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales ; CRMM : Centre de Recherche sur les Mammifères Marins ; ECOP : Évolution des Côtes et des Pratiques ; PMN : Plateforme de Modélisation Numérique ; RTP M3D : Réseau Thématique Prioritaire Mathématique et Décision pour le Développement Durable.

## Quelques exemples des recherches transdisciplinaires impliquant la chimie dans ce nouveau dispositif de recherche

### Valorisation à des fins d'applications « Santé » de molécules issues du milieu marin

L'environnement marin est probablement celui où bio-, chimio-, et pharmacodiversités sont les plus importantes et encore relativement peu explorées et exploitées. Dans ce cadre, et de par sa localisation littorale, il était tout à fait naturel que la rencontre entre chimistes, biochimistes, biologistes marins et physiologistes permette d'initier des travaux pluridisciplinaires concernant la recherche, l'identification et la valorisation de produits de la mer en cancérologie.

Qu'il s'agisse de projets relatifs à la synthèse et à l'évaluation biologique d'alkaloïdes marins pour la préparation de nouveaux indigoides antitumoraux (*figure 1a*) ou de la purification et la caractérisation de pigments de micro-algues marines utilisables en photochimiothérapie<sup>(2)</sup> des cancers (*figure 1b*), la rencontre des différents champs disciplinaires était essentielle afin de pouvoir assurer toutes les étapes concernant l'extraction, la purification et la caractérisation de nouvelles molécules cibles, avant de pouvoir envisager leur production (synthèse ou extraction), l'étude des pharmacomodulations possibles et les tester *in vitro* et *in vivo*.

La rencontre entre les différentes communautés scientifiques permet non seulement par leur complémentarité d'avancer de façon plus rapide, mais surtout de définir la stratégie de valorisation la plus adéquate (synthèse ou exploitation de la ressource), en prenant en compte certaines

données telles que la disponibilité des espèces concernées d'où sont extraites les molécules et l'impact écologique que pourrait avoir l'utilisation par l'homme d'une espèce dans un écosystème pour ses propres besoins.

### Durabilité des matériaux : enjeux économiques et impératifs écologiques

Aujourd'hui, les coûts induits par la corrosion dans un pays industrialisé représentent 4,5 % de son PIB (la corrosion détruit dans le monde 5 tonnes d'acier par seconde). Le souci d'efficacité dans la lutte contre la corrosion (plus que justifié dans des domaines sensibles : aéronautique, nucléaire) a conduit à des solutions parfois extrêmement nocives pour l'environnement, notamment dans le domaine des revêtements et traitements de surface (peintures antisalissures au tributylétain (voir l'article de M. Marchand), revêtements de cadmium, chromatation...)

Les revêtements et traitements de surface (RTS) restent un domaine industriel particulièrement polluant et les nouveaux enjeux de l'anticorrosion sont donc essentiellement d'ordre environnemental. Il est impératif aujourd'hui de remplacer les traitements et procédés ne répondant pas aux normes par des procédés dont l'impact environnemental est le plus réduit possible. Dans ce cadre, physiciens, chimistes et biochimistes travaillent sur des sujets aussi divers que le développement de peintures anticorrosion sans solvant, la mise au point de traitements de surface à base de cérium en substitution de la classique chromatation ainsi qu'au développement d'alliages à base de zinc à dissolution lente.

Si le développement de nouveaux procédés plus propres est l'une des voies, l'augmentation de la durée de vie d'un matériau est la seconde approche possible permettant de minimiser l'impact environnemental ; mais l'allongement de la durée de vie d'un matériau nécessite une compréhension détaillée des processus physico-chimiques mis en jeu par le système de corrosion (métal/interface/environnement). Là encore, physiciens, chimistes et biochimistes interagissent afin d'avancer dans la connaissance des phénomènes de biocorrosion des aciers en milieu marin. L'approche pluridisciplinaire est indispensable pour assurer : la caractérisation de l'action des bactéries sulfurogènes pouvant induire des cas de corrosion catastrophiques. Par extension, ces recherches concernent aussi la problématique du stockage des fûts en acier destinés à contenir les déchets radioactifs.

### L'alliance de la catalyse et de l'ingénierie

Dans ces derniers exemples, la chimie se retrouve encore une fois au centre des activités de recherche qui l'amènent à côtoyer des secteurs disciplinaires relatifs aux sciences pour l'ingénieur (génie civil et génie des procédés principalement).

Parmi les actions de recherches développées, un axe important concernant la qualité de l'air des ambiances habitables permet le développement d'un système de traitement d'air incluant une étape biocatalytique. L'approche pluridisciplinaire permet dans ce cadre, par une approche intégrée incluant le diagnostic, la prise en compte de l'aéraulique<sup>(3)</sup> des bâtiments, l'étude des phénomènes de transferts solide/gaz sans oublier l'aspect énergétique et de répondre plus complètement aux nouveaux besoins de traitement d'air, compatible avec les impératifs des normes HQE (haute qualité environnementale).

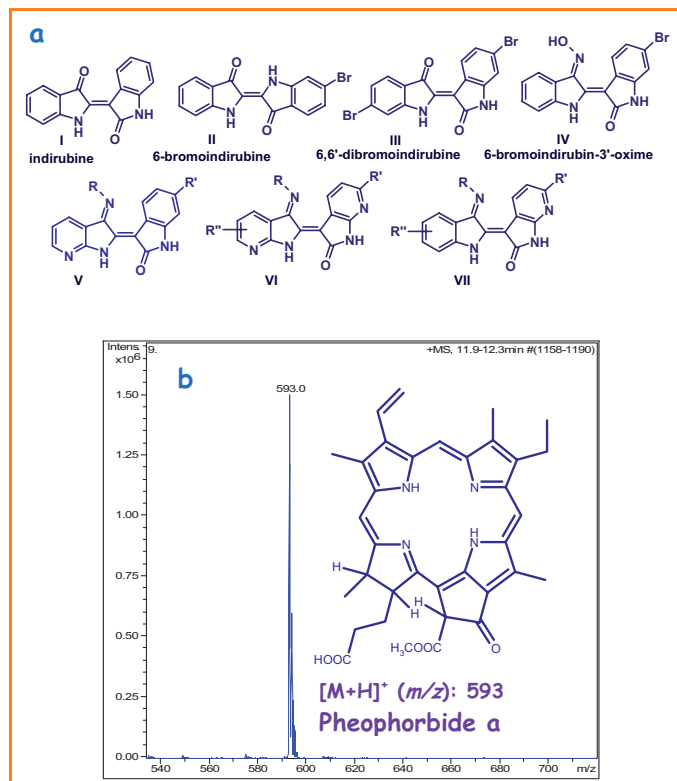


Figure 1 - Valorisation de molécules issues du milieu marin à propriétés antitumorales. (a) Indirubines isolées du milieu marin (I-IV) et indigoïdes de synthèse envisagés (V-VII) ; (b) Pigment de microalgues marines utilisable en photochimiothérapie<sup>(2)</sup> des cancers.



Figure 2 - Unité pilote de biocatalyse solide/gaz (Université de La Rochelle).

La catalyse se positionne aussi comme un acteur important concernant la valorisation du carbone végétal. Physiciens, thermodynamiciens, spécialistes des procédés, biochimistes et enzymologistes travaillent de concert pour l'optimisation de procédés d'hydrolyse de biomasses lignocellulosiques (parois végétales, fibres, bois...) et d'amidons pour la production de sucres fermentescibles<sup>(4)</sup>. Le couplage de traitements thermo-hydro-mécaniques facilitant l'hydrolyse enzymatique en rompant la cristallinité de la cellulose et des amidons natifs permet d'envisager le développement de nouveaux procédés plus propres et plus économiques, répondant aux principes de la chimie verte.

Les activités de recherches concernant la valorisation de molécules naturelles ont ainsi au cours des dernières années permis de développer des procédés d'estérification sans solvant à l'interface solide/gaz mettant en œuvre un biocatalyseur et ce, jusqu'au niveau industriel (figure 2).

Enfin, et toujours en raison de sa position littorale, les unités de l'Université de La Rochelle, impliquées dans le cadre d'un GDR (groupement de recherche) national (SEA<sup>PRO</sup>) travaillent aussi sur la valorisation de sous produits de la pêche et de l'aquaculture, avec pour objectif le développement par des technologies douces incluant des procédés d'hydrolyse et de séparation douces, de nouveaux extraits ou hydrolysats à forte valeur ajoutée pour l'alimentation et la santé humaine.

## Conclusion

Par le biais de cette nouvelle organisation de la recherche, basée sur le nécessaire regroupement de compétences en sciences humaines et sociales, sciences de l'univers, sciences pour l'ingénieur, sciences du vivant et sciences chimiques pour relever les défis des prochaines décennies, l'Université de La Rochelle s'est réorganisée pour pouvoir apporter une réponse la plus globale possible et les outils nécessaires pour, en concertation avec les décideurs et usagers, répondre à la demande du développement durable et de la préservation de l'environnement.

Outre l'aspect recherche, cette restructuration a des effets importants sur la refonte de son offre de formation qui, mise en adéquation avec la structure recherche, doit permettre, profitant des avantages du système LMD (licence-master-doctorat), de définir les nouveaux métiers de demain et des formations spécifiques, même si atypiques dans le schéma actuel de formation.

Par l'investissement de chacun et la volonté de confronter pour mieux les assembler les compétences de chaque champ disciplinaire impliqué, cette refonte importante doit nous permettre de mieux répondre aux besoins futurs, en transmettant, outre la philosophie transdisciplinaire, des connaissances de bases robustes au travers de cette activité recherche repensée et rationalisée.

## Notes

- (1) Quelques chiffres clés : 158 enseignants-chercheurs, chercheurs et cadres de recherche ; 81 personnels d'assistance à la recherche et administratifs ; 117 doctorants.
- (2) *Photochimiothérapie* : méthode de traitement de certaines maladies de la peau associant l'administration de substances exerçant une action photosensibilisante (augmentant la sensibilité de la peau aux rayonnements ultraviolets) et l'irradiation des lésions cutanées à traiter par les ultraviolets longs (UVA).
- (3) *Aéraulique* : distribution de l'air.
- (4) *Fermentescible* : se dit d'un sucre qui peut se transformer en alcool sous l'action des levures.



S. Lamare

Sylvain Lamare et Gérard Blanchard sont professeurs à l'Université La Rochelle\*.



G. Blanchard

\* UMR 6250 LIENSS, Université de La Rochelle, 2 Rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle.  
Courriels : sylvain.lamare@univ-lr.fr ; gerard.blanchard@univ-lr.fr

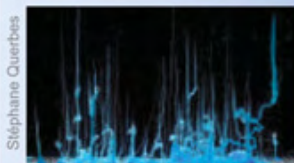
## CONCOURS HAÏKUS - JARDINS CHIMIQUES

Les Atomes Crochus lancent un concours de poésie de science destiné aux collégiens et lycéens, qui sont invités à composer des haïkus pour illustrer les photographies de l'exposition *Recréer la vie ? Jardins chimiques et cellules osmotiques*.

Comprendre la vie, voire la recréer : tel est l'un des grands défis de la science qu'a tenté de relever le chimiste Stéphane Leduc au XX<sup>e</sup> siècle, en inventant la biologie synthétique.

Un siècle plus tard, deux chimistes (Richard Emmanuel Eastes et Clovis Darrigan) se sont lancés sur ses traces et ont reproduit ses expériences historiques (voir la photo).

Aussi fragile que les jardins chimiques de Stéphane Leduc, mais tout aussi poétique : le haïku, court poème d'origine japonaise en 3 vers et 17 syllabes qui rend hommage à l'éphémère, aux petits riens de la vie, semble tout indiqué pour parler de ces étranges objets de sciences... la science aussi peut générer du rêve !



Stéphane Querbes

Un jardin de l'osmose : de splendides et éphémères paysages minéraux générés par osmose, par des cristaux de sulfate de cuivre déposés dans une solution de silicate de sodium.

Sélection des meilleures propositions pour accompagner les photographies de l'exposition, qui séjournera une semaine dans les établissements scolaires. Autres récompenses : kits de jardins chimiques, appareils photos numériques...

Participation jusqu'au 28 février 2009 : [www.atomes-crochus.org/haikus](http://www.atomes-crochus.org/haikus)

# La pollution atmosphérique particulaire sème le trouble

Pierre-Charles Maria

- Résumé** La pollution atmosphérique particulaire est un phénomène qui n'est pas nouveau mais qui évolue. La pollution soufrée est en baisse alors que la pollution carbonée tend à se maintenir avec une tendance à la production de particules ultra-fines. Les effets des aérosols d'origine anthropique sur la santé et le climat sont évoqués, ainsi que les solutions techniques et politiques susceptibles d'être mises en œuvre pour en réduire l'impact.
- Mots-clés** **Aérosols atmosphériques, pollution de l'air, changement climatique, effets sur la santé.**
- Abstract** **Particulate atmospheric pollution makes trouble**  
Particulate atmospheric pollution is not a recent phenomenon but is evolving. Pollution by sulfur is dropping whereas carbonaceous pollution is keeping up with a tendency to produce ultra-fine particles. Health and climate effects of aerosols of anthropic origin are raised along with the technical and political solutions which can be used to cope with their impact.
- Keywords** **Atmospheric aerosols, air pollution, climate change, health effects.**

## Histoire et origine des pollutions

La pollution atmosphérique n'est pas un phénomène nouveau, et les effets d'une pollution déjà ancienne sur un élément architectural peuvent être clairement mis en évidence lorsqu'un événement bien identifié a concouru à l'isoler de la pollution ambiante ultérieure. C'est le cas des statues représentant les rois de Juda qui ornent la façade principale de Notre-Dame de Paris. Celles qui sont visibles actuellement ont été mises en place par Viollet-le-Duc au XIX<sup>e</sup> siècle ; les statues d'origine avaient été jetées à terre durant la Révolution française. Elles sont restées en tas sur le parvis seulement quelques années et enfouies par la suite. Vingt et une des têtes des vingt huit statues ont été retrouvées il y a trente ans lors de travaux de terrassement dans Paris et sont maintenant exposées au Musée national du Moyen Âge en l'Hôtel de Cluny. Les croûtes grises visibles sur ces fragments de statues ont été analysées au Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques, le LISA [1]. Elles sont essentiellement constituées d'une gangue de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) emprisonnant des débris de bois imbrûlé. Le bois était le combustible quasi exclusivement utilisé à Paris avant la Révolution française. Les croûtes noires, souvent beaucoup plus épaisses, et moins denses observées actuellement sur les monuments ont une composition très riche en gypse ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ), indication d'une pollution soufrée, et contiennent des cendres volantes provenant de la combustion du charbon et des fiouls lourds. Elles se sont formées après la révolution industrielle. La pollution soufrée due à la combustion du charbon a prévalu en Europe et particulièrement en Angleterre pendant une grande partie du XIX<sup>e</sup> siècle et jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Le brouillard londonien, le « pea-soup fog », est célèbre.

Le peintre français Claude Monet était fasciné par les couleurs produites par la diffraction de la lumière du soleil au travers de cet épais brouillard. Il a composé toute une série

de tableaux sur ce thème. L'un d'entre eux, *Londres, le Parlement. Trouée de soleil dans le brouillard*, daté de 1904, est visible au Musée d'Orsay. Un autre, une huile sur toile de 81 x 92 cm intitulée *Londres, le Parlement, effet de soleil dans le brouillard* (figure 1), datée également de 1904, a dépassé les 20 millions de dollars lors d'une vente aux enchères chez Christie's à New York en 2004. D'après une intéressante étude à la fois historique et astronomique menée par des collègues de l'Université de Birmingham [2], ce tableau aurait été peint d'après nature durant l'année 1900, en fait le 9 mars, lors de l'un des séjours du peintre à



Figure 1 - Claude Monet, *Londres, le Parlement, effet de soleil dans le brouillard* (1904) : une vision artistique du « pea-soup-fog » londonien du début du XX<sup>e</sup> siècle. Photo Production MY Arts Inc. (<http://www.productionmyarts.com/>).



Londres. Il semble donc que Monet ait daté ses toiles au moment de leur vente et non pas au moment où il les a peintes. Baker et Thornes qui se sont attachés à déterminer avec rigueur l'emplacement d'où le peintre aurait pu avoir la vue reproduite sur la toile et à dater avec précision la position du soleil se proposent, maintenant qu'ils ont la quasi-certitude d'avoir là une fidèle représentation de la pollution atmosphérique particulière de l'époque, d'en déterminer la nature et l'intensité par l'étude des couleurs ; affaire à suivre !

Le brouillard londonien n'a hélas pas laissé beaucoup de souvenirs aussi exaltants. Un document au nom évocateur, *The London smog disaster of 1952 – Days of toxic darkness*, mis en ligne par la Faculté de médecine de l'Université d'Edinburgh, retrace les événements de 1952 [3]. Les décès suite à des bronchites ou des pneumonies avaient été multipliés par sept.

La combustion du charbon riche en soufre, produisant du dioxyde de soufre puis des sulfates et de l'acide sulfurique présents dans les aérosols et les pluies acides, a constitué la source principale de la pollution atmosphérique d'origine anthropique jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Des mesures énergiques ont été prises à partir de cette époque pour réduire sensiblement la pollution par le soufre (« Clean air act » de 1956 au Royaume-Uni par exemple). Les effets ont été bien visibles.

Un exemple d'adaptation des espèces à la pollution atmosphérique – bien connu des professeurs de SVT (sciences de la vie, de la Terre et maintenant de l'Univers) – est celui de la phalène du bouleau (*Biston betularia*) dont la forme *carbonaria*, noire, était dans les années 50 nettement plus abondante en Angleterre dans les zones industrielles polluées que la forme *typica*, blanche, alors que c'est cette variante qui prédomine très largement dans les zones rurales peu ou pas polluées [4]. Cependant, cette pollution soufrée étant en diminution constante de cette époque jusqu'à nos jours, l'adaptation inverse a pu être observée. La forme *carbonaria* de ce papillon est en baisse sensible dans les zones industrielles comme le montrent de nombreuses études, en particulier aux États-Unis [5]. Cette variation peut être corrélée de manière significative à la diminution des concentrations en SO<sub>2</sub> dans l'air ambiant. Dans les années 50, l'évaluation de la pollution atmosphérique était essentiellement liée au mesurage des oxydes de soufre et des fumées noires. Un suivi de l'évolution des niveaux moyens hivernaux des fumées noires dans Paris intra-muros permet de constater que les changements de combustibles ont permis d'abaisser cette pollution par un facteur 10, la faisant passer d'environ 180 µg/m<sup>3</sup> pour l'hiver 1956-1957 à moins de 17 µg/m<sup>3</sup> pour l'hiver 2004-2005 (figure 2).

L'évolution récente de la nature de la pollution atmosphérique peut à nouveau être observée par ses effets sur des éléments architecturaux du patrimoine, comme l'ont montré les études du LISA pour des changements plus anciens tels que la révolution industrielle et le passage du bois au charbon comme combustible principal. Après une visite au Musée de Cluny pour admirer les têtes des rois de Juda, passez donc dans la Cour Carrée du Louvre pour observer la statue d'Apollon, un marbre de Carrare du milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. La statue est située dans la deuxième niche à droite du pavillon de Saint Germain l'Auxerrois. Elle a subi un sablage lors de la grande restauration du Louvre en 1985. En 1994, la main droite de la statue a été cassée par un vandale. La main a été récupérée et mise à l'abri. Entre les doigts, inaccessibles au sablage, nos collègues du LISA ont pu observer une croûte noire épaisse formée avant 1985, constituée principalement de gypse cimentant des cendres volantes [6]. Le dos de cette main est recouvert d'une fine croûte gris foncé formée entre 1985 et 1994 et la section du bras cassé en 1994 a été à nouveau recouverte d'une poussière gris clair (l'analyse a été faite en 2003) contenant moins de cendres volantes micrométriques et plus de suies carbonées nanométriques, sans doute en liaison avec la diésélisation importante du parc automobile.

Au niveau mondial, c'est certainement dans les grandes agglomérations que la pollution atmosphérique particulière pose le plus de problèmes au niveau sanitaire – la situation étant bien plus mauvaise dans les mégapoles des pays en développement (Shanghai, Delhi, Le Caire par exemple) que dans les grandes villes nord-américaines ou européennes pourtant réputées autrefois pour la mauvaise qualité de l'air (Los Angeles, Londres...). Dans son récent livre *Ma vérité sur la planète*, pamphlet contre une écologie intégriste, Claude Allègre évoque à grands traits, mais avec lucidité, la question.

### Analyses et conséquences de la pollution

En France (métropole et départements et territoires d'outre-mer), la surveillance réglementaire de la pollution atmosphérique est assurée par les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) de compétence régionale ou infrarégionale, regroupées au sein de la Fédération ATMO<sup>(1)</sup>. La pollution atmosphérique particulière est actuellement suivie en continu par la mesure en masse des particules qualifiées de grossières (PM 10) et/ou des particules fines (PM 2,5) au moyen d'analyseurs abrités dans des stations fixes ou mobiles. Les PM 10 et les PM 2,5 sont respectivement les particules en suspension dans l'air dont le diamètre aérométrique est inférieur ou égal à 10 et 2,5 µm (PM vient de l'anglais « particulate matter » et peut être traduit par « matière particulaire »). Dans les agglomérations de plus de 100 000 habitants, la qualité de l'air est communiquée chaque jour de manière synthétique au moyen de l'indice ATMO dont la valeur varie de 1, « très bon », à 10 « très mauvais ». Le pire des quatre sous-indices (SO<sub>2</sub>, PM 10, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) en fixe la valeur. Des cartes des prévisions de la pollution de l'air sont maintenant en accès libre grâce au dispositif Prev'Air<sup>(2)</sup>. Pour l'ozone, le dioxyde d'azote, les PM 10, les PM 2,5 et les particules désertiques – celles qui proviennent de l'érosion des sols arides –, les cartes sont disponibles à l'échelle européenne ou pour la France seulement. Des cartes de prévision à l'échelle du globe sont également disponibles pour l'ozone et les

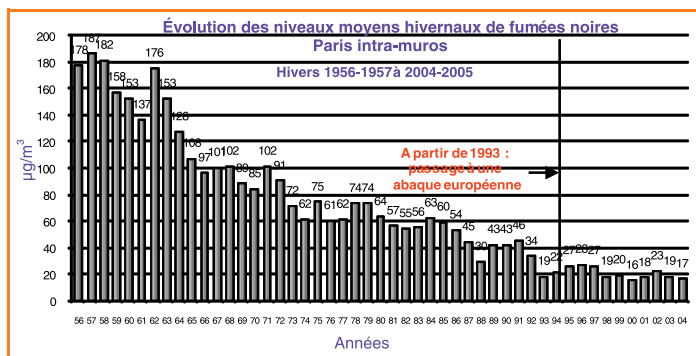


Figure 2 - Pendant les cinquante dernières années, les niveaux moyens hivernaux des fumées noires ont été divisés par un facteur 10 dans Paris intra-muros. Document AIRPARIF.

particules désertiques, ces polluants étant en effet susceptibles d'affecter de très vastes zones dépassant l'échelle du continent.

La matière particulaire en suspension dans l'air qui forme l'aérosol atmosphérique a deux origines, quoique parfois la frontière entre les deux ne soit pas nette. L'une est considérée comme naturelle – activité volcanique, érosion éolienne des sols, embruns marins, certains grands feux de végétation –, l'autre étant qualifiée d'anthropique, plus directement liée à l'activité humaine. Dans ce cas, on distingue l'aérosol primaire de l'aérosol secondaire. Le premier est émis directement sous forme solide : rejets à partir des cheminées et des pots d'échappement, remise en suspension des débris de pneus et des revêtements routiers... Le second est formé par des transformations physiques (condensation, nucléation...) et chimiques (oxydation photochimique, polymérisation...) à partir des composés volatils émis par les sources fixes et les sources mobiles [7]. Les particules en suspension dans l'air sont habituellement classées, selon leur taille, en trois catégories : grossières, fines et ultra-fines. Les particules grossières, au diamètre supérieur à 2,5  $\mu\text{m}$  ont pour origine principale les sols et les sels marins. Les particules fines (entre 0,1 et 2,5  $\mu\text{m}$ ) et les particules ultra-fines (moins de 0,1  $\mu\text{m}$ ) proviennent principalement de l'utilisation des combustibles fossiles. La taille des particules, leur surface et leur forme, ainsi que leur composition chimique, déterminent les risques pour la santé.

En matière de toxicité, il est reconnu que ce sont les particules les plus fines qui présentent le plus de danger par inhalation [8] et l'on voit même un nouveau champ disciplinaire émerger : la nanotoxicologie [9]. Compte tenu du temps passé dans les environnements clos, la question des expositions humaines aux particules ultra-fines dans l'air intérieur se pose nécessairement. Un état des connaissances a été présenté récemment dans la revue *Pollution Atmosphérique* [10]. En ce qui concerne l'air extérieur, les spécialistes de l'effet de la pollution de l'air sur la santé, s'appuyant sur les travaux du réseau APHEIS (« Air Pollution and Health: a European Information System ») [11], dont la coordination est assurée par l'Institut de veille sanitaire, font pression sur l'Union européenne pour que le projet de directive CAFE (« Clean Air for Europe ») soit plus contraignant en matière de PM 2,5. L'abaissement des

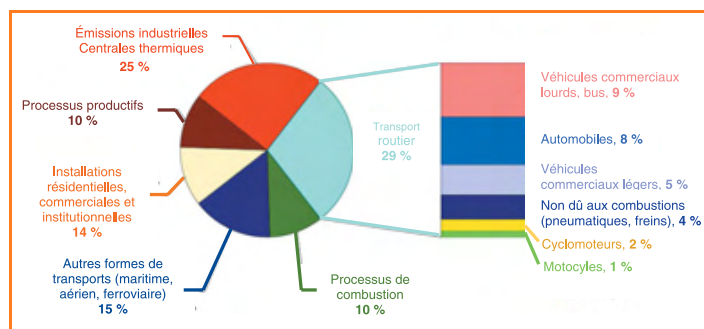


Figure 4 - Contributions d'origine anthropique aux émissions de PM 10 exprimées en pourcentage : l'exemple de l'Italie.

valeurs réglementaires envisagé a déjà pour effet d'augmenter les exigences en matière de métrologie de la surveillance en continu : correction des mesures par TEOM<sup>(3)</sup> pour tenir compte de la composante particulaire volatile et densification des sites de mesurage PM 2,5.

La fraction grossière des PM 10 (diamètre compris entre 2,5 et 10  $\mu\text{m}$ ) est majoritairement constituée de poussières minérales et de sels de mer alors que la fraction fine (moins de 2,5  $\mu\text{m}$ ) contient principalement de la matière organique et une proportion importante de suies carbonées (figure 3).

En moyenne, si les mesures sont effectuées en un même lieu, la quantité en masse des PM 2,5 est très grossièrement égale à la moitié de ce que l'on observe pour les PM 10. Le rapport PM 2,5/PM 10 change en cas d'évènement particulier. Par exemple à Marseille, on a pu noter une diminution sensible de ce rapport lors de feux de forêt ou de l'arrivée de masses d'air chargées de poussières en provenance du sud de la Méditerranée (les particules désertiques du dispositif Prev'Air).

Comme le montre une étude rendue publique en Italie en 2005, les transports, tous modes confondus (aérien, maritime, ferroviaire et routier) représentent près de 45 % des émissions d'origine anthropique de PM 10. Les transports routiers à eux seuls sont à l'origine de 29 % de ces émissions. L'étude Cirillo donne le détail des contributions à cette pollution d'origine routière en distinguant ce qui provient de la combustion des carburants des divers véhicules (poids lourds et autobus, voitures particulières, véhicules utilitaires légers, cyclomoteurs et motos) de ce qui est dû à l'usure des pneumatiques et des freins (figure 4). Ce sont bien sûr les véhicules diesel relativement anciens, ne correspondant pas aux normes récentes et pas encore équipés de filtres à particules, qui émettent le plus. La norme Euro 4, applicable pour les véhicules neufs depuis le 1<sup>er</sup> octobre 2006, permet d'abaisser les émissions de particules de 80 %. Ce sont les nanoparticules (diamètre aérométrique inférieur à 50 nm) qui sont de loin les plus nombreuses alors qu'elles ne représentent qu'une faible partie de la masse totale.

L'étude APHEIS portant sur vingt six villes situées dans quinze des pays de l'Union européenne et totalisant 41,5 millions d'habitants [11] a montré que si l'on pouvait réduire à 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  la teneur annuelle moyenne en PM 2,5, 4 400 décès imputables à la pollution particulaire pourraient y être évités. Ce « plafond de concentration » pour la protection de la santé humaine fixé à 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  qui est un objectif à atteindre au 1<sup>er</sup> janvier 2010 est encore souvent dépassé près des axes de circulation intense (27  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne en 2005 à Auteuil sur le boulevard périphérique, 42  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les PM 10) et 22 000 décès prématurés

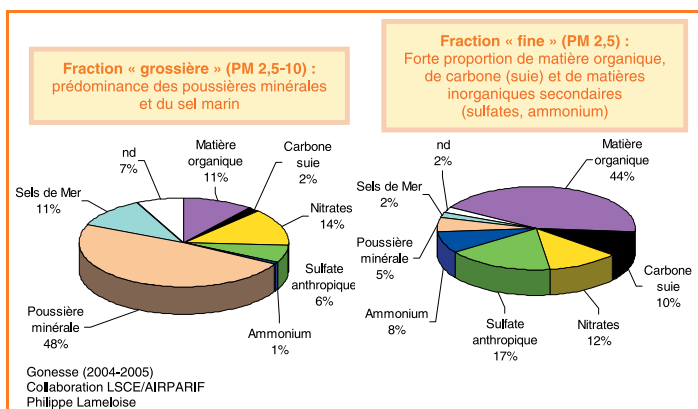


Figure 3 - Analyse type de la composition chimique de l'aérosol en région parisienne (Gonesse) – Collaboration entre AIRPARIF et le Laboratoire des sciences du climat et l'environnement (LSCE).

La fraction grossière des PM 10 est majoritairement inorganique alors que la fraction fine (PM 2,5) contient principalement de la matière organique et une proportion importante de suies carbonées.

pourraient être évités dans les vingt six villes, objet de l'étude, si l'on était en mesure de descendre à  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Rappelons que l'effort à faire dans les grandes agglomérations des pays en développement est sans commune mesure. Alors que, pour comparaison, la concentration moyenne des PM 10 obtenue à partir d'un échantillon constant de stations urbaines dans Paris intra-muros en 2005 était de  $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les PM 2,5), la concentration en PM 10 dans New Delhi, à proximité d'un hôpital récent, peut dépasser les  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  comme c'était le cas au début du mois de janvier 2007.

La pollution atmosphérique particulaire n'est pas le seul fait de l'Homme. Elle provient aussi de phénomènes naturels, parfois cataclysmiques. La palme revient alors aux grandes éruptions volcaniques : El Chichon au Mexique en 1982, le mont Pinatubo aux Philippines en 1991, pour ne citer que les plus récentes. Après l'éruption du Pinatubo, les observations ont montré que la température moyenne de notre planète avait baissé de  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ces épisodes d'intense pollution atmosphérique d'origine naturelle sont-ils les seuls à influencer le climat ? La réponse est non.

Daniel Rosenfeld de l'Université hébraïque de Jérusalem et ses collaborateurs ont montré que les précipitations orographiques – celles qui se manifestent lorsque des masses d'air humide se refroidissent et forment des nuages en remontant le long des pentes des reliefs – sont perturbées par la pollution atmosphérique particulaire d'origine anthropique. La diminution, au cours des années, des précipitations de ce type sur les versants des reliefs sous les vents provenant de grandes villes comme en Californie, en Israël ou en Chine en est la preuve [12].

## Des solutions techniques et politiques

Les évolutions de la pollution atmosphérique sont-elles de nature à modifier durablement le climat ? Les prévisions actuelles sur l'évolution du climat sont préoccupantes [13], et le coût sociétal induit par ce changement peut devenir considérable. Sans pour cela céder au catastrophisme que dénonce Claude Allègre, force est de reconnaître que des orientations drastiques doivent être prises dès maintenant. Comme l'indique le rapport de l'économiste Sir Nicholas Stern, elles apparaissent comme économiquement supportables.

La réduction massive des émissions de gaz à effet de serre est la voie actuellement préconisée pour tenter de stabiliser le réchauffement de la planète. Toutefois, comme l'indique le rapport annuel 2006 du secrétariat de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), les émissions de gaz à effet de serre dans les pays industrialisés sont reparties à la hausse.

Le rôle joué par les aérosols sur le forçage radiatif du climat est complexe [14] et a donné lieu à de nombreuses études, mais il est encore insuffisamment compris. Dans ce contexte, l'éditorial [15] volontairement provocateur (on peut le supposer), publié par le néerlandais Paul Crutzen qui a partagé en 1995 avec Molina et Rowland le prix Nobel de chimie attribué pour l'ensemble de leurs travaux sur la chimie atmosphérique de l'ozone, a fait couler beaucoup d'encre. Il rappelle que le réchauffement dû à l'émission des gaz à effet de serre est en partie compensé par un refroidissement provoqué par les particules émises dans l'atmosphère, que l'origine en soit anthropique ou naturelle comme les éruptions volcaniques. Notons que souvent dans l'esprit du public, ce sont uniquement les activités humaines qui sont considérées comme source de pollution atmosphérique.

Crutzen propose d'étudier sérieusement la possibilité de disperser dans la stratosphère suffisamment de particules soufrées afin de constituer un parasol venant contrecarrer l'effet de serre dont la maîtrise peut s'avérer difficile. Il estime cependant, et il n'est pas le seul, qu'il est urgent de réduire la pollution atmosphérique particulaire dans la troposphère à cause de son incidence néfaste, en particulier sur la santé humaine. Malheureusement, si cet objectif est atteint comme nous le souhaitons tous, cela n'ira pas dans le sens d'une diminution du réchauffement de la planète.

Les chiffres avancés par Crutzen font prendre conscience de l'ampleur du problème. L'utilisation des combustibles fossiles provoque chaque année le rejet dans l'atmosphère de 25 milliards de tonnes de  $\text{CO}_2$ , mais aussi de 55 millions de tonnes de soufre sous forme de  $\text{SO}_2$  dont environ la moitié produit des particules de sulfate de taille inférieure à un micron. En se basant sur l'expérience acquise après l'éruption du Pinatubo, Crutzen évalue à  $0,75 \text{ W}/\text{m}^2$  le pouvoir de refroidissement de 1 million de tonnes de soufre dans la stratosphère. Pour compenser l'élimination quasi complète des aérosols sulfatés d'origine anthropique dont la diminution sensible à l'échelle planétaire est bien visible [16], il faudrait, si on n'arrive pas à réduire les émissions de gaz à effet de serre, disperser chaque année 1 à 2 millions de tonnes de soufre dans la stratosphère faute de quoi, une amélioration complète de la qualité de l'air pourrait conduire à une augmentation de  $0,8 \text{ }^\circ\text{C}$  sur la plupart des continents et de  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  dans les régions arctiques en dix ans.

Pour éviter un tel scénario, il va falloir porter un regard nouveau sur notre environnement : améliorer l'efficacité énergétique, réduire les rejets atmosphériques, optimiser les cycles de vie des produits... La communauté des chimistes dispose d'une feuille de route bien tracée que l'on pourrait résumer par l'acronyme ACME, souvent utilisé par ailleurs et pouvant correspondre dans ce cas à Analyser, Concevoir, Modéliser et Éduquer ! Un développement durable ne peut se concevoir sans une chimie innovante. Doit-on, pour autant, avoir recours à la géo-ingénierie ? Les mesures étudiées par Crutzen choquent, probablement parce qu'elles correspondent à des émissions de matière dans l'environnement atmosphérique vues comme un gaspillage supplémentaire. Par contre, la capture et la séquestration du gaz carbonique choquent moins. En quelque sorte, on a le sentiment de ranger, de mettre de côté, de restituer à la Terre ce qu'on lui a pris. C'est probablement le moyen de contrôler les effets anthropiques sur le climat qui risque le moins de brider le développement des pays émergents, condition indispensable à un équilibre durable de notre planète. Il autoriserait une utilisation plus propre des vastes réserves mondiales de charbon. Les modes de séquestration du  $\text{CO}_2$  sont multiples et certains particulièrement prometteurs comme l'injection du  $\text{CO}_2$  dans des réservoirs naturels d'hydrates de méthane. Les hydrates de  $\text{CO}_2$  sont thermodynamiquement beaucoup plus stables que les hydrates de méthane. D'une pierre deux coups : un stockage sûr du  $\text{CO}_2$  et une récupération assistée du méthane [17].

Pour conclure, disons que l'amélioration de la qualité de l'air est une nécessité absolue, en raison avant tout de ses effets sur la santé humaine. La pollution atmosphérique d'origine particulaire joue à cet égard un rôle crucial. Elle est aussi assurément impliquée dans les phénomènes climatiques, mais ses déterminants et ses conséquences sont encore insuffisamment connus. Le développement des pays émergents, qui s'impose, implique que la gestion mondiale de l'énergie soit en cohérence avec les enjeux sanitaires et environnementaux et par là même, durable.

En ce qui concerne la France, faisons référence au « Rapport Richert » [18]. En 2006, Philippe Richert, sénateur du Bas-Rhin et président du Conseil national de l'air, a reçu mission du Premier Ministre de dresser un bilan de la politique menée en France depuis 10 ans en ce qui concerne la réduction de la pollution atmosphérique et de proposer des pistes d'amélioration. Le rapport érige en principes la transparence des choix sanitaires, environnementaux, économiques et sociaux liés aux politiques d'amélioration de la qualité de l'air, ainsi qu'une approche intégrée « air, climat, énergie » et une gouvernance commune. Souhaitons qu'à l'avenir nous n'en restions pas aux principes, fussent-ils clairvoyants, et que les propositions et mesures énoncées dans ce rapport soient prises en compte.

### Notes et références

- (1) <http://www.atmo-france.org>  
 (2) <http://www.prevoir.org>  
 (3) *TEOM* : Tapered element oscillating microbalance.
- [1] Del Monte M., Ausset P., Lefèvre R.A., Thiébaud S., Evidence of the pre-industrial air pollution from the heads of the Kings of Juda statues from Notre Dame Cathedral in Paris, *The Science of the Total Environment*, **2001**, 273, p. 101.
- [2] Baker J., Thornes J.E., Solar position within Monet's houses of parliament, *Proceedings of the Royal Society A*, **2006**, 462, p. 3775.
- [3] The London smog disaster of 1952 – Days of toxic darkness, *Electronic Medical Curriculum at the University of Edinburgh Faculty Of Medicine*, <http://www.portfolio.mvm.ed.ac.uk/studentwebs/session4/27/greatsmog52.htm>
- [4] Gallien A., Distribution de la phalène du bouleau dans les îles britanniques, *Banque de schémas SVT, Académie de Dijon*, **2006**, <http://svt.ac-dijon.fr/schemassvt/>
- [5] Grant B.S.; Wiseman L.L., Recent history of melanism in American peppered moths, *The Journal of Heredity*, **2002**, 93, p. 86.
- [6] Lefèvre R.A., Ausset P., Recent changing in air pollution in Paris recorded on a statue of Apollo in the Cour Carrée, Louvre Palace, *6<sup>th</sup> International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Lisbonne, **2004**, <http://www.lisa.univ-paris12.fr/>
- [7] Pöschl U., Atmospheric aerosols, composition, transformation, climate and health effects, *Angewandte Chemie Int. Ed.*, **2005**, 44, p. 7520.
- [8] Nel A., Air pollution-related illness: effects of particles, *Science*, **2005**, 308, p. 804.
- [9] Oberdörster G., Oberdörster E., Oberdörster J., Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles, *Environmental Health Perspectives*, **2005**, 113, p. 823.
- [10] Mandin C., Ramalho O. et al., *Pollution Atmosphérique, avril-juin 2006*, 190, p. 139.
- Voir également le bulletin « Info Santé Environnement Intérieur », une publication trimestrielle qui rassemble des synthèses de travaux scientifiques récents menés sur le thème de l'environnement intérieur (<http://rsein.ineris.fr>).
- [11] a) Medina S., Health impact assessment on the benefits of reducing PM<sub>2.5</sub> in 26 European cities (Summary Apehis HIA on PM<sub>2.5</sub>), <http://www.apehis.net/>; b) Commission européenne, Qualité de l'air : fronde des scientifiques, *RDT Info, Magazine de la Recherche européenne*, déc. **2006**, 51, p. 26.
- [12] a) Givati A., Rosenfeld D., Quantifying precipitation suppression due to air pollution, *Journal of Applied Meteorology*, **2004**, 43, p. 1038; b) Rosenfeld D., Dai J., Yu X., Yao Z., Xu X., Yang X., Du C., Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation, *Science*, **2007**, 315, p. 1396. Pour avoir accès à l'ensemble des travaux de l'équipe de Daniel Rosenfeld : <http://earth.huji.ac.il/staff-details.asp?topic=3&id=149>
- [13] Rahmstorf S., Cazenave A., Church J.A., Hansen J.E., Keeling R.F., Parker D.E., Somerville R.C.J., Recent climate observations compared to projections, *Science*, **2007**, 316, p. 709.
- [14] a) Schrope M., Trouble in the greenhouse, *Nature*, **2000**, 407, p. 10; b) Andreae M.O., The dark side of aerosols, *Nature*, **2001**, 409, p. 671; c) Andreae M.O., Jones C.D., Cox P.O., Strong present-day aerosol cooling implies a hot future, *Nature*, **2005**, 435, p. 1187; d) Ramanathan V., Ramanathan M., Roberts G., Kim D., Corrigan C., Chung C., Winker D., Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption, *Nature*, **2007**, 448, p. 575.

- [15] Crutzen P.T., Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change*, **2006**, 77, p. 211.
- [16] Mishchenko M.I., Geogdzhayev I.V., Rossow W.B., Cairns B., Carlson B.E., Laci A.A., Liu L., Travis L.D., Long-term satellite record reveals likely recent aerosol trend, *Science*, **2007**, 315, p. 1543.
- [17] Kvamme B., Graue A., Buanes T., Kuznetsova T., Erslund G., Storage of CO<sub>2</sub> in natural gas hydrate reservoirs and the effect of hydrate as an extra sealing in cold aquifers, *Intern. Journal of Greenhouse Gas Control*, **2007**, 1, p. 236.
- [18] Richert P., Qualité de l'air et changement climatique : un même défi, une même urgence – Une nouvelle gouvernance pour l'atmosphère, Rapport au Premier Ministre, *Collection des rapports officiels, La Documentation française*, Paris, **2007**, <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/074000137/index.shtml>



#### Pierre-Charles Maria

est professeur à l'Université de Nice Sophia Antipolis<sup>1</sup> et président d'ATMO PACA<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Laboratoire de radiochimie, sciences analytiques et environnement, Université de Nice Sophia Antipolis, Faculté des Sciences, Parc Valrose, 06108 Nice Cedex 2.

Courriel : [pccmaria@unice.fr](mailto:pccmaria@unice.fr)

<sup>2</sup> [www.atmopaca.org](http://www.atmopaca.org)



Nous utilisons des matières premières renouvelables issues de la nature et les transformons en produits ultra-performants dans le plus grand respect de l'environnement.



Acteur mondial de premier plan dans le secteur de la chimie de spécialités, Cognis axe sa démarche sur des tendances internationales comme le bien-être et le développement durable. Avec nos produits, nos concepts marketing et nos solutions personnalisées, nous apportons des impulsions nouvelles sur de nombreux marchés industriels : cosmétiques, soins corporels, détergents et lessives, denrées alimentaires, nutrition et santé, vernis et peintures, lubrifiants, textiles, phytosanitaire ou extraction pétrolière.



Tous les sites de Cognis sont soumis aux mêmes exigences très strictes en terme de qualité, environnement, santé, social et sécurité. Nous apportons la même attention à tous : collaborateurs, clients, toutes personnes directement concernées par nos activités.



En 2000, Cognis devient la première entreprise de chimie à recevoir deux certifications mondiales, ISO 14001 et ISO 9001 pour ses cycles de gestion qualité et environnement.



Cognis France  
 185 avenue de Fontainebleau  
 F-77310 Saint Fargeau Ponthierry  
 TEL : +33 1 60 65 21 00  
 FAX : +33 1 60 65 21 01  
<http://www.cognis.com>

# La pollution chimique marine

## Quelles politiques pour une protection durable de l'océan et des mers côtières ?

Michel Marchand

**Résumé** Le milieu marin côtier présente une certaine spécificité par rapport aux autres milieux aquatiques : il est à la fois le milieu récepteur ultime des pollutions terrestres et la zone la plus riche biologiquement, et le milieu où se développent de nombreuses activités (pêche et cultures marines, saliculture, tourisme, thalassothérapie). La zone côtière littorale est par conséquent vulnérable aux pollutions chimiques chroniques et sa protection nécessite recherche, surveillance et réglementation. Une double stratégie peut être mise en place : une approche préventive pour éviter la mise sur le marché de substances toxiques pour l'Homme et l'environnement, et une approche rétrospective basée sur des politiques publiques pour la protection et la restauration des milieux aquatiques dégradés.

**Mots-clés** Milieu marin, pollution chimique, recherche, surveillance, réglementation.

**Abstract** The coastal marine environment presents some specificity compared to other aquatic environments: it is both the receiving end of pollution on land and the most biologically rich marine area, where are developing many uses (fisheries and aquaculture, salt production, tourism, thalassotherapy). The coastal zone is therefore vulnerable to chronic chemical pollution and its protection requires research, monitoring and regulation. A dual strategy can be put into place: a preventive approach to avoid placing on the market of toxic substances to humans and the environment, and a retrospective approach based on public policies for the protection and restoration of degraded aquatic environments.

**Keywords** Marine environment, chemical pollution, research, monitoring, regulation.

Les écosystèmes des zones côtières produisent près d'un tiers des biens et services d'origine écologique [1]. Ils subissent aussi de fortes pressions anthropiques qui sont de trois ordres : (i) les pressions liées aux changements globaux, notamment climatiques, qui vont induire des modifications sensibles sur le fonctionnement des écosystèmes, (ii) les pressions liées aux activités continentales, notamment par des apports de contaminants chimiques dans les eaux côtières et (iii) les pressions liées aux activités maritimes, dont les pollutions accidentelles.

### La vulnérabilité des zones côtières aux pollutions chimiques chroniques

La menace la plus insidieuse de pollution chimique, la plus permanente pour le milieu marin côtier, vient du continent. Les apports d'hydrocarbures vers le milieu marin proviennent pour 80 % des apports telluriques, les pollutions accidentelles ne représentant qu'une faible fraction à l'échelle globale (il n'en demeure pas moins que l'impact local peut être catastrophique lorsque survient l'accident, les exemples de l'*Amoco Cadiz* et de l'*Erika* en sont une triste illustration). Le milieu marin côtier présente une certaine spécificité par rapport à d'autres systèmes aquatiques : il est à la fois le milieu récepteur ultime des pollutions terrestres et la zone la plus riche biologiquement, et le milieu où se développent de nombreuses activités : pêche, conchyliculture (élevage de coquillages), pisciculture marine, saliculture, tourisme, thalassothérapie...

La pollution chimique peut venir de très loin de l'intérieur des terres. Par exemple, la pollution de l'estuaire de la

Gironde par le cadmium résulte des activités minières et de raffinage des minerais de zinc qui s'est maintenue de 1840 à 1993 sur un site minier du bassin de Decazeville, situé à plus de 200 km en amont de la Garonne. Les apports quotidiens de cadmium, sous-produit de l'hydrométallurgie du zinc, ont contaminé le système fluvial du Lot qui agit à présent comme source de contamination secondaire du système fluvial et estuarien [2]. Les niveaux de concentrations de cadmium dans les huîtres prélevées dans l'estuaire de la Gironde ont atteint plus de 100 mg/kg (exprimé par rapport au poids sec de la chair du coquillage) durant les années 80 et se situent à environ 20 mg/kg dans la décennie actuelle. À titre comparatif, dans le bassin d'Arcachon, non influencé par les eaux de la Gironde, les concentrations en cadmium varient entre 1 et 2 mg/kg. La norme sanitaire de cadmium dans les produits comestibles est de 5 mg/kg (poids sec). Cet exemple montre que l'origine d'une pollution marine peut se situer très en amont de la zone côtière et que les conséquences sanitaires peuvent perdurer plusieurs décennies après la fermeture de ce qui en fut la cause.

Autre motif de préoccupation : le fait de retrouver dans les milieux aquatiques des produits pharmaceutiques et cosmétiques. Ils y sont présents *via* l'excrétion humaine et les rejets des stations d'épuration urbaine. Les premiers travaux ont débuté dans les années 90, notamment aux États-Unis [3], et ont permis d'identifier nombre de substances actives dans les rivières, lacs et eaux souterraines. En France, les premiers travaux, menés notamment par l'Université de Bordeaux, ont été réalisés dans les eaux côtières et estuariennes il y a peu de temps [4]. On identifie des produits antibiotiques, anti-inflammatoires, fongicides, antidépresseurs, analgésiques,

anticancéreux, dont il est encore difficile d'évaluer le réel impact sur la faune et la flore aquatiques.

En mer, on pourrait imaginer que la dilution des apports polluants dans l'immensité océanique puisse être la solution naturelle au problème. À ce niveau d'interrogation, il faut distinguer deux groupes de contaminants chimiques : d'une part les substances chimiques de nature hydrophobe (peu solubles), qui ont tendance à s'accumuler dans les organismes aquatiques (par bioaccumulation) et dans le compartiment sédimentaire de la zone côtière (par adsorption sur le substrat solide), et qui se comportent en terme de stockage, et d'autre part les substances hydrophiles (solubles), transportées à l'état dissous, qui se diluent en zone côtière et se comportent en terme de flux. La forte dilution ne signifie pas automatiquement l'absence d'effets. Au niveau de concentration de 20 ng/L, le tributylétain (TBT), substance active rajoutée dans les peintures marines pour empêcher que des salissures (algues, micro-organismes, mollusques) se fixent sur les coques des navires, perturbe considérablement le métabolisme de croissance des huîtres (apparition de chambrage des coquilles d'huîtres) (figure 1). À 2 ng/L, le TBT, perturbateur endocrinien, est capable de modifier le sexe de certains gastéropodes marins (masculinisation des femelles par effet appelé imposex). Ces quelques exemples montrent bien que la protection du milieu marin côtier nécessite recherche, surveillance et réglementation.



Figure 1 - Chambrage d'huîtres soumises à une exposition au TBT (20 ng/L). Source : Ifremer.

## Substances chimiques et contaminants chimiques ?

« L'univers chimique » est vaste : plus de 37 millions de substances chimiques sont recensées, pour l'essentiel des substances issues de la biosynthèse. Environ 100 000 substances chimiques sont produites, importées et utilisées sur le marché européen, et 5 000 d'entre elles (5 %) sont considérées comme dangereuses pour l'Homme et l'environnement.

Les **métaux** font l'objet de nombreuses études pour une compréhension suffisante de leur dynamique et de leur toxicité. Les métaux les plus toxiques sont le mercure, le cadmium, le zinc, le nickel, le plomb, le cuivre et le chrome. Les sources de contamination sont multiples et comprennent les activités minières, la sidérurgie, le transport, l'usage des piles et des batteries, l'industrie des peintures et des colorants, ainsi que l'emploi des engrais phosphorés (cadmium).

Compte tenu de la diversité des molécules, l'étude des **contaminants organiques** représente un chantier très

## Abréviations

Les abréviations suivies d'un astérisque\* dans le texte sont explicitées ci-dessous :

**CMR** : cancérigènes, mutagènes, reprotoxiques.

**DDT** : dichlorodiphényltrichloroéthane.

**PBDE** : polybromodiphényléthers.

**PBT** : persistant, bioaccumulable, toxique

**PCB** : polychlorobiphényles.

**PCDD** : polychlorodibenzo-*p*-dioxines.

**RNO** : Réseau national d'observation de la qualité du milieu marin.

important. Très schématiquement, on peut distinguer quatre grands groupes de substances : (i) les **hydrocarbures**, dont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont les plus préoccupants pour les milieux aquatiques ; (ii) les **pesticides**, avec quelques 900 matières actives et un usage d'environ 80 000 tonnes épandues chaque année ; (iii) les **biocides**, qui désignent les substances utilisées dans un cadre non phytopharmaceutique, comme les additifs mis dans les peintures antisalissures marines qui provoquent une contamination non négligeable par différentes matières actives métalliques (cuivre), organométalliques (TBT) ou organique (diuron, ou atrazine comme l'Irgarol 1057), et enfin (iv) les autres **substances organiques de synthèse** qui représentent un grand nombre de substances (solvants chlorés, PCB\*, retardateurs de flamme, phtalates, détergents, colorants...) qu'il serait vain de vouloir décrire en quelques lignes.

Il est évidemment impossible d'engager des travaux sur 100 000 substances chimiques présentes sur le marché européen, ni même sur 5 000 substances classées comme dangereuses. Les critères de sélection des contaminants chimiques jugés comme prioritaires pour l'environnement sont basés sur trois propriétés : la persistance (P) définissant des substances persistantes dans l'environnement (ex. les polluants organiques persistants (POP), comme le DDT\*), la bioaccumulation (B) définissant leur capacité à s'accumuler dans les organismes aquatiques tels les poissons et coquillages, et la toxicité (T). Ces trois propriétés définissent un ensemble de substances que l'on nomme substances PBT\*. Il faut y ajouter les substances qui ont des propriétés cancérigènes, mutagènes et des effets sur le système de reproduction que l'on appelle les substances CMR\*. On associe également les perturbateurs endocriniens qui induisent des effets sur le système endocrinien. La priorité d'étude se concentre par conséquent sur les substances PBT + substances CMR + perturbateurs endocriniens.

À ce stade, on voit peu à peu apparaître une double stratégie pour la protection des milieux aquatiques dans un contexte de développement durable : (i) une approche préventive, pour éviter la mise sur le marché de substances toxiques pour l'Homme et l'environnement – démarche qui s'appuie sur la législation et la réglementation sur les produits chimiques, (ii) une approche rétrospective, prenant en considération les situations présentes et définissant des politiques publiques pour la protection et la restauration des milieux aquatiques dégradés.

## Approche préventive pour la protection des milieux aquatiques

Les incidences à l'exposition aux produits chimiques ne sont pas anodines et nécessitent des actions de prévention. Adoptée il y a quarante ans, la Directive

européenne 67/548/CEE est le premier texte réglementaire significatif qui définit les conditions de classification des substances chimiques et l'étiquetage des substances dangereuses permettant leur circulation. Un travail d'harmonisation à l'échelle mondiale sur la classification des dangers d'une substance a été réalisé par la suite par l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) en 1998, suite à l'une des recommandations de la Conférence de Rio de 1992. Les critères de dangers sont définis selon des procédures standardisées relatives à la toxicité aiguë, la toxicité chronique, la bioaccumulation et la biodégradabilité.

L'étape suivante est apparue durant les années 90, avec un ensemble de textes européens (directives et règlements) imposant une obligation d'analyse du risque chimique pour la protection de l'Homme et de l'environnement : produits phytosanitaires, substances existantes (substances utilisées sur le marché européen avant 1981), substances nouvelles, biocides, produits vétérinaires, médicaments humains. Pour les substances nouvelles, existantes et biocides, les principes adoptés pour l'évaluation du risque chimique ont donné lieu à un guide méthodologique, texte de référence européen publié en 1996 : le *Technical Guidance Document* (TGD). Une seconde version a été publiée en 2003 dans laquelle un chapitre spécifique a été réservé pour l'évaluation du risque chimique en milieu marin [5].

La disparité des réglementations a conduit l'Union européenne à engager une réflexion aboutissant à une législation plus uniforme sur les substances chimiques, produites et importées dans l'espace européen. Le résultat est la Directive européenne REACH qui a été votée avec divers amendements en 2006 pour entrer en vigueur en juin 2007. Le système REACH (« Registration, Evaluation and Authorization of CHemicals ») est applicable aux quelques 100 000 substances chimiques utilisées [6]. Il part du constat du lourd déficit des connaissances des effets d'un très grand nombre de substances (86 %), essentiellement organiques. Seulement 3 % des substances ont été correctement testées et des informations minimales existent pour 11 % d'entre elles. Par contre, pour 65 % des substances, on ne dispose que de très peu de données et aucune information n'est disponible pour 21 % des substances.

Le premier objectif est de centraliser les informations nécessaires dans une base de données communautaire pour l'ensemble des substances produites ou importées à plus de 1 t/an, soit 30 000 substances. Le programme d'enregistrement est échelonné sur des périodes variables selon le volume de production : 3 ans pour les substances produites ou importées à plus de 1 000 t/an, 6 ans pour celles se situant entre 100 et 1 000 t/an et 11 ans pour celles comprises entre 1 et 100 t/an. Le second objectif est de procéder à l'évaluation du risque chimique, en inversant la charge de la preuve. Ce n'est plus à l'autorité publique de déterminer si une substance présente un risque pour la santé humaine et l'environnement, mais à l'industriel ou à l'importateur. Enfin, pour les substances « extrêmement préoccupantes » (substances PBT, CMR, perturbateurs endocriniens), la mise sur le marché nécessite une autorisation, fonction des conditions d'utilisation de la substance, et la recherche de nouvelles substances moins préoccupantes (principe de substitution).

La mise en place du système REACH a donné lieu à de vives controverses. On a ainsi pu assister à une forte activité de lobby de la part de l'industrie chimique européenne (Cefic), française (Union des industries chimiques, UIC) et

américaine (American Chemical Council, ACC) pour dénaturer le projet initial. La controverse a porté notamment sur le coût d'un tel programme. La seule industrie chimique française a estimé que REACH coûterait 28 milliards d'euros (Mds €) sur 10 ans et la perte de 360 000 emplois. Le coût global estimé par la Commission européenne est plus modeste : 2,8 Mds € étalé sur 11 ans, soit 0,05 % du chiffre d'affaires de l'industrie chimique européenne (417 Mds €). Le gain en terme de santé publique a été évalué à 50 Mds € sur 30 ans ; le gain pour l'environnement est par contre impossible à chiffrer.

La mise en œuvre du programme REACH, à partir de juin 2007, suscite des réactions très partagées. Le projet initial a été largement modifié, notamment sous la pression de l'industrie chimique, mais le compromis trouvé à ce stade est estimé satisfaisant dans le contexte européen, marqué par la priorité donnée à la compétitivité économique et par la réticence des nouveaux membres de l'Union européenne pour renforcer les normes environnementales.

### Approche rétrospective pour la protection des milieux aquatiques

La démarche rétrospective se traduit par une politique volontariste pour restaurer la qualité des milieux aquatiques dégradés. Différentes conventions régionales ont été signées à partir des années 70 pour la protection du milieu marin : Convention d'Helsinki pour la mer Baltique, Convention OSPAR pour l'Atlantique Nord-Est, Convention de Barcelone pour la Méditerranée et Convention de Bucarest pour la mer Noire. Chacune de ces conventions développe différentes stratégies liées aux problèmes rencontrés, mais toutes mettent en œuvre une stratégie « substances dangereuses », ce qui montre bien l'importance accordée aux apports de substances chimiques dangereuses en mer.

Plus en amont, on retrouve les mêmes préoccupations. La Directive européenne 76/464/CEE est le premier texte européen concernant la pollution causée par certaines substances dangereuses déversées dans les milieux aquatiques de la Communauté européenne. Une liste de 132 substances chimiques considérées comme prioritaires a été établie et les États membres devaient prendre les mesures appropriées pour éliminer ou réduire (selon le degré de dangerosité) la pollution des eaux par ces substances.

Mais le texte fondamental actuel est la Directive Cadre sur l'eau (2000/60/CE) qui constitue le cadre réglementaire de la politique de l'eau au niveau communautaire. La Directive concerne l'ensemble des milieux aquatiques : eaux souterraines, eaux de surface continentales (lacs et rivières), eaux de transition (estuaires et lagunes) et eaux marines côtières (s'étendant à 1 mille du trait de côte). Le texte est particulièrement ambitieux ; il impose de préserver les milieux aquatiques non dégradés (milieux de référence) et d'atteindre d'ici 2015 un « bon état » pour les milieux aquatiques moyennement ou fortement dégradés. Le « bon état » englobe l'état écologique et l'état chimique des masses d'eaux (unité élémentaire de surveillance). Le nombre de masses d'eaux pour le territoire métropolitain est de l'ordre de 1 500 pour les eaux continentales et de 200 pour les eaux marines côtières et les eaux de transition. Les paramètres biologiques qui participent à l'évaluation de l'état écologique des masses d'eau côtières sont (i) la composition, l'abondance et la biomasse du phytoplancton ; (ii) la composition et l'abondance de la flore aquatique

(macro-algues, angiospermes); (iii) la composition et l'abondance de la faune benthique invertébrée. Le bon état chimique est défini sur la base du non-dépassement de normes de qualité environnementales, elles-mêmes définies à partir de résultats de tests écotoxicologiques pour la protection de l'environnement (espèces vivant en pleine eau, espèces vivant au contact du sédiment, oiseaux et mammifères pouvant être touchés par l'empoisonnement secondaire lié à l'accumulation de toxiques le long de la chaîne alimentaire) et toxicologiques pour la protection de la santé humaine (consommation des produits comestibles, poissons et coquillages, consommation d'eau potable pour les eaux douces). La valeur la plus contraignante des cinq critères indiqués ci-dessus constitue la norme de qualité environnementale (NQE) qui définit la valeur seuil entre le bon état et le mauvais état chimique [7]. Au total, 41 substances jugées comme prioritaires doivent faire l'objet d'un contrôle dans les masses d'eau pour définir le bon ou le mauvais état chimique. On retrouve différents groupes de contaminants chimiques : métaux, solvants chlorés, hydrocarbures aromatiques, pesticides, biocides, chlorobenzènes, substances diverses (alkylphénols, phtalates, PBDE\*, chloroalcanes à chaîne courte, hexachlorobutadiène). Les programmes de surveillance sont en train de se mettre en place, à l'échelle des districts hydrographiques dont la gestion est confiée aux agences de l'eau.

La dernière étape en cours d'élaboration est l'adoption d'une Directive « Stratégie pour le milieu marin ». Cette Directive vise à être le pilier environnemental de la politique maritime européenne des mers d'Europe, divisée en écorégions (figure 2). Les motivations tiennent au constat de la dégradation et de l'appauvrissement considérable de la biodiversité marine, liés à la contamination du milieu marin par des substances dangereuses, aux conséquences de la pêche commerciale et aux effets du changement climatique. La démarche en cours vise à évaluer l'état initial des eaux marines, à définir un bon état écologique et les objectifs environnementaux à atteindre, à mettre en place des programmes de surveillance et de mesures pour restaurer la qualité des milieux dégradés et enfin un calendrier. La stratégie marine européenne est ambitieuse au plan géographique ; elle s'étend jusqu'aux limites des zones économiques exclusives (ZEE) des États, c'est-à-dire à

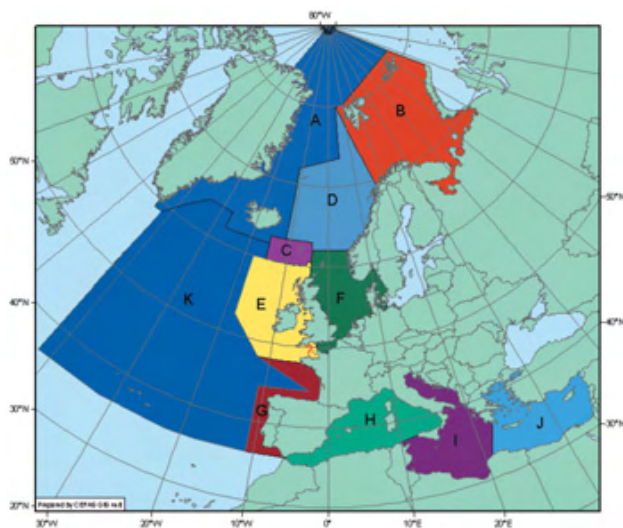


Figure 2 - Écorégions marines définies pour la Directive « Stratégie pour le milieu marin ».

200 milles marins des côtes. La qualification du bon état se réfère à un certain nombre d'éléments physiques, biologiques (pression de la pêche sur les stocks par ex.) et à la contamination chimique qui est un élément parmi d'autres, pouvant être qualifiée par les apports contaminants en provenance de l'atmosphère, du continent (apports telluriques) et de la navigation maritime (risques de pollutions accidentelles, rejets opérationnels des eaux de ballasts ou de nettoyage des cuves).

## Surveillance

L'état de la qualité du milieu marin, les résultats attendus du bénéfice des politiques publiques en matière de protection de l'environnement ou de restauration des milieux dégradés nécessitent la mise en place de programmes de surveillance. L'exemple du programme de surveillance RNO\*, créé en 1974 par le ministère chargé de l'environnement et coordonné par l'Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer), a démontré comment une exigence de qualité pouvait aboutir à l'acquisition de connaissances sur la distribution spatiale des contaminants chimiques dans les zones côtières et sur les évolutions temporelles à long terme [8]. La surveillance des contaminants chimiques concerne les substances bioaccumulables, de nature hydrophobe (métaux, HAP, PCB, insecticides chlorés), mesurées dans des matrices intégratrices (sédiments et coquillages). Les mollusques bivalves, huîtres et moules, répartis sur environ 80 points de prélèvements (dont 8 dans les DOM) sont utilisés comme indicateurs quantitatifs de contamination. Le principe de l'utilisation d'organismes aquatiques bioaccumulateurs remonte aux années 70, avec la mise en place d'un programme de surveillance aux États-Unis, connu sous le nom de « Mussel Watch » [9]. La fiabilité des résultats obtenus est contrôlée par des programmes assurance-qualité, notamment le programme européen QUASIMEME (« Quality assurance for information from marine environmental monitoring in Europe »). Cette exigence permet d'avoir une vision de l'état de la contamination chimique le long du littoral, non seulement à l'échelle nationale, mais également européenne (exemple des PCB sur les figures 3 et 4).

L'analyse des tendances temporelles sur des séries à long terme, acquises directement ou par approche rétrospective sur des échantillons archivés, permet de relier les observations des concentrations à l'évolution des

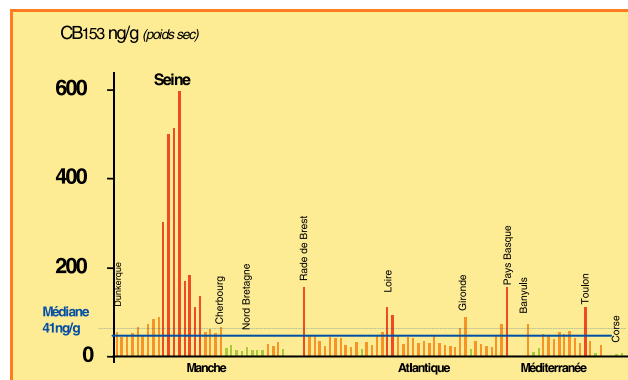


Figure 3 - Contamination du littoral par les PCB (analyses du congénère CB 153 dans les moules et les huîtres).

Source : A. Abarnou, Ifremer.





Figure 4 - Contamination des PCB dans les estuaires européens (analyses du congénère CB 153 dans les moules).

Source : A. Abarnou, Ifremer.

apports au gré des changements des pratiques industrielles ou de réglementations publiques. Ces analyses permettent également de mesurer les capacités de restauration naturelle des milieux naturels lorsque les apports contaminants ont cessé ; ces dynamiques de restauration se mesurent en terme de décennies comme cela a pu être constaté par exemple sur la contamination du DDT (interdit depuis 1972) dans le bassin d'Arcachon (figure 5). Dans l'ensemble, on observe une décroissance quasi générale pour l'ensemble des contaminants organiques, exceptée pour les HAP. La similitude des tendances en France et aux États-Unis, issues des programmes RNO et « Mussel Watch », est ainsi observée, que ce soit pour les métaux (principalement le cadmium) ou pour les composés organochlorés comme le DDT et le lindane.

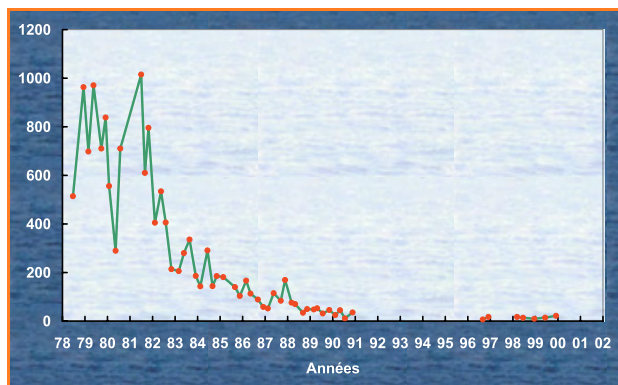


Figure 5 - Évolution des résidus du DDT dans les huîtres du bassin d'Arcachon (concentrations exprimées en ng/g, poids sec). Source : RNO.

Les nouvelles politiques réglementaires européennes, comme la Directive Cadre sur l'eau (DCE), mettent en place non plus des systèmes de surveillance pérennes de la contamination chimique, mais des dispositifs de contrôle pour évaluer l'état chimique (bon ou mauvais) des masses d'eau, sur la base de valeurs seuils représentant des normes de qualité environnementale. Ce changement d'objectif constitue un tournant pour la surveillance des milieux aquatiques. Il conviendrait de maintenir un réseau pérenne d'observation de l'évolution des niveaux de contamination chimique par rapport aux conséquences de la dérive

climatique qui peut modifier les apports contaminants vers les zones côtières et océaniques.

## Recherche

La compréhension de l'impact des contaminants chimiques dans les milieux aquatiques nécessite deux approches simultanées et complémentaires : le devenir des contaminants chimiques et de leurs effets. Le mercure constitue un exemple complexe du devenir d'un contaminant chimique dans l'environnement. La méthylation du mercure dans les milieux aquatiques par des processus naturels bactériens est l'élément clé pour comprendre la bioaccumulation de cet élément le long des chaînes trophiques aquatiques et l'expression de sa toxicité pour l'ensemble des êtres vivants, y compris l'espèce humaine. L'encadré 1 montre l'exemple de la pollution du mercure en Guyane française, liée à l'activité des chercheurs d'or, qui a fait l'objet d'un programme de recherche pluridisciplinaire, lancé conjointement par le CNRS et l'Institut de veille sanitaire (InVS) [10]. Un second exemple de pollution, principalement due à l'activité économique et agricole, est présenté dans l'encadré 2.

La recherche actuelle permet difficilement de répondre avec certitude à la question posée des effets à long terme de la contamination chimique sur les organisations biologiques complexes (populations, communautés, écosystèmes). Elle dégage toutefois des connaissances permettant d'élaborer des outils de gestion des milieux aquatiques. Nous avons vu précédemment que l'évaluation du risque chimique est

### Encadré 1

#### La pollution au mercure en Guyane

Le mercure est un élément naturel qui est présent dans l'environnement essentiellement sous trois formes chimiques : le mercure élémentaire ( $Hg^0$ ), le mercure inorganique oxydé ( $Hg^{II}$ ) et différents complexes organomercuriels (R-Hg) dont le méthylmercure ( $CH_3Hg$ ) est la forme la plus abondante et la plus toxique. La pollution au mercure en Guyane résulte de la recherche de l'or, par les activités d'orpaillage (le mercure élémentaire ( $Hg^0$ ) est utilisé en tant qu'agent d'amalgamation de l'or) et par une forte érosion des sols alluvionnaires très anciens du bassin amazonien qui sont naturellement riches en mercure inorganique ( $Hg^{II}$ ). Les travaux réalisés notamment sur des stations localisées en amont et en aval du barrage hydroélectrique de Petit-Saut ( $360 \text{ km}^2$ ) montrent des différences de comportement biogéochimique du mercure. En amont du barrage, les concentrations de mercure total dans les eaux sont très faibles :  $30 \text{ ng/L}$  dans les échantillons non filtrés,  $5 \text{ ng/L}$  dans la fraction dissoute. La fraction de méthylmercure ne représente qu'environ 1 à 1,7 % du mercure total, soit des valeurs mesurées entre 0,03 et 0,05 ng/L. Sur le site de retenue des eaux du barrage, les conditions anoxiques de la colonne d'eau, au-delà de 4 à 5 m de profondeur, sont à l'origine d'une production beaucoup plus importante de méthylmercure, induite par l'activité des bactéries sulfatoréductrices. Juste en aval du barrage, les concentrations de méthylmercure sont beaucoup plus importantes, en moyenne de  $0,5 \text{ ng/L}$ , soit 30 % du mercure total. C'est cette fraction, considérée comme la plus biodisponible, qui conduit à la bioamplification du mercure dans les poissons. Le facteur de bioconcentration dans les poissons (exprimé par rapport à leur poids frais) est de l'ordre de 50 000 par rapport au mercure total, et de 5 000 000 s'il est estimé par rapport au seul méthylmercure. Il s'ensuit que les concentrations maximales de mercure dans les poissons des cours d'eau guyanais se situent entre 0,8 et 2,0 mg/kg (poids frais), concentrations qui dépassent la norme sanitaire fixée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) à  $0,5 \text{ mg/kg}$ . La contamination par voie alimentaire, par la consommation des produits de la pêche, représente une exposition à caractère chronique qui concerne potentiellement l'ensemble de la population guyanaise et plus largement celle du bassin amazonien.

## Encadré 2

## L'estuaire de la Seine étudié par l'Ifremer

La partie aval de l'estuaire de la Seine, situé à l'exutoire d'un bassin versant, concentre 16 millions d'habitants, 40 % de l'activité économique et 30 % de l'activité agricole [11]. Une telle intensité des activités humaines entraîne *de facto* une forte contamination de l'estuaire (la plus importante des grands estuaires français) par de nombreuses substances chimiques. Un tel « cocktail » de contaminants chimiques peut avoir des effets multiples sur les organismes aquatiques. Deux types d'effets doivent être soulignés du fait de leurs conséquences : les effets cancérigènes, pouvant induire des mutations sur le matériel génétique, et les effets endocriniens, agissant sur le système hormonal des espèces. C'est dans un tel contexte qu'une étude Ifremer [12] a été réalisée pour tenter de mettre en évidence les effets génotoxiques et cancérigènes chez la limande, poisson plat, soumis à l'exposition de la contamination chimique, notamment par les PCB, dioxines et furanes (PCDD\*/F) et hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP). Les niveaux de contamination ont été comparés entre la partie aval de l'estuaire de la Seine et la baie de Somme, en différenciant mâles et femelles, adultes et juvéniles. Parallèlement aux analyses chimiques, plusieurs types de lésions à l'ADN ont été mesurés en tant que marqueurs biologiques de l'expression de la génotoxicité : les adduits à l'ADN (fixation à l'ADN d'une molécule chimique) et les cassures de brins de l'ADN. La recherche de tumeurs était également réalisée par examen histopathologique du foie des poissons échantillonnés. Les niveaux de contamination des PCB et PCDD/F sont bien plus élevés en baie de Seine qu'en baie de Somme et se retrouvent dans les tissus des limandes échantillonnées, principalement dans le foie. Contrairement aux autres contaminants mesurés, les HAP sont faiblement détectés dans le poisson, non parce qu'ils sont absents du milieu, mais parce qu'ils sont biotransformés *in vivo* et les métabolites hydroxylés formés se retrouvent dans la bile de poisson [13]. Parallèlement aux analyses chimiques, la présence de différents types de lésions à l'ADN est démontrée, ce qui témoigne de l'exposition des organismes à des substances génotoxiques présentes dans le milieu naturel. Malgré les dommages à l'ADN, le pourcentage d'individus présentant des lésions cancéreuses reste faible (1,2 %). L'analyse statistique des données obtenues en chimie et biologie montre l'existence d'une corrélation positive et significative entre le niveau de cassures de brins de l'ADN et la concentration en PCB et en PCDD/F dans la limande. Le niveau d'adduits à l'ADN est plutôt corrélé avec la présence des HAP, notamment avec la concentration en fluoranthène dans le foie du poisson. Les conséquences à long terme de tels effets sur les populations de limande sont difficilement prévisibles, d'autant que d'autres facteurs de stress, comme les aménagements physiques, une pêche trop intensive ou l'évolution climatique, peuvent également jouer un rôle significatif sur le cycle de vie de l'espèce et donc sur la stabilité ou l'évolution des stocks.

devenue une obligation réglementaire avant la mise sur le marché de substances nouvelles. Le *Technical Guidance Document* (TGD) est le document méthodologique européen de référence, qui a été adopté par la Commission OSPAR comme outil méthodologique pour l'évaluation du risque chimique en milieu marin. Une telle approche méthodologique nécessite d'être validée en milieu naturel pour estimer sa pertinence pour les gestionnaires de l'environnement. Rappelons que l'expertise (et donc ses outils) fait dorénavant partie de la mission des chercheurs dans le cadre de la nouvelle loi sur la recherche. La caractérisation du risque doit pouvoir être confrontée à la vérité terrain, située à deux niveaux, celui de la validation écotoxicologique (santé des individus) et de la validation écologique (santé des écosystèmes). Cette orientation nécessite une forte interaction entre les chercheurs. Les travaux interdisciplinaires sont en même temps un excellent moyen pour faciliter le rapprochement des scientifiques travaillant sur la « biogéochimie » des contaminants et « l'écotoxicologie ».

## Conclusions

Compte tenu des incertitudes existantes, la surveillance du milieu marin constitue un enjeu essentiel en matière de gestion des milieux aquatiques. Il convient de distinguer les termes « surveillance » et « contrôle ». La « surveillance » permet d'évaluer l'évolution spatio-temporelle de la contamination chimique et les données acquises sur des séries à long terme d'échantillons (plusieurs décennies) constituent des données à caractère patrimonial, le programme RNO en est un bon exemple. Le « contrôle » se réfère au dépassement ou non d'une valeur seuil (norme de qualité environnementale, NQE) pour qualifier l'état chimique d'une masse d'eau et la mise en œuvre d'un tel programme ne vise pas à connaître *a priori* le niveau réel de la contamination du milieu.

Dans un contexte de développement durable, le préventif doit primer sur le curatif. La protection de l'océan et des mers côtières, comme la protection de la santé humaine, nécessite des politiques préventives ambitieuses dont le système REACH constitue aujourd'hui un jalon essentiel amené à évoluer dans les années futures.

## Références

- [1] Costanza *et al.*, The value of the world's ecosystem services and natural capita, *Nature*, **1997**, *387*, p. 253.
- [2] Blanc G. *et al.*, Le cadmium dans le Lot et la Garonne : sources et transport, *Hydroécologie appliquée*, **2006**, *15(1-2)*, p. 19.
- [3] Kolpin D.W. *et al.*, Pharmaceuticals, hormones and other organic wastewater contaminants in US streams, 1999-2000: a national reconnaissance, *Environm. Science and Technology*, **2002**, *36*, p. 1202.
- [4] Casellas C., Risques écologiques et sanitaires des résidus de médicaments dans les eaux, Colloque Hydrosociétés, Montpellier, 16-17 juin 2005, Actes du colloque publiés dans *Environnement, Risques & Santé* (ERS), **2006**, *5(4)*, p. 225.
- [5] Marchand M., Tissier C., *Analyse du risque chimique en milieu marin*, Éditions Ifremer, **2005**.
- [6] Weill C., REACH : enjeux et perspectives, Institut du développement durable et des relations internationales (IDDRI), Synthèses n° 11 (Entreprise et biens publics), **2006**, <http://www.iddri.org>.
- [7] James A. *et al.*, Les normes de qualité environnementale (NQE), outils d'évaluation du bon état chimique, *Bulletin RNO, Surveillance du milieu marin*, Éditions Ifremer et Ministère de l'Écologie et du Développement durable, **2006** (document téléchargeable sur <http://www.ifremer.fr/envlit/surveillance/rnopublis.htm>).
- [8] Claisse D. *et al.*, Lignes de base : les contaminants chimiques dans les huîtres et les moules du littoral français, *Bulletin RNO*, Éditions Ifremer et Ministère de l'Écologie et du Développement durable, **2006** (document téléchargeable sur <http://www.ifremer.fr/envlit/surveillance/rnopublis.htm>).
- [9] Golberg *et al.*, The mussel watch, *Environmental Conservation*, **1978**, *5*, p. 101.
- [10] Boudou A. *et al.* : a) Les chercheurs d'or et la pollution par le mercure en Guyane française : conséquences environnementales et sanitaires », *Environnement, Risques & Santé* (ERS), **2006**, *5(3)*, p. 167 ; b) Chercheurs d'or et contamination par le mercure des systèmes aquatiques continentaux de Guyane – risques à l'égard des populations humaines, *Hydroécologie Appliquée*, **2006**, *15*, p. 1.
- [11] Dauvin J.C., L'estuaire de la Seine : un espace fortement aménagé, Estuaires nord-atlantiques : problèmes et perspectives, *Bulletin spécial Seine-Aval*, GIP Seine-Aval, sept. **2006**, p. 27 (<http://ftp-sa.crihan.fr/webGIPSA>).
- [12] Akcha F. *et al.*, Relation entre la contamination chimique de l'estuaire de la Seine et les effets génotoxiques et cancérigènes chez la limande. Étude financée par l'Agence de l'eau Seine Normandie, *Rapport Ifremer*, Centre de Nantes, **2004**.
- [13] Budzinski H. *et al.*, Link between exposure of fish (*Solea solea*) to PAHs and metabolites: application to the Erika oil spill, *Aquatic Living Resources*, **2004**, *17*, p. 329.



## Michel Marchand

est responsable du Programme « Surveillance et évaluation de l'état des eaux littorales », Ifremer\*.

\* Centre Ifremer de Nantes, Rue de l'île d'Yeu, BP 21105, 44311 Nantes Cedex. Courriel : [michel.marchand@ifremer.fr](mailto:michel.marchand@ifremer.fr)

# Le stockage électrochimique de l'énergie

## Apport des batteries lithium-ion

Sylvain Franger, Charlotte Benoit, Romuald Saint-Martin

### Résumé

L'un des grands défis du XXI<sup>e</sup> siècle consiste en la maîtrise d'énergies nouvelles et propres à l'échelle de la planète, car il est nécessaire de réduire de façon drastique notre dépendance aux énergies fossiles, génératrices de gaz à effet de serre. Plusieurs solutions complémentaires sont envisagées. En particulier, les énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marémotrice...) doivent être davantage développées. Dans le secteur de l'automobile, il s'agit également de combler les besoins en pétrole, alors que dans le même temps, le nombre de véhicules en circulation augmente indéniablement. Pour cela, les piles à combustible sont considérées comme le choix à privilégier à long terme. Cependant, cette technologie doit surmonter de nombreux freins techniques et économiques et les dispositifs hybrides continuent donc d'être développés. Les systèmes de stockage électrochimique de l'énergie et notamment les accumulateurs Li-ion contribuent, depuis près de deux décennies, à l'essor considérable des équipements électriques portables. Ils doivent cependant être encore améliorés pour répondre efficacement aux besoins du secteur automobile et des nouveaux dispositifs nomades.

### Mots-clés

**Stockage de l'énergie, véhicule électrique hybride, batteries Li-ion rechargeables, matériaux d'électrode, chimie du solide.**

### Abstract

**The electrochemical energy storage: contribution of the rechargeable lithium-ion batteries**

One of the XXI<sup>th</sup> century big challenges consists of the control, at the planet scale, of new and clean energies. It is necessary to reduce, in a drastic way, our dependency to fossil energies as they produce greenhouse effect gases. Several complementary solutions have to be considered. In particular, the renewable energy sources (solar, wind, hydraulic, geothermal, tidal power) have to be more developed. In the car industry field, it is also a question of filling out the oil requirements, knowing that in the same time, the number of vehicles unquestionably increases. In that way, the fuel cells are regarded as the choice to privilege in the long term. However, this technology has to overcome numerous technical and economic problems and hybrid electric equipments will continue so to be developed. The electrochemical energy storage systems, and especially the Li-Ion batteries, contribute, for nearly two decades, with the considerable rise of the portable electric components. They have however to be still improved to effectively meet the needs for the automobile sector as well as for the new portable devices.

### Keywords

**Energy storage, hybride electric vehicle, Li-ion rechargeable batteries, electrode materials, solid state chemistry.**

L'énergie est indispensable au développement de toute société humaine et, depuis toujours, l'Homme n'a eu de cesse d'exploiter toute source d'énergie utile à son mode de vie (feu, vent, soleil...). La demande énergétique est restée faible jusqu'à la révolution industrielle, où le charbon (source relativement concentrée d'énergie) a permis un très rapide développement des moyens de production, remplaçant petit à petit les sources d'énergie primaires traditionnelles. Le pétrole et le gaz naturel ont ensuite très rapidement rejoint le charbon et aujourd'hui, ces trois combustibles fossiles représentent les trois-quarts de la consommation mondiale d'énergie, le quart restant étant essentiellement supporté par l'énergie nucléaire.

L'augmentation de la production industrielle et l'essor considérable des transports (terrestres, maritimes, aériens), couplés aux besoins domestiques (notamment pour le chauffage), ont nécessité l'utilisation de quantités considérables d'énergies fossiles (*tableaux I et II*) engendrant progressivement des effets pervers sur l'environnement, soit directement

sous forme de pollutions (dégradation de la qualité de l'air des grandes agglomérations, marées noires...), soit indirectement avec l'émission massive de gaz à effet de serre.

Tableau I - Consommation française d'énergie finale par activité en 2004 (source : ADEME).

\*millions de tonnes équivalent pétrole ; \*\*chauffage, électricité spécifique, eau chaude sanitaire et cuisson ; \*\*\*les 29 pays industrialisés membres de l'OCDE consomment 5 100 Mtep par an d'énergie primaire, alors que le reste du monde ne consomme que 4 600 Mtep (1/3 de la population mondiale n'a ainsi toujours pas accès à une quelconque forme d'énergie autre que la biomasse traditionnelle, essentiellement le bois).

Domaines d'activité	Consommation (Mtep*)	Consommation (%)	Émission de CO <sub>2</sub> (% , année 2002)
Transports	51	28,8	28,1
Industries manufacturières	37	20,9	22,0
Matières premières	16	9,1	
Résidentiel et tertiaire**	70	39,5	36,0
Agriculture	3	1,7	10,5
	177***		

Tableau II - Réserves énergétiques mondiales d'origine fossile (source : Observatoire des énergies).

Énergies fossiles	Part dans la consommation d'énergie mondiale (% , année 2002)	Réserves prouvées (sur la base de la consommation mondiale en 2002)
Charbon	24 (4,5 en France)	> 260 ans
Pétrole	36,5 (36,2 en France)	~ 50 ans
Gaz naturel	23 (14 en France)	~ 65 ans

La prise de conscience progressive, au niveau international, des risques de changement climatique et des conditions nécessaires à un développement durable de la planète, a ouvert incontestablement la voie aux nouvelles technologies de l'énergie.

De plus, au-delà de ces impacts environnementaux, la dépendance énergétique en combustibles fossiles, du fait de la concentration des réservoirs naturels dans peu de pays, (localisés essentiellement au Moyen-Orient et en Afrique du Nord) et ses conséquences politiques (accès pérennes aux sources), économiques (prix du baril de pétrole) et sociales (conflits, guerre du Golfe) ont décidé les dirigeants occidentaux à diversifier les sources d'énergie et à favoriser les productions locales (*tableau III*).

Tableau III - Évolution de la consommation d'énergies fossiles entre 1973 et 2002 (source : Observatoire des énergies).

Énergies fossiles	Années	Part dans la consommation d'énergie mondiale (%)	Part dans la consommation d'énergie en France (%)
Pétrole	1973	46	70
	2002	36,5	36,2
Gaz naturel	1973	15,5	7,7
	2002	23	14

En outre, et quels que soient les chiffres avancés, les sources fossiles ne sont pas inépuisables et même s'il en reste suffisamment pour subvenir aux besoins du proche futur (*tableau II*), il est de toute façon indispensable de dégager rapidement des solutions alternatives et durables afin de palier un manque qui paraît inéluctable. Jusqu'à présent, l'utilisation quasi exclusive des combustibles fossiles a pu se justifier par leur abondance relative, leur pouvoir énergétique important, mais surtout par leur facilité à être distribués et stockés.

Il est en effet plus contraignant et délicat d'utiliser par exemple l'énergie du soleil, qui d'un côté nécessite des équipements de conversion encore onéreux (cellules photovoltaïques, chauffe-eau solaires) et reste de plus une source intermittente. On pourrait bien entendu faire le même constat avec l'énergie éolienne ou marémotrice. Néanmoins, ces énergies renouvelables constituent une piste réellement séduisante. Pour qu'elles deviennent véritablement compétitives, mais surtout utilisables « à la demande », il est toutefois nécessaire de les coupler avec des systèmes de stockage permettant d'emmagasiner une partie de l'énergie produite et de la restituer lorsque la source primaire ne peut plus fonctionner (interruption momentanée ou de longue durée). En matière de recherche et d'innovation, l'objectif poursuivi dans ce domaine est d'amener ces systèmes à des niveaux de performance et de coût compétitifs (*tableau IV*). En effet, le stockage de l'électricité par exemple a toujours

Tableau IV - Coût de l'électricité suivant différentes filières (sources : ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, PNUD et DGEMP).

\*les fourchettes (établies pour la France, en 2003) correspondent à la diversité des coûts de production selon les variantes technologiques, les sites et la taille des installations.

Filières de production	Coût* (HT, en centimes d'euro/kWh)
Solaire (photovoltaïque)	25 - 125
Éolien	5 - 13
Hydraulique	2 - 10
Charbon	3,7 - 4
Nucléaire (fission)	3,2 - 3,5

été le point faible de la filière énergétique. C'est sur ce plan que des percées technologiques peuvent avoir les retombées les plus déterminantes.

### Les batteries lithium-ion

Aujourd'hui, les systèmes de stockage de l'énergie les plus performants et les plus fiables sont les accumulateurs électrochimiques. Parmi cette classe de générateurs, les batteries au lithium sont les plus intéressantes (*tableau V*), ces dernières présentant en effet la particularité d'offrir les densités d'énergie massique et volumique les plus importantes à l'heure actuelle [1-3] (voir *encadré*).

Au début des années 80, les premières batteries au lithium commerciales (Molicel) étaient constituées de deux électrodes particulières : Li métal et MoS<sub>2</sub> (disulfure de molybdène). Les accumulateurs Molicel (600 mAh) ont ainsi équipé certains téléphones mobiles entre 1987 et 1989. Malheureusement, ils ont dû être retirés du marché après un accident survenu au Japon. Ce système possédait en effet un inconvénient majeur : lors de la recharge de la batterie, les ions lithium de l'électrolyte se réduisent pour redonner du lithium métallique et celui-ci se dépose sous forme d'excroissances (dendrites) qui peuvent traverser la solution électrolytique et viennent ainsi en contact avec l'autre électrode, réalisant par là-même un court-circuit. La quantité de charges, échangée quasi instantanément lors de ce phénomène, est telle que l'échauffement local qui en résulte, particulièrement intense, peut initier l'inflammation de l'électrolyte organique et finalement conduire à l'explosion de la batterie.

De tels problèmes de sécurité ont donc immédiatement orienté les recherches vers des systèmes plus sûrs, ne comportant plus de lithium métallique jugé trop réactif. C'est dans ce contexte que les premières batteries lithium-ion ont été commercialisées par Sony en 1991, et depuis, leur importance n'a fait que croître sur le marché de l'électronique portable, notamment pour la téléphonie mobile et les micro-ordinateurs.

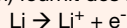
Dans ces systèmes, la technologie couramment rencontrée repose sur l'utilisation de deux électrodes particulières : graphite et LiCoO<sub>2</sub> (oxyde de cobalt lithié). L'originalité du dispositif électrochimique est qu'ici les deux électrodes peuvent insérer-désinsérer réversiblement des ions lithium. En d'autres termes, lorsque la batterie fonctionne, tout se passe comme si les ions lithium étaient échangés d'une électrode à l'autre (on parle d'ailleurs parfois de système « rocking-chair » pour rendre compte de ce processus particulier). Il n'y a plus de formation de lithium

## Encadré

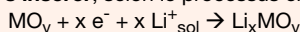
## Les batteries lithium-ion

Les batteries au lithium présentent la particularité d'offrir les densités d'énergie massique et volumique les plus importantes à l'heure actuelle. Ceci est rendu possible par l'emploi d'un réducteur puissant à l'électrode négative, le lithium, qui possède le potentiel standard le plus négatif ( $E^\circ = -3,05 \text{ V/ENH}$ ) et une densité moitié de celle de l'eau ( $\rho = 0,53 \text{ g.cm}^{-3}$ ). Il possède surtout la meilleure capacité faradique par unité de masse ( $3,86 \text{ Ah.g}^{-1}$  contre seulement 0,26 pour le plomb par exemple).

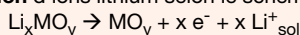
La figure ci-après résume le principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium. Elle montre que pendant la décharge (c'est-à-dire lorsque l'accumulateur délivre du courant), l'électrode négative (anode au lithium) fournit des ions  $\text{Li}^+$  selon la réaction :



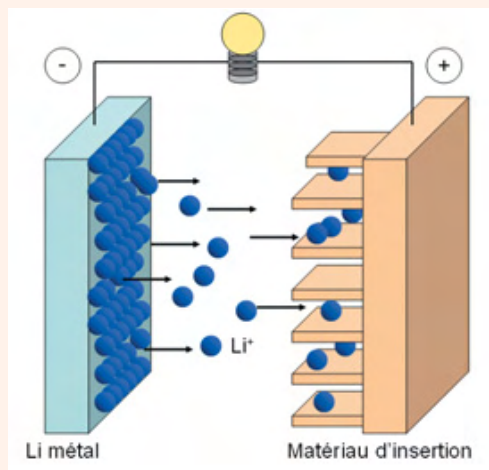
Dans le même temps, le matériau composant l'électrode positive (cathode formée d'un oxyde de métal de transition du type  $\text{MO}_y$ ) va subir une réduction. Le métal M va ainsi passer du degré d'oxydation ( $n$ ) au degré ( $n-1$ ) et pour conserver l'électroneutralité du cristal constituant le matériau cathodique, des ions  $\text{Li}^+$  de l'électrolyte vont s'insérer, selon le processus électrochimique :



Inversement, pendant la recharge (c'est-à-dire lorsque l'accumulateur fonctionne en mode « récepteur »), la réaction électrochimique à l'électrode de lithium devient  $\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Li}$  (réduction des ions lithium de l'électrolyte) et, à l'autre électrode, on observe la réoxydation du métal M. Celle-ci s'accompagne, pour les mêmes raisons d'électroneutralité au sein du matériau, d'une désinsertion d'ions lithium selon le schéma :



Ces matériaux d'électrode positive doivent donc pouvoir insérer/désinsérer réversiblement des ions  $\text{Li}^+$ . Les performances d'un accumulateur dépendent notamment de l'aptitude du matériau cathodique à accueillir un large taux d'ions lithium ainsi que de la diffusion de ces ions au sein de sa structure. Ces paramètres sont en effet déterminants pour la puissance délivrée par l'accumulateur.



Principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium métal (représenté ici en décharge).

métallique au sein de la batterie et par conséquent, la probabilité d'observer un phénomène de court-circuit interne est fortement diminuée.

À l'heure actuelle, les densités d'énergie accessibles avec ces systèmes (première génération de batteries lithium-ion) sont de l'ordre de 550 mAh à 2,5 Ah pour les applications portables et environ 45 Ah pour les applications stationnaires. De nouveaux secteurs entrent en scène avec l'introduction d'une seconde génération d'accumulateurs Li-ion. C'est le cas pour le marché du véhicule hybride électrique (VHE), qui est en plein développement depuis l'avènement de la Toyota Prius en 1998. En 2006, 384 000 véhicules de ce type ont été commercialisés (78 % de marque Toyota), correspondant à un marché de 600 millions de dollars. La prévision de production annuelle de véhicules hybrides est de 1,1 millions

à l'horizon 2010 et de 2 millions en 2015. Les VHE actuels utilisent des accumulateurs de type nickel-métal hydrure (Ni-MH) (tableau V).

Cependant, cette technologie est désormais à maturité (système borné à 1,3 kW/kg) et présente un certain nombre de limitations (problème de puissance à basse température, rendement de charge très affaibli dès 50 °C, durée de vie limitée, forte tension sur les prix due à la hausse du nickel et du cobalt – deux éléments présents en abondance dans les batteries Ni-MH) qui vont nécessiter à terme l'utilisation d'une autre filière d'accumulateurs. Un certain nombre de points laissent prévoir la pénétration prochaine (~ 2010) d'un système Li-ion pour ces applications VHE :

- meilleures performances des batteries au lithium (2,0 kW/kg) ;
- rendement énergétique élevé ;

Tableau V - Caractéristiques moyennes de quelques accumulateurs électrochimiques commerciaux (état chargé, prêt à l'emploi).

\*Ni-Cd : batterie nickel-cadmium (utilisée dans l'outillage portatif par ex.) ; \*\*Ni-MH : batterie nickel-métal hydrure (utilisée dans les appareils photo numériques par ex.).

Caractéristiques		Pb acide	Ni-Cd*	Ni-MH**	Li-ion
Constituants	Anode	Pb	Cd	$\text{LaNi}_5\text{H}_6$	$\text{LiC}_6$
	Cathode	$\text{PbO}_2$	$\text{NiOOH}$	$\text{NiOOH}$	$\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$
	Électrolyte	$\text{H}_2\text{SO}_4$ (aq)	$\text{KOH}$ (aq)	$\text{KOH}$ (aq)	$\text{LiPF}_6$ (org)
Tension unitaire à vide (V/élément)		2	1,3	1,2	3,5
Puissance spécifique ( $\text{W.kg}^{-1}$ )		90	200	200	250
Énergie spécifique ( $\text{Wh.kg}^{-1}$ )		40	65	80	170
Autodécharge (%/mois)		20	10 (+ effet mémoire)	30	très faible (< 5 %)
Rechargeabilité (nombre de cycles)		1 000	2 000	1 500	1 500
Températures d'utilisation (°C)		- 20 à + 50	- 40 à + 50	- 20 à + 50	- 10 à + 70
Coût (euro/Wh)		0,1	0,5	0,6 à 0,9	0,4 à 1

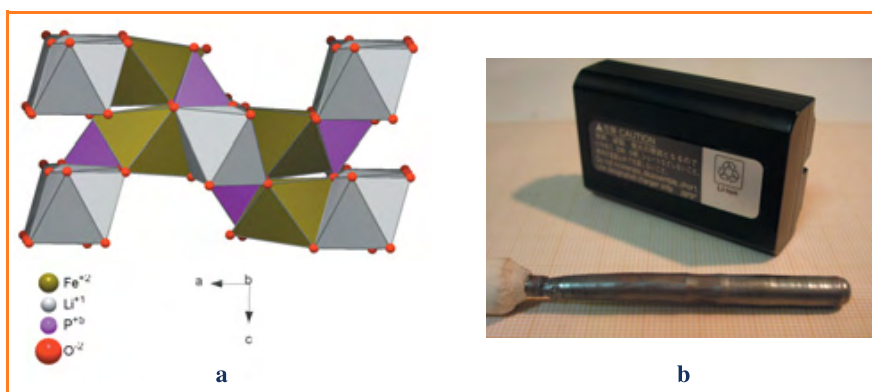


Figure 1 - (a) Structure cristalline et (b) monocristal (obtenu par fusion de zone) de  $\text{LiFePO}_4$ .

- tension unitaire de cellule plus élevée ( $> 3 \text{ V}$  contre  $1,2 \text{ V}$  pour le Ni-MH), nécessitant moins d'éléments en série (gain conséquent en termes de masse, de volume et de prix).

Notons toutefois qu'il est peu envisageable que le développement d'un système Li-ion soit à l'identique de celui développé pour la filière portable. C'est la raison pour laquelle une version Li-ion pour le véhicule n'est présente qu'à l'horizon 2010. En effet, les contraintes de coût et de volume de production, de performances en puissance et de sûreté imposent l'abandon, entre autres, du composé actif d'électrode positive  $\text{LiCoO}_2$  utilisé jusqu'à présent.

Une alternative prometteuse réside dans la famille des phosphates (qui sont déjà connus pour être peu coûteux, peu réactifs et peu toxiques). Un double intérêt d'efficacité et de respect de l'environnement fait désormais du composé  $\text{LiFePO}_4$  (figure 1) un matériau phare pour la nouvelle génération de batteries lithium-ion [4-10]. Toutefois, ce composé reste pénalisé par une conductivité globale encore trop limitée pour des applications à température ambiante. Néanmoins, la génération d'une fine couche de carbone conducteur à la surface des grains permet une amélioration notable de la conductivité électronique du matériau et le contournement de la très faible conduction ionique passe par la réduction des tailles de particules de matière active. En effet dans un grain, le volume efficace pour la diffusion du lithium (surtout si elle est très lente) est d'autant plus élevé que la particule est petite.

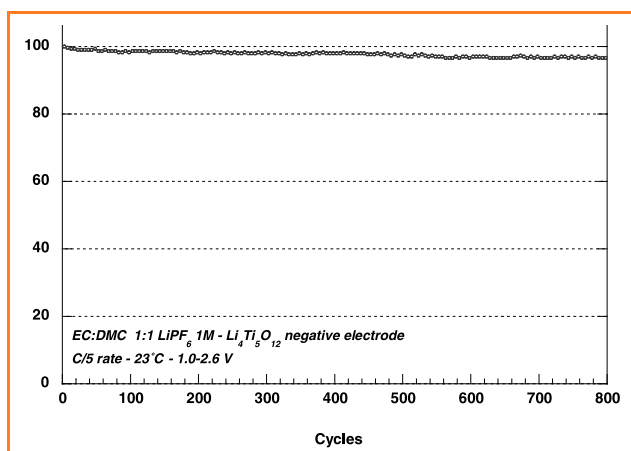


Figure 2 - Excellentes performances du matériau  $\text{LiFePO}_4$  en tant que composé d'insertion du lithium, dans une batterie Li-ion de type commerciale (l'évolution de la capacité initiale de la batterie, au cours des cycles successifs de charge-décharge en 5 heures, montre une perte inférieure à  $0,01 \%$  par cycle).

Un important travail de synthèse autour de ce composé a donc été mis en place durant ces cinq dernières années, afin de satisfaire le cahier des charges précédent et il est désormais envisageable d'utiliser  $\text{LiFePO}_4$  comme matériau d'électrode positive (figure 2).

On voit donc, sur ce simple exemple, que le développement de la seconde génération de batteries lithium-ion ne se fera pas sans une étroite collaboration entre plusieurs champs disciplinaires : chimie, électrochimie, sciences des matériaux, modélisation...

Une synergie évidente doit donc exister entre les différents acteurs de la recherche, depuis la conception jusqu'à la réalisation

pratique des batteries, afin de progresser rapidement dans le domaine et de pouvoir intégrer ces systèmes durablement dans les offres technologiques qui ne manqueront pas d'être proposées aux consommateurs, au cours des prochaines années.

## Références

- [1] Tarascon J.-M., *L'Act. Chim.*, Mars 2002, p. 130.
- [2] Megahed S., Scrosati B., Li-ion rechargeable batteries, *J. Power Sources*, **1994**, *51*, p. 79.
- [3] Tarascon J.-M., Gozdz A.S., Schmutz C., Shokoohi F., Warren P.C., Performance of Bellcore's plastic rechargeable Li-ion batteries, *Solid State Ionics*, **1996**, *86-88*, p. 49.
- [4] Padhi A.K., Nanjundaswamy K.S., Goodenough J.B., Phospho-olivines as positive electrode materials for rechargeable Li batteries, *J. Electrochem. Soc.*, **1997**, *144*, p. 1188.
- [5] Ravet N., Chouinard Y., Magnan J.F., Besner S., Gauthier M., Armand M., Electroactivity of natural and synthetic triphylite, *J. Power Sources*, **2001**, *97-98*, p. 503.
- [6] Yang S., Song Y., Ngala K., Zavalij P.Y., Whittingham M.S., Performance of  $\text{LiFePO}_4$  as lithium battery cathode and comparison with manganese and vanadium oxides, *J. Power Sources*, **2003**, *119-121*, p. 239.
- [7] Franger S., Bourbon C., Le Cras F., Optimized lithium iron phosphate for high rate electrochemical applications, *J. Electrochem. Soc.*, **2004**, *151*, p. A1024.
- [8] Subramanya-Herle P., Ellis B., Coombs N., Nazar L.F., Nano-network electronic conduction in iron and nickel olivine phosphate, *Nature Mater.*, **2004**, *3*, p. 147.
- [9] Delacourt C., Poizot P., Tarascon J.-M., Masquelier C., The existence of a temperature-driven solid solution in  $\text{Li}_x\text{FePO}_4$  for  $0 < x < 1$ , *Nature Mater.*, **2005**, *4*, p. 254.
- [10] Benoit C., Étude des propriétés électrochimiques de nouveaux composés à base de fer utilisables comme matériaux d'électrode positive pour accumulateurs au lithium, Thèse de doctorat (Université Paris XI), **2007**.



S. Franger



C. Benoit



R. Saint-Martin

Sylvain Franger (auteur correspondant) est maître de conférences, Charlotte Benoit, docteur, et Romuald Saint-Martin, ingénieur d'études à l'Institut de Chimie moléculaire et des Matériaux d'Orsay, Université Paris XI\*.

\* Université Paris XI, Institut de Chimie moléculaire et des Matériaux d'Orsay (UMR CNRS 8182), Équipe de physico-chimie de l'état solide (bât. 410), 91405 Orsay Cedex.  
Courriels : sylvain.franger@u-psud.fr  
charlotte.benoit-moez@mps.a.com  
romuald.saint-martin@u-psud.fr

# Une démarche de progrès pour un développement durable

## Expérience de la branche chimie de Total

André Grosmaître

<b>Résumé</b>	La branche chimie de Total est engagée dans une démarche d'amélioration continue de ses performances en matière de sécurité, de protection de l'environnement et de préservation de la santé. Initiée dès le début des années 1990 avec l'adhésion au programme mondial « Responsible Care » de l'industrie chimique, cette démarche s'est renforcée et est maintenant globale avec l'intégration des aspects économiques, sociétaux et environnementaux. Les attentes des parties prenantes sont prises en compte pour rechercher les meilleures solutions contribuant ainsi au développement durable.
<b>Mots clés</b>	<b>Total, branche chimie, « Responsible Care », démarche de progrès HSE, développement durable.</b>
<b>Abstract</b>	<b>Steps of progress for a sustainable development</b> Total's chemicals branch is committed to an ongoing initiative to improve its safety, health and environmental performance. Launched in the early 1990s with the endorsement of the chemical industry's "Responsible Care" worldwide programme, this initiative has steadily gained momentum so that it now encompasses economic, societal and environmental issues. The expectations of stakeholders are taken into account in the search for optimum solutions to help achieve sustainable development.
<b>Keywords</b>	<b>Total, Chemicals branch, "Responsible Care", HSE continuous improvement, sustainable development.</b>

Le monde d'aujourd'hui se trouve confronté à de nombreux défis d'ordre humain, social, économique et environnemental. Face à cette situation complexe, le groupe Total est conscient de sa responsabilité sociétale et environnementale, et au-delà du succès économique de ses activités industrielles et commerciales, Total veut apporter toute sa contribution au développement durable avec trois lignes d'action :

- **Maîtriser et réduire l'impact de ses activités sur les personnes et l'environnement**

En plaçant en tête de ses priorités la sécurité de ses opérations, la préservation de la santé et la protection de l'environnement, le groupe s'impose :

- l'examen systématique et périodique des risques de ses activités industrielles et de transport, ainsi que des évaluations de risques pour les produits sur l'ensemble du cycle de vie ;
- la mise en place de systèmes de management HSE (hygiène/santé-sécurité/environnement) reconnus et vérifiés ;
- une démarche de progrès avec objectifs et plans d'actions associés ;
- un « reporting environnemental » vérifié par des tiers.

- **Contribuer au développement économique et social des parties prenantes concernées**

Créer de la valeur pour les parties prenantes concernées par les activités du groupe est un objectif majeur qui se concrétise à travers :

- la promotion active d'une politique de diversité des collaborateurs du groupe ;

- le soutien volontaire apporté à la mise en œuvre de programmes socio-économiques visant à favoriser la santé, l'éducation, le progrès économique ou l'accès à l'énergie dans les pays en développement ;
- la création d'emplois directs ou indirects sur les territoires d'accueil de ses activités ;
- une contribution financière transparente, à travers impôts, taxes et redevances, au développement des territoires d'accueil, dans le respect des législations locales.

Enfin, pour mieux prendre en compte les attentes de la société civile, Total encourage le dialogue et la concertation, notamment avec les riverains de ses établissements.

- **Mieux anticiper les besoins de demain**

La vocation de Total ne consiste pas seulement à satisfaire la demande actuelle de produits énergétiques ou chimiques, mais aussi à anticiper celle des générations futures. Le groupe s'y emploie notamment en développant :

- de nouveaux produits, plus performants, prenant en compte l'ensemble du cycle de vie et visant notamment une meilleure efficacité énergétique ;
- de nouveaux procédés pour réduire ses propres consommations d'eau et d'énergie, ses émissions de polluants ainsi que la production de déchets ultimes ;
- de nouvelles ressources d'énergie, susceptibles d'assurer un complément aux énergies fossiles dont il s'efforce par ailleurs de prolonger la durée de vie.

Pour préparer l'avenir, Total veille à réduire ses émissions de gaz à effet de serre et celles de ses clients afin d'épargner

les ressources fossiles et de participer à la lutte contre le changement climatique.

La branche chimie de Total est très impliquée dans cette démarche. Dans cet esprit et depuis vingt ans, les activités chimiques de Total souscrivent au « Responsible Care », démarche de progrès de l'industrie chimique mondiale alliant l'amélioration des performances HSE, la réduction des impacts de ses activités et produits, la préservation des ressources naturelles et un dialogue avec les parties prenantes pour une meilleure prise en compte de leurs préoccupations.

Les activités chimiques de Total représentent 19 milliards d'euros de chiffre d'affaires avec un effectif de 44 500 personnes dans le monde (figure 1). Ses activités se répartissent en deux ensembles : chimie de base et spécialités. La chimie de base reprend les activités pétrochimiques, au sein de Total Petrochemicals, depuis la production des oléfines et aromatiques jusqu'aux polymères, et une activité de fertilisants avec la société GPN, plus centrée sur la France et Rosier pour le Bénélux. Les spécialités regroupent les résines avec les sociétés Cray Valley et Sartomer, les colles et adhésifs avec la société Bostik, la chimie de métallisation avec Atotech et enfin la société Hutchinson, producteur de biens intermédiaires et spécialiste de la transformation du caoutchouc. La branche chimie se répartit globalement sur 230 usines dans le monde, principalement situées en Europe, aux États-Unis et dans le sud-est Asiatique.

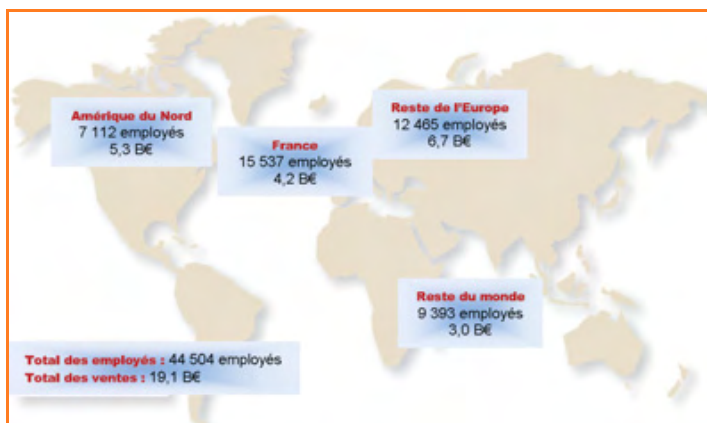


Figure 1 - Activités chimiques et effectifs de Total dans le Monde fin 2006.

## Maîtrise et réduction de l'impact de ses activités

En sécurité industrielle, la maîtrise et la réduction des risques technologiques demeurent une priorité. Des évaluations de risques sont effectuées à la conception et au démarrage des installations et ces études sont reprises et réactualisées périodiquement. Les accidents et presque accidents sont analysés et peuvent conduire à l'élaboration de nouveaux standards et de guides de bonnes pratiques, à des modifications techniques et à des actions de formation spécifiques pour les personnes assurant la conduite des installations.

La sécurité au poste de travail est également une préoccupation majeure. Depuis 2001, première année après la fusion des trois composantes du groupe Total, un programme « Sécurité en action » a été lancé par la branche chimie et les performances se sont améliorées

significativement avec une baisse chaque année de 15 % de nos accidents de travail, soit de 2001 à 2006 une division par deux de la fréquence des accidents (figure 2). Cette attention doit être maintenue pour garantir la durabilité de ces résultats et poursuivre cette baisse car nous ne sommes pas encore au niveau des meilleurs.

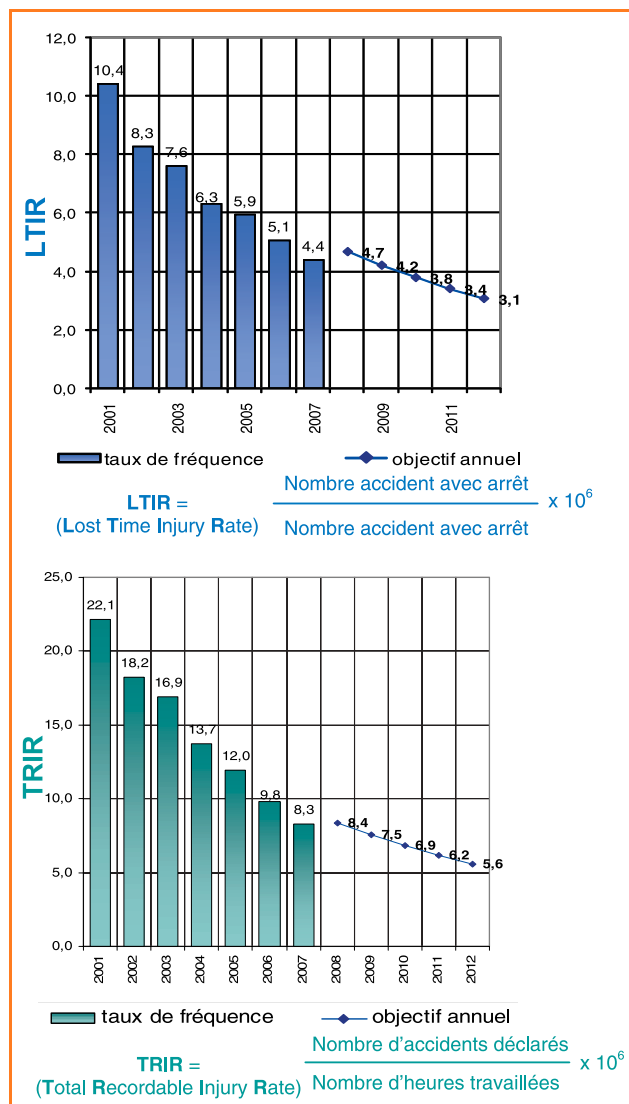


Figure 2 - Sécurité au poste de travail. La gravité (nombre de jours perdus par accident) est aussi un indicateur de suivi.

Ces performances ont été obtenues grâce à l'engagement de tous et plus particulièrement à l'implication de l'encadrement. Des systèmes de management, ensemble de règles, procédures et dispositions organisationnelles, ont été mis en place sur tous les sites. Pour les sites à risque plus important (Seveso en Europe ou équivalent dans le reste du monde), ce système de management est audité par des experts extérieurs selon le référentiel mondialement connu ISRS (« International Safety Rating System »). Notre objectif est que les 61 sites à risque important de la branche chimie soient audités et aient atteint le niveau requis fin 2008.

En environnement comme en sécurité, des systèmes de management « Environnement » sont mis en place. Pour les sites importants pour l'environnement, le groupe impose un audit extérieur qui s'appuie sur la norme ISO 14001. Actuellement, 108 sites sont certifiés ISO 14001 (figure 3). Notre démarche de progrès conduit à une réduction de



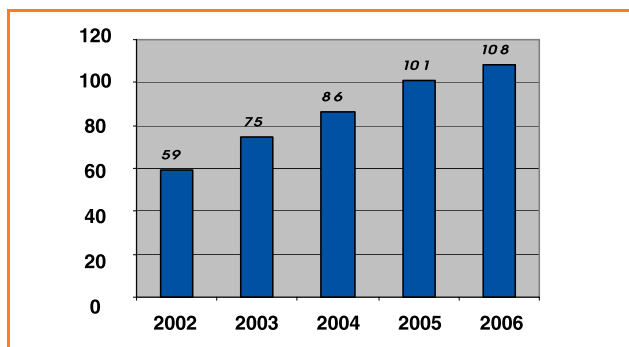


Figure 3 - Certification des systèmes de Management. Branche Chimie : sites certifiés ISO 14001.

l'impact de nos installations sur l'environnement en privilégiant toujours la retenue à la source (modification du procédé ou des conditions opératoires) plutôt que des installations de traitement. Ainsi en l'espace de cinq ans, la charge organique rejetée dans les effluents aqueux comme les composés organiques volatils rejetés dans l'air ont diminué de plus de 20 %. Il convient aussi de mentionner la lutte contre le changement climatique avec un programme d'actions reposant sur un meilleur bilan des émissions avec des vérifications externes, une amélioration de l'efficacité énergétique et des modifications de nos installations lors de grands arrêts pour travaux et extension.

Pour terminer ce volet environnement, il faut citer l'action menée pour réhabiliter les anciens sites industriels. La chimie européenne et américaine était relativement dispersée et avec les restructurations, de nombreux sites industriels ont été fermés depuis la 2<sup>nd</sup>e Guerre mondiale. La réhabilitation de ces anciens sites industriels permet d'éviter tout impact environnemental et sanitaire et de trouver un nouvel usage à ces terrains compatible avec le risque résiduel (figure 4). Notre objectif est de laisser aux générations futures une situation plus saine que celle dont nous avons héritée. Aujourd'hui lorsqu'un site doit être arrêté, la réhabilitation fait partie intégrante du projet comme le volet social associé.

La préservation de la santé englobe l'hygiène et les conditions de travail d'une part et la surveillance de la santé du personnel d'autre part ; les conditions d'utilisation de nos produits sont également prises en considération. Dans tous les cas, une évaluation des risques et des dispositions particulières de prévention permettent de garantir la protection des personnes.



Figure 4 - Réhabilitation du site industriel de Vendin.

## Contribuer au développement des parties prenantes

Dans les relations avec les parties prenantes, la branche chimie de Total a lancé en 2002 un programme d'actions « Terrains d'entente » menées autour des sites industriels, afin de mieux répondre aux attentes et préoccupations de notre voisinage. Des enquêtes et études d'opinion ont été menées en France puis en Europe pour mieux cerner les attentes et la perception des parties prenantes. Des plans particuliers ont alors été établis pour, tout d'abord, mieux se connaître et se faire connaître (journées portes ouvertes, rencontres...) mais aussi travailler ensemble sur des projets communs (plus particulièrement avec le monde éducatif et associatif (accueil de stagiaires, enseignement, opérations de protection de l'environnement...). Enfin, la nouvelle réglementation REACH sur les produits chimiques doit répondre à l'inquiétude des parties prenantes concernant l'impact de ces produits sur la santé et l'environnement. La mise en application de ce règlement européen, qui représente un chantier majeur pour l'industrie chimique, s'étalera sur onze ans et nécessitera de la part de notre industrie des ressources importantes nécessaires aux études et expertises en toxicologie et écotoxicologie.

## Mieux anticiper les besoins de demain

Pour préparer le monde de demain et anticiper les besoins du futur, la branche Chimie consacre d'importants efforts de recherche et développement. Des axes de recherche concernent les procédés de production et le développement de nouveaux produits avec comme objectifs :

- **Développer de nouvelles voies de production** d'oléfines, éthylène et propylène, à partir de gaz naturel, méthanol ou gaz à l'eau compte tenu de la moins grande disponibilité ou du prix des matières premières habituelles naphta et éthane.

- **Mettre au point de nouvelles voies catalytiques** pour optimiser les rendements, améliorer la qualité des produits et réduire la consommation d'énergie. On peut citer toute la progression associée aux catalyseurs Ziegler-Natta conduisant à des polyoléfines matières plastiques beaucoup plus performantes : réduction des coûts de production et amélioration des qualités techniques permettant une diminution du poids des emballages (figure 5), ou de nouvelles applications comme par exemple les réservoirs de carburant des automobiles en polyéthylène.

	poids il y a 20 ans	poids aujourd'hui	réduction à la source	RAPPORT contenant / contenu	
> sac de caisse	24 g	5,5 g	- 77 %	5,5 g	10 kg
> pot de yaourt 125 g	5,8 g	4,8 g	- 17 %	4,8 g	125 g
> bouteille d'eau 1,5 L	40 g	25 g	- 38 %	25 g	1,5 L
> bouchon bouteille minérale	3,1 g	1,8 g	- 42 %		
> sachet légumes 4° gamme	20 g	3,5 g	- 82 %	3,5 g	5 kg
> sachet pour légumes surgelés 1000 g	12,65 g	7,5 g	- 37,5 %	7,9 g	1 kg
> barquette plat cuisiné	40 g	23 g	- 40 %	23 g	300 g
> fût (20 L)	1,2 kg	900 g	- 25 %	900 g	38 kg
> caisse poisson PSE	100 g	87 g	- 13 %	87 g	3 kg

Figure 5 - Réduction, du poids des emballages. Quelques exemples de prévention par réduction à la source.

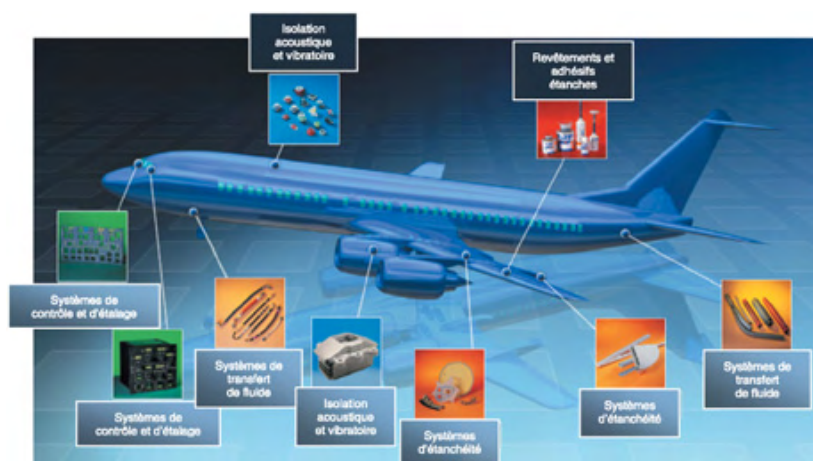


Figure 6 - Ensembles des offres d'Hutchinson pour les avions.

• **Développer de nouveaux produits** permettant de remplacer des matériaux et produits traditionnels afin de mieux répondre aux exigences du développement durable. Ainsi l'emploi de matières plastiques dans l'automobile contribue, grâce à l'allègement des véhicules, à une réduction de 5 % de la consommation de carburant. La chimie apporte des solutions au monde de demain, mais cette contribution n'est pas toujours évidente au grand public et bien souvent, l'industrie chimique génère appréhension, crainte, voire rejet. Comment faire partager l'intérêt du développement d'un mastic pour l'aéronautique, dont la densité passe de 1,55 à 1,10 ? C'est une économie de 400 kg sur un avion de ligne, soit le poids de trois à quatre passagers (figure 6).

• De même, nous nous émerveillons devant les nouvelles techniques d'information et de communication, mais nous ne voyons pas immédiatement la contribution de la chimie comme par exemple celle de la chimie de métallisation avec la fabrication de circuits imprimés en couche plus résistante et encore plus fine.

## En conclusion

La chimie, industrie en pleine mutation, permet au monde d'aujourd'hui de relever les défis de demain en trouvant des solutions allant dans le sens du développement durable. Mais même avec ses atouts, sans esprit d'ouverture et sans écoute des parties prenantes, la poursuite de ses activités et son développement s'en trouveront compromis. Consciente de ces difficultés, la chimie a su initier avec le « Responsible Care » une démarche ambitieuse et innovante. La branche chimie de Total est complètement engagée dans cette voie et apporte toutes ses contributions au développement durable.



### André Grosmaître

est directeur Santé-Sécurité-Environnement & Développement durable, Direction Générale Chimie chez Total\*.

\* Total, Direction Générale Chimie, 2 Place Jean Millier – La Défense 6, 92078 Paris La Défense Cedex.  
Courriel : andre.grosmaître@total.com

**HEXION™**  
Specialty Chemicals



Binding. Bonding. Coating. Leading.

**Axilat™**  
Dispersions, Redispersible  
Powders and Additives for  
**Building & Construction**



Visit [hexion.com](http://hexion.com) today

# L'Université Virtuelle Environnement et Développement durable

Delphine Pommeray et Luc Aquilina

- Résumé** À l'initiative du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, le développement de l'enseignement numérique s'est structuré en France par le biais des universités numériques thématiques. L'une de ces universités, dont la logique n'est pas facultaire mais transversale, a été créée en juin 2005 sous la forme d'une association loi 1901 sous le nom d'UVED (Université Virtuelle Environnement et Développement durable). UVED s'est donné trois missions fondamentales : la production de ressources validées d'un point de vue scientifique, pédagogique et technique, une mission de projet et une mission de développement. UVED s'est centrée sur le niveau Master en vue de développer les liens entre enseignement supérieur et recherche, et développe des ressources pluridisciplinaires dans une démarche de compétences métiers. Cette université virtuelle s'est dotée de fortes exigences de manière à faire entendre une voix expertisée dans le domaine de l'environnement et du développement durable.
- Mots-clés** **Université numérique thématique, environnement, développement durable, formations en ligne, transfert d'expertise.**
- Abstract** **Environment and sustainable development virtual University**  
On behalf of the Ministries of national Education, higher Education and Research, the digital teaching was developed in France through the digital thematic Universities. The Environment and Sustainable Development Virtual University (UVED) has been created in June 2005, with a multidisciplinary approach. This University has three main goals: a resource production after scientific, technical and teaching expertise; a project mission which aims at structuring the production; and a development goal, at national and international levels. UVED is mainly devoted to the Master's degree in order to develop both the links between higher education and research and pluridisciplinary resources through a "professional skills" dynamic. UVED requires high scientific standards so as to prove its skilled knowledge in the field of environment and sustainable development.
- Keywords** **Digital thematic University, environment, sustainable development, digital resources, transfer of expertise.**

Les universités numériques thématiques (UNT) ont été créées à l'initiative de la Sous-direction des technologies de l'information et de la communication pour l'éducation (SDTICE) du Service des technologies et des systèmes d'information des ministères de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

Les UNT s'inscrivent dans la politique de développement des technologies de l'information et de la communication (TIC) soutenue par la SDTICE. Elles ont pour mission, dans le cadre d'une mutualisation à une échelle nationale, de favoriser la mutualisation des acquis, ressources numériques et expériences entre les établissements d'enseignement supérieur, la valorisation d'outils et de ressources numériques existants, la création de ressources numériques nouvelles répondant à des besoins avérés, la création de démarches et parcours pédagogiques nouveaux, la diffusion de ressources pédagogiques numériques libres d'accès.

L'objectif est de mettre à disposition des étudiants et des enseignants un ensemble cohérent de ressources numériques dont la pertinence et la qualité sont garanties par la communauté scientifique animant les UNT.

De création récente (2004), les UNT sont aujourd'hui au nombre de sept et couvrent de grandes thématiques (voir encadré 1).

## L'université virtuelle UVED

L'Université Virtuelle Environnement et Développement durable (UVED), dont la logique n'est pas facultaire mais transversale, a été créée en juin 2005 sous la forme d'une association loi 1901. Plusieurs ministères ont été associés à l'ensemble de la démarche, et UVED est aujourd'hui placée sous le haut patronage des ministres de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables, et sous le parrainage du ministre de l'Agriculture et de la Pêche.

### Encadré 1

#### Les thématiques des universités numériques thématiques (UNT)

- AUNEGE pour l'économie et la gestion
- UMVF pour la santé (qui regroupe maintenant médecine, pharmacie, odontologie et sport sous le nom d'UN3S)
- UNISCIEL pour les sciences fondamentales
- UNIT pour les sciences de l'ingénieur
- UNJF pour les sciences juridiques et politiques
- UOH pour les sciences humaines et sociales, langues et cultures
- UVED pour l'environnement et le développement durable



UVED compte aujourd'hui quarante deux adhérents (voir encadré 2) et développe des formations dans les domaines suivants : sciences de la planète et de l'Univers ; changements globaux ; écosystèmes et biodiversité ; dynamique des milieux naturels ; gestion des ressources naturelles et des déchets ; évaluation et gestion des risques ; gestion et aménagement des territoires ; éco-conception et éco-technologie ; institutions, acteurs, sociétés et territoires. Le développement durable apparaît de manière transversale à ces neuf thématiques.

Pour mener à bien ses missions, UVED a mis en place une forte structuration de son architecture au service de ses différentes missions : Assemblée générale, Conseil d'administration, Bureau, Comité scientifique.

Les différents groupes (technique, pédagogique, juridique, audiovisuel et documentation) appuient les producteurs de ressources de manière à assurer une base commune en termes d'outils et de démarche pédagogique. Cette forte structuration a permis de mettre en place une dynamique commune et de déterminer des modes de fonctionnement communs.

Outre la participation des cinq organismes de recherche, elle s'est dotée d'un Comité scientifique, qui est composé de membres internes et externes, garantissant ainsi au Comité son impartialité. Il organise la priorité de production et réalise l'appel d'offres annuel, valide les projets proposés et valide les productions d'un point de vue scientifique, pédagogique et technique. La qualité des membres de ce conseil et son mode de fonctionnement sont des gages d'une réelle politique éditoriale crédible et exigeante.

UVED s'est donné trois missions fondamentales :

- une mission de production de ressources après validations scientifiques, technique et pédagogique ;
- une mission de projet, qui vise à définir les axes de structuration des productions et les priorités, à recueillir les fonds et promouvoir l'offre ;
- une mission de développement, au niveau national et international.

#### Encadré 2

### L'Université Virtuelle Environnement et Développement durable (UVED) aujourd'hui

- **3 campus numériques** : ENVAM, EscaléS, Économie sociale et solidaire.
- **21 universités françaises** : Bordeaux 1, Université de Bretagne Occidentale (UBO), Blaise-Pascal (Clermont 2), CNAM Délégation Pays de La Loire, Maine, Muséum National d'Histoire Naturelle, Limoges, Haute-Alsace, Nancy Université, Nice, Paris 1, Reims, Rennes 1, Rennes 2, Observatoire de Paris-Meudon, Paul Sabatier (Toulouse 3), Valenciennes, Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ), Université de Savoie (Institut de la Montagne), Université Technologique de Troyes (UTT), IUFM Midi-Pyrénées.
- **3 universités étrangères** : Cheikh Anta Diop (Sénégal), Réseau des Universités du Québec (Canada), Algarve (Portugal).
- **10 écoles** : ENS Lyon, Agrocampus Ouest, École des Mines de Paris, d'Albi, de Saint-Étienne, d'Alès, École Nationale des Techniciens de l'Équipement (ENTE), École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES), École Nationale Supérieure de Chimie de Rennes (ENSCR), Établissement National d'Enseignement Supérieur Agronomique de Dijon (ENESAD).
- **5 organismes** : ADEME, CNRS, CIRAD, INRA, Cemagref.

Outre l'aspect pluridisciplinaire, trois points donnent à cette université un caractère original :

- UVED s'est centrée sur les niveaux Licence et Master pour développer des ressources pluridisciplinaires, inaccessibles aux établissements de manière isolée. Elle a donc vocation principale à promouvoir des projets inter-établissements.
- Elle a cherché d'emblée à développer les liens entre enseignement supérieur et recherche pour promouvoir la valorisation des résultats de la recherche.
- Enfin, elle a résolu de développer ses ressources dans une démarche « compétences métiers » pour être au plus proche des besoins de la société civile et industrielle. UVED souhaite être à l'interface du monde industriel et de l'enseignement supérieur et de la recherche, et être ainsi un acteur du transfert technologique.

UVED crée des ressources utilisées par les organismes dans leurs Masters propres.

### UVED et le développement durable

Étant donné la naissance très récente du domaine de l'environnement et du développement durable (EDD) et son absence de lisibilité dans les structures universitaires, UVED a souhaité réaliser un travail de positionnement et de recensement en vue de contribuer à structurer l'offre de formation dans ce domaine dans une logique « métiers ». Avant de se lancer dans la rédaction de modules, il semblait en effet important de structurer les axes à développer, la production de ressources, et de bien les intégrer dans une offre de formation de niveau Master interdisciplinaire et inter-établissements. Pour mener à bien ce travail de définition, les métiers de l'environnement ont été recensés et analysés à travers l'étude de référentiels métiers et une série d'entretiens ont été réalisés avec des représentants des professionnels publics et privés et des associations citoyennes. En parallèle, l'offre de formation de niveau Master proposée par les établissements adhérents et les compétences mises en œuvre dans ces formations ont été référencées. L'analyse de la carte des savoirs couplée avec la carte des métiers a montré qu'il existe de réels métiers de l'EDD. Ces métiers sont nouveaux et demandent des compétences également nouvelles :

- sur une base scientifique solide et bien centrée qui forme la compétence de base, il est nécessaire de posséder une réelle capacité d'ouverture et de compréhension transversale vers d'autres disciplines ;
- les métiers de l'EDD imposent de nouvelles manières d'approcher les problématiques en intégrant la prise de décision dans un contexte de forte incertitude, l'approche multi-acteurs, la médiation sociale ;
- la compétence finale des métiers de l'EDD vise à intégrer la notion de développement durable comme une vision complète des systèmes complexes.

Les conclusions de ce travail mettent en évidence le fait que le domaine de l'environnement et du développement durable génère de nouveaux métiers et le besoin de nouvelles compétences :

- UVED doit se centrer sur des réalisations pluridisciplinaires afin de permettre aux disciplines de dialoguer entre elles. UVED doit être là où chaque établissement ne peut pas faire seul les réalisations.
- UVED doit mettre en place des ressources sur la notion de développement durable comme une intégration d'une vision large de problématiques à partir d'une base disciplinaire.



• UVED doit développer de nouveaux outils permettant de développer des compétences transversales par le biais d'études de cas multidisciplinaires et interactives, d'approches par problématiques, de gestions de projets complexes.

Pour sa première production initiée fin 2005, UVED a choisi de lancer un ouvrage numérique introductif à l'EDD. Cet ensemble, sélectionné pour le Prix Roberval Multimédia 2009, couvre toutes les facettes du domaine sous quatre entrées et est en accès libre sur le portail d'UVED\* (Encadré 3).

Une version audiovisuelle accompagnera cet ensemble introductif. Elle sera organisée sous la forme de quatre émissions déclinables sous deux versions, public averti et vulgarisation. Une version papier de cet ouvrage numérique est également à l'étude.

### Encadré 3

#### L'ouvrage numérique d'UVED

(prix Roberval Multimédia 2009)

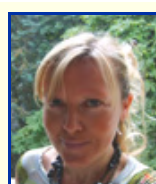
1. Changements globaux ; 2. Dynamique des ressources naturelles ; 3. Analyse et gestion des risques ; 4. Institutions, acteurs, sociétés et territoires. Ces quatre entrées font appel à de nombreuses disciplines intervenant dans le champ des Sciences de l'Environnement et du Développement Durable : biologie des populations, science de l'océan, physique, climatologie, économie, sociologie, droit, énergie, biogéochimie, gestion du risque, géographie. Cette réalisation sans précédent, destinée à évoluer dans le temps, a mobilisé 80 spécialistes, tous experts dans ce domaine et provenant d'une vingtaine d'établissements. Permettre à un étudiant de niveau Licence de situer sa propre discipline au sein de l'ensemble des questions qui se posent aujourd'hui en matière d'environnement et offrir une vue globale de l'EDD pour faire apparaître clairement la transversalité du domaine, tels sont les objectifs de cet outil numérique. C'est également une mine de connaissances pour le grand public. Enfin, l'ouvrage constitue un excellent outil de formation pour les enseignants du primaire et du secondaire.

À ce jour et en réponse aux deux premiers appels d'offres publiés (un en 2006 et deux en 2007), cinq modules ont été livrés et vingt deux sont en cours de production, comme par exemple « La géochimie comme outil d'étude des milieux naturels » ; « Évaluation de l'exposition de l'homme aux polluants par la chaîne alimentaire » ; « Module d'apprentissage sur le contrôle de la qualité et la préservation des ressources en eau » ; « Échanges d'eau et d'éléments » ; « Situations atmosphériques: météorologie, ozone »... La liste de tous les projets en cours de production est consultable sur le portail d'UVED.

L'appel à projets, qui définit les axes de production, les exigences attendues et les critères d'évaluation, est également mis en ligne sur le site\*.

En guise de conclusion, UVED s'est dotée de fortes exigences de manière à faire entendre une voix expertisée dans le domaine de l'environnement et du développement durable. Ce qui reviendrait à formuler le slogan suivant : « Apprendre numériquement, c'est apprendre autrement ! »...

\* Portail d'UVED : [www.uved.fr](http://www.uved.fr)



P. Delphine

#### Pommeray Delphine

est chargée de projet UVED, Université de Rennes 1<sup>1</sup>.

#### Luc Aquilina

est professeur à l'Université de Rennes 1<sup>2</sup>, directeur de la Fédération de Recherche CAREN et président d'UVED.



L. Aquilina

<sup>1</sup> Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, CIRIM, Bât. 24, case 2405, 263 avenue du Général Leclerc, 35042 Rennes Cedex. Courriel : [delphine.pommeray@univ-rennes1.fr](mailto:delphine.pommeray@univ-rennes1.fr)

<sup>2</sup> Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, Géosciences – Bât. 15, 263 avenue du Général Leclerc, CS 74205, 35042 Rennes Cedex. Courriel : [luc.aquilina@univ-rennes1.fr](mailto:luc.aquilina@univ-rennes1.fr)



**Le Centre de Recherches sur les Macromolécules Végétales (Cermav)** créé en 1966 par le CNRS et regroupant plus de 100 personnes, travaille aujourd'hui sur quatre thèmes majeurs : les constituants de la biomasse, l'activité biologique des oligo- et polysaccharides, la biosynthèse et la biodégradation des oligo- et polysaccharides, et les nouveaux matériaux nanostructurés à base de polysaccharides ou de copolysaccharides. Pour mener à bien ses recherches, le Cermav utilise des techniques de pointe en synthèse et en caractérisation.



**Production microbiologique de sucres complexes.** Les sucres complexes à la surface de nos cellules jouent un rôle important dans divers processus de reconnaissance biologique (spécificité antigénique des groupes sanguins, fixation du virus de la grippe...). Ces molécules ont des applications potentielles dans de nombreux domaines mais sont difficiles à synthétiser chimiquement. Depuis 10 ans le Cermav a développé un procédé original de synthèse microbiologique de sucres complexes basé sur une ingénierie génétique d'*Escherichia coli*. Ce procédé breveté permet de produire en grande quantité et à faible coût une collection de plus de soixante sucres représentant les structures biologiques les plus importantes.

Contact : [eric.samain@cermav.cnrs.fr](mailto:eric.samain@cermav.cnrs.fr)

**Une plate-forme de caractérisation structurale** (microscopes optique, à balayage, en transmission, confocal, AFM) permet des études multi-échelles. Les échantillons massifs de polymères naturels sont préparés par ultramicrotomie et les particules isolées sont observées soit après ombrage, soit par cryomicroscopie.

Contact : [isabelle.paintrand@cermav.cnrs.fr](mailto:isabelle.paintrand@cermav.cnrs.fr)

**Un plateau technique dédié à la chromatographie.** Les propriétés originales des composés de nature oligo- et polyosidique, tant sur un plan biologique que rhéologique, sont en relation étroite avec la complexité de leurs structures. Devant la multiplication des demandes de purification et de caractérisation structurale, nous avons mis en place un espace spécifique pour la chromatographie en phase liquide. En plus de la chromatographie en phase gazeuse (GC) et de la spectrométrie de masse, nous proposons un panel de techniques et de modes de fractionnement (GPC haute et basse pressions, HPLC d'affinité sur phase normale et phase inverse, HPLC d'échange d'ions...) associé à une combinaison de systèmes de détection (RI, UV, LALLS couplé à un viscosimètre, ELSD, PAD...). Cet ensemble nous permet de répondre aux sollicitations des chercheurs et industriels.

Contact : [laurine.buon@cermav.cnrs.fr](mailto:laurine.buon@cermav.cnrs.fr)

Dr Redouane Borsali, directeur du Cermav ; [dir-cermav@cermav.cnrs.fr](mailto:dir-cermav@cermav.cnrs.fr) ; <http://www.cermav.cnrs.fr>

# Un exemple de travail collaboratif avec les notions associées à l'équilibre chimique

Jérôme Randon

**Résumé** Un exemple de travail collaboratif est présenté autour du traitement de l'équilibre chimique. Cinq approches de l'équilibre (acide-base, précipitation, partage, oxydo-réduction, complexation) sont partagées par différents groupes d'étudiants qui mettent en commun leur stratégie de résolution de problèmes.

**Mots-clés** Équilibre chimique, étudiants, travail collaboratif, résolution.

Dans l'enseignement de la chimie après le baccalauréat, une large part est faite à la chimie des solutions. Sont alors abordés les équilibres physico-chimiques pour des réactions acido-basiques, des réactions de précipitation, de complexation, d'oxydo-réduction et quelquefois des équilibres de partage entre phases.

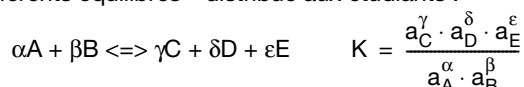
Sur la base des notions de concentration et de quantité de matière qui sont supposées être acquises par les étudiants en premier cycle universitaire (ce qu'il conviendrait de vérifier, car des exemples d'évaluation en L3 (licence) montrent que ces notions doivent encore être consolidées), on s'attachera à développer un ensemble de compétences communes à tous ces équilibres physico-chimiques :

1. Trouver dans des tables les propriétés d'une espèce chimique et les grandeurs caractérisant ces propriétés ;
2. Écrire et équilibrer l'équation bilan d'une réaction chimique ;
3. Écrire la constante d'équilibre associée à une équation bilan ;
4. Prévoir si un mélange de composés peut subir une transformation ;
5. Calculer la constante de l'équilibre à partir des concentrations à l'équilibre ;
6. Calculer les concentrations à l'équilibre à partir de l'état initial du système et d'une information sur l'état d'équilibre ;
7. Calculer la constante de l'équilibre à partir de l'état initial du système et d'une information sur l'état d'équilibre ;
8. Calculer les concentrations à l'équilibre à partir de l'état initial du système et de la constante d'équilibre ;
9. À partir de l'état initial d'un système, prévoir les évolutions à faire subir au système pour atteindre l'état final désiré.

Toutefois, dans nos enseignements, les différents types de réactions sont bien souvent abordés successivement sans nécessairement spécifier au final le caractère totalement transversal des compétences listées ci-dessus.

Nous avons proposé de réaliser une approche de l'équilibre chimique au sein d'un groupe de trente-cinq étudiants en développant une activité de travail collaboratif dans une salle de TD et ceci simultanément sur tous les types de réaction. Les documents utilisés pour cette séquence d'enseignement peuvent être téléchargés sur le site du Master Analyse et Contrôle\*.

Une semaine avant la première séance, l'écriture de la constante d'un équilibre chimique a été présentée de façon générale pour tout type de réaction à l'aide du document « Différents équilibres » distribué aux étudiants :



avec pour le solvant l'activité égale à 1, pour les corps en solution et en première approximation l'activité égale à la concentration, pour les corps précipités l'activité égale à 1 et pour les corps à l'état gazeux l'activité égale à la pression partielle. Cette écriture permet d'exprimer tous les équilibres, incluant les équilibres de complexation, acido-basiques, de dissolution, de précipitation, d'oxydo-réduction et de partage entre phases. La liste des objectifs à atteindre a été de la même façon transmise aux étudiants.

Au cours de la première séances de deux heures, dix groupes de trois à quatre étudiants ont été constitués : groupes 1A, 1B, 2A, 2B, 3A, 3B, 4A, 4B, 5A, 5B puis un document différent (1 à 5) a été distribué à chaque groupe d'étudiants avec pour consigne : « Résoudre par groupe les différents problèmes en identifiant au préalable la compétence visée » (figure 1).

Document 1	Document 2	Document 3	Document 4	Document 5
Document 1	Document 2	Document 3	Document 4	Document 5
<p><b>Document 3</b></p> <p><b>Problème I</b> Le produit de solubilité de l'iodate d'argent <math>\text{AgIO}_3</math> est égal à <math>10^{-7.5}</math>. On mélange à 25 °C, à volumes égaux, une solution de nitrate d'argent <math>\text{AgNO}_3</math>, <math>2 \cdot 10^{-3}</math> M et une solution d'iodate de potassium <math>\text{KIO}_3</math>, <math>2 \cdot 10^{-4}</math> M.</p> <p>Déterminer l'état final du système.</p> <p><b>Problème II</b> ...</p>			<p><b>Document 4</b></p> <p><b>Problème I</b> On solubilise 1 g d'acide lactique dans 100 mL d'eau distillée. Lactic acid [50-21-5] Synonyms: 2-Hydroxypropanoic acid; LACTIC ACID <math>\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3</math>, 90,0786 g.mol<sup>-1</sup> <math>K_a = 10^{-3.9}</math></p> <p>Déterminer l'état final du système.</p> <p><b>Problème II</b> ...</p>	

Figure 1 - Séance 1 : chaque groupe traite les problèmes de son document. Exemple de document pour les groupes 3A, 3B et 4A, 4B.



## Prix et distinctions

### Médailles du CNRS 2008

#### - Médailles d'argent :

**Mireille Blanchard-Desce**, directrice du Laboratoire chimie et photonique moléculaires (CNRS/Université Rennes 1), pour ses travaux très novateurs dans le domaine des systèmes moléculaires ou supramoléculaires pour leur utilisation en biophotonique (imagerie biologique) et comme matériaux pour le traitement de l'information (optique non linéaire) ; **Jean-François Joanny**, directeur de l'Unité physico-chimie Curie (CNRS/Institut Curie, Paris), pour ses recherches dans le domaine de la physique des polymères, et en particulier les approches théoriques qu'il a su développer autour de problématiques relatives à la biologie ; **Philippe Walter**, directeur du Laboratoire du Centre de recherche et de restauration des Musées de France (CNRS/Ministère de la Culture et de la Communication, Paris), pour ses recherches et l'originalité des méthodes qu'il a développées en matière d'analyse *in situ* des objets du patrimoine et les collaborations qu'il a su initier avec les conservateurs des musées, les archéologues et les historiens de l'art.

#### - Médailles de bronze :

**Jérôme Boisbouvier**, Institut de biologie structurale (CNRS/CEA/Université Grenoble 1), pour ses recherches visant à étendre le champ de la RMN liquide à l'étude structurale de systèmes biologiques de complexité croissante (acides nucléiques et assemblages moléculaires de grande taille essentiellement) ; **Valérie Caps**, Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon (CNRS/ Université Lyon 1), pour ses travaux sur le développement de nouvelles voies de synthèse de nanoparticules d'or supportées afin d'en contrôler la morphologie pour des applications en catalyse ; **Fabien Gagosz**, Laboratoire de synthèse organique (CNRS/École polytechnique, Palaiseau), pour ses recherches sur l'utilisation de complexes d'or en catalyse pour l'activation de réactions à température ambiante, un sujet en émergence ; **Nathan David McClenaghan**, Institut des sciences moléculaires (CNRS/ Universités Bordeaux 1 et 4/ENSCP Bordeaux), pour ses travaux sur la synthèse et l'étude d'assemblages moléculaires photoactifs multicomposants pour la nanotechnologie ou le photovoltaïque ; **Guillaume Rogez**, Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg

(CNRS/Université Strasbourg 1), pour sa recherche sur des carboxylates de métaux de transition et des matériaux hybrides lamellaires dans le but d'associer la propriété magnétique du sous-réseau inorganique à la nouvelle propriété apportée par les molécules organiques ; **Anne-Valérie Ruzette**, Laboratoire matière molle et chimie (CNRS/ESPCI, Paris), pour ses études sur le renforcement des matrices polymères par nanostructuration en utilisant des copolymères séquencés afin d'obtenir de nouvelles matrices polymères renforcées dont les propriétés optiques sont mieux préservées.

• La Médaille d'argent distingue un chercheur pour l'originalité, la qualité et l'importance de ses travaux, reconnus sur le plan national et international ; la Médaille de bronze récompense le premier travail d'un chercheur, qui fait de lui un spécialiste de talent dans son domaine, et représente un encouragement du CNRS à poursuivre des recherches bien engagées et déjà fécondes.

Source : CNRS.

### Trois chimistes français lauréats 2008 de la RSC

Parmi les lauréats récompensés par la Royal Society of Chemistry (RSC) :

- **Bruno Chaudret**, directeur de recherche au CNRS et membre de l'Académie des sciences, se voit décerner le prix Sir Geoffrey Wilkinson, en reconnaissance de ses recherches exceptionnelles sur la synthèse de nanoparticules à partir de précurseurs organométalliques et pour ses travaux sur le métal dihydrogéné et les complexes de la même famille.

- **Guy Bertrand**, directeur de l'unité mixte internationale UCR-CNRS Joint Research Chemistry Laboratory, reçoit le Nyholm Prize for Inorganic Chemistry pour ses travaux remarquables sur la chimie des liaisons phosphore-phosphore et la chimie des carbènes stables et de leurs complexes.

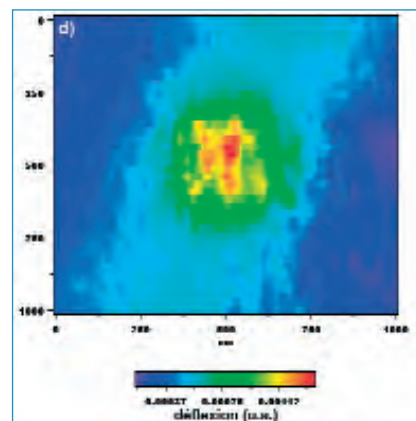
- **Michel Che**, professeur et vice-président de la SCF, Laboratoire de réactivité de surface (CNRS/Université Paris 6), est lauréat du Centenary Prize pour ses investigations pionnières sur la réactivité des surfaces et la catalyse hétérogène.

• <http://www.cnrs.fr/chimie/communication/distinctions.htm>

## Recherche et développement

### Observer le vivant à l'échelle nanométrique

Une équipe du Laboratoire de chimie physique (CNRS/Université Paris-Sud) a mis au point une expérience unique au monde de spectromicroscopie



Cartographie de la signature chimique du virus T5.

infrarouge permettant d'atteindre des résolutions bien meilleures que celles offertes par des microscopes plus classiques (de 1 à 10  $\mu\text{m}$ ). Grâce à elle, les chercheurs ont pu précisément localiser un virus, le virus T5, localisé à l'intérieur d'une bactérie *E. coli*. Ce résultat montre qu'avec cette nouvelle technique très sensible, il est maintenant possible d'étudier par spectroscopie infrarouge des objets nanométriques, taille de bon nombre d'objets biologiques. D'autres travaux montrent qu'il est également possible de travailler dans l'eau et donc de regarder des objets vivants (un champ d'investigation encore vierge). Mesurer *in vivo* une infection virale, suivre localement l'action d'antibiotiques sur les micro-organismes ou l'évolution d'un processus chimique à l'intérieur d'une cellule deviennent maintenant possibles.

• Pour en savoir plus : [http://www.cnrs.fr/chimie/communication/direct\\_labos/dazzi.htm](http://www.cnrs.fr/chimie/communication/direct_labos/dazzi.htm)

### Comprendre les liquides dans tous leurs états

Spécialistes de lévitation aérodynamique, des chercheurs du Laboratoire Conditions extrêmes et matériaux, haute température et irradiation (CEMHTI, CNRS/Université d'Orléans), en collaboration avec des équipes de l'Université d'Aberystwyth (Pays de Galles), ont utilisé cette technique couplée avec le rayonnement synchrotron pour étudier des échantillons d'aluminates d'yttrium portés à très haute température. Ils ont mis en évidence la séparation du matériau devenu liquide en deux états différents. L'utilisation du rayonnement synchrotron a permis de mesurer leurs caractéristiques structurales et thermiques tant à l'échelle atomique qu'à l'échelle nanométrique et submicronique. Ces travaux, qui viennent d'être publiés dans la revue *Science*, ouvrent la voie à une meilleure compréhension de



liquides à hautes températures comme ceux de la croûte terrestre ou à température ambiante comme les liquides biologiques.

- Pour en savoir plus : [http://www.cnrs.fr/chimie/communication/direct\\_labos/hennet.htm](http://www.cnrs.fr/chimie/communication/direct_labos/hennet.htm)

### Le projet Futurol

Lancé officiellement en septembre dernier, le projet Futurol vise le développement et la commercialisation d'un procédé complet de production de bioéthanol de 2<sup>e</sup> génération à partir de plantes entières ou de biomasse lignocellulosique non alimentaire. Ce projet, qui constitue un défi mondial majeur, répond aux orientations de l'Union européenne et s'inscrit dans une logique de développement durable sur le long terme et tout au long de la filière, du champ à la roue. Parmi les onze partenaires regroupés au sein du consortium Procethol 2G qui assurera la mise en œuvre du projet, figurent l'INRA, l'IFP et Total. Les premières réalisations industrielles sont attendues aux alentours de 2015-2020.

- Sources : INRA et IFP.

### Un spectromètre de 950 MHz à l'ICSN

L'Institut de chimie des substances naturelles (ICSN, Gif-sur-Yvette) vient d'installer un spectromètre de résonance magnétique nucléaire (RMN) de 950 MHz qui en fait l'un des laboratoires les mieux équipés au niveau international (seuls deux autres spectromètres de cette puissance étant

actuellement opérationnels dans le monde). Cette opération s'inscrit dans le cadre d'une stratégie d'équipements de haut niveau menée par le CNRS (départements Chimie et Sciences du vivant) dans le domaine de la RMN à très hauts champs, de leur mise en réseau dans toute la France et de leur ouverture aux utilisateurs extérieurs. Le coût de cette installation, près de 6,4 millions d'euros, a été entièrement financé par les ressources propres du CNRS. Ce nouveau spectromètre plus sensible permettra une meilleure compréhension des mécanismes d'interactions, étape importante dans le développement de nouvelles molécules d'intérêt thérapeutique.

- Pour en savoir plus : <http://www.cnrs.fr/chimie/communication/evenements.htm>

### Programmation 2009 de l'ANR

L'Agence Nationale de la Recherche lance 45 appels à projets qui font suite à une large consultation auprès des organismes de recherche, universités, grandes écoles, pôles, entreprises... avec pour résultat des champs thématiques novateurs favorisant l'interdisciplinarité. Si la place de l'action européenne et internationale s'amplifie en 2009, une large part est donnée aux priorités du Grenelle de l'Environnement avec 16 programmes totalement ou fortement orientés vers la recherche de solutions aux grands problèmes environnementaux.

- <http://www.agence-nationale-recherche.fr/documents/uploaded/2008/programmation-2009.pdf>

### Luis Oro, président de l'EuCheMS



Le professeur Luis Oro, ancien président de la Real Sociedad Española de Química (consœur espagnole de la SCF) est professeur de chimie inorganique à Saragosse et directeur de l'« Instituto Universitario de Catalisis Homogénea ». En succédant au professeur Giovanni Natile pour un mandat de trois ans, il souhaite poursuivre les efforts de ses prédécesseurs pour promouvoir la visibilité de la chimie européenne au sein de l'European Association for Chemical and Molecular Sciences (EuCheMS).

- <http://www.euchems.org>

### En direct de l'IUPAC

#### Nouvelle parution du « Gold Book »

Une nouvelle version du « Gold Book » est en ligne : elle contient plus de 300 nouveaux termes, avec une présentation améliorée des formules et un nouveau système de recherche.

Créée en 1919 par des chimistes industriels et universitaires, l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) a réussi à favoriser la communication scientifique internationale autour d'un langage commun et est considérée comme l'autorité mondiale en termes de nomenclature chimique, terminologie, standardisation

des méthodes de mesure, de poids atomiques et autres données.

- XML Gold Book – 2.0 release <http://goldbook.iupac.org/>

#### IUPAC Prizes for young chemists

Ces prix sont destinés à encourager les jeunes chercheurs en début de carrière.

Les lauréats sont invités au grand congrès de l'IUPAC pour y présenter leur travail et pourront être publiés dans *Pure and Applied Chemistry*.

**Date limite de soumission des dossiers : 1<sup>er</sup> février 2009**

- <http://old.iupac.org/news/prize.html>

### Industrie

#### DuPont : 70 ans de Teflon®

DuPont marque cet anniversaire en ouvrant les inscriptions à l'édition 2008/2009 des « **Plunkett Awards** » avec un nouveau critère de sélection : le développement durable. Ce prix récompense l'innovation apportée par des produits ou applications dont un composant essentiel fait appel à un ou plusieurs fluoropolymères de DuPont.

Le nom de ce concours rend hommage au Dr Roy Plunkett, le chercheur de DuPont qui, en 1938, découvrit le polytétrafluoroéthylène (PTFE) alors qu'il effectuait des expériences sur des gaz frigorigènes. Depuis, DuPont a commercialisé toute

une famille de ces plastiques versatiles dotés de propriétés uniques et développés dans de nombreux secteurs industriels allant des ustensiles de cuisson jusqu'à l'électronique, l'aéronautique, les semi-conducteurs et l'industrie chimique.

**Date limite de réception des dossiers de candidature : 15 janvier 2009**

- <http://teflon.com/plunkett>



Photo : DuPont

## Industrie

## Un nouveau centre de R &amp; D pour Rhodia

Après 28 ans de présence en Chine, Rhodia a inauguré en novembre dernier son nouveau centre de recherche et développement international de Shanghai. Dédiés au marché asiatique, les travaux de recherche de ce 5<sup>e</sup> centre porteront sur des innovations technologiques respectant les principes du développement durable (plastiques techniques, formulations pour la détergence et les cosmétiques, produits à base de terres rares). Depuis la pose de la première pierre au printemps dernier, Rhodia a déjà constitué une équipe de 70 chercheurs qui a contribué à une quinzaine d'inventions en cours de protection par des brevets. D'ici 2010, le centre s'étendra sur 6 500 m<sup>2</sup> et emploiera 150 chercheurs, contribuant ainsi au développement du groupe en Asie.

• Source : Rhodia

## Nouveau président pour le CEFIC



Le Belge Christian Jourquin, président du comité exécutif de Solvay, a été nommé en octobre dernier président du CEFIC, le Conseil européen de l'industrie chimique. Il

succède à François Cornélis (Total). « *The chemical industry must reinforce, and be seen to reinforce, its credentials as a responsible and sustainable actor*

at the heart of the fight against climate change » a-t-il déclaré, conscient du rôle crucial que tient l'industrie chimique.

Le CEFIC représente le tiers de l'industrie chimique mondiale, soit environ 27 000 industries chimiques de toutes tailles et plus d'un million d'emplois.

• <http://www.cefic.org>

## De l'énergie durable pour un nouveau lycée



© Tenesol

Soufflé par l'explosion de l'usine AZF en 2001, le lycée d'enseignement professionnel Gallieni de Toulouse a été reconstruit sur le même site. Inauguré en septembre dernier, le nouveau bâtiment, long de 300 m, laisse la part belle à l'énergie solaire photovoltaïque, en partenariat avec Tenesol : intégrés dans sa verrière, 465 panneaux solaires produiront 140 000 kWh d'électricité solaire par an, grâce à 1 900 m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques.

Leader français du photovoltaïque depuis 25 ans, Tenesol (groupe Total & EDF) a développé une expertise unique dans le domaine de l'énergie solaire à travers le monde entier. Depuis sa création, Tenesol a installé

plus d'un million de m<sup>2</sup> de panneaux solaires.

• Source : Tenesol  
<http://www.tenesol.com>

## Enseignement et formation

## Un nouveau site pour enseigner la chimie durable

La plate-forme européenne SusChem lance un nouveau portail dédié à l'enseignement du développement durable. Étudiants et professeurs y trouveront programmes, publications et informations diverses et sont invités à transmettre leurs connaissances et expériences.

• <http://learning.suschem.org>

## L'ESCOM à Compiègne

Face aux besoins accrus en « chimie verte » (éco-conception, biomatériaux), l'École Supérieure de Chimie Organique et Minérale (ESCOM) a décidé dès la rentrée 2008 de s'implanter à Compiègne, en Picardie-Champagne-Ardenne, territoire du pôle de compétitivité à vocation mondiale « Industries Agro-ressources ». En renforçant son partenariat avec l'Université de Technologie de Compiègne (UTC) et l'Université de Picardie Jules-Verne, cette nouvelle implantation va lui permettre de développer sa recherche fondamentale en lien avec des technologies en génie chimique, biologique et génie des procédés, et de jouer un rôle important dans le développement de la chimie verte issue des ressources agricoles.

• <http://www.escom.fr>

Le CNRS / Annuaire / Mots-clés CNRS / Autres sites

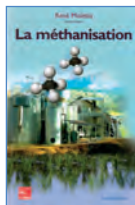
## CNRS Formation Entreprises

du 10 au 13 mars 2009 à PARIS (75)	Outils de caractérisation de particules colloïdales en suspension
du 12 au 13 mars 2009 à GIF SUR YVETTE (91)	Le risque chimique : connaissance et prévention niveau I
du 16 au 20 mars 2009 à CHATENAY MALABRY (92)	Fabrication, caractérisation et utilisation des liposomes et des nanoparticules lipidiques
du 16 au 20 mars 2009 à GIF-SUR-YVETTE (91)	Résonance magnétique nucléaire et interactions biologiques
du 16 au 20 mars 2009 à TOULOUSE (31)	Introduction aux techniques de résonance magnétique nucléaire à une et à deux dimensions
du 11 au 13 mai 2008 à LE MANS (72)	Introduction à la rhéologie et à la rhéométrie : module écoulement
du 11 au 14 mai 2008 à LE CREUSOT (71)	Formation aux plans d'expérience
Le 12 mai 2009 à PARIS (75)	Chromatographie en phase gazeuse (colonnes capillaires)

**Centre de ressources en formation**  
Un problème de formation particulier ?  
N'hésitez pas à nous consulter :  
- par mail à [ressources@cf.cnrs-gif.fr](mailto:ressources@cf.cnrs-gif.fr)  
- par téléphone au 01.69.82.44.96

**Catalogue, programmes et inscriptions :** CNRS Formation Entreprises Avenue de la Terrasse Bât. 31 91196 Gif-sur-Yvette Cedex  
Tél. : 01 69 82 44 55 - Fax : 01 69 82 44 89 <http://cnrsformation.cnrs-gif.fr>

## Livres

**La méthanisation**

R. Moletta (coord)

532 p., 120 €

Éditions Tec &amp; Doc, 2008

Transformer biologiquement nos déchets en énergie et compost, tel est le principal intérêt de la méthanisation. Les contraintes techniques et économiques avaient refroidi l'engouement justement suscité il y a quelques dizaines d'années. Mais aujourd'hui, la détermination grandissante pour préserver notre planète, le renchérissement durable du prix de l'énergie et l'attrait pour les procédés bio militent pour un ample développement de cette technique. Certains de nos voisins européens (Allemagne, Suisse) ne s'y sont pas trompés. Cet ouvrage présente donc très opportunément un large état des connaissances sur les procédés de méthanisation ainsi que les conditions réglementaires et économiques de leur mise en œuvre en France.

René Moletta a su coordonner les contributions de vingt-neuf experts reconnus pour aborder les différents domaines scientifiques et techniques (microbiologie, chimie, génie des procédés, modélisations, instrumentations, écologie, économie...) concernant ces procédés, plus complexes et délicats que généralement perçus.

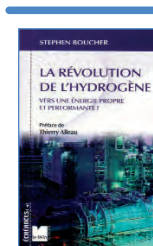
Plusieurs colonies de micro-organismes doivent agir en symbiose dans le(s) digesteur(s) pour réaliser la dégradation anaérobie des produits carbonés. Cette opération conduit d'une part au « biogaz » (environ 60 % de méthane et 40 % de gaz carbonique, avec quelques impuretés), valorisable énergétiquement après un traitement plus ou moins complexe, et d'autre part à un « digestat », bien moins important et odorant que lors d'une transformation aérobie, qui après un traitement adapté peut « retourner à la terre » en remplacement d'engrais.

L'ouvrage est structuré en cinq parties : Connaissance de la méthanisation, Législation, Stratégies et traitements, Le biogaz, Aspects économiques. Les domaines d'application privilégiés de cette technique y sont décrits précisément et illustrés par des exemples quantifiés : traitement des effluents

industriels et urbains (y compris le devenir des nouveaux xénobiotiques), méthanisation des boues des stations d'épuration biologiques et chimiques (STEP), transformation des effluents agricoles, stabilisation des décharges. Le lecteur y trouvera en outre une importante bibliographie et de nombreuses références de sites spécialisés. Comme tout procédé, la méthanisation peut présenter des risques qui sont certes signalés par les auteurs, mais on regrettera que ne soient pas mieux décrites les analyses de risques et les techniques permettant de les maîtriser lors de la mise en œuvre.

Cet ouvrage intéressera les universitaires, chercheurs et étudiants, curieux de faire le point sur une technique appelée à un grand développement dans les prochaines années. Nous faisons le vœu qu'il suscitera la poursuite des recherches, notamment en microbiologie (comportement des colonies microbiennes...) et génie des procédés (intensification, séchage...). Les concepteurs et responsables environnement y trouveront ordres de grandeur et informations nécessaires pour évaluer les opportunités que présente la méthanisation.

Michel Azémar

**La révolution de l'hydrogène  
Vers une énergie propre  
et performante ?**

S. Boucher

158 p., 10,90 €

Éditions du Félin, Paris, 2006

Cela fait bien longtemps que l'hydrogène fait rêver. Jules Verne disait déjà que ce serait une source d'énergie inépuisable. Mais l'hydrogène n'existe pas à l'état libre, il faut de l'énergie pour le produire à partir de composés contenant des atomes d'hydrogène.

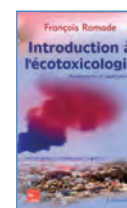
La première réalisation d'une pile à combustible, qui est un moyen efficace d'exploiter l'hydrogène, date de 1839. Au début du XXI<sup>e</sup> siècle, nombreuses étaient les personnes qui voyaient très vite arriver une civilisation de l'hydrogène s'appuyant sur les piles à combustible. Qu'en est-il aujourd'hui ? Il semble que l'on soit encore loin du but et que de nombreux problèmes restent à résoudre.

Après avoir fait part des promesses de

l'hydrogène, décrit pourquoi cela pourrait être un vecteur énergétique dans l'avenir et rappelé les leçons du passé, l'auteur entre dans le vif du sujet en abordant le problème de sa production, de son transport, de son stockage et enfin de son utilisation. Ce dernier point fait en particulier intervenir les piles à combustible qui posent encore de nombreux problèmes technologiques. Qui dit vecteur énergétique dit marché et consommateur. Ces points sont abordés avec réalisme avant de placer le vecteur hydrogène dans un contexte plus politique.

Bien écrit et faisant une excellente synthèse du domaine, ce livre permet au lecteur de faire rapidement le point sur la question et de prendre la mesure des débats existant autour de l'hydrogène. Il pose les bonnes questions et explique clairement quels sont les problèmes à résoudre, les espoirs des chercheurs et des industriels. Il montre de manière objective les avantages et les inconvénients de l'hydrogène, différant en cela des communications trop optimistes que l'on peut voir sur le sujet. Facile à lire et à comprendre, on ne peut donc que fortement recommander sa lecture.

Christian Ngô

**Introduction à l'écotoxicologie  
Fondements et applications**

F. Ramade

618 p., 60 €

Éditions Tec &amp; Doc, 2007

À l'heure de la protection de l'environnement et du développement durable, et alors que la directive REACH est entrée en application dans l'espace européen, voici un livre que tout chimiste professionnel francophone devrait garder à portée de main : il sera vite écorné par l'usage... Il sera naturellement aussi utile au médecin, à l'administrateur et au législateur, tous concernés par le risque écotoxicologique.

François Ramade, professeur émérite à l'Université Paris-Sud, est notamment président honoraire de la Société de Protection de la Nature. Son enseignement, son œuvre scientifique et son engagement citoyen en font l'un des grands noms français de la prise de conscience écologique. Le présent volume représente une remise à jour,

mais aussi une extension importante de ses ouvrages didactiques précédents, déjà bien connus, qui ont contribué à la fondation d'une discipline : l'écotoxicologie. Ce livre contient ainsi l'essentiel de cette discipline que l'auteur définit comme « *la science dont l'objet est l'étude des polluants toxiques dans les écosystèmes* ». La notion d'écosystème peut, comme le montre l'auteur, être élargie jusqu'à inclure la biosphère toute entière.

Onze chapitres explicitent l'écotoxicologie, les polluants et leurs implications. Ces chapitres sont précédés d'un avant-propos et d'une introduction mais l'absence de conclusion générale suggère que l'auteur veut laisser ouverte l'évolution d'une discipline si jeune et ne se hasarde pas à tracer des perspectives quant à l'avenir de la relation entre notre espèce et sa propre biosphère. Un certain nombre d'annexes très utiles ont été compilées : thésaurus des signes et abréviations, index (que le chimiste appréciera tout particulièrement), une bonne centaine de formules développées des principaux composés organiques polluants cités dans le texte, classées par ordre alphabétique, une bibliographie très complète d'environ 1 000 références. Huit planches couleurs regroupant une quarantaine de photographies, placées en cahier central, illustrent richement le contenu textuel.

Si l'on revient au point de vue du chimiste, il trouvera dans ce livre tous les éléments de connaissance nécessaires pour apprécier le risque environnemental du produit ou procédé qu'il veut développer et pour identifier les interlocuteurs capables de l'évaluer quantitativement.

**Hervé Toulhoat**

### Introduction à la chimie organique Les molécules organiques dans leur environnement. Usages, toxicité, synthèse et réactivité

J. Drouin

832 p., 55 €

Librairie du Cèdre, ENS Lyon, 2005

Cet ouvrage imposant est découpé en dix-huit chapitres. Dans les six premiers, l'auteur présente de grandes généralités portant sur la description structurale et la réactivité en chimie organique : description de la liaison chimique, conformation et configuration, spectroscopies et chemins réactionnels. Puis suivent douze chapitres constituant le corps de la description de la réaction en chimie organique, classés par type de fonction. Dans les deux cas, les notions présentées sont introduites de façon approfondie et complète, bien au-delà de ce qui est habituellement présenté dans un ouvrage qualifié « d'introduction ».

De façon générale, cet ouvrage impressionne par le foisonnement des informations, la précision avec laquelle sont présentés les résultats et la rigueur scientifique accompagnant les explications. Tous les éléments de cours sont abondamment illustrés sur des exemples expérimentaux chiffrés et commentés. Nombreuses sont les notes et incises visant à renforcer ou clarifier une explication, faisant parfois même le point sur des imprécisions de pensée ou de langage largement diffusées. Il apportera de plus au lecteur curieux et attentif, au détour d'un encart spécialisé mais aussi d'un tableau ou d'une note de bas de page, d'intéressantes remarques de culture générale sur des domaines aussi variés que la biochimie ou la chimie

industrielle. Un soin tout particulier est apporté à la description de la toxicité ou des usages pharmaceutiques des composés. La lisibilité de cet ensemble très fourni est assurée par un effort de mise en relief des conclusions de paragraphes, un recours judicieux et parcimonieux à la couleur, et la présentation détaillée des réactions bilan et des mécanismes.

Le texte très complet est émaillé de renvois, soit à des ouvrages classiques de référence dans le domaine, soit aux expériences des *Manipulations commentées de chimie organique* publiées par le même auteur. À la fin, à un index très complet, s'ajoutent deux index pratiques supplémentaires, l'un par nom des scientifiques ayant donné leur nom à une réaction et l'autre par fonction afin de cataloguer leurs méthodes de préparation. Il s'agit donc d'une base de cours idéale pour l'enseignant qui y puisera nombres d'exemples et d'illustrations particulièrement bien choisis. C'est entre autres, comme annoncé en quatrième de couverture, un livre particulièrement adapté dans le cadre de la préparation aux épreuves de chimie des concours de recrutement des enseignants que sont le CAPES et l'agrégation. Mais l'ensemble de données illustrées ici fait également de cet ouvrage un point de départ aisé pour des recherches thématiques.

**Hélène Gérard**

#### À signaler

##### AZF, un silence d'état

M. Mennessier

272 p., 20 €

Seuil, 2008

##### Le risque chimique

##### Concepts, méthodes, pratiques

G. Gautret de la Moricière

376 p., 49 €

Dunod, 2008

##### Molecular and biochemical toxicology (4<sup>th</sup> ed)

R.C. Smart, E. Hodgson

958 p., 65,95 £

Wiley-VCH, 2008

##### Sons et lumière

B. Valeur

158 p., 23 €

Belin, Pour la science, 2008

(Ndlr : l'analyse de cet ouvrage est publiée sur Internet)

Retrouvez la suite  
de cette rubrique sur  
[www.lactualitechimique.org](http://www.lactualitechimique.org),  
en téléchargement libre  
sous format pdf via le sommaire  
en ligne de ce numéro.

#### Bulletin de l'Union des professeurs de physique et de chimie (le « Bup »)

La rédaction de *L'Actualité Chimique* a sélectionné pour vous quelques articles.



##### N° 908 (1) (novembre 2008)

- Quelle place pour l'enseignement des sciences expérimentales et particulièrement de la physique-chimie en classe de seconde ?, par J.-C. Jacquemin.
- Quelques idées à propos de l'enseignement de la chimie macromoléculaire, par T. Hamaide.
- Une manipulation d'extraction liquide-liquide pédagogique, propre et sûre, par A. Durand, E. Favre, G. Mauviel, S. Rode.

##### N° 908 (2) (novembre 2008)

- Rôle de l'électrolyte support en électrochimie, par C. Genre, C. Aronica, S. Breteau.
- Mise en place d'un régime stationnaire en électrochimie: l'électrode à disque tournant et la microélectrode, par C. Genre, C. Aronica, S. Breteau.
- Simulation des gradients de solvant en chromatographie liquide, par T. Brière.
- Étude de la transformation du Zn(OH)<sub>2</sub> en ZnO par une décharge électrique dans l'air humide, par A. Kesraoui, N. Bellakhal, M. Dachraoui.
- Synthèse et étude structurale de complexes de coordination du Ni(II), par G. Lemerrier, F. Lux.

• Sommaires complets, résumés des articles et modalités d'achat sur <http://www.udppc.asso.fr>

19 décembre 2008



## Journée Charles Mioskowski

Illkrich

- <http://www.sfc.fr/Sections/Journee-CM-08-12-19.pdf>

11-16 janvier 2009

## 19<sup>th</sup> Winter fluorine conference

### Fabulous future with fluorine

St Petersburg Beach (FL, États-Unis)

- <http://membership.acs.org/F/FLUO/19WFC/INDEX19WFC.HTM>

20-21 janvier 2009

## Ipemtech 2009

### The industrial partnering event in microencapsulation technologies

Nantes

- <http://www.ipemtech.eu>

22-23 janvier 2009



## Journées de chimie de coordination

Reims

- <http://www.univ-reims.fr/jcc2009>

28 janvier 2009



## Chimie et Art

### Le génie au service de l'Homme

Paris

- <http://www.maisondelachimie.asso.fr/colloques/chimie-et-art/view>

28-30 janvier 2009

## SCM-4

### 4<sup>th</sup> International symposium on the separation and characterization of natural and synthetic macromolecules

Amsterdam (Pays-Bas)

- <http://www.ordibo.be/scm>

29 janvier 2009



## Conférence de la section régionale Alsace

Mulhouse

De la catalyse homogène à la catalyse multiphasique : exemples d'applications du laboratoire au développement industriel, par Hélène Olivier-Bourbigou (IFP Lyon).

- [j.streith@uha.fr](mailto:j.streith@uha.fr)

29-30 janvier 2009

## Analyse par faisceau d'ions et patrimoine culturel

### 20<sup>e</sup> anniversaire de l'accélérateur AGLAE

Paris

- [http://www.c2rmf.fr/homes/home\\_id21956\\_u112.htm](http://www.c2rmf.fr/homes/home_id21956_u112.htm)

1-6 février 2009

## e-WISPOC

### European winter school on physical organic chemistry

Bressanone (Italie)

- <http://www.chimica.unipd.it/wispoc/publica>

3-4 février 2009



## Chemical and biochemical wood valuation

### Solutions for new materials and products?

Épinal

- [http://www.ffc-asso.fr/fichs/html/manifestations\\_ffc.html](http://www.ffc-asso.fr/fichs/html/manifestations_ffc.html)

11-13 février 2009

## GAS 2009

### 5<sup>th</sup> Gas analysis symposium and exhibition

Rotterdam (Pays-Bas)

- <http://www.gas2009.org>

5-6 mars 2009

## New materials forum

Valence (Espagne)

- <http://www.e-unlimited.com/events/p200253/overview.asp>

8-11 mars 2009

## 10<sup>th</sup> Florida heterocyclic conference

Gainesville (FL, États-Unis)

- <http://www.iupac.org>

11-14 mars 2009

## GDCh-JCF 2009

### 11<sup>th</sup> JCF-Frühjahrssymposium

Essen (Allemagne)

- <http://jcf-fruehjahrssymposium.de/2009/invitation.htm>

15-19 mars 2009

## Hybrid materials 2009

Tours

- <http://www.hybridmaterialsconference.com>

16-22 mars 2009

## 5<sup>th</sup> World water forum

Istanbul (Turquie)

- <http://www.worldwaterforum5.org>

30-31 mars 2009

## Composites bois polymères

### Innovation et technologies

Bordeaux

- [http://www.fcba.fr/actualites/resultat.php?id\\_fich=2622](http://www.fcba.fr/actualites/resultat.php?id_fich=2622)

1-2 avril 2009



## EcoChem09

### Chemistry and ecodesign for a sustainable development

Montpellier

- [http://www.ffc-asso.fr/fichs/html/manifestations\\_ffc.html](http://www.ffc-asso.fr/fichs/html/manifestations_ffc.html)

1-3 avril 2009

## TEF-3

### 3<sup>rd</sup> International symposium on trace elements in food

Rome (Italie)

- <http://www.iupac.org/web/act/TEF3>

20-24 avril 2009

## Polychar 17

### World forum on advanced materials

Rouen

- <http://www.polychar17.fr/rouen2008>

21-22 avril 2009



## Électrochimie

### dans les nanosciences 3

Paris

- <http://www.univ-paris-diderot.fr/elecnao>

2-7 août 2009

## IUPAC 42<sup>nd</sup> congress

### Chemistry solutions

Glasgow (Royaume-Uni)

Thèmes :

- Analysis and detection
- Chemistry for health
- Communication and education
- Energy and environment
- Industry and innovation
- Materials
- Synthesis and mechanism

Date limite de soumission des résumés :

16 janvier 2009

- <http://www.iupac2009.org>

Vous trouverez d'autres manifestations sur le site de la SCF : <http://www.sfc.fr>, rubrique **Manifestations**.

## Auteurs

- Aeiych S.**, voir Lacaze P.-C. (320-321, p. 90).
- Allègre C.**, Jacques-Émile Dubois, un grand esprit (320-321, p. 128).
- Allonas X.**, Les photopolymères : de la chimie verte aux hautes technologies (317, 16).
- Aloïse S.**, voir Moine B. (320-321, p. 20).
- Amatore C.**, L'électrochimie moléculaire portée à ses limites. Des cinétiques nanosecondes à l'exploration dynamique d'objets nanométriques (320-321, p. 69).
- Amiaud L.**, voir Lemaire J.-L. (315, p. III).
- Amigoni S.**, voir Reeve P. (323-324, p. 89).
- Amouyal E.**, voir Leach S. (315, p. II)/La photochimie en ébullition (317, p. 5).
- André-Frei V.**, voir Bonnet I. (323-324, p. 84).
- Antonioti S.**, voir Fernandez X. (323-324, p. 42).
- Aquilina L.**, voir Pommeray D. (325, p. 49).
- Aubard J.**, voir El Hage Chahine J.-M. (320-321, p. 12)/Propriétés optiques des surfaces : de l'effet Raman exalté de surface à la plasmonique (320-321, p. 81).
- Aycard J.-P.**, voir Couturier-Tamburelli I. (315, p. XV).
- Aze S.**, L'altération des pigments au plomb : étude du minium et de sa possible reconversion (318, p. 9).
- Azémar M.**, La chimie et le développement durable à la FFC : le projet « Chimie pour un Développement Durable » (325, p. 21).
- Baba M.**, voir Gardette J.-L. (317, p. 25).
- Badot P.-M.**, voir Crini G. (325, p. 8).
- Baldovini N.**, Comme un parfum d'histoire... Retour sur le 38<sup>e</sup> Symposium international sur les huiles essentielles (323-324, p. 116).
- Baouche S.**, voir Lemaire J.-L. (315, p. III).
- Bassani D.M.**, Photochimie supramoléculaire : quand le calcul et le mouvement passent par la reconnaissance (317, p. 46).
- Battaglini N.**, voir Marmont P. (320-321, p. 103).
- Belloni J.**, La chimie sous rayonnement : des aspects fondamentaux aux applications dans les sciences des matériaux et les sciences de la vie (316, p. I).
- Bénilan Y.**, voir Gazeau M.-C. (315, p. XIX).
- Benoit C.**, voir Franger S. (325, p. 41).
- Bernard B.A.**, Le follicule pileux : la partie immergée du cheveu (323-324, p. 23).
- Blanchard G.**, voir Lamare S. (325, p. 26).
- Bonnet I.**, La modélisation moléculaire pour développer des principes actifs cosmétiques innovants (323-324, p. 84).
- Bonté F.**, voir Nardello-Rataj V. (323-324, p. 10)/Les produits de soin de la peau : Guerlain, 180 ans d'expertise (323-324, p. 52).
- Bouas-Laurent H.**, Synthèse par voie photochimique. Introduction (317, p. 6)/voir Hoffmann N. (317, p. 6).
- Bourgeois D.**, Étude de la dynamique structurale de la myoglobine par cristallographie sub-nanoseconde (317, p. 55).
- Bousquet J.**, Chimie industrielle et génie des procédés (320-321, p. 4).
- Bouzoud D.**, voir Gasser P. (323-324, p. 18).
- Boyé-Péronne S.**, Photolyse de petits hydrocarbures : une source de radicaux pour la chimie du carbone dans l'espace (315, p. X).
- Brancq B.**, voir Kerverdo S. (323-324, p. 35).
- Bressler C.**, La spectroscopie d'absorption X résolue en temps (317, p. 59).
- Buntinx G.**, voir Moine B. (320-321, p. 20).
- Burget D.**, voir Allonas X. (317, 16).
- Bussotti E.**, voir Fernandez X. (323-324, p. 42).
- Carpentier J.**, Recherche et Défense nationale. Une collaboration fructueuse (1961-1995) : la DRME (320-321, p. 105).
- Cartier dit Moulin C.**, Aromaticité : un ou deux serpents dans l'Ouroboros de Kekulé ? (315, p. 6).
- Chabot H.**, Qui a découvert le chlore ? (316, p. 41).
- Chambaud G.**, Stratégie d'action pour l'environnement et le développement durable au CNRS (325, p. 24).
- Chane Ching K.**, voir Lacaze P.-C. (320-321, p. 90).
- Changenet-Barret P.**, voir Martin M.M. (320-321, p. 14).
- Chehimi M.M.**, Croissance de couches ultra-minces de polymères sur des surfaces conductrices modifiées électrochimiquement (320-321, p. 94).
- Chergui M.**, voir Bressler C. (317, p. 59).
- Cobut V.**, voir Lemaire J.-L. (315, p. III).
- Cochez M.**, voir Ferriol M. (319, p. 41).
- Collin J.-P.**, voir Bassani D.M. (317, p. 46).
- Comte E.**, voir Crini G. (325, p. 8).
- Coupeaud A.**, voir Couturier-Tamburelli I. (315, p. XV).
- Couturier-Tamburelli I.**, La photochimie des cyanopolymères : étape clé de la chimie interstellaire ? (315, p. XV).
- Crini G.**, De la farine de blé pour décolorer des effluents papetiers pollués (325, p. 8).
- Croutxe-Barghorn C.**, voir Allonas X. (317, 16).
- Cuoco G.**, La couleur de l'avant-garde russe : étude de la caractérisation physico-chimique de la matière picturale (318, p. 28).
- Delaire J.**, Matériaux moléculaires et photonique. Introduction (317, p. 31).
- Delamar M.**, Des surfaces d'électrodes modifiées aux polymères conducteurs. L'impulsion de Jacques-Émile Dubois dans le démarrage des études de surfaces organiques (320-321, p. 66)/voir Mangeney C. (320-321, p. 96).
- Delasalle C.**, voir Baldovini N. (323-324, p. 116).
- Delay B.**, voir Chambaud G. (325, p. 24).
- Demirci U.B.**, La production d'hydrogène par hydrolyse catalysée du borohydrure (316, p. 22).
- Denat F.**, Polyamines : études et applications. Un regard sur les premières Journées d'études scientifiques en chimie des polyamines cycliques et linéaires (316, p. 10).
- Deniaud D.**, voir Denat F. (316, p. 10).
- Desvergne J.-P.**, voir Delaire J. (317, p. 31).
- Detalle V.**, voir Aze S. (318, p. 9).
- Dinh-Audouin M.-T.**, La pollution de l'air dans les espaces clos préoccupe (322, p. 45).
- Douki T.**, voir Belloni J. (316, p. I).
- Dubertret B.**, voir Fery-Forgues S. (317, p. 42).
- Dubois J.-E.**, Chemical complexity and molecular topology. The DARC concepts and applications (320-321, p. 37).
- Dulieu F.**, voir Lemaire J.-L. (315, p. III).
- Dumas A.**, Quelques pistes de réflexion pour une recherche pleinement valorisée (320-321, p. 122).
- Dupuis G.**, La technique picturale des peintres de la Renaissance italienne examinée par spectrophotométrie (318, p. 22).
- Eastes R.-E.**, Parlez-vous « chimie » ? (315, p. 4)/Parfait petit chimiste recherche... produits chimiques (316, p. 3)/Ce qui est chimique pour les uns... (318, p. 4)/Des valeurs « naturalistes » (319, p. 4)/« Tout » est chimique ? (320-321, p. 5)/Comment je suis devenu chimiste... (322, p. 3)/« Chimique comment ? » Des différentes façons d'être chimique (323-324, p. 4)/Naturel ET chimique ? (325, p. 3).
- Ecoffet C.**, voir Allonas X. (317, 16).
- El Hage Chahine J.-M.**, Jacques-Émile Dubois : un pionnier de la cinétique rapide (320-321, p. 12).
- Elsaesser T.**, Ultrafast structural dynamics of hydrogen bonds in the liquid phase (320-321, p. 27).
- Ephritikhine M.**, Les progrès de la chimie moléculaire de l'uranium (322, p. I).
- Eskenazi C.**, Chimie et développement durable. Retour sur les MIEC-JIREC 2007 (325, p. 14).
- Espagne A.**, voir Martin M.M. (320-321, p. 14).
- Evano G.**, Synthèse de produits naturels : des acides aminés et du cuivre(I) pour la synthèse d'alcaloïdes cyclopeptidiques (322, p. 20).
- Fahys B.**, voir Crini G. (325, p. 8).
- Fave C.**, voir Leroux Y.R. (320-321, p. 83).
- Félidj N.**, voir Aubard J. (320-321, p. 81).
- Fernandez X.**, Parfum, chimie et création (323-324, p. 42).
- Ferrero L.**, Progrès récents dans la protection solaire (323-324, p. 72).
- Ferriol M.**, Les polymères et le feu (319, p. 41).
- Fery-Forgues S.**, Micro- et nanocristaux luminescents : ce qui change avec la taille (317, p. 42).
- Fillion J.-H.**, voir Lemaire J.-L. (315, p. III).
- Fond C.**, voir Schirrer R. (319, p. 33).
- Fouassier J.-P.**, Polymères et lumière. Introduction (317, p. 16)/voir Allonas X. (317, 16).
- Fournier J.**, Le chlordécone, insecticide du charançon du bananier (316, p. 46).
- Franger S.**, Le stockage électrochimique de l'énergie : apport des batteries lithium-ion (325, p. 41).
- Friend C.**, Dynamic restructuring of gold surfaces during chemical reactions (320-321, p. 75).
- Garaud J.-L.**, Les silicones : 50 ans d'innovation en cosmétique (323-324, p. 29).
- Gardette J.-L.**, Photodégradation des matériaux polymères (317, p. 25).
- Gasser P.**, La peau : support des cosmétiques mais aussi d'évaluation (323-324, p. 18).
- Gasteiger J.**, The challenge of molecular structure representation for property prediction (320-321, p. 51).
- Gauduel Y.-A.**, voir Soep B. (317, p. 51).

- Gauyacq D.**, voir Boyé-Péronne S. (315, p. X).
- Gazeau M.-C.**, Photochimie dans les atmosphères planétaires : à la recherche de la matière prébiotique (315, p. XIX).
- Ghilane J.**, voir Mangeney C. (320-321, p. 96).
- Gooding J.**, The self-assembled monolayer modification of electrodes. Some recent advances in biological application (320-321, p. 85).
- Gramain J.-C.**, voir Hoffmann N. (317, p. 6).
- Gravier E.**, voir Crini G. (325, p. 8).
- Grosmaître A.**, Une démarche de progrès pour un développement durable : expérience de la branche chimie de Total (325, p. 45).
- Guennoun Z.**, voir Couturier-Tamburelli I. (315, p. XV).
- Haacke S.**, voir Poisson L. (317, p. 62).
- Hamaide T.**, Quelques idées à propos de l'enseignement de la chimie macromoléculaire (319, p. 15).
- Hapiot P.**, voir Mangeney C. (320-321, p. 96).
- Hasler M.**, voir Cartier dit Moulin C. (315, p. 6).
- Herlin-Boime N.**, La pyrolyse laser, une méthode souple de production de nanopoudres (317, p. 14).
- Héron S.**, voir Nowik W. (318, p. 35).
- Hervé-Minvielle A.**, voir Verchier Y. (316, p. 30).
- Hoffmann N.**, Photochimie en synthèse organique (317, p. 6).
- Holl Y.**, Polymères organiques, du monomère à l'objet : retour sur les JIREC 2006 (319, p. 14).
- Holliday J.D.**, The influence of the DARC project on chemoinformatics research at the University of Sheffield (320-321, p. 45).
- Homolle O.**, La SFC et *L'Actualité Chimique* vous souhaitent une « Bonne année 2008 ! » (315, p. 2).
- Horowitz G.**, voir Marmont P. (320-321, p. 103).
- Hugon P.**, Étude des polychromies d'un portail gothique : l'exemple de la cathédrale de Senlis, (318, p. 16).
- Hurel M.-P.**, voir Fernandez X (323-324, p. 42).
- Ibanez A.**, voir Fery-Forgues S. (317, p. 42).
- Jacques P.**, voir Allonas X. (317, 16).
- Jeunesse C.**, Les catalyseurs de Brookhart-Gibson : synthèse, purification et utilisation en catalyse de polymérisation (316, p. 36).
- Jolibois B.**, voir Crini G. (325, p. 8).
- Jolly A.**, voir Gazeau M.-C. (315, p. XIX).
- Kerverdo S.**, Tensioactifs basés sur des sucres. Synthèses et exemples d'utilisation en cosmétique (323-324, p. 35).
- Kleiner I.**, voir Gazeau M.-C. (315, p. XIX).
- Klotz S.**, voir Le Godec Y. (322, p. 27).
- Lacaze P.-C.**, voir Delamar M. (320-321, p. 66)/Polymères conducteurs et anticorrosion. Une application originale, susceptible d'exploitation industrielle (320-321, p. 90).
- Lacombat F.**, voir Martin M.M. (320-321, p. 14).
- Lacroix J.-C.**, voir Leroux Y.R. (320-321, p. 83)/voir Lacaze P.-C. (320-321, p. 90).
- Lagrost C.**, voir Mangeney C. (320-321, p. 96).
- Laissus-Leclerc A.**, La réglementation des produits cosmétiques et ses évolutions (323-324, p. 13).
- Lalevée J.**, voir Allonas X. (317, 16).
- Lamare S.**, Le pôle Environnement et développement durable de l'Université de la Rochelle (325, p. 26).
- Lang P.**, voir Marmont P. (320-321, p. 103).
- Lattes A.**, La chimie et le développement durable (325, p. 18).
- Lattuati-Derieux A.**, Les composés organiques volatils émis par des matériaux du patrimoine culturel (318, p. 46).
- Laurent D.**, Jacques-Émile Dubois, pionnier de l'informatique chimique et inventeur du DARC. Le système DARC : de la recherche fondamentale aux transferts technologiques (320-321, p. 33)/ S'interroger à la lumière du passé sur comment dynamiser la recherche en France (320-321, p. 105).
- Le Barny P.**, L'électroluminescence a fêté ses cent ans en 2007 (317, p. 37).
- Le Godec Y.**, Synthèses de matériaux remarquables sous conditions extrêmes : études *in situ* diffraction synchrotron (322, p. 27).
- Le Joliff J.-C.**, Quelques « astuces » de la formulation moderne dans le maquillage (323-324, p. 67).
- Leach S.**, Molécules interstellaires et photochimie dans l'espace. Introduction (315, p. II).
- Lecointe Y.**, voir Herlin-Boime N. (317, p. 14).
- Ledoux F.**, Formulation d'une crème teintée biologique (323-324, p. 99)/ Formulation d'un gloss (323-324, p. 108)/ Formulation d'un mascara émulsion eau dans huile (323-324, p. 112).
- Lemaire J.-L.**, La formation de molécules dans le milieu interstellaire. À la recherche des mécanismes de formation de la molécule H<sub>2</sub> sur les grains de poussière interstellaire : l'expérience FORMOLISM (315, p. III).
- Leroux Y.R.**, Contacts atomiques par voie électrochimique en milieu eau/cyclo-dextrine (320-321, p. 83).
- Lévêque C.**, Développement durable, « avenir incertains » (325, p. 16).
- Ley C.**, voir Martin M.M. (320-321, p. 14).
- Lokshin V.**, voir Moine B. (320-321, p. 20).
- Lopez-Cuesta J.-M.**, voir Ferriol M. (319, p. 41).
- Lougnot D.J.**, voir Allonas X. (317, 16).
- Mahet M.**, voir Martin M.M. (320-321, p. 14).
- Mailhot B.**, voir Gardette J.-L. (317, p. 25).
- Maisonhaute E.**, voir Amatore C. (320-321, p. 69).
- Malval J.-P.**, voir Allonas X. (317, 16).
- Mangeney C.**, Le platine réduit : un puits à électrons (320-321, p. 96).
- Marchand M.**, La pollution marine. Quelles politiques pour une protection durable de l'océan et des mers côtières ? (325, p. 35).
- Maria P.-C.**, La pollution atmosphérique particulaire sème le trouble (325, p. 30).
- Marinelli F.**, voir Tanese M.C. (320-321, p. 98).
- Marmont P.**, Contrôle des interfaces dans les semi-conducteurs organiques (320-321, p. 103).
- Marquet A.**, voir Valade L. (325, p. 4).
- Martin M.M.**, Processus photochimiques ultra-rapides : du laboratoire aux systèmes photoactifs naturels (320-321, p. 14).
- Marx B.**, From specific to generic. From DARC to Markush DARC: the structural search for generic patents (320-321, p. 61)/L'AUDIST de Jacques-Émile Dubois. Histoire de l'Agence Universitaire de Documentation et d'Information Scientifique et Technique (320-321, p. 118).
- Mathe C.**, voir Cuoco G. (318, p. 28).
- Messal R.**, Vers une nouvelle classification des produits chimiques (319, p. 48).
- Meybeck A.**, Les liposomes en cosmétique (323-324, p. 60).
- Mezey P.G.**, Molecular symmetry deficiency and shape deviation measures (320-321, p. 56).
- Mezouar M.**, voir Le Godec Y. (322, p. 27).
- Mialocq J.-C.**, Chimie des matières organiques et inorganiques du patrimoine culturel (318, p. 7).
- Micheau J.-C.**, voir Nakatani K. (317, p. 31).
- Moine B.**, La photoréactivité de photochromes organiques en solution. Approche expérimentale par absorption femto-pico-seconde (320-321, p. 20).
- Moliton A.**, Propriétés électriques et optiques des polymères (319, p. 24).
- Momeni A.**, voir Lemaire J.-L. (315, p. III).
- Morin-Crini N.**, voir Crini G. (325, p. 8).
- Morlat-Thérias S.**, voir Gardette J.-L. (317, p. 25).
- Morlet-Savary F.**, voir Allonas X. (317, 16).
- Mostafavi M.**, voir Belloni J. (316, p. I).
- Mottaghi M.**, voir Marmont P. (320-321, p. 103).
- Mouherat C.**, L'archéologie des textiles : une nouvelle discipline au service de la connaissance et de la compréhension des sociétés humaines (318, p. 30).
- Mouloungui Z.**, voir Vriet C. (315, p. 19).
- Moustou C.**, voir Moine B. (320-321, p. 20).
- Nakatani K.**, La photocommutation : des verres photochromiques aux machines moléculaires (317, p. 31).
- Nardello-Rataj V.**, Chimie et cosmétiques : une longue histoire ponctuée d'innovations, (323-324, p. 10).
- Nowik W.**, Stratégie analytique de l'identification des colorants naturels dans les objets du patrimoine (318, p. 35).
- Olah G.A.**, A remarkable chemist and friend (320-321, p. 7).
- Pensé-Lhéritier A.-M.**, L'analyse sensorielle et l'univers cosmétique (323-324, p. 81).
- Perriot R.**, voir Baldovini N. (323-324, p. 116).
- Petitjean M.**, Jacques-Émile Dubois, le système DARC, et son influence sur la pensée, la représentation et la manipulation de l'information chimique (320-321, p. 43).
- Pham M.C.**, Surfaces d'électrodes bioactives : des polymères conducteurs bifonctionnels pour des biocapteurs enzymatiques et à ADN (320-321, p. 92).
- Pichat P.**, Dix milliards de tonnes par an de béton. De la chimie à l'ouvrage (315, p. 12).
- Piètri N.**, voir Couturier-Tamburelli I. (315, p. XV).
- Pingaud N.**, voir Aze S. (318, p. 9).
- Piro B.**, voir Pham M.C. (320-321, p. 92).
- Pissavini M.**, voir Ferrero L. (323-324, p. 72).
- Plaza P.**, voir Martin M.M. (320-321, p. 14).
- Pocholle J.-P.**, voir Le Barny P. (317, p. 37).
- Poisson L.**, Dynamique électronique femto-seconde de molécules complexes (317, p. 62).

- Poizat O.**, voir Moine B. (320-321, p. 20).
- Pommeray D.**, L'Université Virtuelle Environnement et Développement durable (325, p. 49).
- Porterat D.**, voir Herlin-Boime N. (317, p. 14).
- Pouchard M.**, voir Rigny P. (319, p. 5).
- Raffaëly-Veslin L.**, voir Nowik W. (318, p. 35).
- Randon J.**, Travail collaboratif, un exemple avec les notions associées à l'équilibre chimique (325, p. 52).
- Raulin F.**, voir Gazeau M.-C. (315, p. XIX).
- Reeve P.**, La rhéologie : un outil précieux pour la formulation cosmétique (323-324, p. 89).
- Regert M.**, Matières picturales, pigments, colorants et substances organiques : des matériaux complexes et diversifiés (318, p. 8)/voir Lattuati-Derieux A. (318, p. 46)/Des chasseurs de miel néolithiques aux sculpteurs du XIX<sup>e</sup> siècle : une histoire des produits de la ruche et des cires revisitée par la chimie analytique (318, p. 52).
- Reynaud C.**, voir Herlin-Boime N. (317, p. 14).
- Rigny P.**, voir Homolle O. (315, p. 2)/ Le soutien des associations scientifiques et techniques : une ardente obligation (316, p. 2)/La valorisation de la recherche. Entretien avec Marc Ledoux, directeur de la Politique industrielle au CNRS (316, p. 28)/La réforme du CNRS sera-t-elle celle du recrutement des chercheurs ? (318, p. 2)/Science et industrie : un mariage forcé ! (319, p. 2)/Rencontre avec Paul Hagenmuller (319, p. 5)/Les progrès de la science : des idées et des hommes (320-321, p. 1)/La parité : oubliée de la réforme du système français de recherche (323-324, p. 1)/Quel CNRS pourrait-on avoir ? (325, p. 2).
- Rinaudo M.**, Solutions et gels polymères (319, p. 36)/La biomasse végétale, source de molécules organiques (319, p. 45).
- Rivaton A.**, voir Gardette J.-L. (317, p. 25).
- Rodriguez F.**, voir Marmont P. (320-321, p. 103).
- Rolando C.**, voir Solazzo C. (318, p. 40).
- Saint-Martin R.**, voir Franger S. (325, p. 41).
- Samat A.**, voir Moine B. (320-321, p. 20).
- Schirrer R.**, Endommagement et rupture des polymères amorphes résistant au choc : une vue basée sur la mécanique des milieux continus (319, p. 33).
- Schöllhorn B.**, voir Amatore C. (320-321, p. 69).
- Schorsch G.**, Wacker Chemie : une entreprise performante. Pourquoi ? (315, p. 28)/Une division de Chimie industrielle à la SFC : une fausse « bonne idée » (317, p. 4)/SFC 07 Paris-WF Ulm (322, p. 4)/L'industrie des tensioactifs à l'épreuve du développement durable (323-324, p. 6).
- Schwell M.**, voir Gazeau M.-C. (315, p. XIX).
- Serre C.**, Des solides hybrides poreux à flexibilité géante (322, p. 15).
- Shafizadeh N.**, voir Poisson L. (317, p. 62).
- Sillion B.**, Le Grand Lyon et... la chimie pour un développement durable (315, p. 4)/La chimie pour un développement durable : pourquoi et comment ? (316, p. 3)/L'innovation chimique dans la perspective
- de REACH (323-324, p. 4).
- Simonet J.**, voir Mangeney C. (320-321, p. 96).
- Soep B.**, La femtochimie en mouvement. Introduction (317, p. 51).
- Solazzo C.**, Protéomique dans l'art et l'archéologie (318, p. 40).
- Solozhenko V.**, voir Le Godec Y. (322, p. 27).
- Soppera O.**, voir Allonas X. (317, 16).
- Spotheim-Maurizot M.**, voir Belloni J. (316, p. 1).
- Strub H.**, Photopolymérisation : développements industriels (317, p. 22).
- Sublemontier O.**, voir Herlin-Boime N. (317, p. 14).
- Tanese M.C.**, Organic thin film transistors. Challenging the portable sensor technology (320-321, p. 98).
- Tchapla A.**, voir Nowik W. (318, p. 35).
- Teissier P.**, Paul Hagenmuller : itinéraire de l'enfant terrible de la chimie du solide française (319, p. 1).
- This H.**, La chimie des aliments et du goût (315, p. 7)/Histoire d'une pièce d'argent (315, p. 9)/L'œuf dur : un festin de réactions chimiques (316, p. 5)/Dans la famille « mousses au chocolat »... (319, p. 10)/Descriptions formelles pour penser... et pour la formulation (322, p. 11)/Réinventons la tradition (325, p. 5).
- Tkatchenko I.**, Le Forum européen de la Chimie. Turin, 16-20 septembre 2008 (318, p. 5).
- Tokarski C.**, voir Solazzo C. (318, p. 40).
- Torri G.**, voir Crini G. (325, p. 8).
- Torsi L.**, voir Tanese M.C. (320-321, p. 98).
- Tran-Thi T.-H.**, voir Amouyal E. (317, p. 5).
- Tripier R.**, voir Denat F. (316, p. 10).
- Tripe-Allard G.**, voir Leroux Y.R. (320-321, p. 83).
- Valade L.**, Pour réconcilier chimie et grand public : la chimie s'invite au marché (325, p. 4).
- Vallet J.-M.**, voir Aze S. (318, p. 9).
- Verchier Y.**, Récit d'une expérience pédagogique inn-« eau »-vante (316, p. 30).
- Vieillescazes C.**, voir Cuoco G. (318, p. 28).
- Vitorge M.-C.**, voir Valade L. (325, p. 4).
- Vivier V.**, Des techniques électrochimiques locales pour mieux comprendre la corrosion (322, p. 35).
- Vogelgesang B.**, voir Bonnet I. (323-324, p. 84).
- Vos M.**, Processus ultra-rapides dans les hémoprotéines (317, p. 52).
- Vriet C.**, Les carbonates organiques : une famille de composés méconnue (315, p. 19).
- Willett P.**, voir Holliday J.D. (320-321, p. 45).
- Yang W.**, voir Gooding J. (320-321, p. 85).
- Yassar A.**, voir Marmont P. (320-321, p. 103).
- Zigah D.**, voir Leroux Y.R. (320-321, p. 83).

## Articles

### À propos de

- Aromaticité : un ou deux serpents dans l'Ouroboros de Kekulé ?, par C. Cartier dit Moulin et M. Hasler (315, p. 6).
- Le Forum européen de la Chimie. Turin, 16-20 septembre 2008, par I. Tkatchenko (318, p. 5).

- Pourquoi une Division de Chimie industrielle à la SFC ? par le Bureau de la Division de Chimie industrielle (318, p. 6).
- Rencontre avec Paul Hagenmuller, par P. Rigny et M. Pouchard (319, p. 5).
- SFC 07 Paris-WF Ulm, par G. Schorsch (322, p. 4).
- Rencontre avec Thomas Zemb, directeur de l'ICSM (322, p. 8).
- L'industrie des tensioactifs à l'épreuve du développement durable, par G. Schorsch (323-324, p. 6).
- Pour réconcilier chimie et grand public : la chimie s'invite au marché, par L. Valade, M.-C. Vitorge et A. Marquet (325, p. 4).

### Chimie des aliments et du goût

- La chimie des aliments et du goût, par H. This (315, p. 7).
- Histoire d'une pièce d'argent, par H. This (315, p. 9).
- L'œuf dur : un festin de réactions chimiques, par H. This (316, p. 5).
- Dans la famille « mousses au chocolat »..., par H. This (319, p. 10).
- Descriptions formelles pour penser... et pour la formulation, par H. This (322, p. 11).
- Réinventons la tradition, par H. This (325, p. 5).

### Chimie et patrimoine culturel

- II - Matières picturales, pigments, colorants et substances organiques**
- Chimie des matières organiques et inorganiques du patrimoine culturel, par J.-C. Mialocq (318, p. 7).
- Matières picturales, pigments, colorants et substances organiques : des matériaux complexes et diversifiés, par M. Regert (318, p. 8).
- L'altération des pigments au plomb : étude du minium et de sa possible reconversion, par S. Aze, V. Detalle, J.-M. Vallet et N. Pingaud (318, p. 9).
- Étude des polychromies d'un portail gothique : l'exemple de la cathédrale de Senlis, par P. Hugon (318, p. 16).
- La technique picturale des peintres de la Renaissance italienne examinée par spectrophotométrie, par G. Dupuis (318, p. 22).
- La couleur de l'avant-garde russe : étude de la caractérisation physico-chimique de la matière picturale, par G. Cuoco, C. Mathe et C. Vieillescazes (318, p. 28).
- L'archéologie des textiles : une nouvelle discipline au service de la connaissance et de la compréhension des sociétés humaines, par C. Moulherat (318, p. 30).
- Stratégie analytique de l'identification des colorants naturels dans les objets du patrimoine, par W. Nowik, S. Héron, L. Raffaëly-Veslin et A. Tchapla (318, p. 35).
- Protéomique dans l'art et l'archéologie, par C. Solazzo, C. Rolando et C. Tokarski (318, p. 40).
- Les composés organiques volatils émis par des matériaux du patrimoine culturel, par A. Lattuati-Derieux et M. Regert (318, p. 46).
- Des chasseurs de miel néolithiques aux sculpteurs du XIX<sup>e</sup> siècle : une histoire des produits de la ruche et des cires revisitée par la chimie analytique, par M. Regert (318, p. 52).
- Chimie organique physique**
- Hommage à Jacques-Émile Dubois, un**



**grand pionnier**

A remarkable chemist and friend, par G.A. Olah (320-321, p. 7).  
 L'alchimie d'un grand chimiste. Florilège (320-321, p. 8).  
 Jacques-Émile Dubois : un pionnier de la cinétique rapide, par J.-M. El Hage Chahine et J. Aubard (320-321, p. 12).  
 Processus photochimiques ultra-rapides : du laboratoire aux systèmes photoactifs naturels, par M.M. Martin, P. Plaza, P. Changenet-Barret, A. Espagne, M. Mahet, C. Ley et F. Lacombe (320-321, p. 14).  
 La photoréactivité de photochromes organiques en solution. Approche expérimentale par absorption femto-picoseconde, par B. Moine, S. Aloïse, G. Buntinx, O. Poizat, V. Lokshin, C. Moustrou et A. Samat (320-321, p. 20).  
 Ultrafast structural dynamics of hydrogen bonds in the liquid phase, par T. Elsaesser (320-321, p. 27).  
 Jacques-Émile Dubois, pionnier de l'informatique chimique et inventeur du DARC. Le système DARC : de la recherche fondamentale aux transferts technologiques, par D. Laurent (320-321, p. 33).  
 Chemical complexity and molecular topology. The DARC concepts and applications, par J.-E. Dubois (320-321, p. 37).  
 Jacques-Émile Dubois, le système DARC, et son influence sur la pensée, la représentation et la manipulation de l'information chimique, par M. Petitjean (320-321, p. 43).  
 The influence of the DARC project on chemoinformatics research at the University of Sheffield, par J.D. Holliday et P. Willett (320-321, p. 45).  
 The challenge of molecular structure representation for property prediction, par J. Gasteiger (320-321, p. 51).  
 Molecular symmetry deficiency and shape deviation measures, par P.G. Mezey (320-321, p. 56).  
 From specific to generic. From DARC to Markush DARC: the structural search for generic patents, par B. Marx (320-321, p. 61).  
 Des surfaces d'électrodes modifiées aux polymères conducteurs. L'impulsion de Jacques-Émile Dubois dans le démarrage des études de surfaces organiques, par M. Delamar et P.-C. Lacaze (320-321, p. 66).  
 L'électrochimie moléculaire portée à ses limites. Des cinétiques nanosecondes à l'exploration dynamique d'objets nanométriques, par C. Amatore, E. Maisonhaute et B. Schöllhorn (320-321, p. 69).  
 Dynamic restructuring of gold surfaces during chemical reactions, par C. Friend (320-321, p. 75).  
 Propriétés optiques des surfaces : de l'effet Raman exalté de surface à la plasmonique, par J. Aubard et N. Féridj (320-321, p. 81).  
 Contacts atomiques par voie électrochimique en milieu eau/cyclodextrine, par Y.R. Leroux, C. Fave, D. Zigah, G. Trippé-Allard et J.-C. Lacroix (320-321, p. 83).  
 The self-assembled monolayer modification of electrodes. Some recent advances in biological application, par J. Gooding et W. Yang (320-321, p. 85).  
 Polymères conducteurs et anticorrosion. Une application originale, susceptible

d'exploitation industrielle, par P.-C. Lacaze, J.-C. Lacroix, K. Chane Ching et S. Aeyach (320-321, p. 90).  
 Surfaces d'électrodes bioactives : des polymères conducteurs bifonctionnels pour des biocapteurs enzymatiques et à ADN, par M.C. Pham et B. Piro (320-321, p. 92).  
 Croissance de couches ultra-minces de polymères sur des surfaces conductrices modifiées électrochimiquement, par M.M. Chehimi (320-321, p. 94).  
 Le platine réduit : un puits à électrons, par C. Mangeney, M. Delamar, J. Ghilane, C. Lagrost, P. Hapiot et J. Simonet (320-321, p. 96).  
 Organic thin film transistors. Challenging the portable sensor technology, par M.C. Tanese, F. Marinelli et L. Torsi (320-321, p. 98).  
 Contrôle des interfaces dans les semi-conducteurs organiques, par P. Marmont, M. Mottaghi, F. Rodriguez, N. Battagliani, P. Lang, A. Yassar et G. Horowitz (320-321, p. 103).  
 S'interroger à la lumière du passé sur comment dynamiser la recherche en France, par D. Laurent (320-321, p. 105).  
 Recherche et Défense nationale. Une collaboration fructueuse (1961-1995) : la DRME, par J. Carpentier (320-321, p. 105).  
 Défense et recherche aujourd'hui : un engagement renouvelé. Entretien avec Pierre Schanne. (320-321, p. 115).  
 L'AUDIST de Jacques-Émile Dubois. Histoire de l'Agence Universitaire de Documentation et d'Information Scientifique et Technique, par B. Marx (320-321, p. 118).  
 Quelques pistes de réflexion pour une recherche pleinement valorisée, par A. Dumas (320-321, p. 122).  
 Jacques-Émile Dubois, un grand esprit, par C. Allègre (320-321, p. 128).

**Chroniques****Chimie et industrie chimique**

Une division de Chimie industrielle à la SFC : une fausse « bonne idée », par G. Schorsch (317, p. 4).  
 Chimie industrielle et génie des procédés, par J. Bousquet (320-321, p. 4).

**Communication de la chimie**

Parlez-vous « chimie » ?, par R.-E. Eastes (315, p. 4).  
 Parfait petit chimiste recherche... produits chimiques, par R.-E. Eastes (316, p. 3).  
 Ce qui est chimique pour les uns..., par R.-E. Eastes (318, p. 4).  
 Des valeurs « naturalistes », par R.-E. Eastes (319, p. 4).  
 « Tout » est chimique ?, par R.-E. Eastes (320-321, p. 5).  
 Comment je suis devenu chimiste..., par R.-E. Eastes (322, p. 3).  
 « Chimique comment ? » Des différentes façons d'être chimique, par R.-E. Eastes (323-324, p. 4).  
 Naturel ET chimique ?, par R.-E. Eastes (325, p. 3).

**La chimie pour un développement durable**

Le Grand Lyon et... la chimie pour un développement durable, par B. Sillion (315, p. 4).  
 La chimie pour un développement durable : pourquoi et comment ?, par B. Sillion (316, p. 3).

L'innovation chimique dans la perspective de REACH, par B. Sillion (323-324, p. 4).

**Comment ça marche ?**

Dix milliards de tonnes par an de béton. De la chimie à l'ouvrage, par P. Pichat (315, p. 12).

**Éditorial**

La SFC et *L'Actualité Chimique* vous souhaitent une « Bonne année 2008 ! », par O. Homolle et P. Rigny (315, p. 2).  
 Le soutien des associations scientifiques et techniques : une ardente obligation, par Paul Rigny (316, p. 2).  
 Nouveau Président et nouveau Bureau pour la SFC, par le Bureau de la SFC (317, p. 1).  
 La réforme du CNRS sera-t-elle celle du recrutement des chercheurs ?, par P. Rigny (318, p. 2).  
 Science et industrie : un mariage forcé !, par P. Rigny (319, p. 2).  
 Les progrès de la science : des idées et des hommes, par P. Rigny (320-321, p. 1).  
 La Société Chimique de France : un nouvel essor, par le Bureau de la SCF (322, p. 2).  
 La parité : oubliée de la réforme du système français de recherche, par P. Rigny (323-324, p. 1).  
 Quel CNRS pourrait-on avoir ?, par P. Rigny (325, p. 2).

**Enseignement et formation**

Récit d'une expérience pédagogique innovante « eau »-vante, par Y. Verchier et A. Hervé-Minvielle (316, p. 30).

**JIREC 2006**

Polymères organiques, du monomère à l'objet : retour sur les JIREC 2006, par Y. Holl (319, p. 14).  
 Quelques idées à propos de l'enseignement de la chimie macromoléculaire, par T. Hamaide (319, p. 15).  
 Propriétés électriques et optiques des polymères, par A. Moliton (319, p. 24).  
 Endommagement et rupture des polymères amorphes résistant au choc : une vue basée sur la mécanique des milieux continus, par R. Schirrer et C. Fond (319, p. 33).  
 Solutions et gels polymères, par M. Rinaudo (319, p. 36).  
 Les polymères et le feu, par M. Ferriol, M. Cochez et J.-M. Lopez-Cuesta (319, p. 41).  
 La biomasse végétale, source de molécules organiques, par M. Rinaudo (319, p. 45).

**Les travaux pratiques**

Les catalyseurs de Brookhart-Gibson : synthèse, purification et utilisation en catalyse de polymérisation, par C. Jeunesse (316, p. 36).

**MIEC-JIREC 2007**

Chimie et développement durable. Retour sur les MIEC-JIREC 2007, par C. Eskenazi (325, p. 14).  
 Développement durable, « avenir incertains », par C. Lévêque (325, p. 16).  
 La chimie et le développement durable, par A. Lattes (325, p. 18).  
 La chimie et le développement durable à la FFC : le projet « Chimie pour un Développement Durable® », par M. Azémar (325, p. 21).  
 Stratégie d'action pour l'environnement et le développement durable au CNRS, par G. Chambaud et B. Delay (325, p. 24).  
 Le pôle Environnement et développement

durable de l'Université de la Rochelle, par S. Lamare et G. Blanchard (325, p. 26).

La pollution atmosphérique particulaire sème le trouble, par P.-C. Maria (325, p. 30).  
 La pollution marine. Quelles politiques pour une protection durable de l'océan et des mers côtières ?, par M. Marchand (325, p. 35).

Le stockage électrochimique de l'énergie : apport des batteries lithium-ion, par S. Franger, C. Benoit et R. Saint-Martin (325, p. 41).

Une démarche de progrès pour un développement durable : expérience de la branche chimie de Total, par A. Grosmaître (325, p. 45).

L'Université Virtuelle Environnement et Développement durable, par D. Pommeray et L. Aquilina (325, p. 49).

Travail collaboratif, un exemple avec les notions associées à l'équilibre chimique, par J. Randon (325, p. 52).

### Histoire de la chimie

Qui a découvert le chlore ?, par H. Chabot (316, p. 41).

### Industrie

Wacker Chemie : une entreprise performante. Pourquoi ?, par G. Schorsch (315, p. 28).  
 La valorisation de la recherche. Entretien avec Marc Ledoux, directeur de la Politique industrielle au CNRS, par P. Rigny (316, p. 28).

### La photochimie pour transformer la matière

La photochimie en ébullition, par E. Amouyal et T.-H. Tran-Thi (317, p. 5).

Synthèse par voie photochimique. Introduction, par H. Bouas-Laurent (317, p. 6).

Photochimie en synthèse organique, par N. Hoffmann, J.-C. Gramain et H. Bouas-Laurent (317, p. 6).

La pyrolyse laser, une méthode souple de production de nanopoudres, par N. Herlin-Boime, Y. Leconte, D. Porterat, C. Reynaud et O. Sublemontier (317, p. 14).

Polymères et lumière. Introduction, par J.-P. Fouassier (317, p. 16).

Les photopolymères : de la chimie verte aux hautes technologies, par X. Allonas, D. Burget, C. Croutx-Barghorn, C. Ecoffet, J.-P. Fouassier, P. Jacques, J. Lalevée, D.J. Lougnot, J.-P. Malval, F. Morlet-Savary et O. Soppera (317, p. 16).

Photopolymérisation : développements industriels, par H. Strub (317, p. 22).

Photodégradation des matériaux polymères, par J.-L. Gardette, M. Baba, B. Mailhot, S. Morlat-Thérias et A. Rivaton (317, p. 25).

Matériaux moléculaires et photonique. Introduction, par J. Delaire et J.-P. Desvergne (317, p. 31).

La photocommutation : des verres photochromiques aux machines moléculaires, par K. Nakatani et J.-C. Micheau (317, p. 31).

L'électroluminescence a fêté ses cent ans en 2007, par P. Le Barny et J.-P. Pocholle (317, p. 37).

Micro- et nanocristaux luminescents : ce qui change avec la taille, par S. Fery-Forgues, A. Ibanez et B. Dubertret (317, p. 42).

Photochimie supramoléculaire : quand le calcul et le mouvement passent par la

reconnaissance, par D.M. Bassani et J.-P. Collin (317, p. 46).

La femtochimie en mouvement. Introduction, par B. Soep et Y.-A. Gauduel (317, p. 51).

Processus ultra-rapides dans les hémoprotéines, par M. Vos (317, p. 52).

Étude de la dynamique structurale de la myoglobine par cristallographie sub-nanoseconde, par D. Bourgeois (317, p. 55).

La spectroscopie d'absorption X résolue en temps, par C. Bressler et M. Chergui (317, p. 59).

Dynamique électronique femtoseconde de molécules complexes, par L. Poisson, N. Shafizadeh et S. Haacke (317, p. 62).

### Le dossier

La chimie sous rayonnement : des aspects fondamentaux aux applications dans les sciences des matériaux et les sciences de la vie, par J. Belloni, M. Mostafavi, T. Douki et M. Spothem-Maurizot (316, p. 1).

Paul Hagenmüller : itinéraire de l'enfant terrible de la chimie du solide française, par P. Teissier (319, p. 1).

Les progrès de la chimie moléculaire de l'uranium, par M. Ephritikhine (322, p. 1).

### Molécules interstellaires et photochimie dans l'espace

Introduction, par S. Leach et E. Amouyal (coordinateurs) (315, p. 11).

La formation de molécules dans le milieu interstellaire. À la recherche des mécanismes de formation de la molécule H<sub>2</sub> sur les grains de poussière interstellaire : l'expérience FORMOLISM, par J.-L. Lemaire, J.-H. Fillion, F. Dulieu, A. Momeni, S. Baouche, L. Amiaud et V. Cobut (315, p. 111).

Photolyse de petits hydrocarbures : une source de radicaux pour la chimie du carbone dans l'espace, par S. Boyé-Péronne et D. Gauyacq (315, p. X).

La photochimie des cyanopolynes : étape clé de la chimie interstellaire ?, par I. Couturier-Tamburelli, A. Coupeaud, Z. Guennoun, N. Piétri et J.-P. Aycard (315, p. XV).

Photochimie dans les atmosphères planétaires : à la recherche de la matière prébiotique, par M.-C. Gazeau, M. Schwell, A. Jolly, Y. Bénilan, I. Kleiner et F. Raulin (315, p. XIX).

### Les cosmétiques

#### La science au service de la beauté

Chimie et cosmétiques : une longue histoire ponctuée d'innovations, par V. Nardello-Rataj et F. Bonté (323-324, p. 10).

La réglementation des produits cosmétiques et ses évolutions, par A. Laissus-Leclerc (323-324, p. 13).

La peau : support des cosmétiques mais aussi d'évaluation, par P. Gasser et D. Bouzoud (323-324, p. 18).

Le follicule pileux : la partie immergée du cheveu, par B.A. Bernard (323-324, p. 23).

Les silicones : 50 ans d'innovation en cosmétique, par J.-L. Garaud (323-324, p. 29).

Tensioactifs basés sur des sucres. Synthèses et exemples d'utilisation en cosmétique, par S. Kerverde et B. Brancq (323-324, p. 35).

Parfum, chimie et création, par X. Fernandez, S. Antonioti, E. Bussotti et

M.-P. Hurel (323-324, p. 42).

Les produits de soin de la peau : Guerlain, 180 ans d'expertise, par F. Bonté (323-324, p. 52).

Les liposomes en cosmétique, par A. Meybeck (323-324, p. 60).

Quelques « astuces » de la formulation moderne dans le maquillage, par J.-C. Le Joliff (323-324, p. 67).

Progrès récents dans la protection solaire, par L. Ferrero et M. Pissavini (323-324, p. 72).

L'analyse sensorielle et l'univers cosmétique, par A.-M. Pensé-Lhéritier (323-324, p. 81).

La modélisation moléculaire pour développer des principes actifs cosmétiques innovants, par I. Bonnet, B. Vogelgesang et V. André-Frei (323-324, p. 84).

La rhéologie : un outil précieux pour la formulation cosmétique, par P. Reeve et S. Amigoni (323-324, p. 89).

Formulation d'une crème teintée biologique, par F. Ledoux (323-324, p. 99).

Formulation d'un gloss, par F. Ledoux (323-324, p. 108).

Formulation d'un mascara émulsion eau dans huile, par F. Ledoux (323-324, p. 112).

Comme un parfum d'histoire... Retour sur le 38<sup>e</sup> Symposium international sur les huiles essentielles, par N. Baldovini, R. Perriot et C. Delasalle (323-324, p. 116).

### Recherche et développement

Les carbonates organiques : une famille de composés méconnue, par C. Vriet et Z. Mouloungui (315, p. 19).

Polyamines : études et applications. Un regard sur les premières Journées d'études scientifiques en chimie des polyamines cycliques et linéaires, par F. Denat, D. Deniaud et R. Tripiet (316, p. 10).

La production d'hydrogène par hydrolyse catalysée du borohydrure, par U.B. Demirci (316, p. 22).

L'IRCELYON, un espace d'innovation en catalyse (322, p. 41).

De la farine de blé pour décolorer des effluents papetiers pollués, par G. Crini, P.M. Badot, N. Morin-Crini, B. Jolibois, E. Comte, B. Fahys, E. Gravier et G. Torri (325, p. 8).

### Médailles de bronze du CNRS : nouvelles communications

Des solides hybrides poreux à flexibilité géante, par C. Serre (322, p. 15).

Synthèse de produits naturels : des acides aminés et du cuivre(I) pour la synthèse d'alcaloïdes cyclopeptidiques, par G. Evano (322, p. 20).

Synthèses de matériaux remarquables sous conditions extrêmes : études *in situ* diffraction synchrotron, par Y. Le Godec, V. Solozhenko, S. Klotz et M. Mezouar (322, p. 27).

Des techniques électrochimiques locales pour mieux comprendre la corrosion, par V. Vivier (322, p. 35).

### Sécurité et environnement

Le chlordécone, insecticide du charançon du bananier, par J. Fournier (316, p. 46).

Vers une nouvelle classification des produits chimiques, par R. Messal (319, p. 48).

La pollution de l'air dans les espaces clos pré-occupe, par M.-T. Dinh-Audouin (322, p. 45).



La filière française des huiles  
et protéines végétales



## PROLEA

PROLEA est la plateforme de communication de la filière des huiles et protéines végétales françaises. Elle s'est organisée et renforcée en une trentaine d'années, en réponse à l'embargo américain sur le soja en 1973.

PROLEA regroupe cinq organismes complémentaires

- La **FOP**, la fédération des producteurs d'oléoprotéagineux, clé de voûte de la filière ;
- Deux interprofessions :
  - l'**ONIDOL**, pour les oléagineux ;
  - l'**UNIP**, pour les protéagineux ;
- Un centre technique :
  - le **CETIOM** pour les oléagineux (l'**UNIP** ayant également un rôle technique pour les protéagineux) ;
- Un établissement financier : **SOFIPROTEOL**.



## DE LA CONCERTATION À LA MISE EN PLACE D'ACTIONS

L'organisation professionnelle structurée en filière est un modèle qui, dès les années 70, a permis le rassemblement autour de projets communs à l'ensemble des familles professionnelles touchant les cultures oléagineuses et protéagineuses, dans un esprit de concertation permanente et de mobilisation des Pouvoirs Publics.

C'est grâce à ce mode de fonctionnement que des innovations marquantes et des réalisations majeures pour l'agriculture ont pu voir le jour :

- Mise en place de Plans Protéines pour développer l'offre de protéines végétales en Europe, structuration et gestion de l'outil industriel de trituration des graines oléagineuses depuis les années 70 ;
- Mise en place de travaux de recherche pour l'amélioration et la diversification variétale, promotion des huiles végétales, notamment au travers de cam-

pagnes «grand public» et «prescripteurs» et de soutien à des études scientifiques ;

- développement du biocarburant Diester pour moteur diesel, lancement du 1<sup>er</sup> contrat européen à terme sur les graines de colza avec le MATIF (aujourd'hui EURONEXT.LIFFE).

Le secteur des huiles et protéines végétales en chiffres :

- 150.000 producteurs en France ;
- 2,5 millions d'hectares en France et plus de 8 millions en Europe ;
- Une quarantaine de sélectionneurs-obtenteurs ;
- Un millier de coopératives et de négociants, dont une centaine réalise un chiffre d'affaires de plus de 40 millions d'euros ;
- 14 sites industriels de transformation des graines oléagineuses (trituration, raffinage, estérification) pour environ 3 millions de tonnes de graines triturées par an ;
- le secteur comprend en outre 320 fabricants d'aliments du bétail produisant plus de 23 millions de tonnes d'aliments composés, dont les 3/4 proviennent d'une vingtaine d'entreprises.

## La FOP

Créée en 1990, la **Fédération Française des Producteurs d'Oléagineux et de Protéagineux** est née de la fusion de l'Association Générale des Producteurs de Plantes Riches en Protéines (AFPP) et de l'Association générale des Producteurs d'Oléagineux (AGPO).

La FOP **représente 150 000 producteurs français d'oléagineux et de protéagineux.**

Au plan économique, la FOP assume son rôle de clé de voûte de la filière oléoprotéagineuse en représentant les producteurs français d'oléagineux et de protéagineux.

Au plan syndical, elle agit en leur nom tant au niveau national avec la FNSEA ou encore avec l'AGPB et l'AGPM au sein d'ORAMA qu'au niveau européen en tant que membre de l'Association Européenne pour les Oléoprotéagineux (EOA).

## ACTIVITÉS DE LA FOP

La FOP **défend les intérêts des producteurs** notamment auprès des Pouvoirs publics français et européens et des instances internationales

comme l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC). Les producteurs qu'elle représente ont su innover en lançant avec succès la production de Diester et en diversifiant les débouchés.

La FOP assure un service permanent d'informations auprès des producteurs via des relais (Organismes collecteurs, chambres d'agriculture, FDSEA, JA).

## Le CETIOM

Créé en 1957, le CETIOM est l'organisme technique de recherche et de développement au service des productions oléagineuses françaises.

Les principales productions concernées sont : le colza, le tournesol, le soja et le lin.

## ACTIVITÉS DU CETIOM

- Le CETIOM est le partenaire des producteurs d'oléagineux et de leurs organisations professionnelles avec lesquels il prépare les innovations techniques de demain.
- Son premier objectif est d'améliorer la compétitivité économique des cultures oléagineuses, à toutes les étapes de la filière, depuis la production jusqu'à l'utilisation des produits transformés.
- Sur le terrain, il accompagne les organismes concernés par le développement des oléagineux grâce à son réseau d'expérimentation et d'experts. Il s'attache également à maintenir des relations permanentes avec la recherche, et avec les industriels de l'agrofourmiture et de la transformation.

## L'ONIDOL

Organisation interprofessionnelle au sens de la loi du 10 juillet 1975, l'ONIDOL regroupe les principales associations et fédérations professionnelles concernées par



la production, la commercialisation, la transformation et l'utilisation des oléagineux, colza, tournesol, soja, lin, olive.

### MISSIONS

Créée en 1978, l'ONIDOL a pour objet de promouvoir le développement et l'utilisation des productions d'oléagineux dans un esprit de concertation permanente entre les différentes familles professionnelles et de mobilisation des Pouvoirs publics.

En 1999, elle accueille une section spécialisée, l'Association Française Interprofessionnelle de l'Olive (AFIDOL)

### A L'ORIGINE

**1970** : Controverse de « l'acide érucique » : la consommation d'huile de colza s'effondre !

**1972** : l'INRA met au point de nouvelles variétés de colza ; la reconversion complète sera effective en 1977.

**1973** : Embargo sur les exportations américaines de soja ; les cours flambent. La dépendance de l'Europe en protéines apparaît au grand jour.

**1974** : Lancement d'un PLAN PROTEINES en France ; les oléoprotéagineux doivent contribuer à une agriculture plus « économique » et plus « autonome ».

## ■ L'UNIP

Organisation interprofessionnelle au sens de la loi du 1<sup>er</sup> juillet 1975, l'UNIP regroupe les principales associations et fédérations professionnelles concernées par la production, la mise en marché et l'utilisation des plantes riches en protéines : pois, féverole, lupin, légumes secs, fourrages déshydratés.

### MISSIONS DE L'UNIP

Créée en 1976, l'UNIP a pour objet de promouvoir le développement et l'utilisation des productions de plantes riches en protéines, dans un esprit de concertation permanente entre les différentes familles professionnelles et de mobilisation des Pouvoirs publics.

### A L'ORIGINE

**1973** : embargo sur les exportations américaines de soja : la dépendance de l'Union européenne apparaît au grand jour.

**1974** : lancement d'un Plan Protéines en France pour développer les protéagineux.

La France reste le premier pays européen pour la production et l'utilisation des protéagineux.

## ■ SOFIPROTEOL

Créé en 1983, SOFIPROTEOL est l'Établissement financier de la filière française des huiles et protéines végétales, Proléa. Sa mission est de promouvoir la mise en marché et la transformation des productions oléoprotéagineuses ainsi que de développer de nouveaux débouchés afin d'assurer la pérennité de la filière dans un souci d'équité et de solidarité entre les acteurs.

Outre sa gestion d'activités financières de marché, SOFIPROTEOL gère des fonds d'investissements durables destinés à accompagner les entreprises de l'amont et de l'aval de la filière dans leurs développements.

Dans le cadre de cette vocation d'investisseur et afin d'agir directement sur la structuration de la filière, SOFIPROTEOL exerce une activité industrielle dans la transformation des oléagineux et dans la nutrition et la valorisation des productions animales.

### ACTIVITÉS DE SOFIPROTEOL

#### LA GESTION D'UN PATRIMOINE INDUSTRIEL :

La reprise du GROUPE GLON en 2007, via la holding SOFIAL, la prise de contrôle de la société LESIEUR en 2003, via la société SAIPOL, le développement du Diester, dont la commercialisation est assurée par la société DIESTER INDUSTRIE, et sa présence dans l'énergie et la chimie verte avec sa filiale NOVANCE, illustrent la volonté des principaux acteurs de la filière de sécuriser, à travers SOFIPROTEOL, les



débouchés des producteurs tant dans les domaines alimentaires que non alimentaires.

#### LA GESTION DE FONDS D'INVESTISSEMENTS :

SOFIPROTEOL engage deux fonds financiers dans les métiers des huiles et protéines végétales. Grâce au Fonds de Développement de la Filière des Oléagineux et Protéagineux (FEDOP), SOFIPROTEOL investit dans les entreprises de l'amont à l'aval de la filière. Le fonds d'Action Stratégique des Oléoprotéagineux (FASO), alimenté par les producteurs d'Oléagineux et de Protéagineux, finance la Recherche/Développement, la promotion de la filière et peut intervenir en amorçage/capital risque dans des structures impliquées dans la filière oléoprotéagineuse.



### ACTIONS DE RECHERCHE

#### AMÉLIORATION VARIÉTALE ET DIVERSIFICATION

Aux côtés du CETIOM et de l'INRA, l'ONIDOL :

- **Participe** aux programmes d'amélioration variétale du colza, tournesol et soja : l'objectif est de disposer de variétés plus performantes, plus résistantes aux maladies, avec des qualités nouvelles (composition en huiles, en protéines) ;
- **Encourage** les recherches sur de nouvelles productions (tournesol oléique, lin oléagineux, ricin, moutarde).

Depuis 1993, en matière de nouveaux débouchés, l'ONIDOL participe au développement des productions non alimentaires (colza, tournesol) sur jachère, notamment pour les biocarburants.

