

l'actualité chimique

Mensuel - Juin-Juillet 2004 - N° 276

La Maison de la Chimie



Une belle aventure de 70 ans



Édité par la Société Française de Chimie - ISSN 0151 9093



AVOCADO
ORGANICS

Manufacturing Capabilities and Custom Synthesis Services

Our facilities are modern and well equipped and we take an innovative approach to custom synthesis; our capabilities include:



- Multi-purpose manufacturing facilities
- Manufacturing capacity from grams to >100 kg
- Thousands of compounds produced in-house
- Unique building blocks
- Expert chemists utilise an extensive range of reaction types
- Modern approach to process development
- Scale-up expertise
- In-depth knowledge of 20 L scale
- Potential for further scale-up using Johnson Matthey facilities
- Strict quality control
- Large choice of custom packaging options
- Commitment to customer confidentiality
- Fast, flexible and reliable service

To discuss your requirements or to request a catalogue contact one of our sales staff who will be pleased to help.

**Avocado France
Johnson Matthey
Z.A. Rhodes
38110 LA TOUR-DU-PIN
France**

**Tel: 0800 777 133
Fax: 0800 575 123
Email: avocadofrance@matthey.com**

Avocado Organics are also available from Alfa Aesar sales offices worldwide, visit www.avocadochem.com to find your nearest supplier.

Alfa Aesar
A Johnson Matthey Company



RÉDACTION

Rédacteur en chef : Yann-Antoine Gauduel
Rédactrice en chef adjointe : Séverine Bléneau-Serdel

Secrétaire de rédaction, maquettiste, webmestre : Évelyne Girard

Secrétaire de rédaction, activités de la SFC, manifestations : Roselyne Messal

Chargés de rubrique : Marika Blondel-Mégretis (Histoire de la chimie), Yves Dubosc (Livres et médias), Véronique Nardello-Rataj (Comment ça marche ?), Gilbert Schorsch (Industrie), Pierre Vermeulin (Chimie francophone)

Comité de rédaction : P. Aldebert (CNRS), P. Arpino (div. Chim. anal.), A. Audibert-Hayet (IFP), B. Badet (ICSN), X. Bataille (Histoire des sciences), H. Belhadj-Tahar (Chimie et toxicologie), M. Blanchard-Desce (div. Chim. orga.), M. Blondel-Mégretis (club Histoire), E. Bordes-Richard (div. Cat.), M. Boyer (div. Enseignement-Formation), J. Buendia (SCI), M. Carrega (div. Matér. polym.), N. Cheymol (CPGE), J.-C. Daniel (groupe Formulation, GFP), R.-E. Eastes (ENS), E. Florentin (ENS), J.-P. Foulon (UdPPC), J. Fournier (club Histoire), S. Furois (div. Chimie phys.), J.-F. Lambert (div. Cat.), V. Nardello-Rataj (groupe Formulation), P. Pichat (ADT), A. Picot (prévention des risques chimiques), P. Rigny (exp. scient.), D. Rutledge (div. Chim. anal.), G. Schorsch (SFC), F. Secherresse (div. Chim. coord.), B. Sillion (div. Matér. polym.), H. This (INRA-Collège de France), M. Verdaguer (UPMC), P. Vermeulin (CNRS), C. Viel, D. Vivien (div. Chim. solide)

Journaliste stagiaire : Émérance Marcoux

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

ÉDITION

Société Française de Chimie
250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris
Tél. : 01 40 46 71 64 - Fax : 01 40 46 71 61
Courriel : ac@sfc.fr - http://www.sfc.fr

Directeur de la publication : Armand Lattes, président de la Société Française de Chimie

Imprimerie : SPEI, BP 26, 54425 Pulnoy

Maquettage articles : e-Press, Casablanca Technopark, Route de Nouaceur, Casablanca (Maroc)

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
www.edif.fr
Index des annonceurs : p. 1

© SFC 2004 - Tous droits réservés
Dépôt légal : juin-juillet 2004

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 2004 - L'ACTUALITÉ CHIMIQUE

(11 numéros par an)

Particuliers : France 85 € - Étranger 90 €

Institutions : France 183 € - Étranger 195 €

Lycées : France 100 € - Étranger 120 €

Membres de la SFC :

abonnement inclus dans la cotisation

Abonnement : SFC, Nadine Colliot

250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris
Tél. : 01 40 46 71 66 - Fax : 01 40 46 71 61
adhesion@sfc.fr

Prix de vente au numéro : 18 € (port inclus)

Éditorial 3

Redorer le blason de la chimie, par **Y.-A. Gauduel** 3

A propos de 4

La Maison de la Chimie, une histoire extraordinaire, par **P. Potier** et **J. Hui** 4

Mobilisation nationale en faveur des sciences et techniques, par **R. Messal** 8

Comment ça marche ? 12

Les airbags puisent leur énergie des boosters d'Ariane 5, par **G. Chounet** 12

Recherche et développement 19

Identification d'agents toxiques de guerre et de leurs signatures : scénarios, moyens et stratégie, par **B. Bellier**, **A. Bégos**, **Y. Juillet** et **L. Taysse** 19

Le génie pour les produits. Un génie des procédés pour l'élaboration de meilleurs produits : perspectives et enjeux, par **E. Favre** et **J. Bousquet** 28

Apport du génie des procédés aux enjeux sociétaux dans le contexte « demandes du marché et de la société versus offres technologiques », par **J.-C. Charpentier** 36

Industrie 39

L'innovation au service de la croissance et de l'emploi en Europe : le 3^e European Business Summit (Bruxelles, 11-12 mars 2004) par **G. Schorsch** 39

Enseignement et formation 44

Cérémonie de remise des prix des XX^e Olympiades nationales de la chimie, Paris, 2 avril 2004, par **M. Boyer** 44

La mise en place de la réforme LMD : l'exemple d'une université scientifique, par **Y. Vallée** 48

Histoire de la chimie 52

Journée Victor Grignard et le Traité de Chimie organique
La catalyse : de Berzelius au *Traité* de Grignard, par **H. Batis** et **M. Chastrette** 52

Informations générales 59

Livres et médias 62

Manifestations 63

Calendrier 63

Activités de la SFC 64

Index des annonceurs			
13 th ICC	p. 2	EDIF	p. 18
Avocado	II ^e de couv.	JCO 2004	p. 35
Bayer Cropscience	p. 43	Millipore	p. 61, IV ^e de couv.

Bulletin d'abonnement en III^e de couverture.



P A R I S

25th International Symposium on Chromatography

October 4-8, 2004 - Palais des Congrès - Paris - France

This symposium is the largest and most prestigious meeting providing the most comprehensive coverage of Chromatography and associated techniques.

► **90 lectures**

► **390 poster presentations** until now

to illustrate the following topics :

Analytical tools for genomics and proteomics, fundamentals and modelling, new detection methods, new challenges in gaz chromatography, sample preparation, fast separations for pharmaceuticals and bioanalysis, chemiometry, optimisation and validation strategies, electrically driven separations, hyphenated techniques, new stationary phases , preparative chromatography, chirality, miniaturization and applications to bioanalytical, clinical, environmental agricultural, food, petroleum....

► **A session for Young Scientists will be organized and 2 awards will be given by EuSSS**



► **ISC best poster Awards with 3 prizes will close the Symposium**

► **Short courses and vendor seminars**

► **An exhibition with the participation of :**

Alltech Associates, Buchi, Carlo Erba, Dionex, Chiral Technologies, Elsevier, Eka Chemicals, Jasco France, Knauer, Leco France, Merck, Phenomenex, Picometrics, Tosoh Biosciences, Thermo Electron, Tessek Ingos, Sedere, Varian...

The meeting is run by :



In 2004 come to 

ORGANISATION

 **Manifestations et Communications Internationales**

Groupe COMEXPO

55 Quai Alphonse Le Gallo - BP 317 - 92107 BOULOGNE CEDEX - France
TÉL. : 33 (0) 1 49.09.68.68 - FAX : 33 (0) 1 49.09.68.69
e-mail : congres@isc04.com - web : www.isc04.com

FURTHER INFORMATION : [Information : www.isc04.com](http://www.isc04.com)

CONTACT : Maryse DELERIS - maryse.deleris@isc04.com

Redorer le blason de la chimie

La chimie n'a pas toujours bonne presse auprès des décideurs et de « Monsieur tout le monde ». C'est le moins que l'on puisse dire. Selon les circonstances, la discipline est perçue avec les yeux de Chimène ou avec un regard distant, voire critique et suspicieux. D'un côté, il y aurait une chimie « malsaine et dangereuse », qui explose, pollue, intoxique, rend malade et fait perdre des vies... bref : un bouc émissaire idéal, source de tous les maux d'un monde hyper-industrialisé. De l'autre, une chimie « propre et bienveillante », qui participe aux dépollutions et développement durable, embellit, redonne santé ou moral, anime les soirées festives à grands jeux de feu d'artifice... bref : une image idyllique, source de tout progrès technologique au service de notre bien-être. De prime abord, expliquer l'image souvent brouillée de la chimie à travers cette double perception n'est pas chose aisée. N'y aurait-il pas à la fois une question de présentation objective des faits et un déficit d'explication ou de communication de la part des chimistes eux-mêmes ?

Prenons un premier exemple concret, assez révélateur de l'ambiguïté de la situation, celui de la toxine botulique produite par un bacille. Elle présente un réel danger, incomparablement plus élevé que celui du cyanure. Au rayon des armes bactériologiques, la substance est classée parmi les cinq produits les plus toxiques au monde ! De manière très surprenante, ce principe actif se vend bien. Il jouit d'une excellente réputation dans les journaux et magazines à grand tirage, donc auprès de lecteurs toujours férus de nouvelles sensations. Imaginez donc ! Injectée de manière répétitive au niveau du visage, la toxine affublée de toutes les vertus atténuerait les effets désastreux de rides disgracieuses... une élégante manière de rajeunir et de combattre efficacement les effets du temps. Du moins en apparence, car ses conséquences à long terme sur l'organisme restent méconnues et ne semblent pas préoccuper ou inquiéter outre mesure les apprentis sorciers et autres adeptes de produits « miracle ».

Autre exemple tout aussi révélateur s'il en est, celui de l'industrie du nucléaire. Malgré son absence de pouvoir polluant en matière d'émission de gaz à effet de serre, ce secteur est toujours considéré comme dangereux par les défenseurs de la qualité de l'environnement. Les interrogations sur la gestion des déchets à long terme ne manquent pas. Elles sont légitimes et la chimie a son mot à dire. Pour compléter le tableau, de récents commentaires sur des événements impliquant les tours de refroidissement d'une usine dans le Nord de la France ont servi la cause de raisonnements indéliçables et injustes,

notamment en présentant la légionellose comme l'une des dernières inventions délétères de l'industrie chimique. Mais diable, comment clarifier l'image de la chimie ?

A l'heure où les derniers blocs de charbon viennent d'être extraits du puits de La Houvre à Creutzwald en Moselle, à l'heure où le futur leader européen de l'industrie pharmaceutique est en train de se constituer, à l'heure où le rapport de l'Académie des sciences sur les nanosciences et les nanotechnologies est rendu publique, il semble souhaitable, voire primordial, que les chimistes communiquent plus avec nos concitoyens. Qu'ils expliquent mieux la place et les futurs enjeux de la chimie dans les développements socio-économiques et environnementaux. Certes, l'exercice de style est difficile et sans doute délicat, mais il peut s'avérer particulièrement fructueux et payant pour éviter de voir se multiplier incompréhensions et confusions, malentendus toujours très dommageables pour le rayonnement des sciences.

Les innovations génèrent souvent peurs ou angoisses. Il serait insensé que les chimistes ne contribuent pas à dissiper les inquiétudes sur les nouveaux matériaux nés de la synthèse de nanotubes de carbone, de la manipulation de la matière atome par atome, de l'assemblage de micro-moteurs moléculaires chimiques ou biologiques. A l'avenir, pourrions-nous dissenter sur les éventuels dangers de l'utilisation d'objets invisibles directement sortis de la tête pensante des scientifiques ? Pour éviter de revivre un très mauvais scénario, déjà bien connu, celui qui mit en scène les fibres d'amiante et leurs effets nocifs, les chimistes doivent devenir les acteurs de leur propre communication.

Au cours des mois de juin et juillet, deux actualités chimiques se dérouleront dans la même unité de lieu, la Maison de la Chimie. Le colloque international Chemrawn XV, *La chimie pour l'eau*, et la célébration du 70^e anniversaire de l'inauguration de cette honorable Maison nous rappellent que, de tout temps, les chimistes sont capables de favoriser les débats d'idées et défendre de grandes causes pour l'Humanité. Forts de leurs savoirs, ne pourraient-ils pas, moyennant un sens aiguisé de la pédagogie, communiquer avec le profane ? L'impact de la chimie en sortirait grand et son blason redoré.

Yann-Antoine Gauduel
Rédacteur en chef

La Maison de la Chimie, une histoire extraordinaire

Pierre Potier et Jacques Hui

La Fondation de la Maison de la Chimie célébrera les 8 et 9 juillet prochains le 70^e anniversaire de l'inauguration de sa Maison. Son ouverture en 1934 résultait d'une volonté déterminée des chimistes français, mais ce fut aussi une histoire extraordinaire où se rejoignirent une conjoncture internationale favorable, le message d'une Science universelle au service de tous les Hommes et la mémoire d'un grand savant, par ailleurs homme politique et humaniste. Soixante-dix ans après, la Maison de la Chimie est toujours bien vivante et reste fidèle à la pensée de ses « pères fondateurs ».

Retracer les événements qui ont conduit à la création de la Maison de la Chimie nous paraissait un devoir de mémoire vis-à-vis de tous ceux qui, dans les années 1925-1930, ont contribué à la réalisation de ce projet. Ce sera aussi l'occasion de donner à tous les chimistes, à tous les scientifiques qui ne connaissent pas encore cette Maison, l'envie d'y venir, d'y tenir réunion, d'y rencontrer des collègues. Cette Maison a été érigée pour être la leur, qu'ils soient de France ou d'ailleurs, de l'industrie ou des organismes publics de recherche, ingénieurs, techniciens ou universitaires.

De l'idée de bâtir une maison des chimistes au grand projet qui va naître

Le Syndicat des Produits Chimiques, qui deviendra plus tard l'Union des Industries Chimiques, fut le premier à suggérer en 1912 la création à Paris d'une Maison de la Chimie, « lieu où fonctionnerait un organisme en vue d'établir un lien entre toutes les Sociétés Savantes et Groupements industriels et professionnels relevant de la Chimie ».

Cette idée fut rapidement reprise par la Société Chimique de France (SCF, aujourd'hui Société Française de Chimie), puis par la Société de Chimie Industrielle (SCI) qui fut fondée en 1917 et dont le président, Paul Kestner, et le secrétaire général, Jean Gérard, travaillaient à la constitution d'une Fédération Nationale des Associations de Chimie.

Le contexte de la Première Guerre mondiale freina toutefois le développement du projet, mais il fut réanimé en 1921 par la SCF qui proposa alors la création d'un Centre de réunion de « toutes les Associations françaises scientifiques ou industrielles s'occupant de la chimie ». Les grandes lignes du projet furent alors tracées et ne changèrent que très peu par la suite : création d'une bibliothèque et d'un centre de documentation, salles de réunion, amphithéâtres, services communs à toutes les associations, centre de formation, bureaux pour les associations domiciliées. Il était même prévu un restaurant et des chambres pour recevoir les scientifiques étrangers de passage dans la capitale, un volet du projet qui sera abandonné par la suite.

C'est alors que Paul Kestner suggéra d'installer dans la future Maison de la Chimie le siège de l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (IUPAC) qui venait d'être créée en 1919. Le projet prit alors une dimension internationale qui ne serait jamais remise en cause.

Un contexte international favorable

Le drame de la Guerre 1914-1918 avait fait naître tout un courant pacifiste qui cherchait à établir les bases d'une paix universelle et durable entre les nations qui avaient participé au conflit. Ce fut l'époque de la création de la Société des Nations dès 1919, et plus tard en 1925 des accords de Locarno dont les principaux artisans, Aristide Briand pour la France et Gustav Stresemann pour l'Allemagne, voulaient garantir la paix entre les cinq principaux acteurs européens du conflit.

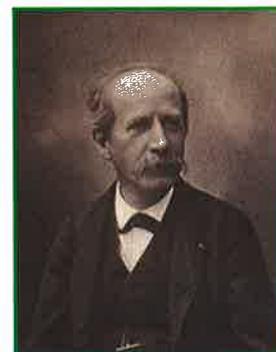
Dans le même temps, la science et ses applications, en particulier en chimie, accélèrent leur développement dans tous les pays, les publications se multipliaient, et savants et industriels du monde entier envisageaient la création d'un Office International de Documentation dont le siège pourrait trouver place, comme celui de l'IUPAC, à la Maison de la Chimie.

Une démarche officielle fut alors faite auprès du gouvernement français en vue, dans un premier temps, de réunir à Paris une Conférence internationale consacrée à la documentation chimique.

L'héritage de Marcelin Berthelot (1827-1907)

La célébration du centenaire de la naissance de Marcelin Berthelot en 1927 servit de catalyseur au projet qui, sous l'impulsion dynamique de Jean Gérard, devenu secrétaire général de la Fédération des Associations de Chimie, allait prendre un nouvel essor et se traduire par la création dès 1928 d'une Fondation internationale et la réalisation par celle-ci au début des années 30 de l'édifice « Maison de la Chimie », telle que nous la connaissons aujourd'hui.

Grand chimiste de renommée internationale, Marcelin Berthelot était considéré par beaucoup comme l'auteur de la seconde révolution chimique par la réalisation des premières



Marcelin Berthelot
(1827-1907).

synthèses organiques qui mettaient fin au concept de « force vitale », alors supposé être à la base de la construction de tous les corps organiques. Il était également connu au niveau international par ses travaux sur la thermochimie et les équilibres des réactions.

Homme de science, Marcelin Berthelot croyait au rôle universel de la science et à la mise à disposition pour tous des découvertes qui en étaient issues. Auteur lui-même de plusieurs centaines de mémoires scientifiques, il ne prit aucun brevet personnel afin que les résultats de ses recherches restent disponibles pour les scientifiques du monde entier.

Homme politique, il fut un défenseur permanent de tout ce qui pouvait conduire à la paix entre les nations et fut ainsi l'un des précurseurs de l'Entente cordiale dont on vient de célébrer le centenaire.

Il n'est donc pas étonnant que la communauté internationale se soit retrouvée pour associer le souvenir du grand savant à la création de la Maison de la Chimie en 1934.

Une mobilisation générale et pacifique

Une vague d'enthousiasme se déchaîna alors et mobilisa des scientifiques et des hommes politiques du monde entier pour promouvoir le projet et célébrer avec éclat le souvenir du grand savant. Ce fut aussi une extraordinaire marque d'intérêt et de confiance pour notre pays.

Dès 1926, l'organisation du centenaire recevait le patronage des plus hautes autorités de l'État et des ambassadeurs de 57 pays. Toute la communauté scientifique y était associée et l'on vit se constituer à travers le pays, dans les territoires qui formaient alors l'Empire français et dans de nombreux pays étrangers, des comités Marcelin Berthelot qui allaient contribuer à promouvoir la souscription internationale pour la construction de la Maison de la Chimie. Cette souscription fut lancée le 6 mai 1927 au cours d'une séance solennelle tenue à la Sorbonne sous la présidence de Paul Painlevé, président du comité Marcelin Berthelot national, et en présence du ministre des Affaires étrangères, Aristide Briand, et de nombreuses personnalités du monde diplomatique, politique, scientifique et industriel.

Le centenaire fut lui-même célébré du 23 au 26 octobre 1927 et donna lieu à de nombreuses cérémonies tant au plan national que dans une soixantaine de nations, souvent en présence des chefs d'État ou des souverains de ces nations.

Cet élan d'enthousiasme se marqua très concrètement par le grand succès de la souscription qui allait permettre la naissance de la Fondation, créée le 12 mars 1928 et reconnue d'utilité publique le 12 août de cette même année. Près de 25 millions de francs de l'époque (environ 9 millions de nos euros d'aujourd'hui) furent recueillis, dont près de la moitié venant de 63 nations participantes.

Le Gouvernement français, quant-à-lui, s'était engagé à participer à la réalisation du projet en mettant à la disposition de la Fondation un terrain situé sur la colline de Chaillot. Le 26 octobre 1927, la première pierre de la Maison de la Chimie était posée en présence d'Édouard Herriot, ministre de l'Instruction publique, qui s'exprima alors en ces termes : « Cette Maison de la Chimie, propriété du monde entier, verra un jour prochain les savants travailler dans une noble émulation au bien-être de l'humanité. Du fait de l'extension de la Chimie, l'édification de la Maison de la Chimie n'est pas un divertissement académique mais l'affirmation des liens profonds qui unissent les peuples ».



Pose de la première pierre de la Maison de la Chimie par Édouard Herriot, ministre de l'Instruction publique, le 26 octobre 1927.

Un chemin difficile jusqu'à l'Hôtel de La Rochefoucauld

Les fêtes du centenaire passées, les difficultés commencent avec, en premier lieu, le revirement des autorités politiques concernant le terrain précédemment offert. La première pierre y restera seule, sans doute aujourd'hui enfouie sous les bâtiments du Conseil économique et social ! Après de multiples discussions entre le Conseil d'administration de la Fondation et les représentants des pouvoirs publics, après quelques attermoissements sur le statut juridique de la future Maison, le choix d'un emplacement se porta sur l'Hôtel de La Rochefoucauld qui venait d'être mis en vente. Cette belle demeure, construite au début du XVIII^e siècle sur un terrain de 4 800 m², permettait, tout en respectant le patrimoine historique que représentait le corps central du bâtiment, d'envisager les travaux nécessaires pour répondre au cahier des charges du projet. La Fondation devra néanmoins faire l'avance à l'État d'une somme de 9 millions de francs pour



L'Hôtel de La Rochefoucauld d'Estissac en 1930.

que la promesse de vente puisse être signée et que l'acquisition définitive devienne effective le 1^{er} octobre 1929.

Il faudra attendre encore deux années pour que l'attribution du bâtiment à la Fondation soit définitivement arrêtée et que les travaux puissent commencer.

La démolition des communs qui constituaient les deux ailes du bâtiment permit de construire une aile droite pour installer le Centre de documentation et le Centre de perfectionnement, organisme de formation permanente destiné aux ingénieurs et techniciens de l'industrie chimique. L'aile gauche était également reconstruite pour abriter le grand amphithéâtre de 1 000 places et les bureaux destinés aux associations domiciliées dans la Maison.

Quant au corps central, il était rehaussé d'un étage pour servir aux réunions et réceptions ainsi qu'à l'accueil de l'IUPAC et de l'Office International de Chimie récemment créé.

Ces travaux durèrent jusqu'à l'automne 1934 et c'est alors qu'eut lieu l'inauguration officielle de la Maison de la Chimie. Celle-ci se déroula le 1^{er} décembre 1934 en présence du président de la République, Albert Lebrun, et de nombreuses personnalités françaises et étrangères. Le rêve de Marcelin Berthelot devenait enfin réalité à travers le symbole que représenterait désormais cette Maison de la Chimie.



La Maison de la Chimie aujourd'hui.

Des activités qui se développent rapidement

Très vite après l'ouverture, le Centre de documentation et le Centre de perfectionnement technique développèrent une intense activité. La bibliothèque allait devenir l'un des centres de documentation chimique les plus riches du monde ; en 1952, elle comptera 70 000 ouvrages et recevra chaque année entre 6 et 7 000 consultants.

Le Centre de perfectionnement technique proposera dès la première année plus de cent conférences, et en 1935-1936, il accueillera environ 8 750 personnes.

Ce succès ne permettait toutefois pas d'assurer l'équilibre financier du fonctionnement de la Maison, ni de répondre à la mission d'entretien du patrimoine confiée statutairement à la Fondation. Le Conseil d'administration décida donc alors d'ouvrir les locaux de la Maison pour d'autres réunions que celles organisées par la communauté des chimistes et de créer ainsi des ressources financières complémentaires. Cette nouvelle orientation fut en particulier développée à l'occasion de l'Exposition universelle des arts et techniques de 1937 dont la proximité géographique attira à la Maison de la Chimie de nombreuses réunions parallèles.

Cette évolution restait bien dans la ligne d'ouverture tracée par les fondateurs et fera de la Maison un centre important de congrès pour la capitale, le troisième encore aujourd'hui par ses capacités après le Palais des congrès et la Cité des sciences de La Villette.

Des heures sombres de la Seconde Guerre mondiale à l'orée du XXI^e siècle

Les péripéties liées à la Seconde Guerre mondiale et à ses suites, les difficultés financières de la Fondation à laquelle ses initiateurs avaient fixé des objectifs ambitieux mais dont les ressources restaient précaires, le départ de l'IUPAC et de la Société Chimique de France, la vente de la bibliothèque devenue propriété de l'Université d'Orsay, le déplacement vers l'École Nationale Supérieure des Industries Chimiques de Nancy des activités du Centre de perfectionnement technique, toutes ces évolutions ont quelque peu estompé dans les années 60 l'œuvre entreprise par la Fondation pour rapprocher les chimistes de France et du monde entier.

Malgré ces turbulences, les administrateurs qui se sont succédé à la tête de l'institution se sont efforcés de rester fidèles aux orientations générales fixées par les fondateurs et de maintenir la Maison de la Chimie dans son rôle d'accueil et de service pour tous les chimistes. Pour remplir cette mission, la Maison de la Chimie met en œuvre des activités pour faciliter rencontres et coopération entre tous ceux qui travaillent à promouvoir la chimie comme l'une des disciplines fondamentales dans l'ensemble des sciences et des techniques.

La domiciliation dans ses locaux de plusieurs sociétés savantes, l'ouverture d'un Club de la chimie qui compte plus de 800 membres, l'organisation de colloques scientifiques autour du thème général « Chimie et ... » dont l'objet est de mettre en évidence la place de la chimie dans la vie de tous les jours, autant d'initiatives qui contribuent à faire de la Maison un lieu de rencontre convivial, apprécié de tous ceux qui le fréquentent.

Tous les deux ans, depuis 1986, la Fondation attribue un Grand Prix d'un montant de 30 000 euros destiné à honorer une œuvre concernant la chimie au bénéfice de l'Homme, de la vie ou de la nature. Il constitue l'une des récompenses scientifiques de haut niveau dans le domaine de la chimie et de ses applications. Le jury est constitué de personnalités appartenant à la communauté scientifique internationale. Le Grand Prix 2004 sera remis à l'occasion de la célébration du 70^e anniversaire.

De « Chimie et Société » à la Conférence Pasteur

L'Année internationale de la chimie avait donné lieu en 2001 à de nombreuses manifestations à travers le pays pour mieux faire connaître l'importance de la chimie comme discipline au cœur de la plupart des technologies modernes. Pour prolonger ce mouvement, les représentants des différentes sociétés savantes et de l'industrie chimique décidèrent début 2002 de mettre en commun leurs efforts pour améliorer la médiation de la chimie et de ses applications vers le grand public et le monde scolaire. Cette initiative prit naissance sous forme d'une commission de travail, « Chimie et Société », qui trouva tout naturellement sa place au sein de la Fondation de la Maison de la Chimie, et qui anime aujourd'hui une dizaine de comités régionaux auxquels se sont associés des représentants de l'Éducation nationale.

En 2003, les mêmes partenaires souhaitèrent étendre cette coopération plus largement et redonner vie à un projet, évoqué à plusieurs reprises dans le passé mais jamais

réalisé de façon concrète et opérationnelle, de Fédération des chimistes en France. La Fondation de la Maison de la Chimie proposa de nouveau son cadre juridique et ses moyens matériels pour donner consistance à ce projet et, le 8 octobre 2003, l'Acte fondateur de la *Conférence Pasteur* était signé rue Saint-Dominique par la section de Chimie de l'Académie des sciences, l'Académie des Technologies, le Département des Sciences chimiques du CNRS, le Comité National de la Chimie, la Fédération Gay Lussac, la Société Française de Chimie, la Société de Chimie Industrielle, la Société Française de Génie des Procédés, la Société Française de Métallurgie et des Matériaux et la Fondation de la Maison de la Chimie. Plusieurs groupes de travail se sont d'ores et déjà mis en place sur les thèmes de la communication et de l'information, de l'enseignement et de la formation, de l'organisation des manifestations, de la recherche et des actions concertées, de l'innovation et des transferts vers les petites et moyennes entreprises.

Ainsi, la Maison de la Chimie retrouve-t-elle sa vocation d'origine ; conformément au rêve de ses fondateurs, elle redevient le symbole du rapprochement entre scientifiques et industriels de tous pays pour mettre la science et la technologie au service de toute l'humanité.



Nous tenons à rendre hommage au professeur André Boullé, qui nous a quittés en 1999, et dont l'excellente brochure sur les origines de la Maison de la Chimie, publiée en 1984 à l'occasion du 50^e anniversaire, a largement servi de source pour cet article.

* Maison de la Chimie, 28 rue Saint-Dominique, 75007 Paris.
Tél. : 01 40 62 27 18. Fax : 01 40 62 95 21.



Pierre Potier
Membre de l'Institut
Président de la Fondation de la Maison de la Chimie



Jacques Hui
Secrétaire général de la Fondation
de la Maison de la Chimie

Le lauréat 2004 du Grand Prix de la Fondation de la Maison de la Chimie

Le lauréat du Grand Prix de la Fondation de la Maison de la Chimie a été nommé vendredi 7 mai. C'est un chimiste exceptionnel, le **Professeur Neil Bartlett**, de nationalité anglaise, qui sera récompensé le 8 juillet prochain. Né en 1932, Neil Bartlett est aujourd'hui professeur émérite à l'université de Californie à Berkeley.

L'œuvre qui sera récompensée par le Grand Prix est la découverte en 1962 du premier composé d'un gaz rare, le xénon : le Xe Pt F6 (solide). Le Professeur a ainsi ouvert la voie à une nouvelle chimie, celle des gaz rares, particulièrement riche dans le domaine des fluorures et des oxydes. C'est parce qu'il était déjà un spécialiste mondialement reconnu de la chimie du domaine fluor qu'il a pu imaginer cette réaction spectaculaire entre le xénon et le fluorure de platine (Pt F6) et découvrir ce composé du xénon.

Il fut en 1998 le premier lauréat à recevoir à Paris le prestigieux Prix Moissan, découvreur du fluor. Il est membre

de neuf académies, dont membre associé étranger de l'Académie des sciences (1989), récipiendaire d'une vingtaine de prix et médailles internationales et Docteur Honoris Causa de neuf universités.

Neil Bartlett a expérimenté une chimie très difficile, qui nécessite beaucoup de précautions. Il a d'ailleurs payé de sa personne (plus d'un mois d'hôpital) la première mise en évidence de l'oxyde de xénon particulièrement instable et explosif.



Le Professeur Neil Bartlett sera donc récompensé par le Grand Prix de la Fondation le 8 juillet 2004, jour de la célébration du 70^e anniversaire de la Maison de la Chimie.

Mobilisation nationale en faveur des sciences et techniques

Roselyne Messal

NDLR : Cet article a été rédigé juste avant l'annonce des changements au sein des ministères concernés. Le 26 avril, le ministère de la Culture et de la communication nous a confirmé que les annonces faites lors de la présentation à la presse restaient pour le moment d'actualité. Nous avons donc décidé de le publier tel quel.

Jean-Jacques Aillagon, ministre de la Culture et de la communication, et Claudie Haigneré, ministre déléguée à la Recherche et aux nouvelles technologies, ont présenté au Conseil des ministres du 25 février 2004, puis à la presse, la mise en œuvre du **Plan national de diffusion de la culture scientifique et technique** pour répondre aux vœux du Président Jacques Chirac. Ce plan de mobilisation, élaboré sous la réflexion de politiques, de responsables des sciences et techniques représentés par les associations, les musées etc. vise en premier lieu à multiplier et stimuler les relais entre les sciences et le grand public, et à donner, en particulier aux jeunes dès l'enseignement scolaire, goût et intérêt pour les sciences. Il devrait contribuer à attirer plus largement les jeunes vers les carrières scientifiques afin d'assurer la compétitivité de la France dans les années à venir (remplacement des départs en retraite notamment...). « Cette mobilisation est nécessaire car depuis 20 ans, on n'a pas mis en valeur la science et la technique » (J.-J. Aillagon).

Les mesures annoncées par les ministres, détaillées ci-après, s'appuieront sur l'ensemble des relais de la culture scientifique auprès des Français : enseignants, chercheurs, institutions sur tout le territoire, associations, médias, édition...

De grands rendez-vous populaires autour de la science

« Chaque citoyen doit accéder à la connaissance » (J.-J. Aillagon)

• La science et le patrimoine étant étroitement associés, dans leur dimension à la fois historique mais également très contemporaine par la mise en œuvre au service de ce patrimoine de technologies innovantes, les **Journées du patrimoine (18-19 septembre 2004)** auront cette année pour thème « **patrimoine, sciences et techniques** ». De nombreux monuments à finalité scientifique sont susceptibles d'être ouverts au public : patrimoine industriel, patrimoine scientifique protégé au titre de la loi sur les monuments historiques (instruments scientifiques, collections de sciences naturelles de médecine), patrimoine astronomique, observatoires, phares... Ces journées pourront également s'appuyer sur des programmes de recensement et de valorisation (photographies, publications, parcours scientifiques, ateliers etc.). Le grand public pourra ainsi découvrir des questions comme la datation, le vieillissement, les problèmes de stabilité et de dégradation des matériaux, les analyses physico-chimiques). Des animations seront proposées sur le thème de la conservation et de la restauration du patrimoine (en particulier avec les laboratoires du CNRS).

• Les ministres de la Culture et de la Recherche souhaitent lancer dès 2004 un **Salon de l'édition scientifique et technique**. Ce salon qui se tiendra à la Cité des sciences et de l'industrie mettra en synergie l'impact de deux manifestations : « Lire en fête » et la « Fête de la science » qui ont lieu toutes deux à l'automne. Ce sera là l'occasion de découvrir la variété des livres et des revues scientifiques dans la diversité de leurs disciplines, de leur niveau de vulgarisation. Il donnera aussi aux auteurs qu'ils soient chercheurs, enseignants ou journalistes..., des tribunes et des lieux d'échanges pour y rencontrer leurs lecteurs. Ateliers et expositions pourront également y être organisés.

• **La Fête de la science 2004, organisée du 11 au 17 octobre 2004**, sera l'occasion de manifester la nouvelle impulsion donnée par la ministre de la Recherche aux actions de culture scientifique et technique, avec une attention toute particulière pour les grandes priorités de la recherche nationale : santé et biotechnologies, développement durable et lutte contre l'effet de serre, gestion des ressources... Cet événement sera élargi aux 25 pays européens dans le cadre des villages des sciences. De plus, une coordination avec « Lire en fête », conduite par le ministère de la Culture, sera destinée à valoriser le livre scientifique et sensibiliser les jeunes publics.

• **La fête de l'Internet scientifique** (qui s'est déroulée du 29 mars au 4 avril 2004), avec le lancement officiel du site spécifique www.science.gouv.fr et de sites consacrés à



Séance d'accompagnement scientifique à l'École de l'Arbalète, Paris 13^e : séparation des constituants de l'eau poivrée par filtration (©photo : Nathalie Sené).

des commémorations de personnalités scientifiques, fait également partie du plan (voir ci-après).

• **2005 sera l'Année mondiale de la physique.** Cette année correspond au centenaire de la parution de trois articles révolutionnaires d'Albert Einstein sur la relativité, le photon et le mouvement brownien. Cette commémoration sera l'occasion d'exciter la curiosité du public, notamment les jeunes et leurs parents, par des opérations qui se dérouleront en milieu scolaire, dans les lieux publics ou même dans la rue. Des initiatives nombreuses et très variées partiront de chaque région de France. La Société Française de Physique s'est associée avec le ministère délégué à la Recherche et aux nouvelles technologies et avec les organismes de recherche afin d'en assurer la coordination. L'événement sera ouvert par une grande conférence internationale de deux jours en janvier 2005 au siège de l'UNESCO (Paris), avec des conférenciers prestigieux, dont plusieurs prix Nobel, qui évoqueront le rôle de la physique dans notre société, l'influence d'Einstein dans la science des XX^e et XXI^e siècles, les liens de la physique avec les autres champs disciplinaires et les problèmes liés à son enseignement. De nombreux chercheurs et professeurs sont déjà volontaires pour intervenir dans les classes de collèges et lycées et préparer des expositions et des expériences sur des phénomènes de base de physique. De son côté, le Centre national de documentation pédagogique (CNDP) prépare une exposition itinérante. L'année 2005 sera aussi l'occasion d'une reprise de la participation des équipes françaises aux concours des Olympiades internationales de physique, destiné aux élèves de fin d'études au lycée. Par ailleurs, l'Université de tous les savoirs réservera un module de 25 conférences pour la physique en juillet 2005 à Paris, avant de se rendre en Province.

Le site Internet www.physique2005.org est déjà en préparation. Rappelons que *L'Actualité Chimique* s'associe à cette célébration et publiera des articles tout au long de l'année 2005 (voir numéro de mars 2004, p. 2).

Mobilisation de la communauté scientifique, enseignants et entreprises

• Malgré l'action combinée des acteurs déjà en place (musées, Centre de culture scientifique, réseaux associatifs, littérature de vulgarisation, rubriques et programmes dans les médias grand public, manifestations festives comme la Fête de la science), la méfiance de la part du public à l'égard des applications nouvelles et la désaffection pour les filières scientifiques n'ont pas été endiguées. Peut-être manquait-il dans le paysage actuel un outil d'incitation et d'innovation capable de démultiplier l'impact des actions les plus efficaces et d'en palier les manques ? Pour remédier à cela, Claudie Haigneré a annoncé la création d'une **Fondation pour la culture scientifique et technique**, qui aura pour vocation de soutenir et d'encourager les actions déjà en cours, tout en encourageant les nouvelles initiatives. Les ressources de la Fondation seront composées de fonds d'origine mixte (publique et privée). Les dons constituant son capital seront collectés auprès de particuliers et d'entreprises et le ministre délégué à la Recherche et aux nouvelles technologies abondera le capital. Le périmètre financier visé est de 10 millions d'euros de capital après 3 ans d'existence. Pour fonctionner, la Fondation devra disposer de 2 millions d'euros de ressources par an,



Exposition « Soleil, mythes et réalités » à la Cité des sciences et de l'industrie (jusqu'en janvier 2005) (©CSI/Bernard Baudin).

constitués par les revenus du capital plus des fonds apportés annuellement par des donateurs, dans le respect de l'équilibre public/privé.

La Fondation agira par allocation de bourses et de prix ou en apportant son soutien direct dans les champs suivants : offre de contenus sur Internet, à la radio et à la télévision et sa diffusion ; sensibilisation des jeunes publics (réseaux associatifs, entreprises, organismes de recherche, professionnels de la diffusion de la culture scientifique) ; lancement d'opérations thématiques articulées sur la promotion des carrières scientifiques ; relations entre science, démocratie et éthique avec la création d'un lieu destiné à développer la réflexion et les forums de discussion.

Après la poursuite des consultations auprès des acteurs et des fondateurs pour élaborer le plan d'action, la Fondation verra le jour au plus tard à la fin de l'année 2004.

• Pour répondre au désir de comprendre, la Cité des sciences et de l'industrie proposera dès fin 2004, à ses visiteurs comme à ses partenaires scientifiques et industriels, une **Galerie des innovations** qui s'étendra sur un espace de plus de 800 m². Produits et services innovants ainsi que leurs processus de création y seront régulièrement exposés et décryptés sous trois angles : fondements historiques et scientifiques, technologies utilisées et impact sur l'utilisateur et la société en général. Les premiers thèmes retenus sont la téléphonie et la biométrie.

• En ce qui concerne l'enseignement, des actions seront menées pour favoriser la mise en œuvre des programmes et **renouveler l'enseignement des sciences au sein du système scolaire**, pour éveiller l'intérêt des élèves et susciter des vocations pour les études et les métiers scientifiques (dès la maternelle par exemple avec une diffusion prévue pour la rentrée 2004 de documents d'accompagnement). Les enseignants disposent déjà de ressources en ligne sur les sites Eduscol et La main à la pâte. Par ailleurs, un partenariat est engagé avec les grandes écoles pour l'accompagnement scientifique à l'école. Dans le secondaire, les programmes scolaires seront réaménagés avec une plus grande place pour la formation méthodologique des élèves et pour les croisements disciplinaires. Des thèmes seront identifiés pour stimuler les convergences comme la santé, la sécurité, l'environnement et le développement durable, l'énergie... Le ministère de la Jeunesse, de l'Éducation nationale et de la Recherche exercera un rôle d'impulsion et de soutien par des accords de partenariats, la formation des enseignants et des intervenants, l'attribution de moyens

(subventions, personnels mis à disposition...) pour aider la réalisation d'ateliers scientifiques et techniques (en particulier pour les collèges et lycées), les Olympiades, les Clubs sciences et citoyens avec le CNRS. La désaffection pour les sciences étant encore plus marquée parmi les jeunes filles, des prix seront destinés à récompenser celles qui s'orientent vers les filières scientifiques (Prix de la vocation scientifique et technique, prix Irène Joliot-Curie), afin de **promouvoir la place des femmes dans le milieu scientifique** de demain.

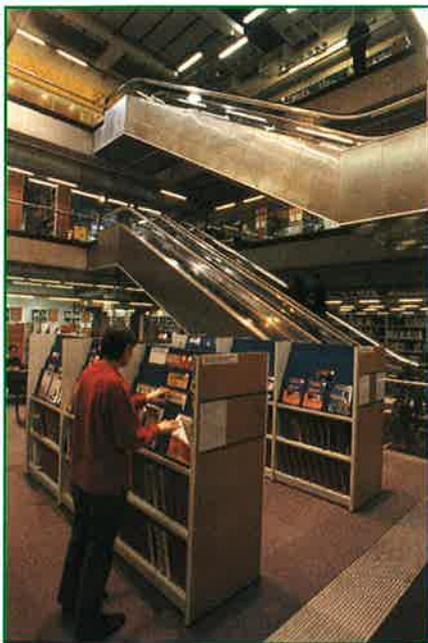
- Claudie Haigueré a souligné l'importance de la communauté scientifique : chercheurs, enseignants-chercheurs, personnels ITA, doctorants... Elle représente un potentiel de plus de 200 000 ambassadeurs de la science qu'il est nécessaire de mobiliser. Sur le long terme, l'objectif est de préparer les jeunes à une **mission de médiation scientifique**, avec une vraie reconnaissance de cette formation.

Ainsi, la diffusion de la culture scientifique pourrait faire l'objet de modules dans le cadre des écoles doctorales. Une charte des CIES (Centres d'initiation à l'enseignement supérieur) sera rapidement élaborée pour assurer la diffusion des bases de l'activité scientifique ; les moniteurs de l'enseignement supérieur ayant vocation à en être des relais privilégiés. Le ministère de la Recherche et des nouvelles technologies suscitera en outre des opérations interactives pérennes de jumelage entre établissements scolaires, universités et organismes de recherche afin d'amplifier la dynamique extrêmement positive observée autour d'initiatives comme « La main à la pâte ».

Pour la formation initiale, la diffusion scientifique deviendra l'une des composantes des programmes des instituts universitaires de formation des maîtres (IUFM). Pour la formation continue, la culture scientifique et technique sera intégrée dans les plans académiques de formation des enseignants.

Promotion du rôle des grandes institutions nationales

- L'État mettra le savoir-faire des grandes institutions nationales au service d'un réseau de diffusion national et régional. Une articulation sera mise en place entre la Cité des sciences et de l'industrie et le Palais de la découverte pour en faire un « **pôle de référence** », décliné dans toute la France. Ces deux organismes coordonneront également leur action avec le Muséum d'histoire naturelle, le Musée du Conservatoire national des arts et métiers (CNAM) et les principales institutions de province à travers la réunion d'un comité de pilotage. Pour mettre en œuvre ce plan ambitieux, la Cité des sciences mobilisera des moyens nouveaux et doublera en deux ans le budget qu'elle consacre à l'action régionale. A



La médiathèque de la Cité des sciences et de l'industrie (©CSI/Michel Lamoureux).

partir de 2005, une exposition sur deux présentée à la Cité sera mise à la disposition de ses partenaires régionaux. Une collection de DVD-Roms sera lancée pour présenter un dossier d'actualité scientifique tous les quatre mois. La médiathèque de la Cité, qui est la plus importante médiathèque publique de culture scientifique, technique et industrielle en Europe, sera mise à contribution pour aider les bibliothèques territoriales à développer leur rôle dans la diffusion de la culture scientifique.

- Il a été décidé également une **mission nationale de coordination et de connaissance de l'ensemble des musées scientifiques avec un programme de sauvegarde du patrimoine scientifique et technique contemporain**, confié au Musée du CNAM. Des partenariats seront développés avec des entreprises industrielles ou des laboratoires soucieux de mieux connaître et mettre en valeur leur propre patrimoine à travers des musées. Dans le même temps, un effort de rénovation sera entrepris. Par exemple, en région Rhône-Alpes, grande région industrielle et scientifique (hydroélectricité, textile, chimie et pharmacie), la direction régionale des affaires culturelles amorcera en 2004 une action pilote autour des orientations suivantes : établir un état des lieux des sites et des collections publics et privés relatifs aux domaines technique, scientifique et industriel ; engager un processus de mise en réseau pour constituer un pôle patrimoine autour du textile avec les musées concernés.

Développement des outils de diffusion de la culture scientifique

L'État va stimuler la production et la diffusion de la culture scientifique à travers l'ensemble des médias (édition, presse, Internet ou télévision).

- La culture scientifique et technique étant l'une des quatre priorités nationales du ministère de la Recherche, cette thématique bénéficie d'une **Action concertée incitative (ACI)** qui a pour objectif de soutenir des projets réalisés dans cette perspective. L'ACI Culture scientifique et technique sera financée par le ministère de la Recherche à hauteur d'un million d'euros, sur le Fonds national de la science.

- Le plan d'action met en particulier l'**accent sur les livres de vulgarisation scientifique**, qui bénéficieront d'aides nouvelles et d'un renforcement de leur diffusion dans les bibliothèques publiques sur tout le territoire. Pour soutenir cette action et inciter les éditeurs à lancer des collections et des titres destinés à un large public, un fonds d'aide à la production d'ouvrages de divulgation de la culture scientifique et technique sera ainsi créé. Ce fonds, intitulé **Fonds Jules Verne**, sera doté par le Centre national du livre et la Cité des sciences et de l'industrie de 100 000 € en 2004.

- D'autre part, le Centre national du livre renforcera en 2004 ses **aides aux bibliothèques territoriales** (au nombre

Pour en savoir plus

<http://www.culture.gouv.fr>
<http://www.recherche.gouv.fr>
<http://www.science.gouv.fr>
<http://www.cite-sciences.fr>
<http://www.palais-decouverte.fr>
<http://www.arts-et-metiers.net>
<http://www.mariecurie.science.gouv.fr>
<http://www.inrp.fr/lamap> (La main à la pâte)
<http://www.lespetitsdebrouillards.org>
<http://www.tous-les-savoirs.com>
<http://www.physique2005.org>

de 3 000), notamment pour l'achat d'ouvrages de vulgarisation scientifique. Elles bénéficieront également de l'assistance de la médiathèque de la Cité des sciences, réseau d'excellence notamment pour les bibliographies et les ouvrages scientifiques. En ce qui concerne les bibliothèques de l'enseignement supérieur, l'ouverture de celles-ci à un plus large public est encouragée. Elles bénéficieront également d'un soutien plus important pour l'édition scientifique française et francophone (achat en trois exemplaires), ainsi que pour les abonnements électroniques à des sites francophones – 7 millions d'euros seront consacrés en 2004 à la constitution de systèmes d'information favorisant l'accès à distance.

• Le plan d'action s'appuie également largement sur Internet, outil idéal et incontournable pour mettre en valeur initiatives et relais d'informations de qualité. La **création du portail Internet www.science.gouv.fr** facilitera l'accès aux contenus scientifiques et un **portail de la culture scientifique** piloté par la Cité des sciences et de l'industrie mettra en valeur l'ensemble des acteurs de la culture scientifique. Ce portail recensera un certain nombre de ressources scientifiques avec des caractéristiques d'attractivité visuelle pour tout public (animations, photographies...) : sites d'organismes de recherche (CEA, CNRS...), sites de musées, chaînes de télévision, associations scientifiques (Petits débrouillards...), sites à vocation éducative (Université de tous les savoirs...), etc. Notons une application interactive surprenante du célèbre tableau de Mendeleïev à découvrir sur le site de la Cité des sciences. D'autres **sites consacrés à des commémorations de personnalités scientifiques** verront le jour : un site sur Marie-Curie à l'occasion du centenaire de son Prix Nobel (en coproduction avec l'Université Paris 8), le 150^e anniversaire de la mort de l'astronome François Arago, ou la mise en ligne de plusieurs sites d'expositions récentes (B. Franklin avec l'Onera).

Le ministère de la Culture s'engage dans une politique d'aide à la production de contenus scientifiques sur Internet avec une ligne budgétaire d'un million d'euros (avec deux appels d'offre sur 2004).

En complément, C. Haigneré et J.-J. Aillagon ont souhaité mettre en place un portail invitant les Français à découvrir l'ensemble des lieux de culture scientifique nationaux, leur programmation, leurs événements etc. Ce nouveau portail sera lancé par la Cité de sciences dans le courant de l'année.

• Enfin, l'action du gouvernement sera complétée par une **mobilisation des services publics radio et télé**. Le ministre de la Culture fixera des objectifs pour l'investisse-

ment dans la production et la diffusion (en particulier en première partie de soirée) de programmes de culture et de connaissance scientifique et technique.

A voir l'étendue des mesures, il semble bien qu'il y ait de la part de notre gouvernement une réelle prise de conscience des problèmes et la volonté d'y trouver des solutions. Comme l'a souligné Mme Haigneré : « *c'est une action volontariste dont l'objectif est de redonner à la science sa véritable place dans la société [...] Certaines mesures existaient déjà, il faut les améliorer ou les développer, et de nouvelles actions sont à entreprendre* ». J.-J. Aillagon a rappelé que la mobilisation des moyens techniques déjà consacrés aux musées scientifiques s'élevait à 5 millions d'euros/an jusqu'en 2006 et que dans le cadre des nouvelles mesures de ce programme spécifique, des fonds de l'ordre de 600 000 € sont prévus pour les bibliothèques et de 200 000 € pour le plan de vulgarisation scientifique.

A noter que lors de la présentation de ce plan, les deux ministres ont souligné le **rôle essentiel des associations** qu'ils ont fortement remerciées pour leur implication, notamment auprès des jeunes. Ils ont rappelé le rôle clé qu'ont ces partenaires indispensables au sein de la Fondation pour la culture scientifique, notamment dans l'élaboration des projets à soutenir.

Souhaitons que cette action volontariste soit gage de succès pour l'avenir et que les jeunes, nos futurs scientifiques de demain, à qui ce plan est majoritairement destiné, trouvent leur vraie place au sein d'une société qui les reconnaîtra...



« Fabrication d'un gel douche » : atelier de manipulation animé par l'association Graine de chimiste dans une classe de 6^e (Collège Albert Camus, La Ferté-Alais, février 2004, D.R.).



Roselyne Messal
est secrétaire de rédaction
à *L'Actualité Chimique**

* 250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris.
Tél. : 01 40 46 71 64. Fax : 01 40 46 71 60.
Courriel : ac@sfc.fr

Commentaires : « La mobilisation n'est pas la guerre ! »

(en référence à la presse de 1939)

La désaffection des jeunes pour les disciplines scientifiques n'est pas une constatation nouvelle comme le remarquait le ministre J.-J. Aillagon, et ce n'est pas un phénomène propre à la France. Dans les années 80 et 90, j'ai fait de fréquentes visites dans des laboratoires industriels de la Silicon Valley et la plupart de mes interlocuteurs étaient des « travailleurs immigrés ». Mes amis américains m'expliquaient alors que les jeunes Américains de souche préféraient s'orienter vers les études commerciales et de droit, plus rémunératrices.

La différence de rémunération entre scientifiques et commerciaux ou juristes n'est sans doute pas le facteur déterminant en France, et c'est probablement plus grave : **la science ne fait plus rêver** ! Plus qu'une analyse des causes par les scientifiques eux-mêmes, une réflexion des sociologues serait intéressante.

Comment redonner ce goût du rêve ? Toutes les mesures évoquées dans l'article ci-dessus seront certes utiles, mais si on devait les hiérarchiser, et il serait utile de le faire, c'est sans doute au niveau de

l'école qu'il faut lancer l'offensive. En effet, tout ce qui peut être fait avec les musées, les institutions, l'outil Internet, ne prend son vrai sens que si la curiosité est éveillée, et les enseignants sont les mieux placés pour exciter les jeunes esprits. Il y a donc une action en profondeur à entreprendre sur la formation des maîtres du primaire qui, à terme, ne peut que les aider à mieux utiliser ce que le terreau associatif leur offre. Les ministres ont aussi évoqué la mobilisation des services publics radios et télévisions, cet aspect est aussi très important : d'une part parce qu'une bonne médiation de la science ne peut qu'inciter à poser des questions ; et que d'autre part, en ce qui concerne l'information, en évitant la surmédiation d'un extrémisme écologique jetant la suspicion sur toute activité industrielle, on peut aussi montrer aux jeunes que science et technologie sont indispensables pour le respect de l'environnement.

Au-delà de la mobilisation, c'est cette guerre pour la formation et l'information qu'il faut gagner.

Bernard Sillion

Les airbags puisent leur énergie des boosters d'Ariane 5

Georges Chounet

Résumé Une large part des générateurs de gaz pour airbags utilisent un matériau pyrotechnique dont les principes de formulation sont proches de ceux du propergol solide, composite utilisé pour les deux boosters du lanceur Ariane 5. Basé sur le mélange intime d'oxydants solides très stables, avec un polymère réticulable, ces produits se présentent sous forme d'objets monolithes peu sensibles et stables, de 10 à 40 grammes. Leur combustion, initiée électriquement par le choc de l'accident, génère en quelques millisecondes les gaz nécessaires au gonflage de l'airbag.

Mots-clés Airbag, propergol solide, oxydant, polymère, procédé continu.

Abstract **Airbag gas inflators draw their energy from Ariane 5 solid boosters**
A great number of airbag gas generators used a pyrotechnic material issued from solid composite propellant knowledge. Basic rules of its formulation are closed to those of Ariane 5 solid boosters propellant. Using very stable solid oxidizers mixed with a thermosetting polymer, these gas generators take the shape of monolithic grains, quite insensitive and stable, weighing about ten to forty grams. Combustion which is electrically triggered by the road-accident impact generates in some milliseconds, the amount of gas needed to inflate airbag.

Keywords Airbag inflator, solid propellant, oxidizer, polymer, continuous process.

Abréviations

MPS	moteur à propulsion solide
NOx	oxydes d'azote
OB	« oxygen balance »
PA	perchlorate d'ammonium
PBHT	polybutadiène hydroxytéléchélique
UPG	usine de propergol de Guyane

En septembre 2003, une fusée européenne Ariane 5 assurait avec succès le lancement de la première sonde lunaire européenne, SMART-1. A la même date, les journaux rapportant cette information publiaient une publicité pour un constructeur automobile bien connu de l'hexagone qui présentait ses nouveaux modèles. Cette publicité insistait sur les performances des « airbags » qui lui avaient permis d'atteindre la notation maximum aux tests de sécurité.

Ce jour là, peu de lecteurs se doutaient qu'un lien reliait ces deux événements : dans chacun des deux systèmes évoqués, l'énergie qui assure le fonctionnement du système est apportée par un matériau pyrotechnique de la famille des propergols solides dits « composites » (encadré 1).

Le matériau pyrotechnique au cœur du système « airbag » et des boosters d'Ariane 5 est un propergol solide de la famille des propergols composites, du fait qu'il est constitué d'un mélange hétérogène de petites particules oxydantes et réductrices maintenues ensemble dans une matrice à propriété élastomérique désignée sous le nom de liant. Ces matériaux ont longtemps été utilisés dans la propulsion des engins à application militaire.

Pour passer du booster à l'airbag, la formulation du matériau énergétique et le procédé d'obtention ont été

adaptés aux exigences de performance énergétique et de condition d'emploi, de taille des objets et de cadence de production, de coût et de sécurité. Enfin, une installation industrielle spécifique assure ces nouvelles productions.

Qu'est ce qu'un propergol composite ? L'exemple des boosters d'Ariane 5

Les matériaux énergétiques ont une lointaine origine commune, souvent située en Chine, et déjà décrite dans les textes dès le Moyen-Age : la « poudre noire », basée sur le mélange intime dans des proportions à peu près figées depuis longtemps de salpêtre (nitrate de potassium), de soufre et de charbon de bois. On retrouve déjà un élément oxydant majoritaire (nitrate), un élément réducteur carboné (charbon de bois) et un tiers additif « facilitateur » de la réaction (soufre).

Exemple de formulation historique de poudre noire

Salpêtre	Soufre	Charbon de bois
75 %	12,5 %	12,5 %

En 1884, l'ingénieur des poudres et futur académicien Paul Vieille invente les poudres celluloseuses dites « sans fumée ». Basé sur la gélatinisation de la nitrocellulose, ce matériau thermoplastique présente la propriété de « brûler » en couche parallèle. Cette propriété va permettre l'emploi de ces produits pour la propulsion d'engins et fusées, comme on le verra ci-après.

Au début des années 40 furent formulés les premiers propergols composites, à base d'asphalte et de perchlorate

Encadré 1**Boosters et airbags : un même principe**

L'architecture générale du lanceur Ariane 5 est la suivante : deux boosters sont attachés de chaque côté du premier étage cryogénique de la fusée. Ces boosters sont des moteurs à propergol solide (MPS), contenant chacun approximativement 235 t de propergol composite.

Leur durée de fonctionnement est d'environ 2 minutes. Ce temps correspond à la combustion complète du propergol et à la production d'environ 8,2 millions de moles de gaz (ou encore 184 millions de m³ ramenés à 20 °C et à la pression atmosphérique). Le rendement gazeux de la composition est, en effet, de l'ordre de 35 moles de gaz produites par kg de propergol consommé.

Les boosters fournissent environ 90 % de la poussée totale au décollage avec 630 t (6,2 mégaNewton) de poussée maximale produite par chaque moteur. A une altitude de l'ordre de 55 km, vides de tout propergol, ils sont séparés du corps de la fusée et retombent en mer où ils sont récupérés pour expertise.

Ce sont les mêmes principes de génération de gaz que l'on retrouve dans les systèmes « airbags » ayant pour fonction, lors d'un choc violent, de déployer et gonfler des sacs en tissu enduit



mais non étanches, véritables coussins amortisseurs qui protègent partiellement conducteurs et passagers (voir encadré 2).

En effet, au cœur du système, un petit « bloc » de quelques grammes à quelques dizaines de grammes, en matériau énergétique, fournit en quelques dizaines de millisecondes, la quantité de gaz nécessaire pour le gonflage de ces sacs de 10 à 100 litres environ, suivant les applications, frontale ou latérale, avec une surpression instantanée maximum de l'ordre de 200 millibars.

Si l'on parle plutôt ici de générateur de gaz, les principes de formulation et de fonctionnement restent proches de ceux des propergols composites pour propulseur.

**Encadré 2****Les sacs pour airbags : des pièces très techniques**

Ces sacs Airbag ne sont pas de simples ballons que l'on gonfle : ils ne sont pas étanches et, à quelques exceptions près, ils se dégonflent presque aussi vite qu'ils se sont gonflés (100 à 200 ms).

Ils ont différents aspects et tailles suivant leur utilisation : 10 litres pour un « airbag latéral », 25 L pour un « airbag rideau »*, 60 L pour un « airbag conducteur » et jusqu'à 150 L pour un « airbag passager ». Ils sont plutôt ronds pour les conducteurs et rectangulaires pour les autres applications.

Diverses astuces sont employées pour en contrôler le déploiement : pliage initial (en Z, en rouleau...), libération de volumes par coutures rompant sous l'effet de la pression, ajout éventuel de « straps » (sangles), etc.

La majorité des toiles utilisées pour les sacs d'airbags est tissée à partir d'un fil de nylon (Polyamide 6.6). Ce fil, constitué lui-même de plusieurs filaments, est calibré en fonction de sa masse linéaire. Un des plus courants est le 235dtex f34, ce qui correspond à un fil dont la masse est de 235 g pour 10 000 m et à 34 filaments. Plus

le fil est gros (470 dtex par exemple), plus le temps de tissage est court : le sac est alors moins cher mais aussi moins étanche. Les sacs peuvent être tissés directement en une seule fois sur un métier (« one piece woven ») ou constitués par différentes pièces cousues entre elles.

Pour améliorer l'étanchéité mais aussi la résistance à la température des gaz, les toiles sont généralement enduites de silicone, en film de quelques dizaines de grammes par m². Le silicone facilite aussi grandement les opérations de découpe et de couture, ce qui réduit leur coût.

* « airbag rideau » : il s'agit d'un nouvel airbag récemment apparu sur les modèles haut de gamme mais qui va certainement se généraliser. Cet airbag se déploie le long des vitres des portières. On le distingue de l'airbag latéral qui est situé dans les montants. Le terme d'airbag rideau (ou airbag-curtain) apparaît ainsi dans des publicités de constructeurs et dans les revues automobiles.

de potassium (KClO₄), oxydant puissant et stable. Réalisé dans des mélangeurs de type pétrin, le mélange était directement coulé à chaud et « moulé-collé » dans la structure métallique des engins. Au début des années 50, l'usage de polymères réticulables, à base de polyuréthane ou de polybutadiène, s'est généralisé. D'une mise en œuvre plus aisée et se prêtant mieux au moulage, ils acceptaient des taux de charge plus élevés et présentaient de meilleures propriétés fonctionnelles (tenue mécanique, combustion, etc.). Dans les mêmes années, le perchlorate d'ammonium (NH₄ClO₄) s'est imposé comme oxydant. Très stable, il offre

un meilleur rendement gazeux, une densité élevée (d = 1,95) et une enthalpie de formation plus favorable.

La propulsion solide : quelques notions générales

L'utilisation de ces matériaux dans la propulsion est basée sur une de leurs propriétés remarquables : les propergols ainsi formulés brûlent (réaction de type oxydoréduction) « en couches parallèles ». Une fois initié en

surface, le front de la réaction de combustion progresse parallèlement à lui-même dans toutes les directions selon une cinétique sensible à la pression et à la température. Cela a deux conséquences immédiates :

1. On peut mesurer une vitesse linéaire de combustion du propergol : cette valeur caractéristique peut s'obtenir sur un barreau cylindrique inhibé sur sa surface extérieure.

2. Cette propriété rend ces matériaux adaptés à la propulsion : à partir d'une surface initiale définie par moulage, on peut prévoir l'évolution de la surface en combustion et calculer le débit massique Q de gaz généré à tout instant, grâce à la relation :

$$Q = \rho \cdot S \cdot V_c$$

avec ρ : densité du propergol, S : surface en combustion et V_c : vitesse de combustion du propergol.

La poussée du moteur est en première approximation reliée au débit gazeux par l'équation :

$$F = Q \cdot V_e$$

où V_e est la vitesse d'éjection des gaz.

Le travail du concepteur de moteur à propergol solide consistera donc, entre autres, à **spécifier un propergol** avec sa vitesse de combustion associée, et à **définir une forme de chargement** (une évolution de surface de combustion) qui permettent d'obtenir une loi de débit et donc une loi de poussée répondant au cahier des charges du lanceur.

Sur le plan énergétique, la performance d'un propergol s'apprécie à travers l'**impulsion spécifique** (Isp), c'est-à-dire la durée, exprimée en seconde, pendant laquelle une unité de masse de propergol produit une poussée unitaire. Elle se mesure sur moteur standard de contrôle et est reliée, au premier ordre, à la composition du propergol par la formule :

$$I_{sp} = K \cdot [T/M_w]^{1/2}$$

avec K : constante, T : température de chambre des gaz de combustion et M_w : masse molaire moyenne des gaz éjectés.

On remarque ainsi que pour la propulsion, la performance énergétique est liée à la quantité et à la nature des gaz fournis par unité de masse de propergol (recherche d'une densité élevée). Elle dépend :

1. De la température des gaz de combustion. **Un critère de sélection des constituants d'un propergol composite est donc l'enthalpie de formation des constituants qui devra être la plus élevée possible** (température de combustion élevée).

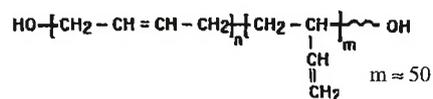
2. **Des espèces formées issues de la réaction d'oxydoréduction (combustion) qui doivent être de faible masse molaire.**

Aujourd'hui, une majorité des lanceurs à propergol solide est basée sur l'emploi des ingrédients suivants :

- **Charges oxydantes** : le perchlorate d'ammonium (PA) de différentes classes granulométriques qui représentent, selon les applications, de 60 à plus de 80 % de la masse totale. Plusieurs répartitions granulométriques sont utilisées pour arriver à ces niveaux de taux de charge et assurer la vitesse de combustion souhaitée. En effet, la granulométrie du PA joue fortement sur la vitesse de combustion du propergol.

- **Charges réductrices** : l'aluminium pulvérulent fin (en valeur moyenne, Φ de 10 à 30 μ m). L'aluminium améliore les

• **Liant polybutadiène hydroxytéléchélique**



• **Réticulation par un polyisocyanate**

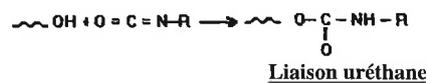


Figure 1.

performances énergétiques (température de combustion, densité), mais n'est pas systématiquement employé.

- Un *liant organique réducteur* dont le constituant principal est un polybutadiène fonctionnalisé par des fonctions hydroxyles, le PBHT (polybutadiène hydroxy-téléchélique, $M_w = 2\ 800$, fonctionnalité moyenne en hydroxyle = 2,5) réticulé avec un di-isocyanate (figure 1).

Le *tableau I* donne les formules chimiques et les performances de différents oxydants comparées à celles du perchlorate d'ammonium.

Tableau I - Performances de différents oxydants.

Oxydant	Oxygène libéré (% en masse)	Rendement gazeux hors oxygène (mole/kg)	Température de fusion (°C)	Enthalpie de formation (kJ/mole)
NH ₄ ClO ₄	34	17	décomposition ≈ 500	- 295,2
KClO ₄	46,2	0	610	- 433,0
NaNO ₃	47	6	307	- 470,0
KNO ₃	39,6	5	334	- 496,5
Sr(NO ₃) ₂	37,8	5	570	- 977,3

A titre d'illustration, on peut voir dans le *tableau II* les grandes lignes de la composition des MPS d'Ariane 5. Avec des charges « monodispersées », le taux de charge volumique maximal accessible se situe aux environs de 60 à 65 %. Le taux de charge volumique recherché de près de 75 % ne peut être atteint que par l'assemblage de plusieurs « répartitions » granulométriques. Généralement, on retrouve trois familles granulométriques dans un propergol, l'objectif étant de se rapprocher d'un empilement de type « apollonien » (figure 2).

La société SME produit industriellement le PA utilisé sur les MPS d'Ariane 5. La dernière étape du procédé de production est une étape de cristallisation menée en réacteur agité. La cristallisation a été réglée pour produire une coupe granulométrique centrée sur 200 μ m et présentant un assez large spectre. D'autres coupes granulométriques sont obtenues par broyage. Dans la composition des MPS, seules deux classes granulométriques ont été retenues, en particulier pour des raisons économiques. Le *tableau III* donne quelques performances calculées de cette composition.

La fabrication du propergol nécessite donc de mélanger le liant avec l'ensemble des charges. Cette opération se fait dans un malaxeur équipé de trois pales à axe vertical

Tableau II - Composition des MPS d'Ariane 5.

	Fonctions	Produits	Taux massique (%)	Taux volumique (approché, %)
Éléments du liant	polymère	PBHT : polybutadiène fonctionnalisé (fonction hydroxyle)	14 en 10 ⁻² en 10 ⁻³	26,8
	réticulant	Di-isocyanate (cf. schéma réactionnel ci-dessus)		
	plastifiant	Di-octyl azélate		
	agent d'adhésion liant chargé catalyseurs de réticulation	Composé avec motifs aziridine 2 catalyseurs associés		
Charges	oxydant	<u>PA brut de cristallisation :</u> Φ médian = 200 μ <u>PA fin broyé :</u> Φ médian = 10 μ	57,8	64,2
	réducteur	Aluminium pulvérulent	18	9,0
Additifs	accélérateur de la combustion	Oxyde ferrique	0,2	

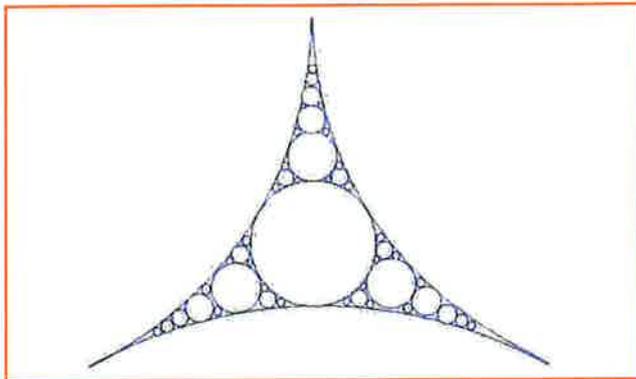


Figure 2 - Exemple de l'empilement appolonien.

L'empilement d'Appolonios (200 ans av J.-C.) vise à paver le plan aussi complètement que possible (cf. Duran J., *Sables, Poudres et Grains*, Eyrolles Sciences, 1997).

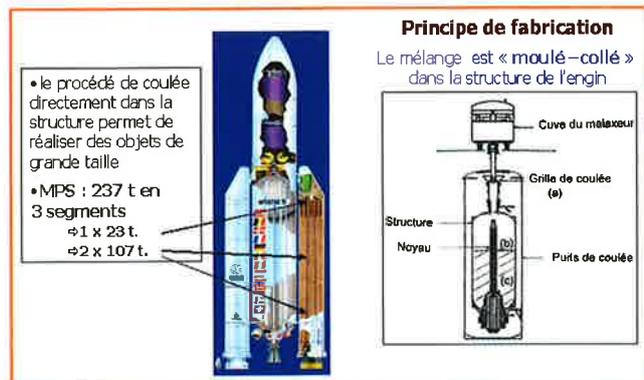


Figure 3 - Principe de fabrication du propergol.

Remarque : le schéma du moteur dans le puits de coulée ne correspond pas à celui d'un segment de MPS.

Tableau III - Quelques performances de la composition des MPS d'Ariane 5 (à 45 bars).

Température de combustion	Densité	Impulsion spécifique adaptée	Rendement gazeux	Principales espèces formées
3 380 °K	1,758 g/cm ³	260 s (détente 45/1)	35,5 moles/kg	H ₂ , CO, H ₂ O, HCl (balance en oxygène : - 35 %)

tournant à vitesse lente. La géométrie des pales et le mouvement de la tête sont tels qu'à l'issue d'un cycle complet de rotation de la tête qui supporte les pales, il n'y a pas de zone de la cuve non « balayée » par les pales. Une fois obtenue une pâte macroscopiquement homogène, le propergol est versé, sous un vide partiel, entre la structure du moteur (sorte de réservoir le plus souvent métallique), protégée par une protection thermique, et un noyau central. Le propergol ainsi **moulé-collé** à la structure est lentement réticulé (figure 3). En fin d'étape dite de « cuisson », le noyau est extrait.

Lors de l'allumage, le propergol va s'initier sur l'ensemble de sa surface libre. Le front de flamme va alors progresser de l'intérieur vers l'extérieur à une vitesse caractéristique du propergol spécifiquement formulé pour l'application. Dans le cas des MPS d'Ariane 5, l'épaisseur à brûler est de l'ordre du mètre, la vitesse de combustion est d'environ 7,5 mm/s

à la pression de fonctionnement proche en moyenne de 4,5 MPa.

Développement d'un propergol pour les systèmes airbags

Le développement de la technologie et du marché des airbags a permis aux « propergolistes » de développer de nouveaux matériaux. Les pyrotechniciens qui se sont lancés dans cette activité l'ont abordée avec leur culture propre. SME s'est appuyée sur sa connaissance des propergols composites pour proposer à son partenaire industriel Autoliv une composition adaptée. Cependant, la nature de l'application avec un effet énergétique limité à la génération « instantanée » de gaz et le passage de l'échelle des MPS à la fourniture d'unités de quelques dizaines de grammes ont imposé une révision profonde des formulations et du mode production.

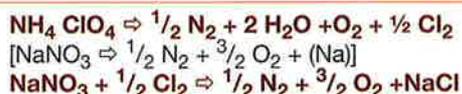
La formulation

Il serait trop long de détailler ici l'ensemble des spécifications d'une formulation pour airbag. Citons en quatre principales :

- une vitesse de combustion élevée qui assure le gonflage d'un sac airbag dans un temps n'excédant pas 40 ms pour les plus gros (airbags « conducteur » et « passager ») ;
- une non-toxicité des gaz qui s'exprime, en plus de stricts interdits, par une limite sur les taux de CO et de NOx, émis lors de la combustion ;
- un fonctionnement assuré entre - 35 et 85 °C et une tenue de 15 ans en vieillissement et en cyclage dit « Arizona » (simulation des conditions extrêmes qui règnent dans ce désert). Cette spécification est traduite, par les constructeurs, en une tenue de 400 heures à 107 °C ;
- une température de combustion modérée et un taux réduit de particules dans les gaz émis.

La constitution de la formulation développée reste basée sur l'emploi de charges oxydantes dans une matrice réductrice de type organique. Ainsi :

- Le perchlorate d'ammonium a été conservé comme oxydant majoritaire pour ses vertus décrites plus haut : bonne combustion, possibilité de réglage de la vitesse de combustion, grande stabilité thermique, disponibilité et coût. Il est associé à un 2^e oxydant, le nitrate de sodium, qui a pour fonction de neutraliser le chlore selon le schéma réactionnel suivant :



L'efficacité de la neutralisation est attestée par la mesure de composition des gaz.

- Pour le liant, le choix s'est porté sur le silicone pour sa bonne tenue en température (à froid et à chaud) (figure 4)

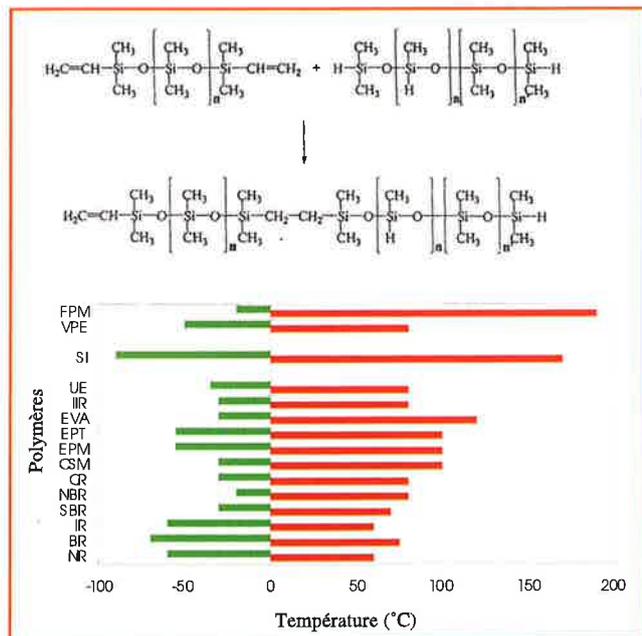


Figure 4.

et sa teneur en oxygène (voir ci-après). Le silicone est connu en pyrotechnie pour donner des combustions vives et est adapté à l'extrusion.

L'aluminium a été éliminé pour des raisons évidentes (température, particules, etc.).

Le dosage entre les ingrédients de la formulation doit permettre de respecter la spécification concernant la teneur en CO et NOx des gaz de combustion. Cela nécessite d'assurer un équilibre entre espèces oxydantes et réductrices : les espèces oxydantes doivent être en quantité suffisante pour oxyder tous les carbones en CO₂, mais un excès d'oxydant amène la formation d'oxydes d'azote. Cette exigence n'existe pas en propulsion, sous cette forme tout du moins, où l'optimum énergétique reste prioritaire.

La définition d'une formulation et l'ajustement des taux nécessitent l'usage intensif d'un code de thermodynamique qui donne, à partir de la formulation du matériau, divers éléments sur la réaction (enthalpie, température, etc.) et la composition des gaz.

La règle d'une « balance en oxygène » (OB) équilibrée impose, en fonction des oxydants retenus, un taux de charge global (figure 5), qui n'est pas accessible dans tous les cas. De ce point de vue, les polymères silicone de type PDMS avec la répétition du motif à un oxygène, -(2Me)Si-O-, présentaient un avantage.

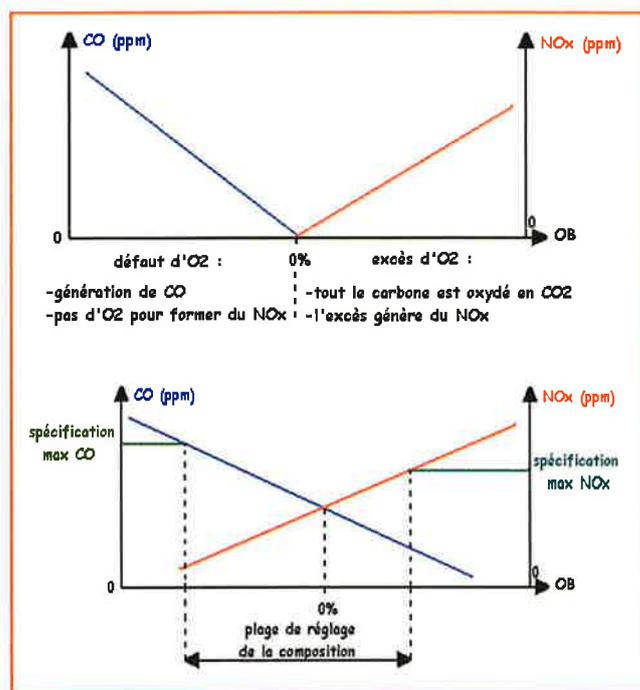


Figure 5.

Le procédé continu

Qui dit « temps de combustion très court » dit aussi « épaisseur de propergol à brûler » très faible. Dans le cas des MPS d'Ariane 5, on a vu que la couche de propergol était de l'ordre du mètre. Ici, avec un fonctionnement à haute pression de l'ordre de 20 MPa et des vitesses de combustion de l'ordre de 50 mm/s, pour obtenir un temps de combustion de l'ordre de 40 ms, l'épaisseur de propergol ne doit pas excéder 0,04 x 50 = 2 mm. L'épaisseur du voile de propergol est alors de 4 mm (encadré 3).

Éléments de sécurité

La sécurité est une préoccupation première dans la production et l'emploi de tels matériaux. Les propergols composites sont des matériaux par nature assez peu sensibles aux sollicitations, qu'elles soient de type choc ou frottement. Ils ont une température d'initiation supérieure à 200 °C, mais présentent par contre une certaine sensibilité au frottement entre pièces métalliques (frottement métal-métal).

Ils brûlent bien à l'air libre et ne présentent pas de risque autre que l'incendie. Par contre, une prise en feu en milieu confiné provoquera une explosion pneumatique dont la violence sera liée à la résistance de l'enveloppe.

La fabrication de ces matériaux est toujours conduite à distance. Les unités de mélange (de type malaxeur ou bivis), sont placées dans des bâtiments aux murs bétonnés et dimensionnés, en fonction de la capacité de l'équipement, pour résister à un événement majorant. De ce point de vue, l'emploi de mélangeur continu qui limite les quantités mises en œuvre dans l'unité de malaxage permet de réduire les « zones de danger » et d'alléger le dimensionnement des bâtiments (épaisseur des murs, dimensions des locaux). La conception et l'exploitation d'installations pyrotechniques sont régies par le décret 79-846 du 28/09/1979, complété par l'arrêté du 26/09/1980 fixant les règles d'isolement des installations pyrotechniques.

Au niveau des équipements de mélange, ils sont conçus pour permettre un déconfinement instantané de la matière en cas de prise en feu (principe de parois localement minces).

En ce qui concerne les conditions d'emploi du mélangeur continu bivis, la vitesse de rotation des vis est limitée pour réduire les risques liés aux frictions entre vis, ou entre vis et fourreau, et le débit matière reste faible (de l'ordre de 100 kg/h) en comparaison de ce qui se pratique dans les industries utilisant ces outils (agroalimentaires, plasturgie, etc.) pour éviter de forts échauffements.

Des systèmes de sécurité sont aussi présents sur l'ensemble de l'installation depuis les introductions des constituants (blocage des écrous, tamisages, détections de particules...) jusqu'à l'outil lui-même (parois fragiles de déconfinement, limiteurs de pression de bridage du convergent, ouverture automatique du fourreau, etc.). **La sécurité est une préoccupation majeure dans ce type de production.**

Tableau IV - Quelques données industrielles du marché des airbags. Cette production couvre environ 25 % du marché mondial des générateurs airbags.

1996	2003	Production	
Démarrage de la première ligne industrielle	3 lignes de production avec une capacité de plus de 500 t/an	150 millions de blocs produits à ce jour avec cette technologie	soit 1 400 t de propergol produit

La concurrence et les évolutions futures

Pour aborder ce marché, SME a exploité ses compétences dans le domaine des propergols composites pour moteurs-fusées. Ses principaux concurrents ont en majorité opté pour des solutions plus proches de la pyrotechnie traditionnelle basée sur la mise en œuvre de produits pulvérulents et une mise en forme par pastillage. Dans ce cas, le petit bloc de propergol extrudé est remplacé par un empilement de petites pastilles (quelques centaines). Cette technologie moins performante en terme de maîtrise de la combustion, et donc du débit gazeux, permet cependant au formulateur de réduire le taux de liant carboné au strict nécessaire à la cohésion d'une pastille, voire de le supprimer dans certains cas (tenue de la pastille par frittage). Ceci est un avantage.

Les études s'orientent donc aujourd'hui vers la mise au point de technique d'extrusion sous eau avec des liants hydrosolubles en faible taux et l'emploi de charges à fort taux d'azote.

Encadré 3

Les objets réalisés sont des petits blocs qui brûlent à partir des deux faces. L'épaisseur de voile de propergol est alors de l'ordre de 4 mm. Le matériau étant de type composite, sa mise en œuvre passe par une étape de mélange et une étape de mise en forme-moulage. Compte tenu de la forme des objets et des cadences de production à assurer, un procédé de mélange en continu couplé à une mise en forme par extrusion a été retenu. Dans ce but, le liant a été formulé afin d'obtenir après mélange une pâte thermodurcissable de consistance suffisante pour être extrudée. En sortie de la filière d'extrusion, la composante élastique du matériau est assez forte pour éviter tout fluage de l'extrudat qui conserve ainsi la forme de la filière.

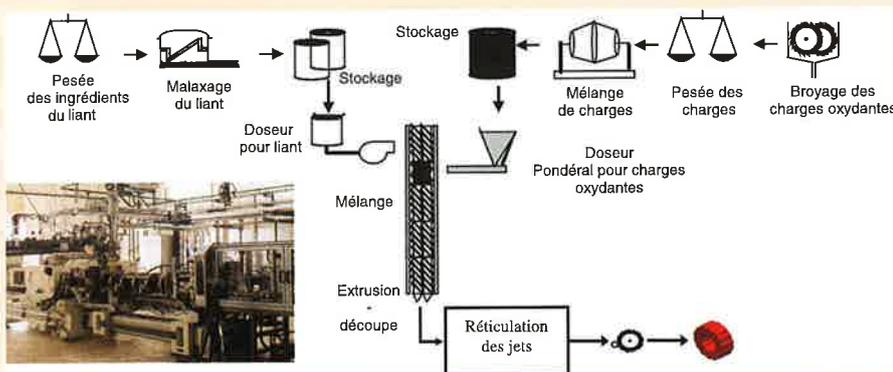


Schéma du procédé.



Conclusion

Pour assurer la propulsion au décollage du lanceur Ariane 5 par des moteurs à propergol solide, le choix s'est porté sur une composition de propergol composite. De conception éprouvée, cette composition est mise en œuvre par un procédé traditionnel basé sur l'emploi de malaxeurs de grande taille et en limite de la technologie. La nouveauté est venue, entre autres, de l'extrapolation réalisée sur la taille des moteurs et des équipements utilisés sur le site de production en Guyane.

A l'autre bout de l'échelle, c'est aussi un propergol composite, mais spécifiquement formulé, qui a permis de répondre aux différentes spécifications requises par la génération de gaz pour airbags. La formulation a du être revue pour tenir compte d'exigences éloignées des performances propulsives traditionnelles et s'adapter à une production continue de type « grande série ». Le matériau pyrotechnique a démontré, à travers cette application, des potentialités qui étaient réservées jusque-là à des applications limitées et spécialisées.

Le succès de cette application du matériau pyrotechnique dans le domaine « grand public » montre tout l'intérêt de cette technologie, en particulier pour des applications de sécurité.

Bibliographie

- Charrette D., Chounet G., Giraud E., 8^e Congrès international de pyrotechnie Euro Pyro 2003, Le procédé continu : une voie industrielle pour de nouveaux propergols, *Actes du congrès*, juin 2003.
- Conkling J.A., *Chemistry of Pyrotechnics. Basic Principles and Theory*, Marcel Dekker Inc., New York, 1985.
- Davenas A. et col., *Technologie des Propergols Solides*, Masson, 1989.
- Giraud E., Chounet G., Tautzia J.-M., Apports de la rhéologie et de la simulation numérique à la mise au point des procédés de fabrication, *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, 1997, 3 (37), p. 113.
- Tautzia J.-M., L'évolution de la technologie de production des matériaux énergétiques, *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, 1997, 3 (37), p. 133.
- Vidal M., Les propergols solides à usage civil, *Techniques Avancées*, 1998, 42.



Georges Chounet

Ingénieur centralien et docteur-ingénieur, il est responsable de l'unité Matériaux-Technologies* au sein de la société SME Propulsion (Groupe SNPE).

* SME, unité MT, Avenue Gay-Lussac, 33167 Saint-Médard-en-Jalles Cedex.

Tél. : 05 56 70 52 13.

Courriel : g.chounet@snpe.com



PUBLICATION
RÉGIE PUBLICITAIRE
EDITION
FINANCEMENT

Depuis 1988

Les Editions **D'Ile de France**

Expérience,
la différence

www.edif.fr

Notre société est spécialisée dans l'édition d'annuaires et de revues professionnelles pour sociétés savantes, associations d'anciens élèves d'écoles d'ingénieurs, fédérations professionnelles...

Notre présence depuis plus de 17 ans dans un secteur d'activités en mutation permanente, la transparence de nos résultats régulièrement positifs depuis la création de notre société, la fidélité de nos partenaires éditoriaux sont autant de preuves du professionnalisme de notre équipe et constituent de fait notre meilleure « carte de visite ».

Notre atout majeur, et c'est aussi notre spécialité, est de vous garantir la gratuité de vos ouvrages papiers en contrepartie de l'exclusivité de la régie publicitaire entièrement assurée par notre service commercial.

Régisseur exclusif
de la Revue
l'Actualité Chimique

Editions D'Ile de France

102, avenue Georges Clemenceau • 94700 Maisons-Alfort
Tél. : 33 1 43 53 64 00 • Fax : 33 1 43 53 48 00
e-mail : edition@edif.fr

Identification d'agents toxiques de guerre et de leurs signatures

Scénarios, moyens et stratégie

Bruno Bellier, Arlette Bégos, Yannick Juillet et Laurent Taysse

Résumé	L'évolution de la menace chimique substitue peu à peu au risque d'une conflagration majeure impliquant l'usage d'armes de destruction massive celui, plus insidieux, de la prolifération incontrôlée des savoirs et savoir-faire, ainsi que des matériels et produits chimiques nécessaires à la production d'agents toxiques. Les États doivent donc disposer des moyens d'identification de tels agents, non plus seulement dans un cadre militaire, mais encore pour assurer la protection des populations civiles. Pour cela, seule la réalisation d'analyses poussées dans un cadre procédural strict permet d'obtenir des preuves indubitables de l'emploi d'agents chimiques par un agresseur. Les laboratoires experts, capables de répondre sans délai ni ambiguïté à ce type de sollicitations, sont des plates-formes techniques diversifiées et à la dimension des listes de produits concernés, susceptibles également de mettre en œuvre des processus de vérification créés par la Convention d'Interdiction des Armes Chimiques.
Mots-clés	Analyse chimique, bioterrorisme, armes chimiques, environnement, vérification.
Abstract	Identification of chemical warfare agents and their environmental signatures: scenarios, means and strategy The chemical threat progressively evolves from the danger of a global conflict involving weapons of mass destruction to the one, more insidious, of uncontrolled proliferation of know-how and knowledge, materials and chemicals, linked to the production of toxic chemicals. Such a polymorphous threat implies that nations develop a technical capacity for identifying toxic chemicals, not only for military purposes, but for civilian protection. This requires a capacity of performing forensic investigations, strictly controlled from a juridical point of view, so that unambiguous proofs of a chemical aggression may be obtained if necessary. With this aim in view, procedures were established for the verification of the Chemical Weapons Convention. These procedures are supported by a network of expert laboratories, capable of answering rapidly and unambiguously to the analytical challenges of the domain, and combining various analytical techniques allowing to identify a very large pattern of compounds.
Keywords	Chemical analysis, bioterrorism, chemical weapons, environment, verification.

Scénarios et agents à identifier

La menace chimique : guerres, attentats et exposition involontaire

La menace représentée par les agents de guerre chimique [1], mais aussi par toutes sortes de produits chimiques à usage agricole ou industriel, est d'une très grande diversité, aussi bien par les formes que peut prendre cette menace que par la variété des produits concernés. On se souviendra ainsi que toutes sortes de composés, y compris les plus improbables, ont été « essayés » sur les champs de bataille d'Ypres ou de Verdun [2]. L'idée d'« armes chimiques » est d'ailleurs aujourd'hui quelque peu surannée, dans la mesure où elle fait appel à l'idée de l'usage de munitions comme vecteurs de la dispersion des toxiques. Or, si la militarisation de ces agents était un aspect déterminant pour la constitution d'un arsenal étatique et pouvait sembler limiter leur utilisation à un nombre restreint de nations, compte tenu d'une complexité technique certaine, l'éventualité de la production « rustique » d'agents toxiques, d'une pureté moyenne et dispersés par des moyens élémentaires apparaît aujourd'hui à considérer avec

attention. La secte Aum Shirinkyo a apporté en 1995 la triste confirmation de la crédibilité de ce scénario en faisant dans le métro de Tokyo plusieurs victimes par l'emploi de toxiques de guerre organophosphorés, tels que le sarin et le VX [3]. Plus récemment, les événements tragiques survenus à Moscou [4] sont un autre exemple d'utilisation possible d'agents chimiques à des fins non militaires.

Ainsi, l'identification d'agents toxiques n'est plus seulement une nécessité pour protéger des unités militaires constituées d'attaques chimiques ou d'une exposition accidentelle à des produits répandus lors de la destruction de sites de production chimique, militaires ou industriels. La protection des populations contre les menaces d'attentats mettant en œuvre des produits chimiques toxiques apparaît aujourd'hui comme une exigence supplémentaire, et l'idée de défense fait aujourd'hui converger la défense au sens le plus usuel du terme (militaire) et la défense civile.

La Convention d'Interdiction des Armes Chimiques [5]

La répulsion que suscitent chez le plus grand nombre les armes chimiques – est considérée comme arme chimique

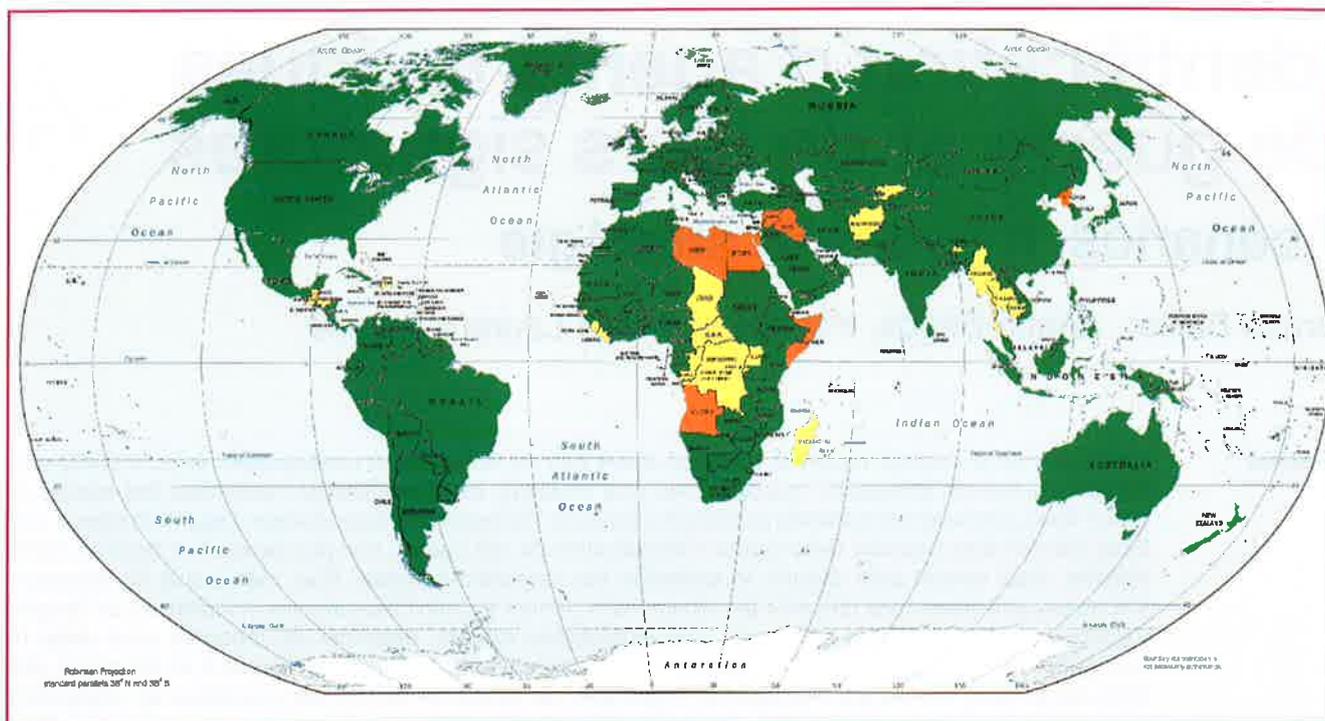


Figure 1 - Pays signataires de la Convention d'Interdiction des Armes Chimiques.

tout produit chimique toxique employé dans l'intention de blesser ou tuer, et/ou tout dispositif ou munition ayant pour but la libération d'un tel produit chimique toxique – , conjuguée à la volonté de désarmement et de désescalade, a conduit à la signature en 1993 de la Convention d'Interdiction des Armes Chimiques (CIAC), entrée en vigueur en 1997, et ratifiée par plus de 150 pays (figure 1). Cette convention régleme très strictement les différents aspects liés aux armes chimiques, que ce soit dans l'esprit ou dans le détail, une liste d'agents soumis à vérification étant annexée à la convention, sous la forme de trois tableaux. L'application de la CIAC est surveillée par l'Organisation d'Interdiction des Armes Chimiques (OIAC)

qui siège à la Haye. Celle-ci a le pouvoir de dépêcher des équipes d'inspecteurs placées sous son égide, afin de contrôler les installations de fabrication – autorisées à produire des quantités limitées d'agents toxiques, à des fins définies précisément –, mais aussi de faire la lumière sur toute accusation de violation de la CIAC.

Les agents de la menace chimique

Les tableaux de la CIAC regroupent les agents identifiés comme toxiques de guerre, et leurs précurseurs, dont les principaux sont présentés dans le *tableau I*, ainsi que d'autres agents non listés mais apparaissant comme de

Effets biomédicaux des principaux agents chimiques de guerre

Les organophosphorés

L'intoxication par neurotoxiques organophosphorés se traduit par une inhibition des cholinestérases qui aboutit à une intoxication par l'acétylcholine endogène. Le tableau clinique associe [27] :

- un syndrome muscarinique : bradycardie, hypotension artérielle, bronchoconstriction intense, myosis, hypersécrétion des glandes salivaires et sudorales ;
- un syndrome nicotinique, souvent tardif : paralysies musculaires, en particulier des muscles respiratoires, et complications cardiaques ;
- un syndrome central caractérisé par une atteinte sensitomotrice distale, prédominante au niveau des membres inférieurs, avec des crampes musculaires, une hypotonie, une diminution des réflexes ostéotendineux pouvant évoluer, dans les cas les plus graves, vers une paralysie flasque.

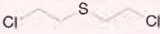
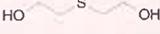
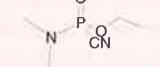
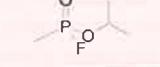
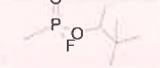
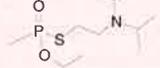
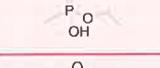
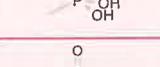
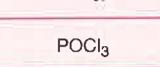
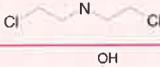
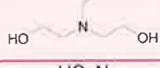
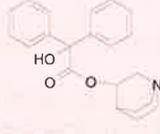
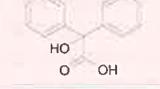
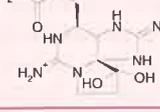
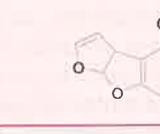
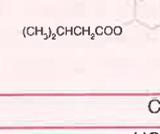
Le délai d'apparition des symptômes cliniques dépend du mode de contamination (quelques minutes par inhalation à 1-3 heures par la voie cutanée). L'approche thérapeutique consiste à libérer et protéger les voies aériennes, avec rétablissement d'une ventilation efficace. L'utilisation d'un anticholinergique, comme l'atropine, est souvent combinée à un traitement par des benzodiazépines (diazépam) afin de prévenir la toxicité neurologique et les convulsions. L'utilisation concomitante d'une oxime (pralidoxime,

obidoxime, HI-6) permet la réactivation des cholinestérases inhibées par l'organophosphoré.

Les vésicants : ypérite, moutardes à l'azote, lewisite

Les vésicants sont des irritants tissulaires ubiquitaires, au premier rang desquels l'ypérite est le composé le plus redouté. Les mécanismes de cytotoxicité de l'ypérite et de ses analogues sont très complexes : ce sont des alkylants à pouvoir électrophile élevé entraînant la formation de liaisons covalentes lors de réactions de substitutions nucléophiles de nombreux sites biologiques. L'alkylation des acides nucléiques et de nombreuses protéines aboutit à la perturbation des grandes fonctions cellulaires [28]. Les effets toxiques de l'ypérite apparaissent généralement quelques heures après l'exposition (1 à 4 heures), les manifestations sont pluri-organiques et dépendent de la dose reçue. Sont décrites des lésions oculaires (photophobie et larmolement), cutanées (érythème et vésication), des lésions de l'appareil respiratoire (bronchoconstriction, œdème pulmonaire), de l'appareil digestif (nausées, diarrhée, vomissements) et du tissu hématopoïétique (leucopénie). Enfin, c'est un agent aux effets cancérigènes et mutagènes démontrés. Il n'existe actuellement ni antidote, ni prétraitement contre les effets de l'ypérite. Les traitements en vigueur visent essentiellement à atténuer les symptômes de l'intoxication [28].

Tableau I - Quelques agents de la menace et leurs propriétés.

Nom	Famille	Formule chimique	Tableau de la CIAC	Type d'agent*	Log P [26]	T° _{eb}	MM	
Ypérite (HD)	Organosoufrés		I.A.4	toxique vésicant	2,41*	140 °C / 20 mm	159,08	
Thiodiglycol			II.B.13	précurseur, produit de dégradation	- 0,63	168 °C / 14 mm	122,19	
Tabun (GA)	Organophosphorés		I.A.2	neurotoxique, agent G (alkyl alkylophosphonofluoridates)	0,38	67 °C / 2 mm	162,13	
Sarin (GB)			I.A.1		0,30	151 °C	140,1	
Soman (GD)			I.A.1		1,78	63-65 °C / 8 mm	182,18	
VX			I.A.3	neurotoxique, agent V (S-dialkylaminoéthyl O-alkyl alkylophosphonothiolates)	2,09	80 °C / 0,01 mbar	267,37	
Méthyl-phosphonate d'éthyle			II.B.4	produit de dégradation	- 1,15	120 °C / 0,3 mm	124,08	
Acide méthyl-phosphonique			II.B.4	produit de dégradation	- 2,28	(T° _{fus.}) 104 °C	96,02	
Dichlorure de méthylphosphonyle			II.B.4	précurseur	- 0,13*	69 °C / 19 mm	132,91	
Oxychlorure de phosphore		POCl ₃	III.B.5	précurseur lointain	-	105 °C	153,33	
Lewisite I		Organoarséniés		I.A.5	toxique vésicant	2,56*	196 °C	207,32
HN-2		Moutardes à l'azote		I.A.6	toxique vésicant	0,91	71 °C / 9 mm	156,06
Triéthanolamine			III.B.17	précurseur	- 1,59	277 °C / 150 mm	149,19	
Cyanure d'hydrogène	-	HC≡N	III.A.3	toxiques généraux	-	25-26 °C	41,05	
Phosgène	-	COCl ₂	III.A.1		-	8 °C	98,92	
Benzilate de quinuclidinyle (BZ)	-		II.A.3	incapacitant	3,01*	T° _{fus.} 164 °C	337,42	
Acide benzilique	-		II.B.8	précurseur	2,3	T° _{fus.} 150 °C	228,25	
Saxitoxine	-		I.A.7	toxine	- 2,44*	T° _{fus.}	299,3	
Aflatoxine B ₁	Mycotoxines			toxine	1,23*	T° _{fus.} 268 °C	312,28	
Toxine T-2				toxine	2,27*	T° _{fus.} 151 °C	462,5	
Chlore	Toxiques industriels	Cl ₂		toxique respiratoire	-	- 34 °C	70,91	
Formaldéhyde	Toxiques industriels	HCHO		irritant, cancérigène	-	- 19 °C	30,03	

réelles menaces ; la diversité de ces composés suggère la complexité des moyens d'identification à mettre en œuvre.

Moyens d'analyse et d'identification en laboratoire

Exigences et objectifs

La recherche dans un laboratoire expert d'agents chimiques agressifs est sujette à des exigences sensiblement différentes de celles du terrain. Lors d'un incident présumé mettant en jeu des composés chimiques, la recherche de produits toxiques devra être effectuée le plus rapidement possible, afin d'éclairer en cas de besoin les équipes d'intervention sur les mesures de protection à prendre et sur l'arsenal thérapeutique à déployer. En outre, la recherche de signatures de composés – *produits caractéristiques issus de la dégradation de composés d'intérêt* – sera également très utile, certains produits ayant une stabilité limitée dans le temps. Dans le cas d'inspections, ou de collecte d'échantillons à des fins de renseignement et de contre-prolifération, ce sont même ces signatures qui seront le plus à même d'être identifiées.

Principes directeurs liés à la CIAC

Pour assurer la réelle application par les États signataires de la CIAC, l'OIAC s'est dotée d'instruments de contrôle, dont un réseau de laboratoires experts soumis à une procédure récurrente de désignation. Ces dispositions font autorité dans le domaine de l'analyse experte d'agents chimiques toxiques – *au premier rang desquels les composés des trois tableaux de la CIAC* – et permettent d'assurer un niveau très élevé de fiabilité des laboratoires désignés. La désignation est conditionnée par l'obtention d'une accréditation selon les normes en vigueur (aujourd'hui la norme ISO 17025) et la réussite annuelle à des exercices interlaboratoires organisés sous l'égide de l'OIAC [6].

Particularités liées à l'expertise dans le domaine des agressifs chimiques

Les laboratoires experts dans le domaine sont naturellement soumis à des contraintes particulières, à commencer par une exigence absolue de sécurité, et la nécessité de posséder des banques de données particulières, la portée des banques commerciales usuelles étant limitée quant aux agents dont il est ici question. S'ajoute à cela la nécessité de posséder des standards (étalons, produits de référence) et donc, le plus souvent, les moyens de les synthétiser (les composés du *tableau I* de la CIAC étant naturellement non commerciaux et leur transport soumis à une très stricte législation). Enfin, il n'est pas inutile de s'intéresser à la nature des échantillons, ainsi qu'à la diversité des produits en cause. En effet, la très grande majorité des laboratoires d'analyse sont spécialisés, qui dans un type d'échantillon (air, eau, sol, tissu biologique, aliment...), qui dans un type de composé (polluant atmosphérique, sel minéral, médicament, drogue...) possédant en règle générale des propriétés homogènes. A l'inverse, l'expertise dans le domaine des agressifs chimiques requiert à la fois la capacité à analyser des matrices d'une grande diversité : environnement (atmosphère, eau, sol, végétation), matériel (tenue de protection, filtre, pièce métallique, plastique), voire éventuellement des prélèvements biologiques (sang, urine, tissu), et des composés

aux propriétés physico-chimiques extrêmement variées (*tableau I*). Ajoutons pour conclure l'exigence d'une sensibilité particulièrement élevée, eu égard à la toxicité considérable de certains composés d'intérêt.

Toutefois, certains agents chimiques pourront ne faire l'objet que d'une analyse qualitative. En effet, la seule identification de composés listés par la CIAC (quelle qu'en soit la concentration), mais aussi de composés détournés de leur vocation première, dans un échantillon où leur présence serait de toute évidence non naturelle, sera suffisante pour déclencher une réponse médicale appropriée. Cette identification suffira également, dans le cas de composés interdits, pour engager une action juridique et diplomatique auprès de l'OIAC.

Prélèvement et échantillonnage

Le choix des sites de prélèvement, la nature des matrices, le conditionnement et les conditions de conservation et de transport des échantillons sont autant d'étapes dont l'influence sur le résultat et l'incertitude associée peuvent être critiques. Le choix des sites pourra être guidé par l'utilisation d'appareils de détection, tel l'AP2C [7] qui permettra de sélectionner au mieux des échantillons riches en composés soufrés et/ou phosphorés. Par la suite, le transport vers le lieu de l'analyse sera des plus cruciaux, compte tenu de la stabilité limitée de certains agents dans des milieux environnementaux.

Les groupes de travail de l'OTAN, puis ceux liés à la préparation de la CIAC, ont établi des guides de référence pour l'échantillonnage sur des sites potentiellement contaminés par des agressifs chimiques [8]. On citera cependant ici en guise de mise à jour de ces guides l'émergence de la microextraction en phase solide (SPME) [9] qui apparaît à la fois comme une méthode d'extraction et d'échantillonnage. Cette technique permet d'effectuer directement l'extraction des analytes d'intérêt dans la matrice considérée (eau, air) au moment du prélèvement, pour une analyse immédiate ou pour être conservée jusqu'à son analyse hors-site. Son usage aisé, ainsi que la diversité croissante des matériels commerciaux, ouvrent de larges perspectives pour son emploi.

Organisation de l'analyse en laboratoire

L'analyse dans un laboratoire expert peut être divisée schématiquement en trois phases :

- le **traitement** de la matrice résultant du prélèvement, qui a pour objectif de produire une forme analysable de l'échantillon (ceci sera explicité par la suite) ;
- l'**analyse** proprement dite, qui vise à identifier, et le cas échéant à quantifier les composés extraits ;
- la **validation** des résultats de l'analyse.

Ces trois étapes indispensables ne sont pas strictement consécutives puisque la validation du résultat commence dès l'entrée sur le site d'analyse. En effet, l'enregistrement de l'échantillon, sa codification et son stockage en un lieu sécurisé et dans des conditions de conservation appropriées, sont le point de départ obligatoire d'un contrôle offrant toutes les garanties juridiques. Ensuite, un processus itératif (traitement, analyse préliminaire, traitement complémentaire, analyse, etc.) sera souvent observé, afin de lever des incertitudes pouvant persister après les premières étapes de l'analyse.

Il serait fastidieux de détailler ici les différents cas de figure pouvant se présenter à l'analyste, en fonction

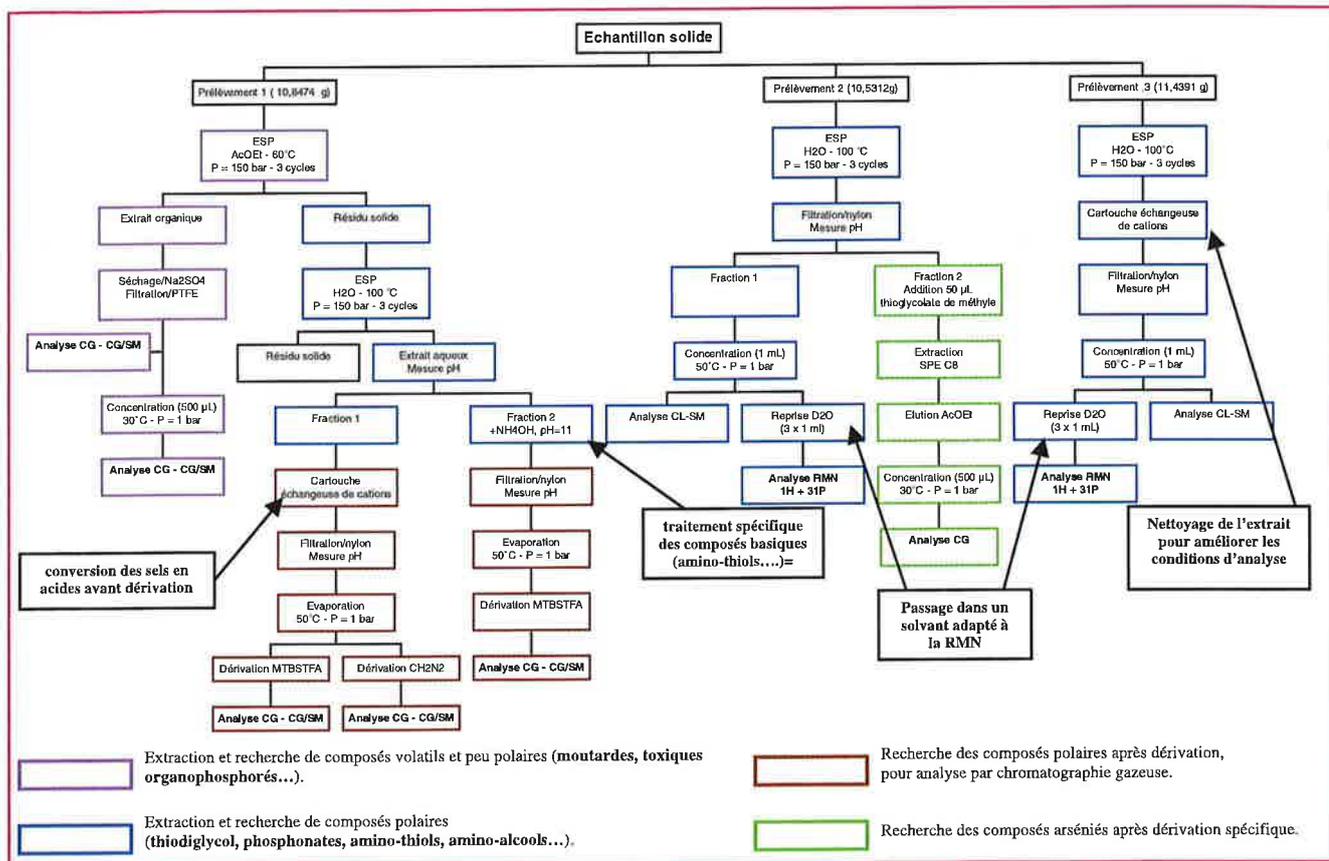


Figure 2 - Un exemple de traitement d'un échantillon de sol pour la recherche de tous les composés de la CIAC et de leurs produits de dégradation.

notamment du type de matrice à analyser. Nous nous bornons donc à décrire sommairement les techniques pouvant être mises en œuvre [10], ainsi que leurs avantages et limites respectives. cela sera illustré par la recherche des produits listés par la CIAC et de leurs produits de dégradation dans un échantillon de sol (figure 2).

Traitement de l'échantillon

Cette partie de l'analyse regroupe les étapes conduisant de l'échantillon initial à une forme analysable, c'est-à-dire en règle générale une solution aqueuse ou organique contenant les produits d'intérêt éventuellement présents. Les critères déterminant l'efficacité d'un schéma de traitement pour la recherche d'un composé donné sont bien sûr le rendement d'extraction de ce composé, mais aussi la sélectivité de la méthode – limitation du nombre d'interférents co-extraits –, le facteur de concentration obtenu – capital pour atteindre la sensibilité recherchée –, et l'« innocuité » vis-à-vis du produit – qui ne doit pas être dégradé au cours de la manipulation. En revanche, la notion d'analyse de routine, qui justifie la validation *in extenso* d'une méthode, n'existe pas dans un tel domaine. Les scénarios que nous avons ébauchés suggèrent plutôt une grande diversité de matrices, et il apparaît illusoire de valider des méthodes sur chacune d'entre elles, pour toutes les familles de produits concernés.

En dernier lieu, la stratégie de traitement d'échantillon devra être adaptée aux techniques analytiques disponibles au laboratoire. Ainsi, certains laboratoires équipés uniquement de détecteurs couplés à la chromatographie gazeuse devront effectuer des étapes de dérivatisation des extraits

aqueux, qui pourront sembler superflues aux possesseurs de spectromètres de résonance magnétique nucléaire (RMN), ou de couplages chromatographie liquide/spectrométrie de masse (CL/SM).

Cas des échantillons liquides

Les échantillons organiques ne requièrent le plus souvent qu'un traitement sommaire : centrifugation, filtration, concentration. Les matrices aqueuses pourront faire l'objet d'une extraction liquide-liquide, visant à faire passer en phase organique les composés peu polaires. L'extraction en phase solide ou la micro-extraction en phase solide sont également des moyens de séparer les composés peu polaires, d'atteindre des facteurs de concentration importants, ou encore de purifier l'extrait de certains interférents. L'analyse des extraits est ensuite identique à celle présentée plus loin.

Cas des prélèvements d'atmosphère

Ces prélèvements se présentent sous la forme de tubes remplis d'un adsorbant – résine polymère de type Tenax® ou XAD-2, phases à base de carbone graphitisé type Carboxen®, tamis moléculaires Carbosieve®... – qui retient les composés volatils d'intérêt. Le choix de l'adsorbant est naturellement d'une grande importance pour l'analyse ultérieure. La désorption pourra s'effectuer soit par passage d'un solvant liquide sur le tube, soit par désorption thermique, ces deux possibilités s'accompagnant d'une analyse par chromatographie gazeuse couplée à des détecteurs spécifiques et/ou à la spectrométrie de masse [11]. Une atmosphère particulièrement intéressante est celle en équilibre avec un échantillon solide confiné, l'espace de

tête (*headspace*). L'analyse après préconcentration de cet espace – par piégeage sur un support du type de ceux mentionnés ci-dessus [12] ou sur une aiguille de microextraction en phase solide [13] – est un moyen très sensible pour l'analyse de polluants volatils dans des matrices solides.

Cas des échantillons solides

Outre l'extraction manuelle (éventuellement assistée par ultrasons), des méthodes automatisées telles l'extraction par solvants pressurisés ou par fluide supercritique présentent plusieurs avantages pour le traitement de matrices solides dans un tel contexte. Au nombre de ceux-ci, on citera d'abord la diminution du temps d'analyse, la réduction de la consommation en solvant et la moindre exposition des manipulateurs, ce qui apporte un progrès significatif en matière de sécurité. Le plus souvent, les rendements d'extraction sont comparables à ceux obtenus par des méthodes manuelles [14]. En contrepartie, l'investissement initial important, l'encombrement des appareils et la nécessité de disposer d'échantillons de taille réduite pour entrer dans des cellules d'extraction dont le volume est de l'ordre de 10 cm^3 , sont autant de limites aux applications de ces techniques.

Afin de permettre la recherche d'une aussi grande variété de composés, la succession de plusieurs extractions par des solvants de polarité croissante sera nécessaire (figure 2). La modulation des différents paramètres de l'extraction (durée, température...) s'effectuera également dans ce but. Par la suite, les extraits obtenus pourront être concentrés sous pression réduite ou courant d'azote.

Purification des extraits

Afin de réaliser des analyses aussi efficaces et sensibles que possible, il est souhaitable de purifier les extraits des éventuels interférents polluant l'échantillon de départ (hydrocarbures, silicones, acides humiques...). Ceci peut être effectué grâce à une utilisation judicieuse des méthodes douces d'extraction (permettant une extraction sélective de certains interférents [15]), mais aussi par l'application de traitements

supplémentaires aux extraits obtenus. A cet égard, les cartouches d'extraction en phase solide représentent une solution de choix, en permettant de retenir sélectivement soit les interférents, soit les composés d'intérêt qui seront ensuite élués et analysés. Le développement de nouvelles technologies (anticorps immobilisés, polymères à empreinte moléculaire) autorise aujourd'hui l'accès à des phases solides de plus en plus sélectives et dont l'intérêt pour certaines applications très spécifiques n'est pas négligeable [16].

Techniques d'analyse

Le traitement de matrices très riches conduit le plus souvent à des extraits non moins riches, pouvant contenir plusieurs milliers de produits dans des concentrations détectables par des moyens modernes. En conséquence, l'analyse de ces extraits nécessite une filtration des signaux d'intérêt ou une séparation des composés présents, afin d'extraire non plus les produits mais l'information.

Selon la nature de l'extrait, celui-ci fera l'objet d'une séparation par chromatographie en phase liquide (CL) ou gazeuse (CG) (cf. figure 2). D'innombrables colonnes étant disponibles sur le marché, la séparation des composés pourra faire l'objet, si nécessaire, d'une attention spéciale en jouant sur différents paramètres chromatographiques (nature de la phase stationnaire...). On mentionnera ici sans s'attarder l'électrophorèse capillaire et la chromatographie ionique dont les applications, pour intéressantes qu'elles puissent être, restent d'une portée trop limitée pour être utilisées en vue de l'identification d'une large gamme de composés inconnus [17].

Quelques exemples de limites de détection sont donnés dans le tableau II. Il convient de souligner que la nature de la matrice a une influence majeure sur la limite de détection d'une méthode d'analyse, les appareils ayant bien souvent des performances intrinsèques qui ne sont pas limitantes.

Dérivation chimique avant analyse par CG

L'analyse par CG n'étant appropriée ni à des produits en solution aqueuse, ni à des produits trop polaires, un

Tableau II - Exemples de seuils de détection.

* après 13 heures d'acquisition.

Composé	Matrice	Appareil et technique	Limite de détection
Thiodiglycol	eau	RMN ^1H 500 MHz	$1\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$
Acide méthylphosphonique	eau	RMN ^1H 500 MHz	$1\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$
		RMN ^{31}P 360 MHz	$5\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$
Acide éthyl méthylphosphonique	eau	LC-MS (électronébulisation mode positif)	0,5 ng injectés
		LC-MS (électronébulisation mode négatif)	0,5 ng injectés
VX	sol	GC-FPD mode phosphore (après extraction)	$< 1\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ dans l'échantillon initial
		GC-AED mode carbone	5 ng injectés
	solution organique	GC-AED mode soufre	5 ng injectés
		GC-AED mode phosphore	5 ng injectés
		GC-AED mode azote	10 ng injectés
Soman	solution organique	GC-AED mode carbone	0,5 ng injectés
		GC-AED mode phosphore	2 ng injectés
Toxine T-2	eau	LC-MS (électronébulisation mode positif)	$< 0,5\ \text{ng}$ injectés
	sol	LC-MS (après extraction)	$0,3\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ dans l'échantillon initial

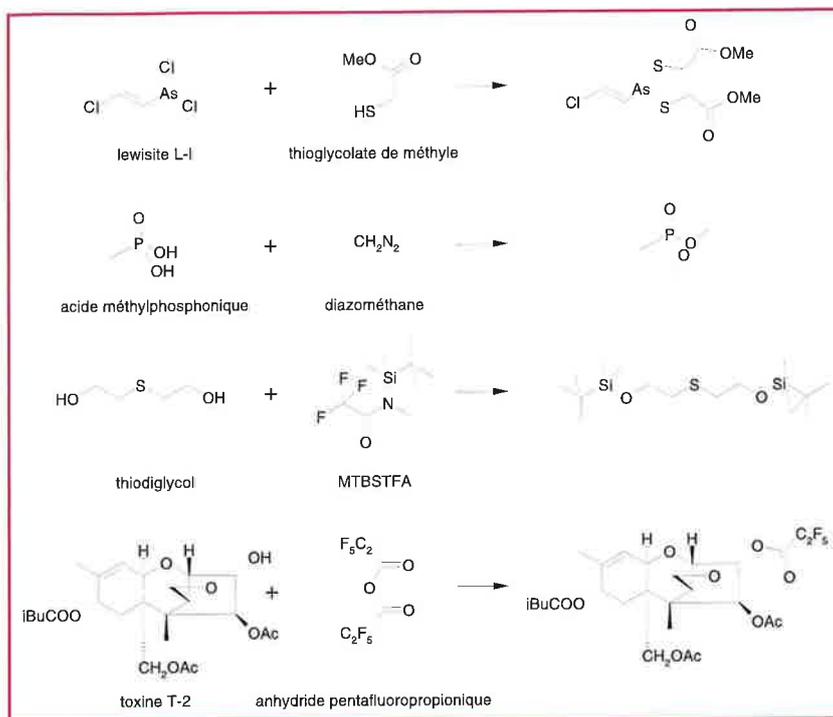


Figure 3 - Quelques réactifs de dérivation et réactions associées.

traitement préalable de dérivation chimique (méthylation, silylation...) pourra s'avérer nécessaire (figure 3) [18].

CG couplée à des détecteurs spécifiques

La CG reste ici la technique dominante, pour les raisons suivantes : elle est la mieux adaptée à l'analyse des toxiques (volatils, dans leur immense majorité) et elle peut être couplée à des détecteurs particulièrement adaptés au domaine. De plus, les composés non volatils, même de poids moléculaire relativement élevé comme certaines toxines, restent adaptés à la CG moyennant une dérivation chimique appropriée. Ainsi, les détecteurs à photométrie de flamme (sélec-

tifs des composés contenant du soufre ou du phosphore), à photométrie de flamme pulsée (soufre, phosphore, arsenic...), ou encore azote-phosphore (NPD, détecteur thermo-ionique) sont-ils des outils de choix, si l'on se souvient en particulier que la très grande majorité des composés listés par la CIAC contiennent du soufre ou du phosphore (tableau 1). Nous accorderons ici une mention particulière au détecteur d'émission atomique qui permet de détecter spécifiquement un grand nombre d'éléments, et peut être utilisé pour accéder à la formule brute d'un composé inconnu ; le niveau d'information obtenu en fait un outil particulièrement intéressant pour un criblage rapide et efficace d'échantillons complexes [19] (figure 4). En règle générale, comme dans le cas décrit à la figure 2, ces détecteurs sont utilisés à des fins de criblage spécifique afin d'orienter ensuite l'identification des composés d'intérêt éventuellement présents. Ils constituent également un moyen de choix pour effectuer une quantification quand celle-ci est requise.

Identification de composés séparés par CG

Outre les détecteurs mentionnés plus haut, la CG peut être interfacée à des moyens d'analyse permettant l'identification de composés, par comparaison avec des données de référence ou par analyse structurale complète. Exception à ce principe, la méthode des indices de rétention ne fait appel qu'à des détecteurs atomiques classiques, spécifiques (voir ci-dessus) ou non (détecteur à ionisation de flamme par exemple), et permet de caractériser un produit par sa séparation chromatographique relativement à une série de composés de référence. Si la série la plus employée est celle des *n*-alcanes, d'autres séries permettant l'utilisation avec des détecteurs spécifiques ont été développées, en particulier

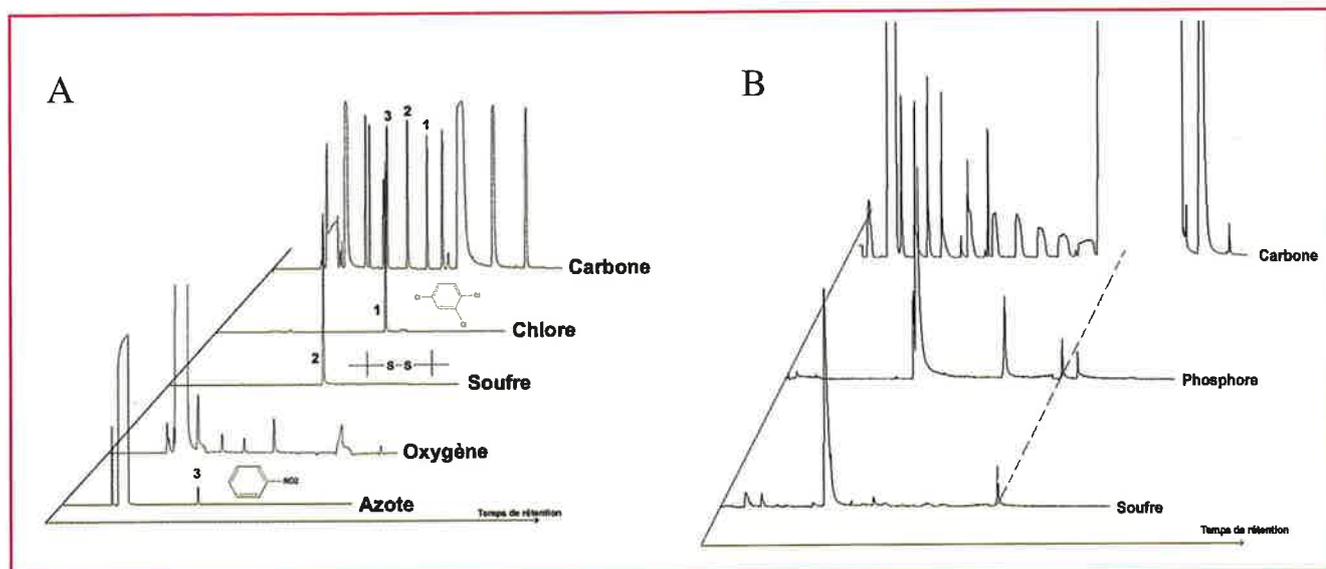


Figure 4 - Intérêt du détecteur d'émission atomique pour l'obtention d'informations sur des composés contenant des hétéroatomes multiples.

A : détection de composés contenant des hétéroéléments dans un mélange de référence.

B : détection d'un composé phosphoré et sulfuré (masqué par un interférent hydrocarboné) dans un extrait environnemental.

dans le domaine des agents de guerre chimique ; on citera ainsi la série P (diméthylphosphinothioates de *n*-alkyle) et la série M (sulfures de *n*-alkyl bis(trifluorométhyl)phosphines). De nombreux indices de rétention dans ces différentes séries sont disponibles dans la littérature [20].

Toutefois, l'indice de rétention laissant encore la place à une certaine incertitude, il sera nécessaire d'y associer une méthode d'identification structurale. Deux techniques couplées à la CG sont classiquement utilisées : la spectrométrie de masse (SM) et la spectroscopie d'absorption infrarouge à transformée de Fourier (IRTF). Si cette dernière reste d'un usage limité dans le domaine des agressifs chimiques, les possibilités qu'elle offre la SM d'accéder à la structure d'un composé totalement inconnu en font actuellement la méthode d'identification préférentielle. La combinaison possible de l'ionisation chimique – qui permet d'accéder à la masse moléculaire –, de l'ionisation sous impact électronique – qui conduit à une fragmentation du composé et donc à un spectre riche en informations, très propice à une recherche automatisée dans des bibliothèques de spectres – et de la SM en tandem – SM/SM, qui repose sur la sélection préalable d'ions suivie de leur fragmentation contrôlée et permet l'accès à une information structurale plus fine et/ou à une sensibilité exacerbée – confère à cette technique une puissance d'identification sans égale, appuyée par la richesse des bibliothèques de spectres accessibles [21].

Chromatographie en phase liquide (CL)

La CL et les détecteurs associés apparaissent aujourd'hui comme le complément naturel et indispensable de la CG (CG-SM en particulier) puisqu'ils sont plus particulièrement appropriés aux composés polaires et donnent accès à l'identification de composés de haute masse. Certes, si le couplage de la CL avec des détecteurs décrits plus haut (FID : détection à ionisation de flamme, FPD : détection à photométrie de flamme) offre des possibilités de criblage sélectif [22], la portée du couplage CL-SM est cependant bien supérieure, malgré une plus faible sensibilité.

Cette méthode permet d'éviter les étapes toujours fastidieuses de dérivation chimique, pour la recherche non seulement des produits de dégradation de composés toxiques dans l'environnement, mais aussi des agents eux-mêmes présents dans des échantillons d'eau [23]. De nombreux composés lourds telles les toxines [24] sont également identifiables par CL-SM, y compris en l'absence de standards de référence, grâce en particulier aux techniques de piégeage d'ions qui permettent d'atteindre des niveaux élevés d'information.

Pour une utilisation optimale de cette technique, il semble nécessaire de disposer de plusieurs sources d'ionisation, l'ionisation chimique à pression atmosphérique (APCI) étant plus particulièrement appropriée aux faibles masses, tandis que l'ionisation par électro-nébulisation (ESI, *electrospray*) donne accès à des ions multichargés, donc à des très hautes masses (plus la charge *z* est haute, plus la masse détectable *m* s'élève, les détecteurs de masse étant limités non en masse, mais par le rapport *m/z*). Cette dernière méthode d'ionisation conduit notamment à d'excellents résultats avec des molécules peptidiques, et permet à elle seule de reconstituer des séquences.

Les limitations actuelles sont dues en premier lieu à la pauvreté des banques de données spécialisées ; celles-ci sont d'ailleurs difficiles à constituer car la reproductibilité des spectres selon les appareils est limitée. La sensibilité de la CL-SM reste également le plus souvent inférieure à celle de

la CG-SM après dérivation, pour les produits où cette dernière est applicable.

Résonance magnétique nucléaire (RMN) [25]

À la différence des couplages décrits plus haut, cette technique n'est aujourd'hui qu'exceptionnellement associée à une méthode séparative ; cela n'est cependant pas rédhibitoire, même pour des échantillons complexes, car la RMN reposant sur la discrimination des composés contenant un élément particulier (hydrogène, carbone, fluor, phosphore, pour ne citer que les plus courants) par l'environnement chimique dans lequel se situe cet élément.

C'est la technique de choix pour l'analyse d'échantillons liquides, le traitement de l'échantillon pouvant dans ce cas être réduit à sa plus simple expression (filtration).

Si la RMN du phosphore ³¹P est naturellement la technique la plus directement intéressante ici – vue sa sélectivité par rapport au bruit de fond environnemental (qui contient normalement très peu de produits phosphorés) et sa capacité de discrimination (classification par familles : phosphates, phosphoramidates, phosphonates, phosphonothioates...) – la RMN du proton apporte également son lot d'informations, avec une sensibilité qui peut dans certains cas compenser la perte de sélectivité. À cet égard, citons des enchaînements de type OCH₂CH₂X, SCH₂CH₂X ou NCH₂CH₂X, présents dans de nombreux composés d'intérêt, et qui peuvent facilement être caractérisés par RMN, d'autant que les régions spectrales concernées sont fréquemment peu masquées par des interférents. De surcroît, la puissance de filtration de l'information et d'identification RMN sont encore accrues par les techniques de RMN bidimensionnelle qui peuvent permettre d'isoler un signal d'interférents éventuels, voire de reconstruire totalement la structure d'une molécule.

La limite actuelle aux utilisations de la RMN pour l'analyse de traces reste sa sensibilité relativement faible, de l'ordre du µg.mL⁻¹ pour le proton et le phosphore, avec une taille minimale d'échantillon de l'ordre de 500 µL pour les appareils courants. Cependant, les développements récents (microsondes, cryosondes...) laissent augurer de rapides progrès dans ce domaine.

Validation de l'identification

Les différentes techniques d'analyse que nous venons de passer sommairement en revue permettent donc théoriquement de détecter et identifier les composés d'intérêt éventuellement présents. Cependant, l'identification ne pourra être acceptée qu'après une étape indispensable de vérification, sur la base des informations fournies par les différents moyens. Les critères d'identification actuellement retenus par la communauté internationale impliquée dans les travaux de vérification de la CIAC sont :

- la comparaison avec une référence « authentique » : composé commercial ou synthétisé sur site, et analysé dans les mêmes conditions (méthode la plus souhaitable, mais plus difficile à mettre en œuvre) ;
- la comparaison avec un spectre de bibliothèque (banque de données propres au laboratoire, banque de données académique ou commerciale) ;
- ou l'interprétation des données d'analyse fondée sur la comparaison des données expérimentales obtenues avec un composé structurellement proche (méthode la plus sujette à discussion, mais qui peut être inévitable pour des composés auparavant inconnus ou chimiquement difficiles d'accès).

Dans tous les cas, l'identification d'un composé suivant l'un ou l'autre de ces critères doit être réalisée par deux méthodes complémentaires avant de conclure. Il est de toute façon probable que des analyses dans le cadre de la vérification de la CIAC seront confiées simultanément à au moins deux laboratoires, l'OIAC conservant un reliquat des échantillons en vue d'une possible contre-expertise.

Conclusion

La diversité des scénarios présentés au début de cet article montre combien la combinaison de plusieurs techniques d'analyse existantes est requise pour parvenir à répondre à tous les cas de figure susceptibles de se présenter. Une polyvalence, inhabituelle dans les recherches « classiques », est demandée aux laboratoires visant à atteindre un niveau d'expertise dans le domaine. Les critères d'identification exigés, d'autant plus sévères que le contexte dans lequel peuvent s'opérer de telles analyses est sensible, mettent en exergue l'obligation de disposer :

- de banques de données spécialisées, et préférentiellement de bibliothèques réalisées en interne (les variations observées entre différents types d'appareils pouvant en particulier rendre impossible l'identification par comparaison à une référence) ;

- d'une capacité de synthèse, pour pouvoir compiler les banques recommandées ci-dessus et pour réaliser à la demande la fabrication d'un standard « authentique » ;

- d'opérateurs expérimentés, susceptibles d'exploiter les données à leur disposition pour effectuer une identification, et entraînés à la manipulation d'agents hautement toxiques.

Pour l'analyse proprement dite, le couplage CG-SM reste encore le moyen d'identification le plus répandu, mais l'extension de la menace chimique à des molécules de hautes masses (toxines) rend inévitable la mise en œuvre conjointe de couplages CL-SM. Les laboratoires experts dans le domaine devraient principalement évoluer autour de ces techniques pour l'identification, tout en préservant des outils capables de filtrer certaines informations pertinentes tels que les détecteurs chromatographiques spécifiques ou la RMN mode phosphore.

Enfin, l'évolution actuelle des techniques d'analyse à haut débit doit permettre de rendre plus performantes et réactives les analyses effectuées sur le terrain en continu (pour la surveillance d'une zone, par exemple). En revanche, l'idée de routine ou d'analyse de grandes séries semble peu en adéquation avec les analyses de confirmation telles qu'esquissées ici. Dans ce domaine, l'attente de progrès se porte, non vers une rapidité accrue, mais vers une meilleure sensibilité et la multiplication des solutions utilisables autour d'un même moyen d'analyses, pour obtenir une plus grande adaptabilité à la situation rencontrée.

Remerciements

A tous les personnels de la section analyse chimique, notamment C. Albaret, P Augé, A. Bossée, C. Montauban et H. Renault pour la mesure des limites de détection, et plus généralement à tous les relecteurs de cet article.

Notes et références

[1] Ricaud P., article « arme chimique », *Encyclopedia Universalis* ; Meyer C., *L'arme chimique*, Ellipses, 2002 ; Lepick O., *Les armes chimiques*, Que sais-je, 1998.

- [2] Lepick O., *La Grande Guerre Chimique 1914-1918*, PUF, 1998.
 [3] *Nature*, 1995, 374, p. 392 ; Morita H. et al., *Lancet*, 1995, 346, p. 290 ; Tsuchihashi H., *J. Anal. Toxicol.*, 1998, 22, p. 383.
 [4] Wax P.M. et al., *Ann. Emerg. Med.*, 2003, 41, p. 700.
 [5] Les termes d'« arme chimique » et « produit chimique toxique » sont précisément définis à l'article II de la Convention d'Interdiction des Armes Chimiques. On utilisera dans cet article le vocable « agent de guerre chimique » ou « toxique de guerre » au sens de produit chimique toxique pouvant être employé à des fins militaires.
 [6] On trouvera de plus amples détails dans Meyer V., *Anal. Chem.*, 1998, 70, 21A.
 [7] L'AP2C, appareil portable de contrôle de la contamination, de conception et de fabrication française, est en dotation dans plusieurs armées. Fonctionnant sur le principe de la photométrie de flamme, il permet de détecter spécifiquement des traces de composés phosphorés ou soufrés.
 [8] Rauttio M. et al., *Recommended operating procedures for sampling and analysis in the verification of chemical disarmament*, procédures GS-1 à GS-5 et SC-1 à SC-7, Ministère des affaires étrangères de Finlande, 1994 ; AEP-10/Manuel OTAN sur le prélevement et l'identification des agents de guerre chimique, 3^e éd., Organisation du traité de l'Atlantique Nord (sans classification), 1988.
 [9] Pawliszyn J., *SPME, Theory and Practice*, Wiley-VCH, New York, 1997 ; Lakso H.A., Ng W.F., *Anal. Chem.*, 1997, 69, p. 1866 ; Schneider J.F., Boparai A.S., Reed L.R., *J. Chromatogr. Sci.*, 2001, 39, p. 420.
 [10] Brickhouse M.D. et al., *J. Chromatogr. A*, 2000, 883, p. 185.
 [11] Stuff J.R. et al., *J. Chromatogr. A*, 1999, 849, p. 529.
 [12] Black R.M. et al., *J. Chromatogr.*, 1993, 637, p. 71.
 [13] Lambropoulou E. et al., *J. Chromatogr. A*, 2001, 922, p. 243.
 [14] Beck N.V., *J. Chromatogr. A*, 2001, 907, p. 221 ; Chaudot X., Tambuté A., Caude M., *J. High Res. Chromatogr.*, 1998, 21, p. 457.
 [15] Chaudot X., Tambuté A., Caude M., *J. Chromatogr. A*, 2000, 866, p. 231.
 [16] Hennion M.C., *J. Chromatogr. A*, 2003, 1000, p. 29.
 [17] Nassar A.F., Lucas S.V., Hoffland L., *Anal. Chem.*, 1999, 71, p. 1285 ; Vermillion W.D., Crenshaw M.D., *J. Chromatogr. A*, 1997, 770, p. 253.
 [18] Black R.M., *J. Chromatogr. A*, 2003, 1000, p. 1.
 [19] Mazurek M. et al., *J. Chromatogr. A*, 2001, 919, p. 133.
 [20] D'Agostino P.A., Provost L.R., *J. Chromatogr.*, 1988, 436, p. 399.
 [21] Kientz C.E., *J. Chromatogr. A*, 1998, 814, p. 1.
 [22] Hooijschuur E.W.J., Kientz C.E., Brinkman U.A.T., *J. Chromatogr. A*, 2001, 928, p. 187.
 [23] D'Agostino P.A., Hancock J.R., Provost L.R., *J. Chromatogr. A*, 1999, 840, p. 289.
 [24] Van Baar B.L., Hulst A.G., Wils E.R., *Anal. Biochem.*, 2002, 301, p. 278.
 [25] Mesilaakso M., Niederhauser A., *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, R.A. Myers (éd.), J. Wiley & Sons UK, 2001.
 [26] La plupart des valeurs expérimentales sont extraites de Munro N.B. et al., *Environ. Health. Perspect.*, 1999, 107, p. 933 ; les valeurs marquées d'un astérisque sont des estimations obtenues par le logiciel LOGKOW de Syracuse Research Corporation (<http://esc.syrres.com/interkow/kowdemo.html>).
 [27] Rousseau J.-M. et al., *Ann. Fr. Anesth. Réanim.*, 2000, 19, p. 588.
 [28] Mérat S. et al., *Ann. Fr. Anesth. Réanim.*, 2003, 22, p. 108 ; Papiromeister B. et al., *Medical defense against mustard gas: toxic mechanisms and pharmacological implications*, CRC Press, Boca Raton, FL, 1991.



B. Bellier



Y. Juillet

Bruno Bellier (auteur correspondant)*, ingénieur, est chef du Département analyse et évaluation chimique, **Arlette Bégos**, ingénieur, est chef de la Section analyse chimique, **Yannick Juillet**, technicien, est spécialiste de la chromatographie et **Laurent Taysse**, docteur ès sciences, est chef de la Section toxicologie générale et analytique au Centre d'études du Bouchet**.

* Tél. : 01 69 90 84 21.

Fax : 01 64 93 52 66.

Courriel : bruno.bellier@dga.defense.gouv.fr

** DGA/Centre d'études du Bouchet, 5 rue Lavoisier, BP 3, 91710 Vert-le-Petit.



A. Bégos



L. Taysse

Le génie pour les produits

Un génie des procédés pour l'élaboration de meilleurs produits : perspectives et enjeux

Éric Favre et Jacques Bousquet

Résumé

Une tendance marquée des industries chimiques, et plus largement des industries de procédés, consiste à élaborer de plus en plus fréquemment des produits formulés complexes et de nature hétérogène. Cet état de fait amène à reconsidérer la place et le rôle que peut jouer le génie des procédés dans l'élaboration d'un produit formulé donné. Cet article tente de faire le point sur les enjeux et perspectives relatifs à cette problématique, en délimitant dans un premier temps différents niveaux d'approche dans l'élaboration d'un produit formulé. Une attention particulière est alors portée à l'articulation à donner aux aspects relatifs aux matières premières entrant dans le produit (conditionnant pour une large part l'état de la matière à traiter : systèmes solides, dispersions fluides, solides mous) avec les technologies de mise en œuvre. Le terme « génie pour les produits » est proposé pour dénommer cette discipline naissante et une première tentative d'identification des principaux défis et enjeux qu'elle présente est développée.

Mots-clés

Produits, génie des procédés, formulation, spécialités chimiques.

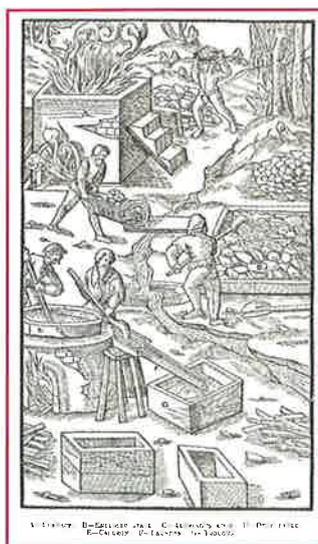
Abstract

Engineering for products: perspectives and challenges of chemical engineering for product design

Chemical process industries are more and more concerned by the production of complex and heterogeneous products in place of a single molecule. This matter of fact calls for a re-examination of the potential role of chemical engineering, in close association with physical-chemistry and chemistry considerations, in order to develop and produce a given formulated product. This work tentatively offers an overview of the various approaches which can be proposed for a product design problem. Attention is focussed on the key relationship which has to be set up between the type of molecules (ingredients) involved in a given product, and the corresponding technological processes. It is suggested to call this still emerging discipline « product engineering » and a series of its future prospects and targets are tentatively listed.

Keywords

Products, chemical engineering, formulation, specialties.



Le génie des produits au XVI^e siècle. Production d'alun pour la teinture textile (d'après G. Agricola [35]).

L'évolution récente du génie des procédés

A l'instar des autres sciences de l'ingénieur, le génie chimique (« *chemical engineering* », devenu génie des procédés chez nous depuis vingt ans), créé à la fin du XIX^e siècle, puis largement diffusé à partir des années 50 avec l'essor de l'industrie pétrolière et pétrochimique, doit faire face à un dilemme permanent :

- rester à l'écoute des problèmes et des besoins de l'industrie,

- développer simultanément ses outils propres (communément appelés *paradigmes*) en appliquant une

méthodologie spécifique s'appuyant elle-même sur des disciplines plus fondamentales (mathématiques, informatique, physique, chimie, mécanique, sciences de la vie...).

Les difficultés liées au maintien de cet équilibre subtil font régulièrement l'objet de controverses entre les partisans d'une approche plus rigoureuse [1-2] (au risque d'empiéter trop sur les disciplines relevant des sciences pures) et ceux qui souhaitent se limiter à la stricte résolution des problèmes industriels [3-4] (au risque de mettre en péril le caractère scientifique de la discipline). Sans entrer dans ce débat de fond, force est de constater que le génie des procédés a été et reste indubitablement appelé à évoluer, en réponse à une série de facteurs propres à chacun de ces deux pôles que nous qualifierons d'*interne* pour le premier (problématique scientifique) et d'*externe* pour le second (problématique industrielle et sociétale).

Pour ce qui est des facteurs *internes*, une série de pistes a été proposée récemment par divers auteurs pour apporter un certain renouveau à la discipline (voire pour aboutir au troisième paradigme que différents auteurs appellent de leurs vœux depuis plusieurs années [5]) :

- En termes d'*objet*, les recommandations du rapport Amundson [6], datant de près de 20 ans, restent pour l'essentiel d'actualité. Les enjeux sociétaux mis à part (environnement, énergie, santé), on peut les résumer schématiquement au fait d'étendre les frontières de la discipline vers des systèmes fortement non idéaux et/ou complexes (polymères, systèmes dispersés fluides, suspensions et dispersions concentrées, solides...), mettant en jeu des processus

aux interfaces et opérant souvent en régime transitoire (procédés discontinus).

- En terme de *méthode*, les limites de l'approche systémique, que l'on peut globalement caractériser par les mots-clés : opérations unitaires, bilans de matière et d'énergie, thermodynamique des gaz et liquides, privilégiant les comportements plutôt que les structures, ont conduit à une certaine forme de remise en cause. Partant de ce constat, certains auteurs préconisent un retour en force des notions structurelles et interfaciales dans la démarche du génie des procédés [7].

- Sur un autre plan, les difficultés de prise en compte, voire de réconciliation, des différents *niveaux d'échelle* compatibles avec la démarche du génie des procédés (du niveau moléculaire à l'échelle macroscopique) continuent à alimenter un débat de fond sur l'éventuelle possibilité de réaliser théoriquement ce saut d'échelle [8-9], à l'instar des méthodes de renormalisation échafaudées par K. Wilson dans le domaine de la physique. Cet état de fait n'empêche cependant pas une appréhension souvent suffisante pour de nombreux problèmes, dès lors que l'échelle caractéristique des processus se déroulant dans un système est identifiée [10].

- D'une manière plus générale, il est utile de rappeler également la nécessité fréquemment invoquée pour les sciences d'être capable de prendre en compte la complexité, une *tendance vers la biologie* étant le nec plus ultra dans le domaine. Étudier ou s'inspirer des systèmes vivants est suggéré à cet égard par certains auteurs pour mettre à l'épreuve et/ou faire évoluer la démarche du génie des procédés.

A ces suggestions et interrogations à dominante interne, il est nécessaire de mettre en regard des facteurs *externes* qui tiennent, pour la plupart, à une mutation progressive opérée par les industries de procédés depuis plus d'une vingtaine d'années :

- La compétition internationale et l'obligation de résultats ont conduit à une refonte complète du paysage industriel en termes de sociétés. Il est à noter que malgré les fusions à marche forcée, le positionnement des grands groupes chimiques a connu en dix ans une régression significative, par exemple en termes de classement en capitalisation boursière en particulier face aux nouvelles technologies [11], mais aussi face aux nouveaux majors de la pharmacie (souvent issus eux-mêmes de conglomérats chimiques), ou face aux groupes pétroliers (eux-mêmes restructurés récemment) qui restent maîtres de nombreuses matières premières et énergétiques.

- Au sein même des sociétés, l'organisation structurelle privilégie maintenant un positionnement au plus près du client, suivant en ce sens les recommandations des groupes d'experts des années 1970 (comme le célèbre *Boston Consulting Group*). Le concept de SBU (« *strategic business unit* ») représente un exemple emblématique de ce précepte. Au risque d'être caricatural, on pourrait résumer cette tendance forte par une mainmise croissante du marketing dans les choix stratégiques des sociétés.

- À la politique de rentabilité, basée sur des investissements lourds pour produire une molécule par un procédé continu pérenne optimisé à prix de revient minimal (dite *commodité*), s'est substituée une stratégie visant à proposer des produits développant des propriétés données avec un taux

Tableau I - Découpage schématique des principales caractéristiques des produits des industries chimiques en commodités et spécialités (adapté d'après [6, 12]).

	Commodités	Spécialités
Exemples	Produits de base (éthylène, ammoniac, chlore...) + Intermédiaires (urée, acide acétique, acrylonitrile...)	Pigments Agents de surface Insecticides Arômes Antioxydants
Nombre de molécules	~ 20 produits de base + 200 intermédiaires	Plus de 30 000
Produit	Inchangé sur le marché pendant des décennies	Rapidement remplacé
Compétition	Prix	Qualité et performances
Ratio chiffre d'affaires/investissement	0,5	2
Type de produit	Petites molécules	Tensioactifs, polymères, solides divisés
Procédés de production	Produit unique, tonnage élevé, production continue	Production discontinue, quantité modeste
Prix de vente	0,1 à 1 €/kg	2 à 500 €/kg

de renouvellement le plus rapide possible. Cette deuxième catégorie, plutôt caractéristique des produits dits de *spécialités*, fait souvent appel à des procédés discontinus pouvant offrir une rentabilité accrue en ayant recours à des ateliers de production polyvalents. Une classification prétendant recouvrir l'ensemble des produits des industries chimiques sur cette seule base dichotomique est certes critiquable et donne lieu à de nombreuses controverses, y compris sur l'utilisation même des deux termes¹ [12]. Une tentative de présentation des caractéristiques principales de ces deux grandes familles de produits est néanmoins proposée, à titre illustratif, dans le *tableau I*. Quoi qu'il en soit, les activités de type commodités représentent aujourd'hui moins de 45 % du chiffre d'affaires de l'ensemble des industries chimiques des pays industrialisés, alors que la part des produits de type spécialités ne cesse de croître [9].

- Même si l'élaboration de nouvelles molécules ou nouveaux isomères dans les laboratoires de recherche se poursuit à une vitesse vertigineuse, notamment pour des applications pharmaceutiques (*figure 1a*), le développement et la mise sur le marché d'une nouvelle molécule doit faire face à une série d'obstacles réglementaires présentant un coût croissant et pouvant occasionner un délai qui affecte la durée de protection effective par brevet [13]. Ces difficultés

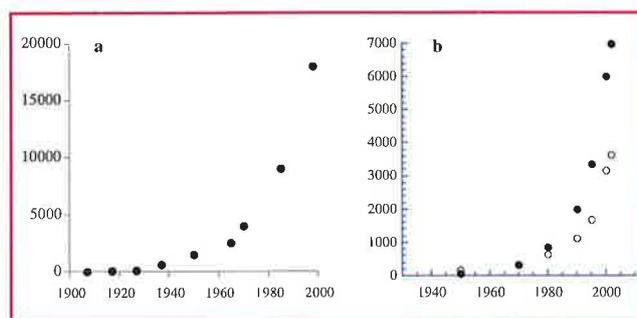


Figure 1 - a) Évolution (en milliers) du nombre de molécules connues depuis 1900 ; b) Nombre cumulé de citations dans la littérature scientifique (en milliers) faisant intervenir les concepts « *formulation and technology* » (●) et « *chemical engineering and product* » (○). (Source : Chemical Abstract Services).

Tableau II - Principaux secteurs d'application de la chimie de spécialités et des industries relevant de la formulation.

Adhésifs	Photographie
Produits phytosanitaires	Matériaux plastiques
Cosmétiques	Peintures, encres, vernis
Lubrifiants et huiles	Caoutchoucs
Produits alimentaires (arômes, texturants...)	Fibres textiles
Peintures et revêtements	Produits papetiers
Détergents et produits de nettoyage	Préparations pharmaceutiques
Traitement des métaux	Inhibiteurs de corrosion
Produits pétroliers (carburants, bitumes...)	Cuirs
Plâtres et ciments	Sécurité (ignifugeants, extincteurs)
Traitement de l'eau	

ont donc incité fortement les groupes chimiques à améliorer des produits existants, ou encore à jouer sur une combinatoire de molécules parmi celles autorisées afin de répondre à un besoin [14].

Les divers critères esquissés ci-dessus contribuent à délimiter, de manière plus ou moins marquée, le panorama d'une problématique récente (tout du moins dans son appellation) des industries chimiques et parachimiques. La notion de produit au sens bien de consommation (et non plus « simple » produit chimique) et celle de propriété(s) d'usage traduisant les attentes du client ou du consommateur sont au cœur de cette problématique. Ces deux caractéristiques trouvent tout leur sens dans le secteur des produits de spécialités, et surtout dans les nombreuses industries (non strictement chimiques) produisant des produits formulés à destination directe du consommateur (tableau II). Le terme de formulation ou encore de génie de la formulation est fréquemment employé en français pour couvrir ce champ disciplinaire [15], alors que les Allemands parlent plus volontiers de « produktgestaltung » (même si le vocable « formulacionstechnologie » peut être cité occasionnellement [16]). La littérature anglo-saxonne utilise plus couramment la notion de génie des produits (« product engineering » [17-18]), pouvant être déclinée en « chemical product engineering » [19] ou « chemical product design » [20] lorsqu'elle s'applique à des objets chimiques ; l'emploi du terme « formulation » en anglais est quant-à-lui plutôt réservé au strict choix des ingrédients d'un produit donné.

Alors que la communauté des physico-chimistes a été sensibilisée très tôt à la notion de formulation², l'engouement pour le concept de produit en génie des procédés est plus récent mais spectaculaire, comme on peut en juger par l'évolution du nombre d'articles scientifiques associant ces deux termes (figure 1b). Avant d'entrer dans la problématique de la place et du rôle potentiel pouvant être joués par le génie des procédés dans ce domaine, il est indispensable de préciser les différentes facettes recouvrant ce vaste champ disciplinaire.

Formulation et/ou génie des procédés : où en est-on ?

La formulation a initialement été définie par l'Union des Industries Chimiques comme un « art consistant à optimiser la fabrication d'un produit en utilisant différentes techniques de mélange à partir de produits chimiques de base et divers additifs permettant de satisfaire les exigences du client qui les utilisera » [21]. Le caractère empirique recouvrant cette définition, et dans une moindre mesure la place pour le moins restreinte laissée aux procédés, ont conduit à une définition plus détaillée proposée récemment [22] : la formu-

lation recouvre l'ensemble des opérations nécessaires à la préparation d'un produit à « valeur d'usage » (médicament, cosmétique, détergent, peinture...) par mélangeage de matières premières synthétiques (minérales, organiques ou macromoléculaires) ou naturelles (huiles, cires hydrocolloïdes...). Elle concerne peu ou prou toutes les industries situées en aval de la chimie (carburants, plastiques, caoutchouc, ciments, céramiques...), mais ce terme est habituellement réservé à la « parachimie » et aux industries dites de « spécialités » (médicaments, phytosanitaires, cosmétiques, produits d'hygiène, détergents, peintures, encres, adhésifs, lubrifiants, bitumes...).

Cette définition, pour précise qu'elle soit, ne retire en rien le caractère générique qui se cache derrière le vocable de formulation, à l'instar de nombreux autres termes passés dans le langage courant comme matériaux, biotechnologie ou moyens de communication [23]. Un découpage simplifié en périmètres permet de distinguer différents niveaux d'actions englobés dans le terme formulation, représentés figure 2. Le produit en constitue bien évidemment le centre de gravité, sur lequel viennent se greffer :

i) en amont, les ingrédients (molécules ou spécialités chimiques préformulées entrant dans la composition du produit) ainsi que les technologies de mise en œuvre (procédés) nécessaires pour aboutir au produit formulé ;

ii) en aval, les propriétés du produit formulé. Une précision importante est à faire sur ce terme qui recouvre deux notions distinctes. D'une part, les caractéristiques physiques (mécaniques, optiques, thermiques, électriques...), chimiques et structurales du produit ; ces données sont le plus souvent quantifiables, accessibles expérimentalement et constituent la base d'interprétation des relations structure/propriétés, chères aux biologistes, et passées dans le langage des matériaux et des produits formulés. D'autre part, le terme de propriétés est aussi employé au sens de fonctions d'usage que doit avoir le produit lors de son utilisation, c'est-à-dire les qualités attendues par le consommateur ou le client. Ces dernières constituent les fonctions premières à satisfaire ; elles reposent sur des tests d'application très variables selon le secteur industriel concerné (par exemple la vitesse de dissolution d'un comprimé pharmaceutique, le temps de prise d'un mortier, la brillance d'une peinture, la tenue en bouche d'une crème glacée...). Il va sans dire que

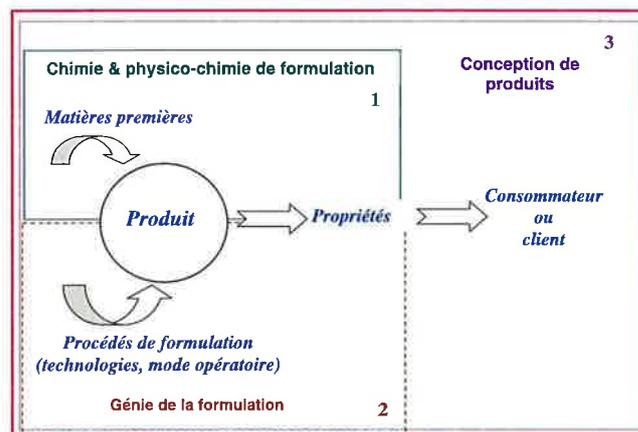


Figure 2 - Représentation schématique des approches au cœur des notions de formulation (1), génie de la formulation (2) et conception de produit (3).

l'établissement de relations explicites entre les propriétés physiques d'un produit formulé et ses fonctions d'usage constitue un défi scientifique de premier plan.

Les différentes approches de la formulation

La représentation largement simplifiée de ces questions apparaissant à la *figure 2* est critiquable ; elle permet cependant d'identifier différents angles d'approche de la problématique « produit formulé », constituant autant de champs disciplinaires.

La formulation au sens strict

Un premier périmètre se limite aux relations molécules-produits-propriétés, correspondant à la *formulation dans son sens le plus strict* (recherche de la formule, c'est-à-dire des ingrédients permettant de développer au mieux les fonctions visées). Terrain d'action favori du physico-chimiste, le rôle du procédé dans ce schéma est souvent oublié ou réduit au simple mélange des matières premières, comme évoqué dans les définitions données plus haut. Un gisement considérable de connaissances relatives à cet espace existe pour chaque secteur d'application, particulièrement dans l'industrie ou les centres techniques professionnels. Rationaliser ce savoir-faire, à caractère souvent empirique et qui continue à faire preuve d'une efficacité remarquable, représente un défi auquel se sont attaqués les chimistes et physico-chimistes depuis longtemps.

Le génie des produits

Une approche plus large consiste à intégrer le triptyque molécules-procédés-produit dans la problématique précédente, afin de donner toute la place qu'elles méritent aux technologies de mise en œuvre. En effet, celles-ci peuvent jouer, avec la formule, un rôle clé dans l'obtention de la structure du produit requise pour atteindre les fonctions d'usage recherchées. Cette analyse constitue un message véhiculé jusqu'à présent par quelques auteurs ou groupes de réflexion, avec comme argumentaire principal la nécessité d'aborder, dès les premiers stades de l'élaboration d'un produit, les considérations physico-chimiques en parallèle avec les contraintes de procédés. La pluridisciplinarité qui soutient cette combinaison d'approche est souvent citée comme essentielle à la réussite d'un développement [24]. Les industries alimentaires, pharmaceutiques ou parachimiques possèdent de loin la plus longue et riche expérience en conception de produits à bien d'usage, et cherchent le plus souvent à la mettre en œuvre, malgré les difficultés liées à la gestion d'équipes de projet pluridisciplinaires. La prise en compte de la dimension technologique et d'ingénierie ainsi proposée suggère une dénomination du type génie de la formulation fréquemment employé (*figure 1*), ou encore *génie (de l'élaboration) des produits* (« *product engineering* ») à ce deuxième pan d'activités.

La conception de produit (« *product design* »)

Un périmètre encore plus large que le précédent peut également être proposé, capable d'englober en aval les besoins et attentes du consommateur. Ce domaine fait intervenir des concepts à dominante économique, comme la création d'un besoin ou l'identification des attentes du marché, assorti des méthodes permettant d'échafauder rapidement un produit adéquat (sélection d'idées, stratégies d'innovation...). Cette action, qui s'inspire des méthodes développées en *conception de produit* (au sens large), peut

être appliquée aux objets chimiques ou tout autre mettant en jeu un processus physico-chimique [9, 20].

La « préformulation », une autre façon de faire du génie des procédés pour optimiser un produit

On peut à ce stade préciser une autre catégorie de génie des produits, concernant l'industrie chimique au premier chef, mais se distinguant de la définition de la formulation exposée précédemment. En effet, il ne faudrait surtout pas négliger un pan entier d'activités situé en amont de la *figure 2*, conduisant à la production de molécules ou de spécialités chimiques préformulées entrant dans la composition des produits formulés. Le rôle que joue ici l'industrie chimique, fournisseur de molécules pour la quasi-totalité des secteurs industriels, comporte deux différences notables par rapport à celui de la formulation telle qu'elle est entendue plus haut : d'une part, les produits concernés sont très souvent des molécules (produits purs) ne présentant pas le caractère de mélange hétérogène des produits formulés ; d'autre part, l'utilisateur n'est pas le plus souvent un consommateur mais un industriel. Toutefois, le schéma conceptuel présenté *figure 2* s'applique également à cette autre forme de génie des produits [25], parfois qualifiée de *préformulation*. De manière analogue au génie des produits formulés, une association étroite entre le chimiste de synthèse, le physico-chimiste et l'ingénieur procédé peut là aussi jouer un rôle capital, tant pour assurer le respect du cahier des charges du produit que pour stimuler l'innovation³. S'apparentant à la production chimique plus conventionnelle (synthèse et purification d'une molécule spécifique), la préformulation joue souvent un rôle considérable dans l'atteinte des fonctions d'usage ; les exemples montrant comment un produit chimique façonné pour un usage précis peut améliorer la qualité du produit final abondent. Un principe actif solide entrant dans la composition d'un comprimé pharmaceutique requerra par exemple une granulométrie, une morphologie, voire un état de surface particulier pour permettre la réalisation du comprimé par compaction en présence des excipients et agents de surface choisis pour la formule commerciale (*figure 3*). De la même manière, un polymère pourra être produit sous différents grades selon l'usage visé par son utilisation dans le produit final (épaississant, gélifiant, stabilisant) [13].

Il existe donc une source d'ambiguïté incontestable dès lors que le terme de « génie des produits » est employé, puisqu'il revêt tantôt le sens de préformulation proposé ici, tantôt le sens génie des produits formulés développé plus haut, et ce au gré des auteurs (*figure 3*). A l'instar de l'industrie pharmaceutique, il faut maintenir une articulation

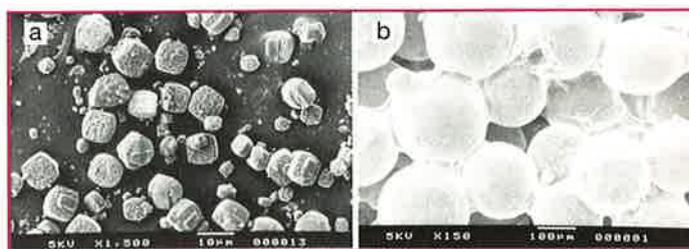


Figure 3 - Deux facettes du génie des produits au travers d'un exemple appliqué aux solides divisés.

a) Préformulation : exemple de principe actif (solide pur) obtenu par cristallisation et broyage ; b) produit formulé : exemple de comprimé (principe actif + liant + excipients) sous forme commercialisable.

Tableau III - Répartition des produits formulés en trois classes avec leurs caractéristiques.

	Système homogène	Système solide particulaire	Système dispersé fluide	Solides mous
Exemples de formes finales	Huiles, lubrifiants, carburants	Comprimé, granules, poudres	Émulsions, dispersions, mousses, latex, micelles	Pâtes, crèmes, gels
Phase continue	-	Solide	Liquide	Solide
Phase dispersée	-	Gaz	Liquide, solide ou gaz	Liquide ou gaz
Constituant clé		Interphases, surfaces solides de propriétés spécifiques	Tensioactif	Polymère

entre ces deux secteurs, à savoir la production d'une molécule seule (qualifiée de production primaire en industrie pharmaceutique) et son utilisation dans un produit formulé commercialisé (production secondaire). Les méthodes et contraintes peuvent différer significativement entre ces deux secteurs, et plus particulièrement les procédés mis en œuvre : la préformulation visant à produire une molécule dans une phase solide ou liquide homogène fait souvent appel à des opérations unitaires plus « classiques » (distillation, cristallisation, polymérisation), alors que les procédés de formulation au sens strict concernent invariablement l'élaboration de mélanges plus ou moins hétérogènes complexes faisant appel à des enchaînements d'opérations unitaires moins classiques et où la mécanique joue un rôle clé (tels que, par exemple, les opérations d'émulsification, de granulation, de gélification...).

Avant d'évoquer plus en détail la place et le rôle du génie des procédés dans le contexte de la formulation, il est indispensable d'évoquer dans un premier temps la composition des produits formulés.

Des produits formulés en tant qu'objets

Les critères liés à la nature chimique des molécules présentes, ou à leur fonction attendue (principe actif, solvant, épaississant, stabilisant, antioxydant...) conduisent à un nombre de classes à considérer trop élevé. Une vue plus synthétique peut être résumée au fait qu'un produit formulé contient en général 5 à 20 constituants différents, et que ceux-ci, hormis le milieu solvatant pour les produits fluides (phase aqueuse ou organique), peuvent être classés en quatre familles principales : petites molécules organiques, agents de surface et d'interphase, polymères, solides divisés.

Il est intéressant de noter, ne serait-ce que pour se convaincre du caractère général de cette observation, qu'un produit aussi banal que le sel de cuisine répond à ces critères [12].

En dehors de la stricte composition, la structure, ou plus exactement le type d'état de la matière à considérer, répond *grosso modo* à trois grands cas de figure, indiqués dans le *tableau III*. Cette classification arbitraire ne doit pas être prise trop à la lettre mais elle offre l'avantage d'une typologie mettant en exergue les cas de figure très différents, sur les plans mécanique et physico-chimique, que peut être amené à traiter un ingénieur procédé en génie des produits formulés. Schématiquement, elle délimite trois ensembles distincts :

i) Les systèmes solides particuliers, constitués principalement de solides divisés et dont la dimension caractéristique est typiquement comprise entre 0,1 µm et 1 mm.

ii) Les formes fluides dispersées, présentant une hétérogénéité à des échelles de taille comprises entre

10 µm et quelques nm (microémulsions). La place des agents de surface tient un rôle prépondérant dans ce type de structure, et les procédés qui leur sont associés comportent de manière quasi systématique un aspect relevant de la dispersion et du mélange.

iii) Les milieux déformables pseudocontinus qui constituent principalement les pâtes et gels. Systèmes à caractère ambivalent entre solide et liquide, la notion d'interface ou d'interphase peut y être moins marquée comme dans le cas des gels polymères. Leur très haute viscosité est due le plus souvent à la présence de polymères ou de molécules susceptibles de former un réseau structuré apparenté à un polymère réticulé.

Les procédés de formulation stricto sensu

En dehors d'un découpage basé sur la nature des objets concernés (produits formulés), une autre logique d'action peut être esquissée à partir des types de procédés mis en jeu. Une liste non exhaustive des principaux procédés de formulation est présentée dans le *tableau IV*, selon qu'ils s'adressent aux états solides ou fluides.

Cette présentation met en avant deux opérations unitaires quasi incontournables, communes à la plupart des schémas de production : le mélange, pratiqué souvent mais pas uniquement en amont, et le séchage, technique de finition très courante.

Un autre point commun plus générique est que la plupart des procédés élémentaires cités dans le *tableau IV* sont des opérations où la mécanique joue un rôle fondamental. Dans presque tous les cas, le procédé consiste à créer une interface, ou une interphase, ou encore à modifier de façon très spécifique la structure de la matière traitée. Dans tous les cas, la quantité et la qualité de l'énergie dissipée par le procédé ainsi que le mode spatio-temporel de libération de celle-ci jouent un rôle déterminant pour la qualité du produit fabriqué. L'exemple de la mayonnaise, cher à Hervé This, est bien connu. L'ajout d'ingrédients en quantité et qualité ne suffit pas. Il faut aussi introduire ceux-ci au bon moment et

Tableau IV - Les principaux procédés de formulation en fonction de la nature (solide ou fluide) des phases traitées.

Phase solide	Phase fluide
Agitation, mélange	Agitation, mélange, dispersion
Broyage, micronisation	Compoundage, extrusion
Cristallisation	Émulsification
Calandrage	Moussage
Tamassage	Gélification, cristallisation
Granulation	Polymérisation
Compactage	Atomisation
Agglomération	Lyophilisation, désolvation
Enrobage, enduction, pelliculage	Coacervation, polymérisation interfaciale
Séchage, dévolatilisation	Séchage, dévolatilisation

avec la dose adéquate d'un certain type d'énergie mécanique.

Le rôle très important que jouent la mécanique et les machines dans ce « chapitre » du génie des procédés a été compris très tôt par nos collègues allemands du génie chimique. L'exemple donné par le professeur Rumpf à Karlsruhe et par tous les brillants élèves qu'il a formés est remarquable. Ceux-ci sont ensuite passés par l'apprentissage industriel et sont revenus enfin dans diverses universités où ils ont à leur tour enseigné et développé des programmes de recherche aussi divers que : extrusion, séchage, séparation solide/liquide, agglomération, broyage, écoulement et convoyage des poudres, émulsification, enrobage, pastillage... Souvent, ces travaux étaient réalisés en liaison non seulement avec des industries intéressées par les produits, mais aussi avec des équipementiers qui ont compris qu'ils pouvaient trouver là un moyen précieux pour protéger, voire accroître leur compétitivité.

Les défis du futur

On ne peut pas parler de futur sans évoquer d'abord l'évolution récente de l'industrie chimique mondiale dont les tendances sont communes à celles que suivent bien d'autres industries de procédés. Les compagnies étaient encore récemment surtout orientées par la maîtrise des matières premières et des techniques de production, et beaucoup moins par le développement des marchés. Leurs gammes de produits étaient très diversifiées, ce qui tendait à favoriser l'existence de grands groupes intégrés multimétiers. Depuis dix ans, la globalisation des échanges commerciaux et financiers a accru la compétitivité générale et a forcé la plupart des sociétés chimiques à se concentrer sur leurs points forts et à spécialiser leur activité. Certaines ont choisi le business du vivant, d'autres les grandes commodités pétrochimiques, d'autres enfin ce qu'il est convenu d'appeler le secteur des spécialités chimiques, caractérisé par le Boston Consulting conformément à la figure 4 [27]. Si l'on met à part le développement très fort que vont encore connaître longtemps les industries consacrées au milieu vivant, il est clair que la chimie de spécialités offre de belles perspectives de développement à l'industrie chimique des pays industrialisés, peu pourvus en matière première pétrolière et dont les taux de croissance économique restent modestes. Pour progresser sur les marchés de spécialités, l'industrie chimique concernée doit faire appel non seulement aux meilleurs chimistes et physico-chimistes, mais elle doit demander un effort d'adaptation encore très important aux spécialistes du génie des procédés. Citons quelques pistes possibles, encore difficiles à préciser pour certaines :

- Développer des modèles thermodynamiques des états de la matière non classiques : verres, gels, émulsions, suspensions concentrées, mousses, pâtes...

- Introduire, quand c'est possible, les modèles précédents (même approximatifs) dans des schémas d'opérations unitaires : modèles consécutifs/compétitifs pour des réacteurs par exemple, bilans de population pour des procédés d'agglomération, enrobage, broyage...

- Exploiter davantage dans les opérations la problématique des systèmes statistiques, en dépassant en particulier les approches classiques utilisant la moyenne (moment d'ordre 1 de la distribution).

- Étendre l'application des méthodes du génie des procédés aux techniques de production de systèmes

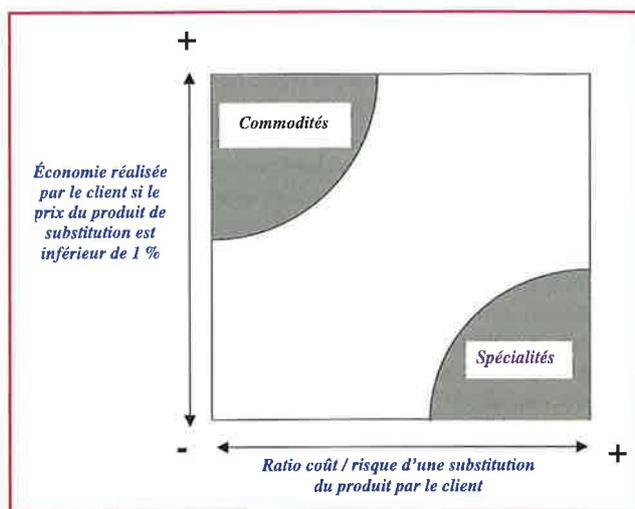


Figure 4 - Positionnement spécialités vs commodités (d'après [27]).

fragiles, métastables ou présentant des *défauts maîtrisés*, en examinant par exemple si une analyse plus locale des réacteurs, coagulateurs ou précipitateurs mis en œuvre ne permet pas de résoudre certains problèmes de maîtrise de la production ou d'améliorer les produits obtenus.

- Mieux exploiter, en termes de procédés, les progrès faits par les chimistes et physico-chimistes dans les connaissances des relations propriétés/structure.

- Appliquer au contrôle de certains procédés les techniques analytiques avancées qui ont fait récemment des progrès importants en miniaturisation et fiabilité.

Il va sans dire que la liste de propositions ci-dessus n'est en aucun cas exhaustive.

Conclusion : le génie pour les produits, évolution ou révolution ?

Au terme de ce tour d'horizon articulé autour de la problématique procédés et produits, une série de points méritent d'être soulignés.

D'abord la nécessité d'une terminologie unanime. Un premier constat s'impose, relatif à l'absence de définition commune de plusieurs termes clés :

- **produit**, qui peut être employé aussi bien comme résultant de l'activité de l'industrie chimique (définition économique, c'est-à-dire possédant une valeur marchande), ou uniquement l'objet acheté par le consommateur (définition plus sociétale) ;

- **propriétés, formulation, spécialités...**

Le mot génie des produits a le mérite d'être court et de correspondre directement au mot anglo-saxon reconnu « product engineering ». Mais pour éviter d'attribuer au seul ingénieur de procédé tout l'aspect que les jeunes d'aujourd'hui qualifieraient de génial dans certains produits nouveaux, nous proposons le vocable de **génie POUR les produits**. Cela dit, cette nouvelle appellation traduit-elle une simple évolution ou une véritable révolution pour notre discipline ?

La révolution apportée au début du XX^e siècle par le génie des procédés au travers du concept d'opération unitaire reposait essentiellement sur son caractère générique, permettant de **se détacher de l'objet chimique** (cher jusqu'alors à la chimie industrielle) pour rationaliser l'analyse d'une unité de production chimique autour de son plus petit

dénominateur commun⁴. Le retour en force de la dimension chimique et physico-chimique, maintes fois évoqué dans la problématique du génie des produits, auquel s'ajoute la prise en compte quasi incontournable de la *notion de structure*, suscite des interrogations quant à la pertinence de la démarche, devenue aujourd'hui conventionnelle, du génie des procédés. Le fait que de nombreuses analyses foisonnent au détriment de travaux de synthèse⁵ laisse présager une difficulté pour un expert en procédés de se détacher réellement de l'objet dès lors qu'une notion de type produit sera abordée. En ce sens, le développement du génie des produits pourrait constituer une forme de rupture en terme de pratique⁶ pour le génie des procédés.

Une deuxième rupture, plus méthodologique, pourrait également provenir du niveau de complexité des objets traités, obligeant le recours à des outils à caractère statistique (plans d'expérience, logique floue, réseau de neurones...) pour œuvrer au cœur du système molécules/procédés/produits/propriétés⁷. Sans négliger l'intérêt incontestable de ce type d'outils dans le domaine de l'aide à la décision ou de la résolution rapide de problèmes à dominante industrielle, force est de constater que l'emploi exclusif de cette stratégie constituerait un changement radical.

Au risque de paraître rétrograde, un certain nombre d'indicateurs tempèrent néanmoins la vision de rupture évoquée ci-dessus et invitent à maintenir la méthode du génie des procédés qui a fait jusqu'à présent son succès sur la base d'une description la plus rigoureuse possible de la thermodynamique des systèmes, des phénomènes de transport, ainsi que des équations de bilans et de réaction chimique, compatibles avec une résolution mathématique (analytique ou numérique) :

- Dans le domaine des procédés de formulation, des avancées remarquables ont été réalisées concernant des opérations aussi complexes que l'émulsification [29] ou la granulation [30]. Certains paramètres dans les travaux cités peuvent présenter un caractère empirique, être difficilement accessibles expérimentalement et ne sont pas toujours reliés de manière univoque avec la formulation du système. Néanmoins, l'approche unifiée offerte par le génie des procédés permet d'ores et déjà d'orienter les choix, voire de dresser une cartographie des relations procédés/structure du produit.

- Concernant les processus mis en jeu dans l'utilisation des produits formulés (technologies d'application), une interprétation de phénomènes aussi subtils que l'effet de peau pouvant se développer par exemple lors du séchage d'une peinture (« *skinning effect* »), ou encore des défauts de surface apparaissant en enduction (« *ribbing* »), a pu être élaborée sur la base d'une approche rigoureuse [31-32]. Sans être totalement prédictifs, ces travaux laissent entrevoir la possibilité de rationaliser la compréhension de processus considérés jusqu'alors comme accidentels et, d'une certaine manière, incontrôlables, lors de la mise en œuvre du produit par l'utilisateur.

- Enfin, des exemples, encore rares, offrant une approche plus large relevant du génie des produits au plein sens du terme (c'est-à-dire balayant l'ensemble de la problématique des procédés aux propriétés d'usage) ont été rapportés récemment, en particulier dans le domaine des crèmes et lotions cosmétiques [33-34].

Finalement, les auteurs pensent plutôt que le développement du **génie pour les produits**, essentiel pour accompagner la mutation des industries de procédés (dont la chimie)

vers des produits toujours plus performants et souvent complexes est un pas franchi vers un génie des procédés finalement assez différent de celui de référence. Ce génie pour les produits ne reniera rien du génie chimique classique, mais demandera à ses praticiens une plus large culture scientifique (particulièrement dans les domaines de la chimie et de la physico-chimie) et technique. Au final, c'est donc une belle aventure qui se profile, avec à la clé un véritable défi scientifique et pédagogique à destination de nos futurs élèves.

Notes

- ¹ De nombreuses variantes existent, en particulier selon le devenir des produits (vente directe au consommateur ou à un autre industriel), leur composition (une seule molécule ou un mélange formulé), ou encore leur prix de vente.
- ² Une division Formulation, comptant plus de 400 membres, existe à la Société Française de Chimie depuis plus de vingt ans.
- ³ Cette situation n'est pas nouvelle. Le développement du nylon, avec le succès à caractère emblématique qui en a découlé, résulte d'un groupe de projets associant chimistes et ingénieurs des procédés haute pression chez Dupont [26].
- ⁴ La naissance du génie chimique est parfois associée dans ce sens aux techniques de management du système manufacturier américain du début du siècle échafaudées dans le domaine de l'automobile par H. Ford et diffusées par Taylor [26].
- ⁵ Il n'existe pas (encore) l'analogue du *Perry's Chemical Engineering Handbook* (R.H. Perry & Don Green (eds), Mac Graw Hill), consacré au génie des produits par exemple.
- ⁶ D'aucuns associeront ce changement aux caractéristiques de l'époque post-moderniste, annoncée par les milieux artistiques et les sociologues, pour laquelle la spécificité, le caractère unique de l'objet par opposition à son traitement générique, constitue l'un des piliers (cette analyse a constitué la trame de la surprenante *2001 Danckwerts Memorial Lecture* par J. Prausnitz [28]).
- ⁷ Le fait que l'un des premiers chapitres des *Techniques de l'Ingénieur* consacré à la formulation traite des plans d'expérience est à ce titre révélateur.

Références

- [1] Bird R.B., Rethinking academia: restore the right priorities, *Chemical Engineering Progress*, **1996**, *92*, p. 80.
- [2] Astarita G., Frontiers in Chemical Engineering and 1992, *Chemical Engineering Progress*, **1990**, *86*, p. 55.
- [3] Landau R., Education: moving from chemistry to chemical engineering and beyond, *Chemical Engineering Progress*, **1997**, *93*, p. 52.
- [4] Landau R., The chemical engineering trilemma, *Chemical Engineering Progress*, **1976**, *72*, p. 13.
- [5] Wei J., A century of changing paradigms in chemical engineering, *ChemTech*, **1996**, *26* (5), p. 16.
- [6] Amundson N.R., *Frontiers in Chemical Engineering. Research Needs and Opportunities*, National Academy Press, Washington DC, **1988**.
- [7] Villadsen J., Putting structure into chemical engineering, *Chemical Engineering Science*, **1997**, *52*, p. 2857.
- [8] Mashelkar R.A., Seamless chemical engineering science: the emerging paradigm, *Chemical Engineering Science*, **1995**, *50*, p. 1.
- [9] Krieger J.H., Chemical engineering redefines itself in era of global change, *Chemical & Engineering News*, **1996**, *74*, p. 10.
- [10] Bacchin P., Bergel A., Biscans B., Floquet F., Wilhelm A.M., Joulia X., Génie des procédés : discipline des interactions et interactions des disciplines, *Entropie*, **1999**, *216*, p. 61.
- [11] Cussler E., Savage D.W., Middleberg A.P.J., Kind M., Refocussing chemical engineering, *Chemical Engineering Progress*, January **2002**, p. 26.
- [12] Agam G., *Industrial Chemicals. Their Characteristics and Development*, Elsevier Amsterdam, **1994**.
- [13] Wintermantel K., Process and product engineering achievements. Present and future challenges, *Chemical Engineering Science*, **1999**, *54*, p. 1597.
- [14] Quadbeck-Seeger H.J., Chemistry for the future. State of the art and perspectives, *Angewandte Chemie*, Int. English Ed., **1990**, *29* (11), p. 1177.
- [15] Schorsch G., La formulation au carrefour des compromis, *Informations Chimie*, **1991**, *325*, p. 152.
- [16] Mollet H., Grubenmann A., *Formulationstechnologie*, Wiley VCH, **2000**.
- [17] Charpentier J.-C., Process engineering and product engineering, *Chemical Engineering Science*, **1997**, *52*, iii-iv.
- [18] Kind M., Product engineering, *Chemical Engineering and Processing*, **1999**, *38*, p. 405.
- [19] Favre E., Marchal-Heussler L., Kind M., Chemical product engineering: research and educational challenges, *Transactions IChemE*, **2002**, *80* (A), p. 65.

- [20] Cussler E., Moggridge G., *Chemical Product Design*, Cambridge University Press, **2001**.
- [21] Union des Industries Chimiques, Science et Technologie pour l'Industrie Chimique, Fascicule « Formulation », **1995**.
- [22] Aubry J.-M., Schorsch G., Présentation générale de la formulation, *Traité Génie des Procédés*, Techniques de l'Ingénieur, **2000**.
- [23] Schorsch G., La formulation : de l'art à la science du compromis, *L'Act. Chim.*, décembre **2000**, p. 20.
- [24] Wesselingh J.A., Janssen L.P.B.M., Teaching product engineering, *Récents Progrès en Génie des Procédés*, **1999**, *64*, p. 401.
- [25] Wei J., Molecular structure and property: product engineering, *Industrial Engineering Chemistry Research*, **2002**, *41*, p. 1917.
- [26] Ndiaye P., *Du nylon et des bombes*, Belin, **2001**.
- [27] Semel J., *Keynote lecture* présentée au 3rd European Congress of Chemical Engineering, Nuremberg, Allemagne, **2001**.
- [28] Prausnitz J.M., Chemical engineering and the postmodern world, *Chemical Engineering Science*, **2001**, *56*, p. 3627.
- [29] Walstra P., Principles of emulsion formation, *Chemical Engineering Science*, **1993**, *48*, p. 333.
- [30] Iveson S.M., Lister, Growth regime map for liquid bound granules, *AIChE Journal*, **1998**, *44*, p. 1510.
- [31] Cairncross R.A., Francis L.F., Scriven L.E., Predicting drying in coatings that react and gel: drying regime maps, *AIChE Journal*, **1996**, *42*, p. 55.
- [32] Coyle D.J., Macosko C.W., Scriven L.E., The fluid dynamics of reverse roll coating, *AIChE Journal*, **1990**, *36*, p. 161.
- [33] Wibowo C., Ka M.N., Product oriented process synthesis and development: creams and pastes, *AIChE Journal*, **2001**, *47* (12), p. 2746.
- [34] Wibowo C., Ka M.N., Product centered processing: manufacture of chemical based consumer products, *AIChE Journal*, **2002**, *48* (6), p. 1212.
- [35] Agricola G., *De Re Metallica*, Libri XII, **1556**.



E. Favre

Éric Favre

est professeur à l'ENSIC de Nancy*.

Jacques Bousquet

est à la direction scientifique de Total**.

* Laboratoire des sciences du génie chimique, CNRS UPR 6811, Groupe ENSIC, INPL, 1 rue Grandville, 54001 Nancy.

Tél. : 03 83 17 53 90. Fax : 03 83 32 29 75.

Courriel : Eric.Favre@ensic.inpl-nancy.fr

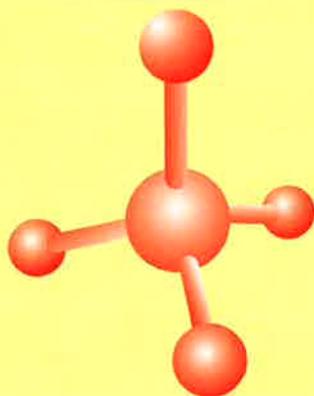
** Total, Direction scientifique, BP 22, 69630 Solaize.

JCO 2004

Journées de Chimie Organique

7-9 septembre

ECOLE POLYTECHNIQUE - PALAISEAU (FRANCE)



JCO 2004

Colloque organisé par la
Division de Chimie Organique de la Société Française de Chimie

sfc
 Société
 Française
 de Chimie

<http://www.evicevents.com/chimie/index.html>

Apport du génie des procédés aux enjeux sociétaux

dans le contexte « demandes du marché et de la société versus offres technologiques », c'est-à-dire encore dans le contexte « de la matière première à la mise sur le marché du produit à haute valeur ajoutée »

Jean-Claude Charpentier

Allant du pétrole à la pharmacie en passant par le verre, le ciment, le bitume, le papier, le textile, la peinture, la cosmétique, l'alimentaire ou la chimie, les industries de procédés chimiques et parachimiques sont en rapide évolution (voir figure 1 pour l'année 2002). **Leurs marchés exigent une adaptation permanente de l'offre à la demande sociétale.** Ainsi, les notions de service au client, de création de valeur pour l'actionnaire, de leadership sur les marchés et d'acceptation par le public, jouent un rôle de plus en plus stratégique pour ces industries confrontées à un double défi : humain, et scientifique et technologique :

pour les pays en voie de développement et d'industrialisation, la main d'œuvre est de moindre coût et les réglementations locales (environnement, sécurité) sont moins contraignantes ;

pour les pays industrialisés, les demandes des consommateurs sont pressantes et changeantes, et les contraintes justifiées et très fortes de la part du public portent sur les questions d'environnement, d'image auprès du public et de maîtrise des risques industriels pour le couple produit-procédé.

Dans ce cadre, les **industries chimiques et parachimiques**, et plus généralement les **industries de procédés** européennes et **notamment françaises**, en compétition avec les industries nord-américaines et japonaises, sont confrontées à deux autres défis :

- pour la production des commodités et des intermédiaires : recherche de procédés innovants en sélectionnant les procédés, non seulement sur la base d'économies d'exploitation, mais sur la base de gains compensatoires résultant d'une sélectivité accrue et d'économies de matière et de chaleur au sein du procédé. Cela requiert la réduction des pertes en matières premières et en énergie et le recyclage des produits et des sous-produits, et la maîtrise des risques liés aux conditions de production et de manipulation des produits chimiques et leur degré d'acceptabilité par la société civile ;

- pour la chimie de spécialités (pharmacie, cosmétique, alimentaire...) caractérisée par des objectifs (marchés, vente, compétition) dominés par la propriété d'usage du produit (solides divisés, solides mous, mélanges et fluides complexes), les éléments dominants concernent l'expertise et la compétence pour ajuster des procédés à une demande variée et changeante de la part du consommateur et la rapidité de réponse aux conditions des marchés.

Dans tous les cas, le génie des procédés apporte une aide précieuse pour relever ces défis puisqu'il concerne l'ensemble des connaissances scientifiques et technologiques nécessaires aux transformations physico-chimiques et biologiques de la matière première et de l'énergie en un produit finement ciblé pour le consommateur. Mais il faut souligner par exemple qu'aujourd'hui 60 % des produits vendus par une entreprise chimique sont cristallins, polymères ou sous forme de solides amorphes qui doivent répondre aux normes standards.

Il en va de même pour les produits pâteux ou émulsifiés. **Les procédés pour les fabriquer de façon maîtrisée** nécessitent une connaissance des phénomènes physico-(bio)chimiques, de transferts et de transports intervenant aux différentes échelles de temps et d'espace de la chaîne de production (figure 2).

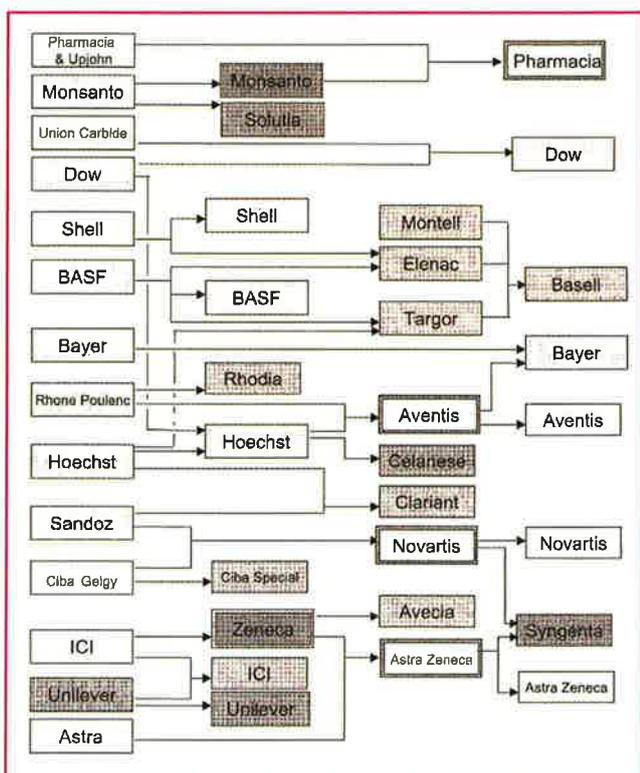


Figure 1 - Restructuration des industries chimiques (selon Felcht, 2002).

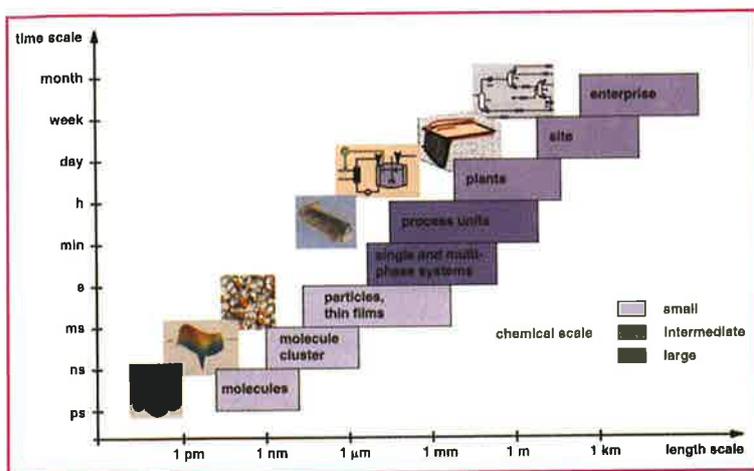


Figure 2 - Échelles de la chaîne de production (« the supply chain »).

Ainsi, la traduction des processus moléculaires en lois phénoménologiques macroscopiques pour créer et maîtriser, par des procédés performants et sûrs, les propriétés d'usage et la fonctionnalité des produits, constitue l'approche actuelle du génie des procédés, ce que j'appelle le génie du triplé « Processus moléculaires-Produit-Procédé (G3P) ». C'est une approche pluridisciplinaire systèmes intégrés multiéchelles d'espace et de temps. Portée par la puissance croissante des outils informatiques, cette approche est rendue possible grâce aux énormes avancées en modélisation moléculaire, en instrumentation scientifique, dans les nanotechnologies et dans le traitement de l'information (signal et image). Et elle doit conduire à une meilleure connaissance et à la maîtrise des risques industriels pour une chimie et une parachimie sûres et durables.

De ce fait, les enseignements et recherches en génies chimique et des procédés sont menés dans quatre directions en rapport avec les enjeux sociétaux :

1. Augmenter la productivité et la sélectivité à l'aide d'opérations intelligentes et d'un contrôle multiéchelle des processus : cela conduit à intensifier les processus élémentaires par apport localisé d'un flux « informé » d'énergie ou de matière et nécessite l'utilisation de microtechnologies pour un **transfert d'informations homme-procédé** (dans les deux sens). Cela demande des modèles mathématiques élaborés (mais pas trop) et des réseaux de nano- et micro-capteurs locaux, un fin contrôle informatique des processus élémentaires de cinétique et de transfert de matière, de chaleur et de quantité de mouvement, et des connaissances en imagerie en milieux réels, opaques et granulaires. On peut citer la nanoconception sur mesure (« nanotailoring ») de structures catalytiques contrôlées aux échelles moléculaires ou supramoléculaires *via* des synthèses nanostructurales (figure 3). Il est aujourd'hui possible de concevoir et réaliser des matériaux structurés aux propriétés contrôlées aux échelles nano et micro.

2. Conception de nouveaux équipements basés sur des principes scientifiques, de nouveaux modes de fonc-

tionnement opératoires et de nouvelles techniques de production (« **process intensification** ») : **séparateurs hybrides multifonctionnels** totalement contrôlés qui couplent ou découplent les processus élémentaires, transfert-réaction-séparation (distillation réactive, cristallisation réactive, technologies membranaires, garnissages structurés...), et **miniaturisation, modularisation et décentralisation** pour les modes de production, notamment pour les produits dangereux. Ainsi, la réduction du nombre d'équipements unitaires conduit à une diminution des coûts d'investissement et à des économies d'énergie significatives. De plus, l'amélioration de la sélectivité en produits désirés conduit à une économie d'utilisation des matières premières et par suite, à une réduction des coûts opératoires (figure 4). Globalement, des réductions de coûts d'investissements et opératoires de l'ordre de 10 à 20 % peuvent être obtenues en optimisant ainsi les procédés.

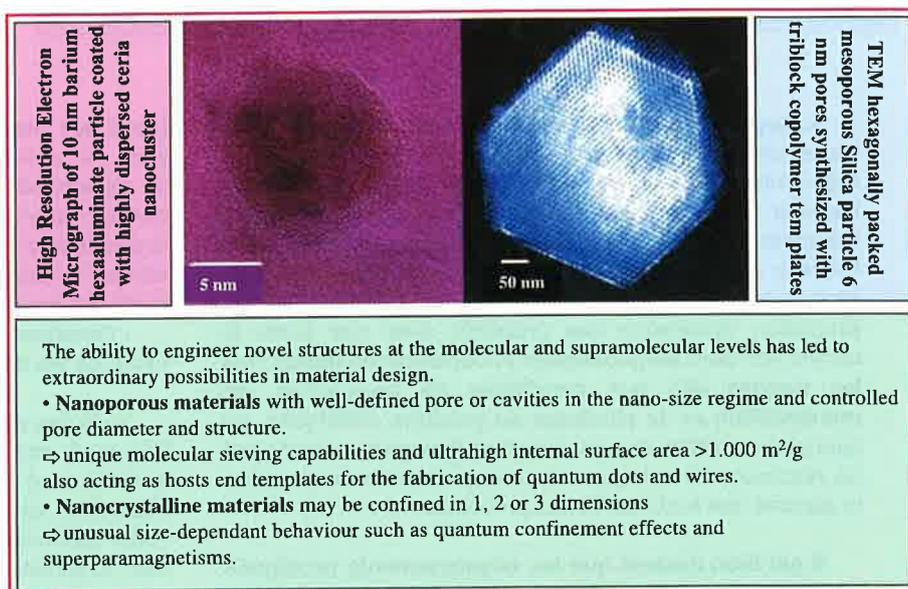


Figure 3 - Nanoconception de matériaux à structure contrôlée (Ying Y.J., *AIChE Journal*, 2000).

Mais la question se pose aujourd'hui de savoir si l'usine chimique du futur se miniaturisera à l'image des unités de production des industries de l'information et de la communication : la réponse proviendra inévitablement de la poussée au changement due à la demande sociétale en procédés plus sûrs et moins polluants pour remplacer certains complexes industriels actuels qui produisent des tonnes de déchets par tonne de produits utiles.

3. Appliquer la méthodologie du génie chimique à la formulation et au génie du produit (« product design and engineering ») : fabriquer la ou les propriété(s) d'usage pour des produits sophistiqués qui combinent plusieurs fonctions à la mésoéchelle du consommateur exigeant quant à la **sécurité** et à la **qualité** et les propriétés de ces produits et quant à l'analyse de leur cycle de vie. Ces dernières doivent être construites à partir de structures solides ou d'émulsions liquides contrôlées aux nano- et micro-échelles (goût, odeur, couleur, biocompatibilité, maniabilité, granulométrie...). Il est important de souligner que les coûts d'élaboration de ces produits sont du même ordre de grandeur que les dépenses affectées aux recherches-développements, représentant elles-mêmes 30 à 35 % du coût global.



Figure 4 - L'usine du futur (DSM Magazine, n° 83).

4. Appliquer la modélisation et la simulation à toutes les échelles espace-temps à des situations réelles et à des exploitations *in situ*, i.e. le contrôle en temps réel : depuis l'échelle moléculaire jusqu'à celle du grand complexe industriel. Cela comporte la simulation du comportement à l'échelle de l'ensemble des unités du complexe (figure 4). Ainsi, il est permis d'optimiser la production à l'aide d'une simulation dynamique des procédés avec des outils et techniques pour **diagnostiquer et contrôler en temps réel les risques liés aux conditions de production, de manipulation et de stockage de produits chimiques**, ou bien pour contrôler en temps réel les risques d'emballage de réacteurs. Et cela permet plus généralement d'assurer la sécurité des hommes et des procédés.

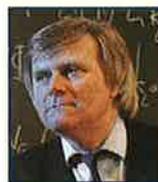
Il est bien évident que les enseignements prodigués et les recherches menées en génie des procédés dans ces quatre voies sont totalement sensibilisés au développement et à la diffusion de la culture du risque pour améliorer la valeur et l'image de la chimie en France, et plus généralement pour aider à répondre à un certain nombre d'enjeux sociétaux, pour ne citer que celui du développement durable, avec ses trois composantes **business**, comportant une meilleure conversion et sélectivité de la matière et de l'énergie pour obtenir le produit désiré par le consommateur, **environnementales** et **sociétales** (sécurité des produits et des installations).

C'est ainsi qu'en recherche, en formation initiale ou en formation continue dans la plupart des grandes écoles de chimie et de génie des procédés françaises, en plus des domaines de base traditionnels (thermodynamique,

cinétique, transferts d'extensités, théorie des réacteurs, automatique et contrôle de procédés), les recherches et/ou les enseignements sur la culture du risque concernent les domaines suivants :

- **le risque électrostatique** (notamment dans les procédés industriels et/ou pour les caractéristiques de sécurité des produits) ;
- **l'explosion de poussières et liquides inflammables** (quels risques, quelle accidentologie et quelles préventions et protections pour les poussières ?) ;
- **la calorimétrie**, un **outil indispensable à la sécurité** (par ex. pour le contrôle de l'emballage des réacteurs) ;
- **l'analyse thermique**, un outil lors du stockage d'un produit ;
- **la sécurité de la manipulation des poudres** ;
- **le retour d'expériences accidentelles en chimie fine concernant la sécurité des installations** : a) étude du procédé ; b) intégration des paramètres de sécurité et mise en place des parades nécessaires à la prévention du risque dans la conception et la réalisation des installations ; c) exploitation rigoureuse des installations ; d) facteur humain dans la sécurité des installations, avec le respect de la qualité des consignes et des modes opératoires, la formation et l'expérience des opérateurs ; e) obtention du produit (ciblé par le consommateur) ;
- **l'analyse** multiéchelles d'espaces et de temps **du cycle de vie des produits...**

Voilà des exemples parmi d'autres illustrant l'apport que l'on peut attendre du **génie des procédés aux enjeux sociétaux** et ce, dans le contexte actuel « demande du marché et de la société versus offres technologiques » ; l'offre technologique étant elle-même totalement tributaire des avancées scientifiques, notamment des avancées pluridisciplinaires en sciences du génie des procédés, sciences de l'ingénieur s'il en est !



Jean-Claude Charpentier

est directeur de l'École Supérieure de Chimie Physique Électronique de Lyon* et président de la Fédération Européenne de Génie Chimique.

* CPE Lyon, 43 bd du 11 Novembre, BP 2077, 69616 Villeurbanne Cedex.

Tél. : 04 72 43 17 02. Fax : 04 72 43 16 70.

Courriel : charpentier@cpe.fr

<http://www.cpe.fr>

Retrouvez la SFC et L'Actualité Chimique sur la toile

<http://www.sfc.fr>

L'innovation au service de la croissance et de l'emploi en Europe

Le 3^e European Business Summit
(Bruxelles, 11-12 mars 2004)

Gilbert Schorsch



L'European Business Summit (EBS)

C'est en 2000 qu'à l'initiative de la Fédération des Entreprises Belges (FEB) et de l'Union Européenne des Entreprises de l'Industrie et du Commerce (UNICE), les conférences EBS ont été mises en place.

Ces journées – où se rencontrent responsables de la Commission européenne et de l'industrie – visent la concertation sur les objectifs affichés lors de la réunion du Conseil européen de Lisbonne en 2000 : « faire de l'Europe, d'ici 2010, la puissance économique mondiale la plus compétitive ».

Pour la 5^e édition, qui a réuni près de 1 000 participants, les organisateurs avaient retenu comme thème : « **Recherche et innovation : une stratégie européenne pour plus de croissance et d'emploi** ». Avant le renouvellement de la Commission européenne en juin, cette réunion revêtait un intérêt particulier : elle permettait d'évaluer le chemin parcouru en cinq ans. Témoignages et réflexions prospectives se sont succédés pendant deux jours sous forme de conférences et de tables rondes. Occasion pour quelques-uns des principaux **responsables de la Commission** de justifier leur action : Philippe Busquin (promoteur des 3 % de R & D/ PIB d'ici 2010), et Margot Wallström (initiatrice du *Livre Blanc* sur la chimie et la réglementation REACH – *Registration, Evaluation, Autorisation of Chemicals* – en cours de discussion...). Occasion aussi pour les **chefs d'entreprises** présents de réagir aux initiatives de la Commission et de faire quelques propositions : Daniel Janssen (président du Conseil d'administration de Solvay), Tom McKillop (PDG d'Astra-Zeneca), Jürgen Strube (président du Conseil de surveillance de BASF, mais également président de l'UNICE...).

Mais la conférence ne s'est pas réduite à un simple dialogue Commission/industrie. Confrontés quotidiennement aux problèmes de la croissance et de l'emploi dans leur pays, des **responsables politiques** sont venus apporter une contribution intéressante. Plusieurs d'entre eux ont suggéré des orientations concrètes : Mary Harney (vice-premier ministre de l'Irlande et présidente du Conseil de la compétitivité, car l'Irlande préside durant le 1^{er} semestre 2004 le Conseil européen), Fientje Moerman (ministre de l'Économie, du Commerce extérieur et de la Politique scientifique de Belgique) et son collègue Didier Reynders (ministre des Finances) pour ne donner que quelques noms...

Compétitivité européenne : état des lieux

Il est impossible de rendre compte de toutes les contributions dont ces deux journées ont porté témoignage. Fort judicieusement, les organisateurs avaient retenu de traiter à fond un nombre limité de situations plutôt que d'illustrer superficiellement l'ensemble des problèmes.

Des situations contrastées selon les technologies et les marchés...

Parler de la compétitivité européenne d'une façon générale n'a aucun sens. Il faut aborder la question par marchés et technologies. Quels sont les enseignements de ces journées ?

Les mauvaises nouvelles d'abord...

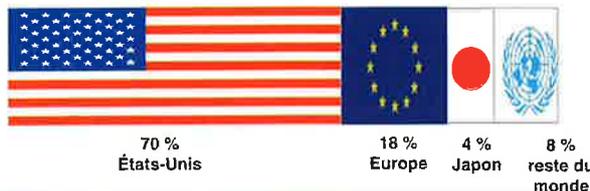
Commençons par signaler ce qui restera la grande et désagréable surprise pour nombre de participants : **la brutale dégradation de la compétitivité de l'industrie pharmaceutique européenne durant ces douze dernières années**. Dirigeants de grandes entreprises pharmaceutiques européennes (Tom McKillop, PDG d'Astra-Zeneca ; Jean Stéphane, président de GSK Belgique...), de filiales

L'industrie pharmaceutique européenne en 2002.

(D'après la conférence de Tom McKillop, PDG d'Astra Zeneca, source : EFPIA, données 2002).

- **5^e secteur industriel**
(3,5 % de l'industrie manufacturière européenne)
- **582 500 d'emplois hautement qualifiés**
(dont 91 500 en R & D)
- **19,8 billion € investis en R & D**
(environ 20 % de toute la R & D en Europe et un pourcentage supérieur à tous les autres secteurs)
- **Excédent commercial de 40 billion €**
L'Europe reste un exportateur de médicaments. La pharmacie représente la plus grande contribution parmi les industries high-tech de la balance commerciale européenne.

Analyse géographique (pour les principaux marchés) des ventes de nouveaux médicaments entre 1998 et 2002 (source: IMS, 2003)



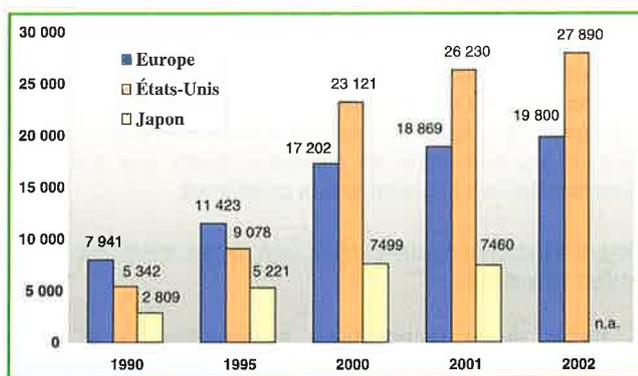
européennes de sociétés américaines (Didier de Chaffoy, vice-président R & D de Johnson & Johnson Europe...), et représentants de l'EFPIA, l'European Federation of Pharmaceutical Industries and Associations (Brian Ager, directeur général de cette fédération) se sont déplacés pour exposer la situation. Quatre chiffres, souvent cités, suffisent pour prendre conscience de la situation et pour la comprendre :

- entre 1990 et 2002, le nombre de molécules actives mises sur le marché par les entreprises européennes est passé de 60 à 20 % ;

- dans le même temps, les budgets de R & D ont été multipliés par 5 aux États-Unis et seulement par 2,5 en Europe !

L'évolution des budgets de R & D entre 1990 et 2002.

(D'après la conférence de Tom McKillop, PDG d'Astra Zeneca).



Le marché et les moyens étant à présent aux États-Unis, les principales entreprises européennes sont en train d'y délocaliser leurs centres de recherche. Dans ce contexte, l'objectif, sur une base française, du rapprochement de Sanofi et d'Aventis, absents du Sommet, n'est-il pas déjà dépassé ?

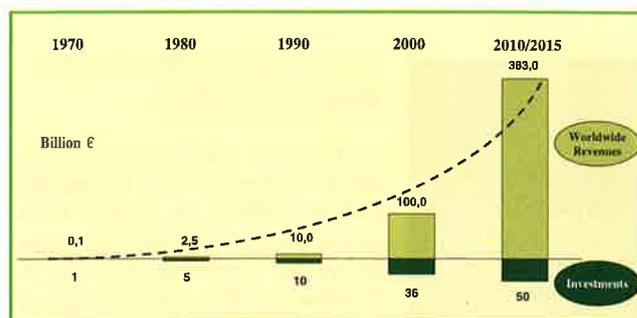
Cette dégradation des positions européennes est d'autant plus inquiétante qu'elle s'accompagne simultanément de l'incapacité pour l'industrie européenne des biotechnologies de se développer au rythme de sa concurrente américaine. Il n'y a ni secret ni potion magique. L'investissement américain y est dix fois plus important ! Et encore, l'Europe ne fait de la figuration que grâce à la contribution de l'Angleterre. C'est bien dommage quand on sait que les biotechnologies constituent aussi une compétence de base pour l'innovation dans le domaine de l'agroalimentaire et... la lutte contre le bioterrorisme, comme nous le verrons ci-après.

Au lendemain des attentats de Madrid, la table ronde (prévue de longue date) consacrée aux **problèmes de la sécurité, en matière de défense et de lutte contre le bioterrorisme** a pris une signification et une importance particulières. Le ton des intervenants était à la gravité. Le commissaire européen pour la Justice et la Sécurité intérieure, le Portugais Antonio Vitorino, a d'ailleurs pris la parole dès le début de la session afin de pouvoir partir plus rapidement pour Madrid. A nouveau, les moyens consacrés par les États-Unis à la défense sont supérieurs à ceux de l'ensemble des autres pays de l'OTAN (facteur 2,5 pour les investissements et facteur 5 pour la R & D), comme l'ont montré les interventions de Daniel Deviller (EADS, European Aeronautic Defense and Space Company) et Scott A. Harris (Lockheed Martin). L'adaptation des moyens de surveillance et de défense des espaces demande des **matériaux** de plus

en plus sophistiqués (pour les **systèmes de guidage et de détection des fusées, missiles et autres garde-côtes...**). Certes, l'European Aeronautic Defense and Space Agency coordonne ses actions avec celles de l'OTAN ; mais dans le contexte mondial, ce marché exige que les entreprises européennes (outre EADS déjà citée, BAe Systems, Thalès ou Finemeccanica...) restent compétitives pour espérer concurrencer les américaines.

Évolution des investissements et des recettes du marché mondial des biotechnologies.

(D'après la conférence de Philippe Archinard, chef exécutif d'Innogenetics ; source : BCG-Biotech-Study, BCG Estimate).



La lutte contre le bioterrorisme, autre volet de la sécurité, exige une double action. D'abord la surveillance de la circulation des personnes, c'est-à-dire la **détection de la falsification des visas et des passeports**, pour laquelle le recours à des **biocapteurs/détecteurs** sera de plus en plus fréquent. Ensuite, la mise au point de **remèdes contre les armes « sales »** : des bactéries aux virus, en passant par les gaz asphyxiants et suffocants. Celle-ci s'avère particulièrement délicate puisqu'il s'agit simultanément selon Philippe Kourilsky (directeur général de l'Institut Pasteur) « d'adapter des vaccins existants à des risques inconnus et trouver de nouveaux vaccins contre des effets biologiques connus ».

Consolons-nous : qu'il s'agisse des matériaux pour la défense ou de la lutte contre le terrorisme, la chimie et la biochimie apportent une contribution décisive et la transition vers l'industrie chimique.

De bonnes nouvelles ensuite...

Fort heureusement, **l'Europe détient encore le leadership dans un certain nombre de marchés et de technologies**. Parmi celles-ci figure encore **l'industrie chimique** avec un CA mondial 2002 de 1 841 milliards d'euros dont 34 % pour l'Europe et 29 % pour les États-Unis. Pour combien de temps encore, compte tenu de la future réglementation REACH ? Tous les intervenants sans exception ont dénoncé **les méfaits prévisibles de REACH, non seulement pour l'industrie chimique, mais pour l'ensemble de l'industrie**. « Une maladresse », selon Luc Vansteenkiste, actuel président de la FEB ; « une erreur », selon Daniel Janssen de Solvay, dans son appel à la Commission. Des ajustements se feront pour ne pas pénaliser indûment l'industrie européenne. Compte tenu de cette incertitude, la situation de l'industrie chimique n'a pas été débattue davantage.

L'industrie agroalimentaire par contre, représentée par Jean Martin (Unilever, et président de la Confédération européenne des industries alimentaires et des boissons), a

Le poids de l'industrie agroalimentaire en Europe.

(D'après la conférence de Dominique Taeymans, directeur des affaires réglementaires et scientifiques, Conformation of the Food and Drink Industries of the EU).

- Premier secteur industriel européen (13% de la valeur de la production industrielle, 11% des emplois)
- Production : 626 billion €
- Exportation : 45 billion €
- Un secteur dominé par les PME-PMI
- 3,6 millions d'employés

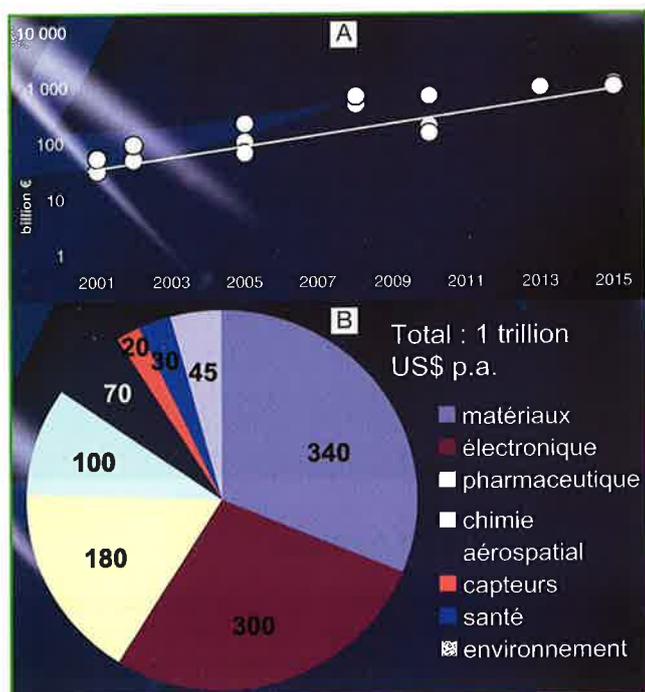


donné lieu à débat dans une table ronde. Pour Christian Patterman, directeur des biotechnologies à la Commission pour l'agriculture et l'industrie agroalimentaire, l'Europe est en mesure de préserver sa position dominante. L'intervention de Pierre Jean Everaet, le PDG d'Interbrew (le brasseur de Stella-Artois), a illustré à point nommé la suprématie de l'Europe. **Interbrew – dont l'effectif est passé de 6 500 à 73 000 en huit ans ! – ne vient-il pas de s'installer dans le fauteuil de leader mondial de la bière après l'acquisition récente du champion national brésilien AmBev ? Il rejoint ainsi le club des leaders mondiaux de**

Le futur marché mondial des nanotechnologies.

A- les chiffres d'affaires (source : DG Research) ; **B-** les domaines d'application dans les 15-20 années à venir, en billion US\$ p.a. (source : Departement of foreign Affairs and International Trade, Canada).

(D'après la conférence de Ezio Andreta, directeur des industries technologiques de la Commission européenne).



l'agroalimentaire d'origine européenne, formé entre autres de **Nestlé** (eaux minérales et café...), **Unilever** (glaces et thé...) ou **Danone** (produits laitiers frais...).

Cette industrie devra cependant rester très attentive à la sécurité, et en particulier au risque de **contamination** des aliments, à leur **traçabilité** (« de la fourchette à la ferme ») et, de plus en plus, à leur **contenu nutritionnel**. Il faudra réussir à combiner harmonieusement agriculture traditionnelle, culture organique et biotechnologies, pour gagner la confiance du consommateur. Mais les problèmes ne pourront plus se régler directement entre scientifiques et industriels. Les consommateurs devront être davantage associés aux évolutions des produits et des législations, comme l'a souligné Jim Murray, le directeur de l'Organisation des consommateurs européens.

La session consacrée aux **nanotechnologies** a conclu que si l'Europe veut garder son « leadership » actuel, elle devra rapidement identifier les secteurs d'application pratiques et rentables de ces technologies.

L'innovation : pas uniquement un problème de moyens...

Les exemples ci-dessus ont bien sûr mis en relief le déficit de moyens de l'Europe. Ce n'est pas une réelle nouveauté. Une session spéciale avait été programmée sur le rôle des incitations financières et fiscales avec une question « *lubrifiantes ou abrasives pour l'innovation ?* ». Les analyses sont convergentes. **Les difficultés proviennent davantage du manque d'esprit d'entreprise et de vision des dirigeants européens et de l'absence de propositions et de projets intéressants à développer, que du manque de moyens !** Retenons trois sources ou propositions de financement des projets d'innovation :

- D'abord la **Banque d'Investissement Européenne**, alimentée à 50 % par les banques centrales des pays membres, à 30 % par la Commission et à 20 % par des banques privées européennes, **doit jouer le rôle de catalyseur** (Francis Carpenter, directeur du Fond européen d'investissement).

- Une initiative belge ensuite : la **réduction de 50 % des impôts est accordée à 72 établissements scientifiques en Belgique**. Ceux-ci peuvent désormais utiliser ces fonds sans le contrôle de l'État. La mesure sera transposée ultérieurement aux entreprises. Bel exemple de confiance et d'appel à l'implication des responsables (Didier Reynders, ministre des Finances et Fientje Moerman, ministre de l'Industrie, du Commerce extérieur et de la Politique scientifique (intéressant ?) en Belgique).

- Enfin l'exemple polonais, surprenant et un brin provocateur : « *Pour passer du charbon et des patates à la haute technologie, les créateurs d'entreprise polonais investissent leurs économies personnelles, celles de leurs familles et amis, sans attendre subventions ou prêts* » (Henryka Bochniarz, ancienne ministre de l'Industrie et du Commerce extérieur, et actuelle présidente du patronat privé en Pologne). C'est certainement un bon moyen d'assurer l'utilisation optimale des fonds investis... Est-ce suffisant pour vraiment initier des projets porteurs de croissance significative ?

Les freins culturels à l'innovation

Les intervenants ont souvent fait allusion aux spécificités européennes, à savoir le double divorce. **Divorce d'abord**

entre la population et les scientifiques. « La république n'a pas besoin de savants » reste plus que jamais d'actualité et s'applique à toute l'Europe. La science et les technologies y sont perçues par leurs retombées néfastes. **Absence de dialogue et simple cohabitation ensuite**, plutôt que divorce, **entre scientifiques et industriels** qui ne tirent pas ensemble dans le même sens. Les **inventions**, c'est-à-dire les publications ou les brevets, ne conduisent pas systématiquement à des **innovations**. **Il faut un besoin et un marché pour qu'il y ait innovation, donc emploi et croissance.** Selon une étude d'un institut suisse de St. Gallen, il faut 175 idées ou inventions pour aboutir à un succès ou une réelle innovation. N'insistons pas. Un important travail de conviction reste donc à faire !

Bilan et orientations des actions de la Commission

Saluons le contenu et la franchise des discussions. Dans la séance finale, les industriels à la tribune ont clairement indiqué leur position. « **L'Agenda de Lisbonne** » (voir *L'Act. Chim.*, janvier 2003, p. 26) **reste une bonne initiative**. Il fixe un bon cadre et les moyens nécessaires à l'innovation en Europe. Cependant, trop dépendant des politiques nationales, **les chiffres et les mentalités n'ont malheureusement guère bougé en cinq ans**. Il y a les bons élèves du professeur Busquin (en Europe du Nord), et les mauvais (plutôt au Sud). Il y a bien un problème de mentalité. Davantage de rigueur, de concertation et d'actes dans le Nord. Des messages contradictoires ont aussi été lancés et des erreurs commises (voir REACH ci-dessus)... Bref, les industriels n'ont pas été tendres. Par contre, nous regrettons que les responsables de la Commission n'aient pas profité du face à face pour fustiger le manque de volontarisme de l'industrie en matière de financement de la recherche. Car en examinant de près les chiffres, c'est bien la contribution industrielle qui est souvent défailante.

N'accablons donc pas trop la Commission. Ses budgets de R & D ne représentent que 5 % de l'ensemble des budgets européens de R & D ! Ayons conscience des difficultés techniques, inhérentes au fonctionnement des institutions. Retardés par le vote à la majorité qualifiée, **les processus décisionnels sont trop lents**. « *Est-il normal, que pour transférer un chercheur de bon niveau de France en Italie, il est recommandé de l'envoyer d'abord aux États-Unis ?* » caricature Mary Harney.

Le bilan est donc mitigé. Il est temps de **passer maintenant des paroles aux actes** : « *Nous en parlons, nos concurrents le font* » concluait un orateur.

Pour le 7^e PCRD, actuellement en cours de préparation, et pour donner le bon exemple, **la Commission propose donc carrément un doublement, de 20 à 40 milliards, de ses budgets.**

Laissons le mot de la fin à **Mary Harney**, l'énergique vice-premier ministre d'Irlande. Elle réclame à la fois pour l'Europe **un changement d'attitude et de perspective**. Elle préconise la **politique des 3T** pour réussir la bataille de l'innovation : **talent**, par l'excellence de la formation ; **technologie**, par une meilleure coopération entre universités et entreprises ; enfin,



Mary Harney, vice-premier ministre de l'Irlande, qui préside actuellement le Conseil européen.

tolérance, par une meilleure écoute dans les communautés scientifiques, et entre celles-ci et la société civile. L'Europe aura bien besoin de s'appuyer sur ces 3T pour réussir l'intégration des dix nouveaux pays.

Le renouvellement de la Commission et l'adoption probable de **la prochaine Constitution** devraient permettre de corriger les défauts de jeunesse recensés et de **donner enfin à l'Europe la vision dont elle a manifestement besoin**. **Il faut, comme le dit Romano Prodi, actuel président de la Commission européenne, réussir « l'union des cerveaux ».**

Commentaires

Les industries traditionnelles ont aussi besoin d'innovation

Une constatation d'abord qui n'est pas ressortie aussi nettement des débats qu'elle aurait dû. La Commission prend progressivement conscience qu'elle a peut-être trop soutenu, par le passé, des projets « *souvent aléatoires et dénués d'objectifs économiques sensés* » dans les nouvelles technologies ou les « high-tech ». La préservation des emplois passe aussi par un **soutien aux industries traditionnelles**. Ce sont les exemples de l'agroalimentaire qui ont le mieux illustré cette nécessité. **Le temps moyen de préparation des repas d'une famille de 4 personnes est passé en 25 ans de 2 heures à moins d'un quart d'heure**. Ce raccourcissement n'a été possible que grâce à des innovations dans la chaîne du froid et les techniques de réchauffage (du micro-ondes au chauffage par induction). De la même manière, Interbrew n'a pu devenir le leader mondial de la bière que grâce à des innovations majeures de ses procédés de filtration et d'emballage. Dans des industries traditionnelles, des gisements d'innovations existent encore (aéronautique, acier, automobile, textile, génie civil, mais aussi industrie chimique...). C'est pourquoi la Commission propose, pour le 7^e PCRD, la mise en place dans ces domaines de **plate-formes technologiques** pour préserver des emplois européens qui risquent sinon de se délocaliser. La mise en place d'une plate-forme chimique est à l'étude.

Quelques exemples d'innovations dans une industrie traditionnelle.

(D'après la conférence de Pierre Jean Everaert, Interbrew).

INNOVATIONS at INTERBREW AmBev

- Beer filtering using crystals & minerals
- Plastic collapsible & stacking crates 24 bottles
- Home use dispenser for Draft beer
- Refrigerated Car & Pick n'ick Draft beer dispensers
- PET (plastic) bottles world-wide acceptance

Libérons toutes les énergies

Cette réunion a aussi valu par la **diversité des intervenants**. Nous avons été séduits par des intervenants qui traditionnellement n'ont pas beaucoup voix au chapitre. Comme vous l'aurez remarqué, **les femmes** – de **Mary**

Quelques phrases « choc » sur la formation, entendues à l'EBS

« L'évaluation des étudiants privilégie trop la conformité aux attentes de l'enseignant au détriment de la formation de leur esprit critique ».

« La formation des docteurs n'est pas adaptée. Il n'y a pas assez de « carrières » pour eux dans les universités et ils n'ont pas du tout les compétences requises pour travailler directement en entreprise ».

« Les collaborations entre les universités et les entreprises manquent de cohérence et d'efficacité ».

« Les dépôts de brevet sont difficiles et les discussions sur le brevet européen tardent à se concrétiser ».

Harney à Fientje Moerman, en passant par Henricka Bochniarz – ont eu des interventions percutantes et originales. Journée de la femme du 8 mars oblige ? De la même manière, si les grands pays fondateurs de l'Europe ou les grandes entreprises brillent par leur absence, des **pays plus petits ou moins influents** (Irlande, Finlande, Pologne...), ou des **représentants de start-up** dans les nano- ou les biotechnologies (belges, irlandaises...) ont apporté des contributions originales, sans pratiquer la langue de bois. Un jeune entrepreneur n'a pas craint de mettre en cause l'absence de capacités « managériales » et de vision de beaucoup de dirigeants industriels en Europe ! Il n'a pas été contredit par la salle... Une recommandation donc : **que l'Europe puisse profiter pleinement de cette diversité !**

Lueurs d'espoir en guise de conclusion

Cette discussion tripartite **Commission/élus politiques/monde industriel** s'est révélée particulièrement riche. Elle a permis d'illustrer les divers aspects du problème de la croissance et de l'emploi. Elle a sensibilisé les participants aux **difficultés et marges de manœuvre étroites** que rencontrent les politiques **pour concilier le souhaitable** (les propositions émises de la Commission) **avec le réalisable** (les actions des entreprises).

Suivre des conférences mettant en exergue les faiblesses de l'Europe s'avère plutôt décourageant. Concluons donc par deux messages d'optimisme.

Le premier a été délivré lors de la conférence par Erkki Liikanen, le Commissaire de la DG Entreprise et Société de l'Information. A la fin d'une de ses récentes interventions aux États-Unis, où il présentait les handicaps de l'Europe vis-à-vis des États-Unis, un célèbre économiste l'a approché et lui a recommandé de ne pas trop se complaire dans ce type de comparaison. « *Dans les années 70, la comparaison États-Unis/Japon tournait invariablement à l'avantage du Japon ! On sait ce qu'il est advenu par la suite* » lui glissa-t-il à l'oreille, en lui recommandant donc d'avoir davantage confiance dans les capacités de l'Europe. Les événements ont donné tort à toutes ces prévisions désastreuses.

J'ai trouvé le 2^e signe d'espoir dans l'article que je lisais dans le Thalys, au retour de Bruxelles, dans *Chemical & Engineering News* du 23 février (p. 27-34). Il relate l'expérience zurichoise où l'Université et l'École polytechnique fédérale ont réussi, depuis quelques années, à attirer des enseignants américains, ou européens en poste aux États-Unis. La recette ? Des moyens, c'est-à-dire des budgets de fonctionnement, des laboratoires de pointe, pour des recherches en collaboration avec l'industrie locale, dans une saine ambiance d'émulation. La situation n'est donc pas aussi désespérée. L'exemple de Zürich vient à propos pour nous en convaincre !



Gilbert Schorsch

est membre du Comité de rédaction de *L'Actualité Chimique*, en charge de la rubrique Industrie.

* 250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris.
Courriel : CGSchorsch@aol.com

Bayer CropScience: a new world leader in crop solutions



Your partner for growth

www.bayercropscience.com



 Bayer CropScience

Cérémonie de remise des prix des XX^e Olympiades nationales de la chimie

Paris, 2 avril 2004

Michel Boyer

Le 2 avril dernier, la Cité des sciences et de l'industrie de Paris a accueilli les candidats et quelque 400 invités, issus majoritairement des milieux enseignant et industriel, à la cérémonie solennelle de remise des prix des XX^e Olympiades nationales de la chimie.

Animée par les « Bateleurs de la Science » autour du thème « Chimie et Beauté », un éclairage particulier a été donné au textile et c'est Philippe Desaulles, président de DuPont de Nemours France, qui a parrainé cette cérémonie.

Les 48 candidats, lauréats dans leur région puisque sélectionnés d'octobre à février sur quelque 2 500 lycéens participants, ont concouru au niveau national autour de trois épreuves réparties sur deux jours, mercredi 31 mars et jeudi 1^{er} avril : un « entretien de groupe », sorte de grand oral collectif, un « questionnaire » faisant suite à la conférence sur les textiles innovants d'Isabelle Ferreira, ingénieur chimiste à l'Institut Français du Textile et de l'Habillement, et enfin une épreuve « manipulation-protocole » en guise de travaux pratiques. Un film sur les coulisses du concours, réalisé par l'Union des Industries Chimiques (UIC) a présenté de façon ludique et à travers les réactions spontanées de déceptions et de joies, le travail des candidats pendant ces deux jours.

Le lendemain des épreuves, le palmarès a consacré **Cyrille Corpet** (Terminale S au lycée Pierre de Fermat de Toulouse) premier lauréat de ces XX^e Olympiades. Il recevra



De gauche à droite : Michel Boyer, président des Olympiades, Yves Jeannin, Académie des sciences, Cyrille Corpet, lauréat 2004, Jean Pelin, directeur général de l'UIC, Marie-Claude Vitorge, chargée de mission SFC, Claude Boichot, doyen de l'Inspection générale de sciences physiques et chimiques fondamentales, Marie-Élisabeth Borredon, déléguée régionale des Olympiades, et Mireille Galian, correspondante UdPPC. Photo D.R./R. Bourguet/Olympiades.

en novembre prochain la Médaille gravée de l'Académie des sciences sous la coupole de l'Institut de France.

Il est à noter la faible représentation féminine puisque seules 13 candidates se sont présentées au concours scientifique. La première récompensée est Héléne Fernandez (Terminale STL au lycée Hippolyte Fontaine de Dijon) qui s'est classée 4^e.

Quatre équipes de 1^{ère} littéraire ont également concouru en présentant un sujet de leur choix. Le 1^{er} prix est allé à Solène Havette et Léa Jeanson (Lycée Clemenceau de Reims) pour leur communication sur « les magiciens de la lumière » traitant de la création des vitraux, de la fabrication des verres et de la restauration des chefs d'œuvre.

Énoncés, corrigés des épreuves, liste des prix et noms des lauréats sont disponibles sur le site de la SFC (www.sfc.fr/Olympiades/olympiades.htm).

Vingtième anniversaire oblige, tous les candidats sont repartis avec encore plus de cadeaux que les années précédentes, les 40 partenaires (dont les 25 plus grands industriels français) ayant choisi de gâter ceux qui seront peut-être leurs chimistes de demain... Signalons que la SFC n'est pas en reste puisqu'elle contribue tous les ans au fonctionnement des Olympiades et qu'elle remet un prix à l'équipe pédagogique ayant encadré le premier lauréat. Les dix premiers et leurs enseignants pourront également découvrir *L'Actualité Chimique* durant une année.

A cette occasion, l'article de Larbi-Mourad Bouldjennet relatant 20 ans d'Olympiades (*L'Act. Chim.*, 2004, 273, p. 48) a été distribué aux 450 participants et reste disponible sur le site Internet de la SFC.

Cette cérémonie très réussie a été à l'image des Olympiades : un mélange de passion et d'émulation. Cet anniversaire est la confirmation d'une démarche exemplaire et originale qui consacre des lycéens passionnés au sein d'une plate-forme de rencontre entre le milieu des enseignants et celui des industriels.

Rendez-vous est pris à la rentrée scolaire 2004 pour les XXI^e Olympiades nationales de la chimie sur le thème « Chimie et Habitat », une science au service de l'innovation.

La cérémonie orchestrée par David Raffaele (UIC) – qui succède à Daniel Ayroles en tant que coordonnateur national des Olympiades – a vu se succéder les allocutions percutantes de Michel Boyer, président des Olympiades nationales de la chimie et maître de cette cérémonie, Jean Pelin, directeur général de l'UIC et Philippe Desaulles, président de DuPont de Nemours France.

Nous reproduisons ci-après le discours prononcé en ouverture par Michel Boyer.



Michel Boyer, président des Olympiades nationales de la chimie.
Photo D.R./R. Bourguet/Olympiades.

« Nous voici réunis pour fêter le XX^e anniversaire de la création des Olympiades nationales de la chimie, anniversaire que nous voulons marquer plus particulièrement.

Parmi l'ensemble des disciplines scolaires, la chimie possède une particularité, une originalité, c'est à la fois :

- Une **science**, science de la matière et de ses transformations, qui possède son propre langage, avec son alphabet à plus de 100 lettres ou atomes, ses règles de construction et de transformation des molécules et matériaux organisés, ses capacités d'analyse et de synthèse, de modélisation et de création de nouveaux matériaux à propriétés spécifiques.

- C'est également une **industrie**, capable de fournir à la société les produits ou matériaux entrant dans la composition de tous les objets de notre environnement, répondant à nos besoins quotidiens en matière de santé, d'habitat, de transport, de loisirs, d'agriculture, et bien d'autres encore.

Cette double composante de notre discipline lui vaut les réactions les plus diverses de la société : la passion de ceux d'entre nous qui la pratiquons, mais l'indifférence de ceux qui la méconnaissent et le rejet de ceux qui ne voient que les effets pervers d'une utilisation mal maîtrisée ou détournée.

La chimie, comme d'ailleurs les sciences d'une manière générale, ne jouit pas d'une image particulièrement attractive auprès de ce que l'on appelle le grand public et en particulier auprès des jeunes en formation. Notre société, fortement technologique, a cependant besoin de développer la culture scientifique du citoyen pour être mieux comprise, acceptée et dirigée, et de former des scientifiques de haut niveau pour répondre aux besoins de la recherche, du développement, de la production et de la transmission du savoir.

D'où les initiatives qui ont été prises depuis une vingtaine d'années pour créer les moyens de diffusion de la culture scientifique au plus grand nombre ; par exemple la Cité des sciences et de l'industrie, ouverte en 1986, dont je remercie vivement son président, Monsieur Jean-François Hebert, pour son accueil aujourd'hui. La Cité, avec son double qualificatif « sciences et industrie », répond particulièrement à notre préoccupation de faire se rencontrer la science et l'industrie chimique dans l'enseignement.

Les Olympiades nationales de la chimie ont été conçues, il y a 20 ans, avec cette même préoccupation de reconnaissance des formations et de promotion des carrières scientifiques. L'auteur de cette initiative était Louis Barbouteau, du groupe industriel Elf-Aquitaine, qui a été accompagné très

rapidement par Gérard Montel, premier président des Olympiades nationales de la chimie, et par une équipe de professeurs dont je citerai Jean-Pierre Foulon, Josette Fournier, Alain Hebert, Marcel Burie et Robert Panico.

De nombreux partenaires se sont associés à cette initiative, comme le Comité National de la Chimie, la Société Française de Chimie, l'Union des Physiciens, l'Union des Industries Chimiques, le ministère de l'Éducation nationale, ceux de la Recherche, de l'Agriculture, de nombreuses entreprises chimiques à titre individuel ou collectif, de nombreuses grandes écoles et universités.

L'**objectif principal** de ces Olympiades était de **motiver** les élèves scientifiques pour des études supérieures en chimie afin d'assurer les besoins en techniciens supérieurs, en ingénieurs, en chercheurs et enseignants formés à la chimie. Les moyens mis en œuvre reposaient sur la découverte des **applications** de la chimie dans la **vie quotidienne et la société**, la **valorisation de l'expérimentation** comme méthode d'enseignement, et le **contact** effectif des élèves et de leurs professeurs avec les **professionnels** dans l'industrie et la recherche.

C'est ainsi qu'a été mis en place un réseau académique régional de centres d'Olympiades de chimie, animés par des enseignants des universités, des professeurs de lycées et de classes préparatoires, des ingénieurs de l'industrie chimique et avec la collaboration des techniciens de laboratoires des lycées. Ces centres offrent aux élèves volontaires un programme d'activités extrascolaires comportant principalement :

- des séances de laboratoire qui traitent de sujets liés à la vie quotidienne, comme la synthèse de l'allantoïne (molécule de base en cosmétologie) ou de la saccharine (édulcorant de synthèse) ;
- des visites d'entreprises et de laboratoires de recherche ;
- des conférences assurées par des professionnels.

A l'issue de ce programme, des concours, dotés de nombreux prix, sont organisés chaque année, au niveau régional, puis au niveau national : celui qui nous réunit aujourd'hui.

Depuis leur création il y a 20 ans, plus de 50 000 élèves de terminales scientifiques ou techniques ont pu bénéficier de cet apport culturel original résultant de l'association du monde éducatif et du monde professionnel dans un discours commun.

Comment les élèves réagissent-ils aux Olympiades de chimie ? Quel est l'impact sur leur cursus ultérieur ?

A partir des discussions que nous avons avec les candidats au moment des concours, et à partir de deux mini-enquêtes effectuées sur un échantillon de lauréats des dernières années, on peut dire :

- que l'intérêt principal des élèves porte sur les séances de laboratoire. Elles leur permettent d'expérimenter sur des composés proches de leur vie quotidienne ou de leurs préoccupations, dans une contrainte moins hiérarchique avec des enseignants plus disponibles, les uns et les autres étant volontaires ;

- qu'ils sont également très intéressés par les visites d'entreprises ou de laboratoires où ils peuvent rencontrer des professionnels de la chimie et se faire une meilleure idée des métiers exercés.



Échanges d'idées sur la chimie au cours du buffet entre Pierre Aldebert (CNRS) et deux candidats 2003, dont Thibaut Bondoux, lauréat 2003 et premier à avoir reçu la Médaille de l'Académie des sciences. Il est actuellement en classe préparatoire PCSI (lycée Saint-Louis, Paris). Photo D.R./L'Act. Chim./SBS.

Tous les élèves interrogés disent garder un excellent souvenir des Olympiades de chimie, même s'ils ne pratiquent pas la chimie ultérieurement. Ce fait est très important compte tenu du devenir de ces élèves : la quasi-totalité poursuit des études supérieures, principalement en grandes écoles scientifiques. Les Olympiades ont souvent conforté leur désir d'études supérieures et le choix de la chimie pour une partie d'entre eux (on en retrouve plus de 20 % dans les écoles de chimie). Pour les autres, compte tenu des études suivies (École polytechnique, Écoles normales supérieures...), leur situation de cadre ayant eu un contact positif avec notre discipline ne peut être que bénéfique pour son image et sa place dans la société.

Quel est maintenant l'impact des Olympiades sur l'enseignement même de la chimie ?

On trouve une première retombée de notre activité dans le contenu des programmes de chimie de l'enseignement secondaire qui a fait l'objet de deux réformes pendant cette période. Ces réformes ont fait largement appel aux enseignements tirés des expérimentations pédagogiques développées dans les Olympiades. Sans entrer dans le détail, citons la prise en compte de l'approche thématique pour aborder la chimie sous un angle attractif pour les élèves. Citons également l'introduction d'une épreuve d'évaluation des connaissances expérimentales des candidats au baccalauréat.

D'une manière plus qualitative, les Olympiades ont fait largement évoluer la façon d'enseigner la chimie, l'état d'esprit de cet enseignement devenant moins dogmatique pour faire une plus large place à l'expérience.

Si le nombre de professeurs impliqués directement dans les Olympiades est nécessairement très limité, une proportion beaucoup plus importante y est sensibilisée grâce à la diffusion très large des sujets des concours régionaux et nationaux par l'Association des Olympiades nationales de la chimie accompagnée par l'Union des

Professeurs de Physique et Chimie et par la Société Française de Chimie.

Ces documents pédagogiques sont par ailleurs une aide très recherchée pour la formation des futurs professeurs dans les Instituts universitaires de formation des maîtres (IUFM). Certains d'entre eux favorisent même les stages de leurs élèves dans les centres d'Olympiades, ce qui accrédite la valeur de modèle pédagogique de ceux-ci.

Comment les Olympiades ont-elles influé sur le statut de la discipline chimie dans l'enseignement ?

Traditionnellement, la chimie est associée à la physique dans l'enseignement du second degré, du moins en France. Les professeurs de sciences physiques enseignent à la fois la physique et la chimie, mais sont généralement plus formés en physique qu'en chimie.

Le statut de la chimie a commencé de s'affirmer dans l'enseignement secondaire vers les années 1960 avec la création de l'**agrégation de chimie** distincte de celle de physique.

Il faut attendre les années 90 pour que la Conférence des grandes écoles propose la création de trois filières dans les classes préparatoires scientifiques, dont une filière physique-chimie (PC) dans laquelle le poids de la chimie est équivalent à celui de la physique. Parallèlement, l'École polytechnique, très tôt partenaire des Olympiades de chimie, ouvre une majeure chimie en 1^{ère} année d'école, puis recrute une partie de ses élèves à partir de la filière PC, reconnaissant ainsi la valeur de la formation expérimentale qu'impose la chimie en regard d'une formation plus abstraite donnée par les mathématiques.

Il faudra attendre l'année 2000 pour que l'**Inspection générale de sciences physiques** devienne l'**Inspection générale de sciences physiques et chimiques fondamentales et appliquées**.

Et il faut attendre l'année 2003 pour que l'association des professeurs de sciences physiques perde le nom d'**Union**



La cravate achetée sur une braderie par Patrick Couterut, professeur au lycée J. Monod de Saint-Jean de Braye (45), illustre bien l'implication des enseignants dans les Olympiades. Photo D.R./L'Act. Chim./SBS.

des Physiciens pour devenir l'Union des Professeurs de Physique et Chimie.

Si l'on ne peut pas lier directement bien sûr les Olympiades de chimie à ces évolutions, on peut dire qu'elles y ont largement participé par le fait même qu'on retrouve souvent les mêmes personnalités à l'origine des différentes propositions et actions qui contribuent à donner à la chimie le statut qui lui revient.

J'ai commencé mon propos en rappelant que la chimie est à la fois une discipline scientifique et une industrie. En quoi les Olympiades ont-elles contribué à exprimer cette dualité ?

Les objectifs mêmes des Olympiades étaient de faire connaître le monde de l'entreprise aux jeunes lycéens. Pour cela, l'équipe initiale qui a conçu les Olympiades comprenait des représentants de l'industrie, de l'éducation et de l'administration éducative, et les équipes locales des Olympiades – les délégations régionales – ont été organisées en associant étroitement l'enseignement secondaire et supérieur avec les représentants des industries à l'aide des Unions des Industries Chimiques régionales. Ce modèle constitue ainsi une véritable plate-forme de rencontre, de discussion, de connaissance mutuelle entre nos deux communautés, industrielle et éducative. Cet outil est une chance remarquable pour notre discipline qui possède ainsi un moyen de s'inscrire dans la vie active et de donner à ses élèves une image concrète de la chimie dans la société. C'est également une chance pour les professeurs d'avoir un accès direct aux débouchés potentiels de leur enseignement, et pour les professionnels de se faire connaître et faire connaître leur besoin auprès des jeunes en formation.

Les Olympiades de chimie ont-elles atteint leur but ? Doivent-elles s'arrêter ? Doivent-elles évoluer vers un autre projet ?

La question mérite d'être posée comme elle le serait de tout projet expérimental qui tenterait de devenir institutionnel et perdrait du même coup son caractère innovant et créateur. La question se pose également compte tenu des investissements financiers qui permettent son fonctionnement.

Je répondrais avec trois remarques ou constatations :

- La première concerne le public auquel nous nous adressons : c'est le propre de l'enseignement ; il est renouvelé tous les ans et ce qui peut nous apparaître comme répétition en tant qu'adulte n'est que nouveauté pour les jeunes à qui nous nous adressons.

- La deuxième concerne l'activité de nos collègues qui animent ces Olympiades : les thèmes de travail, renouvelés tous les deux ans, impliquent nécessairement de nouvelles créations pédagogiques, de nouvelles réflexions, et les concours se devant d'être originaux amènent également tous les ans leurs lots d'innovations qui alimentent ensuite l'enseignement dit de masse.

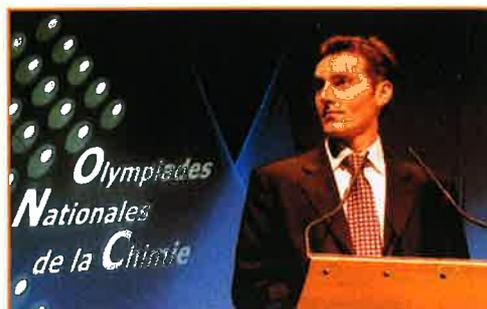
- La troisième concerne l'évolution même des Olympiades. Depuis leur création, les conditions du concours ont fortement évolué, tant dans l'évaluation de l'épreuve expérimentale que dans la pratique des épreuves écrites et orales ; les jurys cherchent à évaluer les qualités personnelles des candidats ainsi que leur capacité d'adaptation à des situations nouvelles, plus que la somme des connaissances acquises.

Les Olympiades ont également apporté une innovation récente avec la création d'une épreuve commune pour tous

les candidats de 1^{ères} scientifiques et non scientifiques. Cette épreuve consiste à réaliser collectivement un projet de communication sur un sujet choisi librement comportant un volet scientifique, technique ou industriel proche de la chimie et si possible ayant une implication dans la région des candidats. L'objectif de ce nouveau concours est de favoriser les actions de culture scientifique à caractère partiellement chimique, abordées avec objectivité et rigueur.

Je conclurais donc que les Olympiades doivent continuer à offrir aux élèves l'opportunité de découvrir les richesses de notre discipline et de rencontrer des équipes dynamiques ayant envie de transmettre leur goût pour la chimie. Elles doivent continuer également à servir de modèle expérimental pour une nécessaire évolution des contenus et méthodes d'enseignement, et surtout, elles doivent pouvoir maintenir les liens très fructueux qui ont été établis entre les enseignants et les industriels, **ce que j'appelle la plate-forme de communication entre nos deux communautés.** Ces propositions ont largement été approuvées par l'Assemblée générale des délégués régionaux et délégués des UIC réunis à Dijon en septembre dernier.

Je finirai en me faisant le porte-parole des lauréats qui sont aujourd'hui dans cette salle et de tous leurs camarades qui n'ont pas cette chance mais qui ont pu bénéficier du programme proposé cette année : merci aux équipes de professeurs et de techniciens qui les ont encadrés, merci aux équipes des délégations régionales qui ont organisé les activités en région, merci aux partenaires industriels réunis au sein de l'Union des Industries Chimiques et aux partenaires universitaires et institutionnels qui apportent les moyens humains, financiers et administratifs aux Olympiades nationales de la chimie.



David Raffaella, le nouveau coordonateur national des Olympiades. Photo D.R./Olympiades.

Et en mon nom propre, merci aux membres des jurys qui viennent d'œuvrer ces deux derniers jours après une longue préparation du concours de plusieurs mois. Merci aux établissements qui nous ont accueillis : le lycée Louis le Grand, l'Université Pierre et Marie Curie, l'École Nationale Supérieure de Chimie de Paris et l'École Nationale de Chimie Physique et Biologie. Merci à tous les collaborateurs de la Direction de la communication de l'UIC. Merci à Daniel Ayroles qui nous quitte et à David Raffaella qui a pris avec enthousiasme les rênes de ces Olympiades qui ont 20 ans aujourd'hui et à qui je souhaite de continuer à attirer de très nombreux jeunes vers les sciences et la chimie ».

Michel Boyer

Président des Olympiades nationales de la chimie

La mise en place de la réforme LMD

L'exemple d'une université scientifique

Yannick Vallée

Résumé

L'Université Joseph Fourier, Grenoble 1, est passée au système LMD (licence, master, doctorat) à la rentrée 2003. Les grandes lignes du LMD dans cette université scientifique et médicale sont présentées. L'accent est porté sur la modularité des parcours, leur ancrage dans la recherche de l'établissement, et sur la priorité de « réenchanter la science ».

Abstract

The introduction of the « Bachelor-Master-Doctorate » reform in France: the example of a scientific university

Université Joseph Fourier – Grenoble 1, moved to the LMD (Bachelor-Master-Doctorate) degree system with the academic year 2003/2004. The main outlines of the implementation of this degree system within this university of sciences and medicine are presented. Highlights are on the modularity of the various course programmes, together with their foundation on the research going on within the institution, and the priority on reviving interest for scientific subjects.

C'est quoi le « LMD » ?

Le 21 juillet 1997, Claude Allègre fait parvenir à Jacques Attali une lettre de mission dans laquelle il lui demande de réfléchir à des réformes possibles du système d'enseignement supérieur français. Jacques Attali rendra public son rapport, rédigé en commun avec 14 personnalités, en mai 1998. Il y présente quelques propositions, dont l'une remodèle l'échéancier des principaux diplômes à décerner. Cette proposition, initialement baptisée « 3/5 ou 8 », évoluera un peu plus tard en « 3,5,8 », puis en LMD, pour « licence, master, doctorat ». C'est un projet ambitieux qui recevra l'estampille européenne lors de la rencontre de Bologne entre les ministres concernés. Les rencontres de Prague puis de Berlin confirmeront les grandes lignes du projet. Quels sont ses objectifs ?

D'une part, puisque c'est un projet européen, donner une plus grande cohérence aux systèmes de formation supérieure des divers pays engagés dans la réforme. Il s'agit de définir trois grands niveaux diplômants : la licence (trois années d'études supérieures, pour un étudiant réussissant chaque étape du parcours sans échec), le master (deux années après la licence), puis le doctorat (environ trois ans après le master). Deux unités importantes apparaissent : le semestre et l'ECTS. Même si par atavisme, nous parlerons encore longtemps d'« année universitaire », la réelle unité de temps du LMD est le semestre. Plus que trois années, la licence, c'est six semestres. Le crédit ECTS (European Credit Transfer System) est l'unité de compte. En France, chaque semestre est divisé en unité d'enseignement (UE). Chaque UE suivie avec succès rapporte des crédits. Un étudiant obtient sa licence s'il a cumulé 180 crédits. 120 crédits plus tard, il a son master. Typiquement donc, un semestre vaut 30 crédits (répartis, par exemple, en 5 UE de 6 crédits chacune). A l'Université Joseph Fourier (UJF), nous avons travaillé sur la base d'un ECTS pour 20 heures de travail de l'étudiant. Ces 20 heures comprennent des cours magistraux, des travaux dirigés, des travaux pratiques, mais

aussi les heures de travail personnel. Suivant les UE, ce dernier peut être estimé différemment, il n'y a donc pas de correspondance directe entre heures de présence (cours + TD + TP) et crédits ECTS.

Peu à peu, les universités françaises passent à ce système. Outre qu'il est (sans doute) appelé à s'étendre à l'Europe entière, il a deux avantages notables. Il est d'abord nettement *plus lisible*, plus simple que le système précédent. A priori, seuls les trois niveaux de sortie L, M et D sont possibles, même si des niveaux intermédiaires subsisteront encore longtemps (par exemple, bac + 2 pour les DUT). Ensuite, il est *modulable*. L'étudiant se voit offrir un panel d'UE dans lequel il fait son choix, par exemple pour se construire une licence. Bien sûr, ce choix est encadré et il doit rester impossible de se construire une licence de bric et de broc, en piochant de-ci de-là des UE un peu au hasard. Il n'empêche que l'étudiant est de fait plus responsable de son parcours. Il n'est à aucun moment enfermé dans un tube et peut se réorienter tout en conservant ses acquis (ses points ECTS).

Les masters : la logique DML

L'université est le lieu par excellence où se rencontrent recherche et formation. Celles et ceux qui y font la science la transmettent dans ses amphithéâtres, ses salles de TD et de TP. En ce sens, une formation ne mérite le qualificatif d'universitaire (et pas simplement de « supérieure ») que si elle se construit en lien étroit avec la recherche. Parce que ce lien est fondamental, nous avons choisi de fonder notre offre de formation sur nos compétences en recherche. De ce principe découle une logique de présentation de notre LMD qui part des laboratoires et des écoles doctorales vers les masters et, en aval, les licences. Cette logique descendante, que nous avons baptisée DML, garantit un environnement recherche suffisant à toutes nos mentions de master et de licence.

La recherche à l'UJF est structurée dans neuf écoles doctorales (*figure 1*). Elles correspondent aux grands domaines

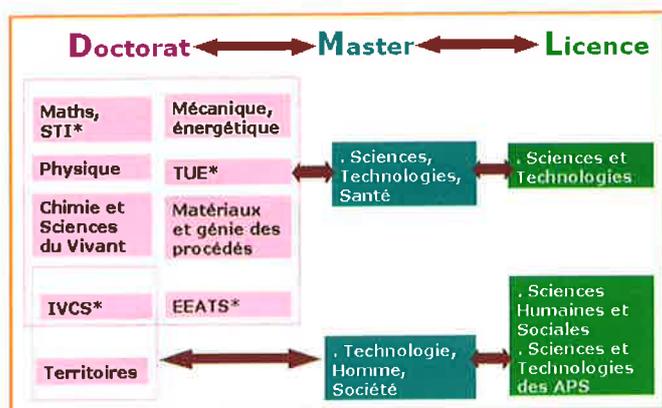


Figure 1 - La déclinaison du LMD de l'Université Joseph Fourier.

* STI : sciences et technologies de l'information, informatique.

TUE : terre, univers, environnement.

EEATS : électronique, électrotechnique, automatisme, traitement du signal.

IVCS : ingénierie pour la santé, la cognition, l'environnement.

de compétence de nos laboratoires : un grand ensemble « sciences dures » (maths, physique, mécanique...), avec ses déclinaisons plus appliquées (matériaux, génie des procédés...), complété par une recherche en plein développement sur la santé. Cette recherche en santé, appuyée sur d'importants aspects cliniques, est fortement connectée à nos laboratoires de sciences dures, *via* la biologie, la chimie, mais aussi la physique et l'informatique. Si bien que l'on peut parler d'un continuum d'activités des mathématiques pures à la médecine. Voulant fonder notre offre master sur la recherche, il nous a semblé logique de créer un premier vaste « domaine de master » que nous avons intitulé « sciences, technologies, santé », et nous l'avons précisé en le déclinant en « mentions de master ». Ces mentions (physique et ingénierie, sciences du vivant...) intègrent toutes nos « spécialités de master » (figure 2). Nous n'avons à aucun moment cherché à établir une dichotomie forte entre les masters menant à des carrières de recherche (*via* une thèse) et ceux dits « professionnalisants » conduisant a priori à une insertion dans la vie professionnelle à bac + 5 (l'équivalent des ex DESS). Bien au contraire, ces deux types de master relèvent d'une logique universitaire : ils doivent tous deux s'ancrent dans les compétences recherche de l'établissement. Il nous a donc semblé illogique de classer d'un côté les masters recherche, de l'autre les masters professionnalisants.

Notre second domaine de master regroupe nos activités liées aux sciences humaines qui relèvent pour la plupart de notre UFR APS (activités physiques et sportives) et de l'UFR de géographie. Les doctorats concernés se retrouvent dans deux écoles doctorales : « droit, sciences politiques, relations internationales » et « ingénierie pour la santé, la cognition, l'environnement ». Cette deuxième école est très interdisciplinaire puisqu'elle a aussi des connexions avec notre premier domaine (sciences, technologies, santé), en particulier sur la mention sciences du vivant. Nous avons baptisé ce second domaine « technologie, Homme, société », voulant signifier en cela que les sciences humaines enseignées à l'UJF sont proches du monde technologique et scientifique.

Le bouquet des licences

De même, la licence étant un diplôme universitaire, nous ne saurions accepter une déconnexion qui finirait par

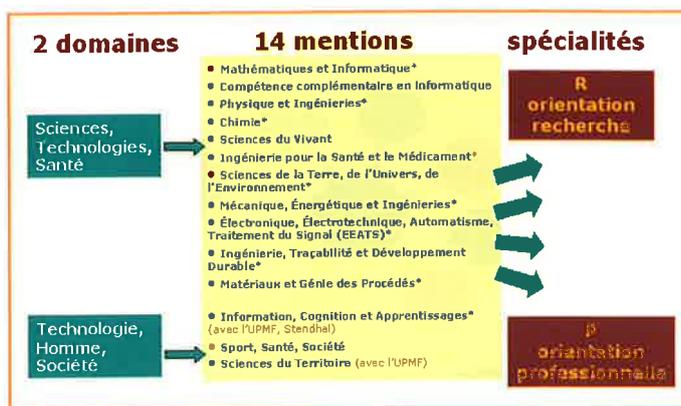


Figure 2 - Les masters de l'UJF.

* Sur 14 mentions, 10 sont cohabilitées avec l'Institut national polytechnique de Grenoble (INPG).

transformer ce niveau en un grade « secondaire supérieur », la vraie entrée dans le monde proprement universitaire intervenant en master. Nous défendons un continuum de formation du 1^{er} semestre de l'année L1 à la thèse. Nous avons mis en place trois domaines de licence : sciences et technologies (10 mentions), sciences humaines et sociales (avec une seule mention, géographie) et sciences et techniques des activités physiques et sportives (là aussi, une seule mention). Dans l'esprit du LMD, nous avons construit nos six premiers semestres sur un mode modulaire : dans un ensemble d'UE, l'étudiant fait des choix qui le conduisent à se construire « sa » licence. Bien sûr, ses choix sont guidés. Nous n'acceptons pas qu'en picorant à droite à gauche, un étudiant invente une licence qui n'aurait plus aucune spécificité. Ce choix guidé, on pourrait mieux dire ce choix « orienté », est réalisé sur la base de dialogues avec l'équipe pédagogique et l'aide d'un logiciel. Il offre à l'étudiant un panel de possibilités que nous représentons sous la forme du « bouquet des licences » (figure 3). Chacun des dix cercles principaux y représente le cœur d'une mention de licence (par exemple, la spécialité chimie de la mention chimie). Les cercles secondaires (les pétales) sont des spécialités bi-disciplinaires (pour la mention chimie : chimie-biologie, chimie-physique, chimie informatique).

Le 1^{er} semestre (S1) est un semestre d'adaptation et d'orientation. Dans la mention sciences et technologies, il est assez similaire quel que soit l'étudiant. Dans le parcours aboutissant à une licence de chimie, il est ainsi préconisé : une UE de physique, une de mathématiques, une de chimie et une UE d'ouverture (langues, sports, culture scientifique, vie associative...). La 5^e UE est laissée au choix de l'étudiant (biologie, informatique...). Toujours pour un étudiant qui se destine à la chimie (disons qu'il s'appelle Rémi), le second semestre (S2) est découpé de façon assez similaire. C'est au passage du semestre 2 au semestre 3 que Rémi se verra proposer soit de continuer vers une licence monodisciplinaire, soit de préparer une licence bidisciplinaire, par exemple chimie-biologie. Évidemment, il aura eu intérêt s'il présupposait dès S1 ou S2 qu'il allait faire ce choix de prendre des UE libres de biologie. Le semestre S3 du parcours chimie-biologie est constitué d'une UE de physique, une de chimie, une de biologie, une d'ouverture (langues etc.), et toujours, une au choix. Si Rémi poursuit sur cette voie, il aboutira au semestre 6 (S6) avec les UE : chimie organique biologique, chimie organique expérimentale, biologie

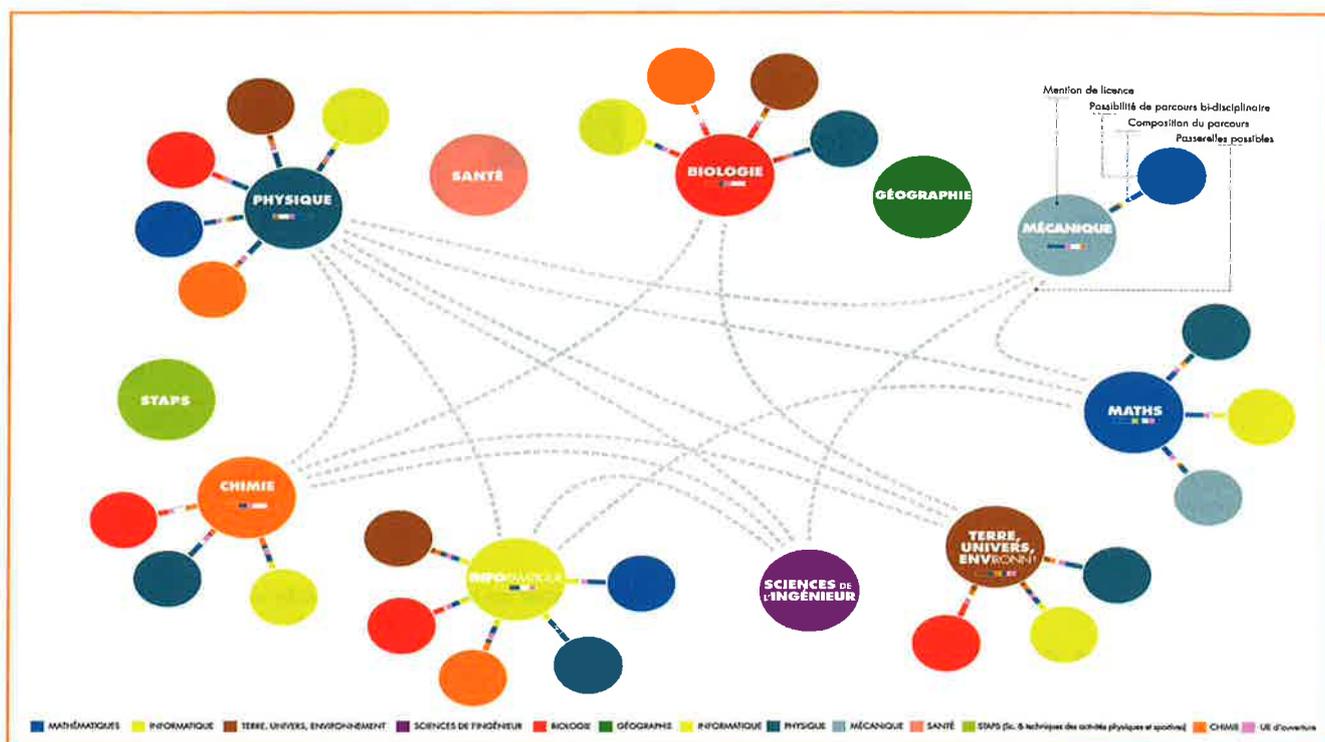


Figure 3 - Le bouquet des licences de l'UJF.

structurale, projet professionnel (le plus souvent, découverte d'un laboratoire). Pour sa 5^e UE, il pourra choisir, par exemple, chimie industrielle ou microbiologie moléculaire. Dans ce parcours de Rémi, toutes les UE valent 6 ECTS. Le voilà donc, après six semestres de cinq UE, nanti de 180 ECTS et d'une licence « sciences et technologies », mention « chimie », spécialité « chimie-biologie ». L'ensemble de son parcours et les compétences acquises seront décrits dans un « supplément au diplôme » auquel nous travaillons encore. Il pourra envisager, à Grenoble ou ailleurs, de s'inscrire dans un master de chimie ou de biologie.

Notons que si notre étudiant avait choisi de ne pas poursuivre après sa licence, il aurait plus valablement choisi une licence professionnelle. Ces licences, construites en partenariat étroit avec des industriels, sont des 3^e années de spécialisation, accessibles après les deux premières années de licence. Rémi aurait ainsi pu s'orienter vers une licence professionnelle « biotransformation en industrie laitière ».

Réenchanter la science

Nous sommes particulièrement préoccupés de la désaffection (relative) des bacheliers pour les études scientifiques. Il nous a semblé pertinent d'utiliser le passage au LMD pour intensifier une stratégie de « reconquête ». Elle commence bien sûr par des présentations de notre offre de formation dans les lycées, aux élèves et aux enseignants, mais aussi par l'organisation annuelle de la « journée des lycéens » sur le campus. Surtout, nous souhaitons présenter aux étudiants une vision plus dynamique et plus ouverte des sciences. Nous nous donnons les moyens de « réenchanter la science » par des choix de politique d'établissement tournés de façon volontariste vers l'expérimentation. Notre contrat quadriennal, dans son volet formation, met l'accent sur le bon usage des travaux pratiques (TP). Nous investissons régulièrement dans ce domaine, non seulement sur la base

de ce contrat, mais aussi en réinvestissant une part significative des réserves de notre établissement dans les TP. Notre choix s'est logiquement porté récemment sur les TP des deux premières années de licence. Nous poursuivons vers la 3^e année.

Nous souhaitons particulièrement décloisonner les domaines scientifiques et faire percevoir à l'étudiant la continuité des sciences. Aucun problème industriel n'est un problème monodisciplinaire. Pour appréhender cette continuité, nous mettons en place des UE pluridisciplinaires autour d'un concept général ou d'un objet. Ces UE sont essentiellement expérimentales. Les TP sur l'eau sont un premier exemple. Mis au point par un ensemble de collègues de diverses disciplines, montés au sein de CUBE (Centre universitaire de biologie expérimentale), ils permettent à l'étudiant, par une série d'expériences, de percevoir divers aspects de l'eau à travers la physique, la chimie, mais aussi la biologie ou la mécanique. Dans le même esprit, nous mettons au point une UE sur les couleurs.

Autre action : accroître le nombre de TP réalisés dans les laboratoires de recherche. Souvent montés et opérés avec l'aide de chercheurs des organismes de recherche et des personnels techniques des laboratoires, ils permettent à l'étudiant un premier contact avec le monde de la recherche. Ce sont les plates-formes CESIRE (Centre d'enseignement supérieur et d'initiation à la recherche par l'expérimentation).

Nous avons également mis en place des enseignements d'histoire et de philosophie des sciences qui placent les connaissances disciplinaires acquises par les étudiants dans une perspective historique, mais aussi sociétale et éthique.

L'investissement des enseignants-chercheurs, des enseignants et des personnels techniques et administratifs de notre université dans la mise en place de ces nouveautés (parmi d'autres, par exemple l'amplification du contrôle continu des connaissances, la multiplication des examens oraux...), et maintenant dans leur fonctionnement, a été et

reste considérable. La mise en place du LMD, que nous avons accompagnée de ces choix, a été un travail considérable. On ne passe pas correctement au LMD sans volontarisme et sans une implication forte de tous les personnels d'une université.

Le site universitaire de Grenoble

Les quatre universités grenobloises regroupent environ 50 000 étudiants. Le passage au LMD, s'il a d'abord été l'occasion de renouveler nos maquettes d'enseignements, a aussi été un moment de discussion privilégié entre les quatre équipes présidentielles des universités Pierre Mendès France (UPMF, droit, sciences économiques), Stendhal (lettres, langues), de l'Institut national polytechnique (INPG) et de notre université. L'INPG et l'UJF ont largement mis en commun leurs expériences pour la mise en place des masters. La majorité des masters scientifiques et technologiques sont maintenant co-habilités UJF-INPG. Nous avons aussi un master co-habilité avec l'UPMF et un master est commun aux quatre universités. La discussion n'est certes pas terminée (elle avait été amorcée avant la réforme au niveau des écoles doctorales, mais elle n'a été qu'ébauchée sur les licences, et le résultat sur les masters est incomplet), mais elle a eu un impact majeur sur les évolutions que nous prévoyons maintenant dans la gestion du site universitaire de Grenoble, au niveau inter-universitaire. Le LMD, en ce sens, a été fédérateur. Approfondi, il devra permettre plus facilement des choix d'UE ouverts sur les quatre universités.

La nécessité d'imbriquer recherche et formation, qui nous semble consubstantielle du LMD, ouvre aussi les universités vers les organismes de recherche. Le niveau D bénéficiait déjà largement de nos relations privilégiées avec le CNRS, le CEA, l'INRIA, l'INSERM... à travers nos unités mixtes, mais aussi dans des unités propres d'organisme conventionné avec l'UJF. Des initiatives comme CESIRE, citée précédemment, renforce le partenariat, particulièrement au niveau master, grâce à des TP réalisés dans les unités de recherche. Les stages en laboratoires, parfois dès le niveau licence, ont pris une place plus importante. Les laboratoires deviennent des lieux de formation. L'UMR devient une UMRF, de recherche et de formation par la recherche. Des premières initiatives ont été engagées avec les grands instruments européens présents sur Grenoble : l'Institut Laue Langevin (ILL), le synchrotron (ESRF), l'European Molecular Biology Laboratory (EMBL), le Laboratoire des champs magnétiques intenses (LCMI). L'impact de ces instruments sur l'image de la recherche grenobloise est considérable.

Nos étudiants doivent percevoir la nécessité et l'importance des collaborations européennes pour mener à bien des projets d'une telle envergure.

Enfin, s'il a participé à une meilleure coordination du site grenoblois, le LMD ne nous a pas refermés sur Grenoble et nous poursuivons, voire approfondissons, nos relations au niveau de la région Rhône-Alpes avec l'Université de Savoie, l'Université Claude Bernard à Lyon et l'École normale supérieure de Lyon.

Le LMD : une réussite ?

Je considère déjà que notre passage au LMD est un succès. Le 1^{er} septembre 2003, lors de notre première rentrée LMD, ce n'était pas une évidence. En particulier, la modularité du nouveau système avait entraîné une refonte complète des emplois du temps et le choix de créneaux horaires homogènes basés sur des périodes d'une heure trente de cours et de TD, nouveaux pour beaucoup de composantes. Pourtant, tout a fonctionné. Reste à pérenniser le système et surtout, et c'est là le point essentiel, à juger si les étudiants réussissent mieux, s'ils sont mieux préparés à trouver un emploi. A vérifier aussi, qu'ils sont plus nombreux, à l'entrée à l'université, à choisir des parcours scientifiques. Il faudra plusieurs années pour qu'un jugement objectif puisse être porté. Il faudra aussi, sans doute, plusieurs années pour que ce système LMD soit adopté par une majorité, voire la totalité des pays européens.

Remerciements

Nous remercions tout particulièrement Thierry Dombre, ex vice-président formation de l'UJF, qui a été le maître d'œuvre de notre mutation vers le LMD et qui a imaginé le thème « réenchanter la science ». Merci aussi à tous les personnels de l'UJF pour leur adhésion au projet et pour l'immense travail accompli. Et merci à nos étudiants qui ont compris l'importance de cette réforme.



Yannick Vallée

est président de l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1*.

- * UJF, Domaine universitaire, bâtiment administratif, 38041 Grenoble Cedex 9.
Courriel : Presidence@ujf-grenoble.fr



La catalyse : de Berzelius au *Traité* de Grignard

Habib Batis et Maurice Chastrette



Cet article s'inscrit dans la série publiée suite à la conférence du club Histoire de la chimie qui s'est tenue à Lyon le 19 juin 2003, consacrée à Victor Grignard et au *Traité de Chimie organique* (voir *L'Act. Chim.*, 2004, 275, p. 35).

Résumé

La présentation de la catalyse dans le *Traité de Chimie organique* de Grignard est analysée au regard du développement historique de ce concept. Le combat mené par Liebig contre les idées de Berzelius aboutit à une éclipse très longue de l'idée même de catalyse, jusqu'à la renaissance due au développement de la cinétique chimique et aux travaux d'Ostwald et de Sabatier. Le *Traité* donne peu d'écho aux controverses théoriques et privilégie une revue exhaustive des réactions catalytiques en chimie organique connues à la date de sa parution.

Mots-clés

Catalyse, histoire, controverses, Berzelius, Liebig, Oswald, Sabatier, Grignard, *Traité de Chimie organique*.

Abstract

Catalysis: from Berzelius to Grignard's Treatise

The way catalysis described in *Grignard's Treatise* is analysed, taking into account the historical development of this concept. The battle fought by Liebig against the ideas of Berzelius resulted in a very long eclipse of catalysis, followed by a strong revival due to the appearance of chemical kinetics and to the works of Ostwald and Sabatier. The *Treatise* retains only a small part of these controversies and privileges an exhaustive review of catalytic reactions in organic chemistry.

Keywords

Catalysis, history, controversies, Berzelius, Liebig, Oswald, Sabatier, *Grignard's Treatise*.

Dans le *Traité de Chimie organique* publié sous la direction de Victor Grignard, la catalyse est présentée en 1936 dans le tome II, soit cent ans après l'introduction du mot catalyse par Berzelius dans son rapport annuel de 1835 [1] et dans un article publié en 1836 [2]. Ce siècle a vu la mise en place progressive et difficile des concepts fondamentaux de la catalyse, jusqu'au développement de la théorie du complexe activé par Eyring [3] et Evans et Polanyi [4] à partir de 1935. Il nous a semblé intéressant de voir comment cette évolution était traduite dans le *Traité*, dont l'objectif prioritaire semble avoir été la revue exhaustive des expériences connues.

La catalyse est située au carrefour des différents domaines de la chimie et figure à juste titre avec la cinétique chimique dans les programmes d'enseignement dès le niveau secondaire. Elle n'est pas sans poser aux élèves plusieurs problèmes de compréhension qui semblent parfois renvoyer à des difficultés rencontrées dans l'histoire de la chimie.

L'examen de l'évolution des idées sur la catalyse met en lumière trois points principaux :

- La théorie actuellement acceptée ne s'est imposée que plus d'un siècle après les premières expériences. En effet, si certains phénomènes catalytiques comme la fermentation étaient utilisés depuis des siècles, les aspects proprement chimiques ne se sont développés qu'à la fin du XVIII^e et au début du XIX^e siècle. Il s'est produit alors une accumulation importante de faits expérimentaux relatifs à la modification

de diverses réactions chimiques par la présence de faibles quantités de substances qu'on ne pouvait considérer ni comme réactifs, ni comme produits.

- Les expériences de catalyse réalisées dans diverses branches de la chimie semblaient n'avoir en commun que le caractère incompréhensible de leurs résultats, qui ne pouvaient pas être interprétés dans le cadre alors familier de la théorie de l'affinité chimique. Presque toujours, les résultats de ces expériences ont été présentés seulement qualitativement et ne peuvent être expliqués par la participation d'une substance dans un rapport stœchiométrique.

- Le rattachement décisif de la catalyse à la cinétique chimique s'est fait bien après l'invention du concept de catalyse, comme l'a remarqué Oswald [5] : « *Tout a changé quand on a compris que la catalyse se rattache à un problème de cinétique chimique. Dans l'histoire de la science, je ne connais pas d'autres exemples, où la seule formation d'un concept, sans augmentation notable du nombre des faits connus, ait si brillamment et si manifestement exercé une action décisive et rapide sur le développement scientifique* » (p. 288).

La lenteur du développement de la théorie de la catalyse peut s'expliquer, au moins en partie, par le contexte scientifique et industriel dans lequel sont apparues les premières expériences. Nous rappellerons brièvement ce contexte avant de présenter quelques points saillants dans le développement de la catalyse sans prétendre en retracer l'évolution historique complète. Enfin, nous analyserons, en

relation avec le développement historique, le contenu du tome II du *Traité* de Grignard.

Le contexte scientifique et industriel

Au début du XIX^e siècle, la loi des proportions définies est peu à peu admise par tous les chimistes. Il est alors compréhensible que toute explication d'un phénomène chimique doive cadrer avec les lois de la stœchiométrie. La catalyse ne peut échapper à cette règle, comme le montrent les travaux de Désormes et Clément sur la synthèse de l'acide sulfurique catalysée par le salpêtre [6]. L'étude de la réaction a commencé en 1793, mais les auteurs n'ont pu formuler leur théorie qu'en 1806, lorsque les règles de formation des combinaisons chimiques formulées selon les vues de Proust ont eu l'aval de la communauté des chimistes.

La notion d'affinité telle qu'elle apparaît au début du XIX^e siècle laisse dans l'ombre la nature des forces chimiques. Les prouesses de l'électrochimie incitent d'excellents chimistes comme Davy, Faraday ou Berzelius à tenter de substituer aux forces newtoniennes des forces de nature électrique. Berzelius proposera sa théorie dualiste comme une explication générale des combinaisons chimiques.

Entre 1794, date des recherches de E. Fulhame sur le rôle de l'eau dans l'oxydation du charbon, et 1835, un grand nombre de réactions que nous appelons aujourd'hui catalytiques ont été étudiées [7]. Plusieurs de ces réactions ont eu une grande importance dans la société, parmi lesquelles la synthèse de l'acide sulfurique, le briquet de Döbereiner qui a persisté pendant près d'un siècle avec un million d'exemplaires vendus au total (voir encadré), et la lampe de sûreté de Davy développée en 1816 et utilisée pendant une centaine d'années.

Le briquet chimique de Döbereiner

Après un apprentissage d'apothicaire entrepris en 1794, Johann Wolfgang Döbereiner (1780-1849) crée de petites entreprises chimiques qui ne survivront pas aux guerres napoléoniennes. Nommé en 1810 professeur associé de chimie et de pharmacie à Iéna, il devient titulaire d'une chaire en 1819.

Au cours de ses travaux sur le platine, il vient en possession de quantités importantes de minerai de platine. En cherchant à séparer le platine de son minerai, il découvre que le platine finement divisé rougit lorsqu'il est placé dans un courant d'hydrogène et qu'il est même capable d'enflammer ce gaz. Il ne parvient pas à trouver une explication satisfaisante, mais

il comprend que cette propriété peut être mise à profit pour construire un briquet chimique mis en vente en 1823. Döbereiner ne manqua pas d'en offrir un exemplaire à son ami Johann Wolfgang von Goethe.

Le briquet connut un immense succès, car il n'y avait pas alors de moyen commode de produire une flamme. Les premières allumettes avaient été produites à Paris en 1805 par Jean Chancel. Le bois

Vers le concept de catalyse

La multiplication de phénomènes non explicables par les théories en vigueur a posé des problèmes aux chimistes qui avaient à reconnaître la généralité du phénomène de catalyse, et à lui trouver un nom et une explication. Nous avons noté précédemment [7] les propositions de Thenard et de Mitscherlich, faites avant la synthèse de Berzelius.

La proposition de Berzelius en 1835

La reconnaissance de la généralité du phénomène

C'est dans la partie consacrée à la chimie végétale de son rapport annuel du 31 mars 1835 que Berzelius formule ses réflexions sur la catalyse sous le titre : « *Quelques observations sur une force jusqu'ici inconnue, et sur l'action qu'elle exerce dans la formation des composés organiques dans la nature vivante* » [1]. Nous nous appuyerons sur la traduction française publiée en 1837 et sur l'article paru en 1836 dans les *Annales de Chimie* sous le titre « *Quelques idées sur une nouvelle Force agissant dans les Combinaisons des corps Organiques* » [2].

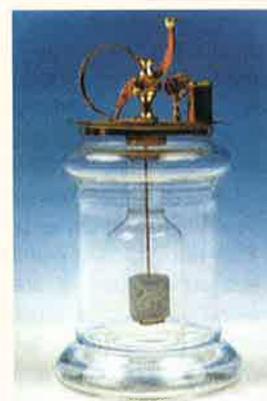
Berzelius commence par une revue des expériences connues, mais il ne cite que les travaux de Kirchoff (1812), Thenard (1813), Davy (1817), Döbereiner (1822) et Mitscherlich qui avait regroupé en 1834 [8] sous le nom d'actions de contact ses observations sur la déshydratation de l'alcool en présence d'acide sulfurique et sur d'autres réactions de combinaison ou de décomposition.

Alors qu'en 1831 Berzelius [9] avait signalé la saccharification de l'amidon par les acides et par le malt découverte par Kirchoff, sans associer les deux faits, il rapproche en 1835 des phénomènes bien plus disparates et met en évidence une propriété commune à toute une série de corps [1] : « *Il est donc prouvé que beaucoup de substances simples ou composées, solides ou dissoutes, possèdent la*

était recouvert d'un mélange de chlorate de potassium, de sucre et de gomme arabique. L'allumette s'enflammait au contact d'acide sulfurique concentré dont l'emploi limitait beaucoup leur utilité. Ce n'est qu'en 1827 que John Walker, un pharmacien anglais, mettra en vente des allumettes dont la tête sera recouverte d'un mélange de chlorate de potassium, de sulfure d'antimoine et de gomme arabique. On reprochera à ces allumettes, qui s'enflammaient par frottement sur du papier de verre, leur odeur repoussante.

Le briquet est constitué d'un récipient en verre, fermable en haut, à moitié rempli d'acide sulfurique dilué. A l'intérieur se trouve un cylindre de verre, fermé par un robinet, auquel est suspendu un morceau de zinc. Le métal et l'acide réagissent avec un dégagement de dihydrogène qui repousse l'acide en dehors du cylindre interne, ce qui arrête la réaction.

En ouvrant le robinet situé en haut du cylindre, on peut produire un courant de dihydrogène qui s'enflamme au contact d'une « éponge de platine ». La pression dans le cylindre interne baisse, l'acide sulfurique entre à nouveau en contact avec le zinc et une nouvelle provision de dihydrogène est produite.



Wolfgang Döbereiner (1780-1849).

faculté d'exercer sur des corps composés une influence essentiellement distincte de l'affinité chimique, influence qui consiste à produire un déplacement et un autre arrangement de leurs éléments, sans y participer directement ou nécessairement, à l'exception de quelques cas spéciaux » (p. 106).

La force catalytique et la catalyse

Dans son rapport de 1835, Berzelius, ayant reconnu les points communs dans un ensemble de phénomènes, invoque pour les expliquer une force nouvelle : « Cette force paraît consister en définitive, en une faculté des corps, à éveiller par leur simple présence, et sans y participer chimiquement, ce jeu de certaines affinités, qui, à cette température, restaient inactives, de manière à déterminer, en conséquence d'une nouvelle répartition des éléments du composé, un nouvel état de parfaite neutralisation chimique » [1] (p. 107).

Il crée les mots correspondant aux nouveaux concepts : « Néanmoins, aussi longtemps que nous ne pénétrons pas la nature réelle de cette force, il sera plus simple, pour nos recherches futures, de la considérer comme indépendante, et de lui donner, pour la facilité de l'intelligence, un nom particulier. Je la nommerai, en conséquence, en suivant une étymologie bien connue en chimie, la force catalytique des corps, et la décomposition qu'elle détermine, la catalyse, de même qu'on a désigné par analyse la séparation des éléments d'un composé au moyen des affinités chimiques ordinaires » (p. 107).

Il est clair que Berzelius comprend le mot catalyse dans le sens de destruction que lui avait donné en 1597 l'alchimiste Libavius (1540 ?-1616) dans son livre *Alchemia* [10]. Ceci est confirmé dans le traité de 1845 : « L'action de cette force est plus générale et en même temps plus mystérieuse, dans les opérations de la chimie organique, surtout dans les corps vivants. [...] Nous avons donné à la cause de ces phénomènes le nom de force catalytique, tiré de καταλυω, je détruis » [11] (p. 111).

La nature de la force catalytique

Berzelius se pose naturellement le problème de la nature et des propriétés de cette nouvelle force [2] : « Cette nouvelle force, qui était inconnue jusqu'ici, est commune à la nature organique et inorganique. Je ne crois pas qu'elle soit une force tout à fait indépendante des affinités électrochimiques de la matière ; je crois au contraire qu'elle n'en est qu'une nouvelle manifestation ; mais tant que nous ne pourrions pas voir leur liaison et leur dépendance mutuelle, il sera plus commode de la désigner par un nom séparé » (p. 150).

Plus tard, dans le *Traité* de 1845, Berzelius fixe les limites de ses explications : « ... et si ces idées sont fondées, il est évident que la force catalytique agit principalement sur la polarité des atomes, qui est augmentée, diminuée ou changée par elle. En d'autres termes, la force catalytique se manifeste par l'excitation de rapports électriques, qui jusqu'à présent ont échappé à nos recherches » [11] (p. 112).

La critique de Liebig et ses conséquences

Les échanges d'idées entre Berzelius et Liebig à propos de la force catalytique ont commencé dès 1835 [12] et l'opposition de Liebig au concept de force catalytique est restée ferme au cours du temps.

La critique de Liebig

Liebig critique très fortement plusieurs des propositions de Berzelius. Il considère que la création d'une nouvelle force

est non seulement inutile mais nuisible, comme le montre cet extrait du *Guide pour l'introduction à la chimie*, traduit en français en 1864 : « Quoiqu'on ne sût contester que ces faits ne peuvent s'expliquer par la décomposition ordinaire d'un sel par un acide, ceci néanmoins ne nous donne pas la moindre raison pour créer une nouvelle force par un nouveau mot qui n'explique pas davantage le phénomène. L'admission de cette force nouvelle est préjudiciable au développement de la science ; car elle satisfait en apparence l'esprit et entrave ainsi les recherches ultérieures » [13] (p. 171).

Pour Liebig, la cause des fermentations et des putréfactions est la communication d'un mouvement [14]. Ainsi, l'action de la levure dans la transformation du sucre en alcool résulte pour lui d'un choc mécanique venu de la levure en décomposition : « Cette cause est la faculté que possède un corps en décomposition ou en combinaison, c'est-à-dire en action chimique, d'éveiller la même action dans un autre corps, qui se trouve en contact avec lui, ou de le rendre apte à subir l'altération qu'il éprouve lui-même » (p. 160). En ce qui concerne les catalyseurs métalliques, Liebig se range au côté de Faraday et conclut que l'action du platine est plutôt liée à son aptitude à « absorber les gaz » et propose un mécanisme qu'il assimile à « un véritable mouvement perpétuel » [15].

La désaffection envers la catalyse

La critique de Liebig a été tellement efficace que non seulement le mot mais encore le concept même de catalyse disparaissent pratiquement de la chimie jusqu'à la fin du XIX^e siècle, comme le montrent, à titre d'exemples, les deux textes suivants.

Dans l'article consacré au mot catalyse du *Dictionnaire* de Wurtz, Salet va jusqu'à remettre en cause le regroupement des phénomènes dits catalytiques [16] : « Ainsi, qu'y a-t-il de commun entre l'action de la levure de bière sur les jus sucrés, l'action du noir de platine sur un mélange d'hydrogène et d'oxygène, et celle du même corps sur l'eau oxygénée ? Ces trois phénomènes, qui furent tous trois confondus sous le nom de phénomènes catalytiques, s'expliquent aujourd'hui d'une façon simple et fort diversement [...] ».

Naquet et Harriot prennent la même position [17] : « On a donné le nom de phénomènes catalytiques à des phénomènes dans lesquels un corps détermine une combinaison ou une décomposition par le seul fait de sa présence et sans intervenir dans la réaction. Pour expliquer cette action, on a invoqué autrefois une force particulière, la force catalytique ; mais une étude plus scientifique de ces phénomènes a montré que leur cause peut être rapportée aux différents agents physiques et chimiques connus ».

Ostwald remarque que, malgré l'abondance des faits catalytiques, les recherches expérimentales n'ont pas été entreprises : « La science n'a guère cherché à expliquer ces faits, si importants et si nombreux qu'ils soient. Nous sommes surpris qu'on n'ait jamais fait de recherches expérimentales pour trouver les lois de la catalyse, alors qu'on a étudié d'une façon très suivie des choses d'intérêt infiniment moindre. La science se tenait éloignée de la catalyse comme d'un lieu mal famé. De temps en temps, on réchauffait la vieille hypothèse mécaniste, et c'était tout » [5] (p. 286).

Il pense cependant, en faisant preuve d'un optimisme sans doute exagéré, que les choses ont changé : « Il y a peu d'années encore, si quelque chimiste osait employer le mot catalytique, on l'accusait de manquer d'esprit scientifique, et

ce reproche lui était adressé d'autant plus volontiers que la critique comprenait moins la question. Aujourd'hui les choses ont essentiellement changé, et le mot longtemps banni est aussi régulièrement employé que n'importe quel autre terme scientifique clairement défini et s'appliquant à un ensemble régulier de faits » [5] (p. 272).

La catalyse selon Oswald



Wilhelm Ostwald
(1853-1932).

La deuxième moitié du XIX^e siècle est marquée par la naissance de la thermodynamique, avec son lot important de concepts et de grandeurs mesurables, et par la fin des errements du concept d'affinité. Dans la même période, se développent en chimie organique des réactions dont la caractéristique principale est leur lenteur. Ce développement impose progressivement des études, jusque là inhabituelles, sur l'évolution temporelle des réactions chimiques et conduit à la mise en place de la cinétique chimique,

dont l'importance n'échappe pas à Ostwald.

Les concepts de la cinétique

Les premières approches de la loi de vitesse ont vu le jour en 1850 avec les travaux de Wilhelmy consacrés à l'hydrolyse du sucre de canne en présence d'un acide [18]. L'auteur déterminait la marche de la réaction par la variation du pouvoir rotatoire de la solution, mesuré à l'aide d'un polarimètre. Ces expériences appellent plusieurs remarques :

- Wilhelmy a suivi la réaction grâce à la mesure d'une propriété physique alors que, à la même époque, la même réaction d'inversion du sucre de canne était étudiée par voie chimique par Loewental et Lenssen [19].

- Le concept de vitesse de réaction n'était pas encore connu du temps de Wilhelmy, et comme le souligne Ostwald : « ... on ne pouvait le créer sans anticiper en quelque sorte sur des résultats que l'on ne connaissait pas encore » [5] (p. 256).

- Wilhelmy a admis que dans des volumes égaux de la solution acidulée, la vitesse de transformation est proportionnelle à la concentration du sucre resté inaltéré : $dZ/dt = kZ$; Z étant la concentration du sucre au temps t. Cette idée, même si elle figurait sous une autre forme dans les travaux de Wenzel (cité dans [5], p. 258), peut être considérée comme un changement de paradigme.

Cependant, ces travaux n'ont été connus par la communauté scientifique que quelques décades après leur réalisation, grâce à Ostwald. Entre temps, Berthelot et Péan de Saint-Gilles ont publié à partir de 1862 leur étude cinétique de la réaction d'estérification [20]. Cette réaction incomplète, tout en étant plus complexe que l'inversion du sucre car plusieurs concentrations varient simultanément pendant le déroulement de la réaction, est cependant traitée selon le principe général établi par Wilhelmy. Plusieurs autres travaux menés indépendamment par Harcourt et Esson [21], Guldberg et Waage, Van't Hoff et Arrhenius, ont conduit aux mêmes résultats et ont permis de poser les bases théoriques de la cinétique chimique en accord avec les lois de l'équilibre qui s'établissent à la fin de la réaction.

Liens avec la thermodynamique

Après une période d'incompréhension de plus d'un demi-siècle, il était devenu clair, au moins pour Ostwald, que les phénomènes de la catalyse pouvaient s'expliquer dans le cadre de la cinétique chimique. Ostwald préfère cependant aborder le phénomène de catalyse selon sa conception « d'énergétiste » : « Comme Berzelius et d'autres après lui l'avaient déjà reconnu plus ou moins nettement, on ne peut réaliser par catalyse aucune réaction, qui soit en contradiction avec les lois de l'énergie. Le catalyseur ne peut donc apporter qu'une quantité d'énergie insignifiante, et même la plupart du temps, on le retrouve inaltéré à la fin de la réaction » [5] (p. 289).

Ayant admis que les aspects énergétiques de la réaction ne sont pas modifiés par la présence du catalyseur, Ostwald définit le domaine d'intervention de la catalyse : « En d'autres termes, seules les réactions qui seraient possibles sans catalyse peuvent être produites par l'action des catalyseurs, et cette influence ne peut se rapporter à l'équilibre lui-même, mais seulement à la vitesse avec laquelle il est atteint. Par conséquent, un catalyseur est un corps qui modifie la vitesse d'une réaction chimique, sans apparaître, lui-même, dans les produits résultant de cette réaction » [5] (p. 289). La définition que donne Ostwald du catalyseur, et que l'on retrouve plus d'un siècle après dans beaucoup de manuels utilisés pour l'enseignement de la catalyse, demeure assez ambiguë.

Les débuts de la théorie des intermédiaires

Bien avant Ostwald, plusieurs auteurs ont cherché à expliquer l'action du catalyseur, en restant dans le cadre des lois de la stœchiométrie. Henry [22], De la Rive [23] et d'autres ont développé l'idée que dans une réaction $A + B \rightarrow AB$, le catalyseur C intervient en formant un composé intermédiaire AC de composition constante qui, en réagissant avec le second réactif, régénère le catalyseur.

Ce point de vue, qui a initié la « théorie chimique de la catalyse », était une bonne base pour la compréhension du mécanisme de la catalyse, à savoir la recherche systématique de l'intermédiaire réactionnel. La synthèse de l'acide sulfurique dans une chambre de plomb était un exemple édifiant. Pour Ostwald, cette théorie, qu'on appelle aussi « théorie des intermédiaires réactionnels », ne peut être considérée comme générale mais la question reste ouverte : « La théorie des réactions intermédiaires ne pourrait-elle pas devenir, en se développant, une théorie générale de la catalyse ? Il est vraisemblable que non. [...] Néanmoins, une question aussi vaste que celle-ci doit être poursuivie assidûment, et le nombre des catalyses connues d'une façon relativement suffisante n'est pas encore assez grand pour justifier une opinion définitive » [5] (p. 304).

Les travaux de Sabatier en chimie organique vont permettre d'apporter de nombreux exemples et de préciser les possibilités d'interaction entre le ou les réactifs et le catalyseur.

La catalyse selon Sabatier

Le développement de nouvelles réactions en chimie organique et les recherches pour l'amélioration de leur rendement constituent un champ d'intense activité au début du XX^e siècle. C'est avec les travaux de Sabatier (prix Nobel en 1912) que la catalyse en chimie organique a conquis une place de choix.



Paul Sabatier
(1854-1941).

Sabatier, pas plus que Mitscherlich avant lui, n'a accepté le point de vue purement physique de l'action catalytique, basé sur l'absorption des gaz dans les pores du métal et soutenu par Faraday et de Saussure. Sabatier postulait la formation de composés intermédiaires instables qui déterminent le sens et la vitesse de la réaction. Il a montré que dans certaines réactions, comme les réactions d'oxydation des composés organiques catalysées par le cuivre et la décomposition du monoxyde de carbone catalysée par le nickel, les intermédiaires peuvent être

isolés et identifiés. La formation d'intermédiaires instables est aussi expliquée dans le cadre de la thermodynamique : « *La création de composés intermédiaires fournis par les catalyseurs, puis leur destruction ultérieure, correspondent le plus souvent l'une et l'autre à une diminution d'énergie libre du système ; et cette dégradation par échelon est fréquemment bien plus facile que la dégradation directe immédiate, de la même manière que l'usage d'un escalier facilite la descente* » (p. 55).

Sabatier a formulé son point de vue sur le mécanisme de la catalyse en optant pour une intervention purement chimique du catalyseur : « *La catalyse nous semble donc en général résulter de phénomènes purement chimiques accomplis grâce à la présence du catalyseur, qui donne avec l'un des éléments du système primitif une combinaison temporaire instable dont la destruction ou la réaction rapide sur les autres éléments déterminent la transformation du système, le catalyseur étant régénéré semblable à lui-même, capable de poursuivre indéfiniment le même effet* » [24] (p. 65).

Tout en admettant le bien fondé des doutes d'Oswald sur l'utilisation systématique des intermédiaires pour expliquer le mécanisme de la catalyse, Sabatier a soutenu que cette explication est une bonne voie aussi bien pour la compréhension que pour la prédiction de l'intervention des divers catalyseurs en milieu homogène et hétérogène : « *En ce qui me concerne, cette explication par des combinaisons temporaires instables a été le phare directeur de tous mes travaux sur la catalyse : sa lueur s'éteindra peut-être dans l'avenir, parce que des clartés encore insoupçonnées se lèveront plus puissantes dans le champ mieux défriché de nos connaissances chimiques. Actuellement telle qu'elle est, malgré ses imperfections et ses lacunes, la théorie nous paraît bonne parce qu'elle est féconde et permet de prévoir utilement des réactions* » [24] (p. 66).

La catalyse dans le *Traité de Grignard*

La catalyse en chimie organique, à laquelle les travaux de Sabatier ont apporté une contribution décisive, est traitée dans le deuxième fascicule du tome II du *Traité de chimie organique*. Les 204 pages de ce texte n'ont pas été rédigées par Sabatier, mais par E. Carrière et H. Bonnet. La bibliographie arrêtée au 1^{er} décembre 1933 comporte 1727 références, ce qui est une indication claire de l'essor de la catalyse en chimie organique. La plus grande partie du texte est consacrée à une revue détaillée des réactions connues et seulement 17 pages, comportant 133 références, sont consacrées aux généralités et au mécanisme de la catalyse. Une deuxième contribution de 49 pages, consacrée aux

réactions d'oxydation est rédigée par C. Dufraisse. La bibliographie, arrêtée en 1935, comporte 843 références.

Revue des réactions catalytiques en chimie organique

Le *Traité* de Grignard a rassemblé un ensemble important de réactions catalytiques utilisant des molécules organiques. Les descriptions rapportées ont traité les différents aspects du processus catalytique : technologie de la préparation des catalyseurs, activation et désactivation, conditions de température et de pression utilisées dans ces réactions, etc. Les réactions les plus importantes ont été regroupées en réactions d'hydrogénation et de déshydrogénation en phase gazeuse et liquide, réactions d'oxydation, réactions d'hydratation et d'hydrolyse, réactions de déshydratation en milieu gazeux et liquide, réactions d'estérification, réactions d'isomérisation et de polymérisation...

Domaine d'intervention et rôle du catalyseur

Incontestablement, les réactions d'hydrogénation catalytique étudiées par Sabatier ont constitué le point de départ d'une longue série de réactions organiques avec l'utilisation de plusieurs types de catalyseurs (oxydes, métaux, sels...) dans des systèmes comportant une ou plusieurs phases. Ceci a pu se produire grâce à un développement aussi bien technologique (pour la réalisation de ces réactions sous différentes pressions) que chimique, avec la diversification des méthodes de préparation des catalyseurs.

Comme un catalyseur est utile par son activité, tous les facteurs qui la modifient se sont avérés plus que jamais importants en chimie organique et notamment pour une utilisation à grande échelle. Ainsi, les mécanismes de désactivation chimique (par empoisonnement et encrassement) et physique (par frittage des catalyseurs), ont été largement étudiés. Parallèlement, se sont développées des voies permettant d'atténuer leur effet ou de les éliminer par l'utilisation de promoteurs, de catalyseurs mixtes ou supportés.

Mécanisme de la catalyse

Deux théories sont mentionnées dans le *Traité* pour expliquer le mécanisme de la catalyse : la théorie basée sur la formation de composés intermédiaires et la théorie basée sur le phénomène d'adsorption.

La première théorie, largement utilisée et développée par Sabatier, a été déjà appliquée par Désormes et Clément pour expliquer la formation de l'acide sulfurique dans les chambres de plomb, même si la nature chimique de l'intermédiaire réactionnel a fait l'objet de controverses tout au long de la première moitié du XIX^e siècle. Cette théorie a été appliquée dans les réactions d'oxydation en postulant la formation d'un peroxyde dans la réaction de déshydratation de l'éthanol, en supposant la formation d'un sulfate acide d'éthyle intermédiaire ; dans les réactions d'hydrogénation sur les métaux, en supposant la formation d'un hydrure...

La théorie basée sur l'adsorption est relativement plus récente que celle basée sur la formation de composés intermédiaires. Tout en étant plus générale, l'adsorption conduit dans certains cas à des combinaisons intermédiaires avec le catalyseur et est, par conséquent sur ce point, en accord avec la première théorie. Cependant, grâce à l'introduction du concept d'adsorption, elle échappe à la vieille spéculation sur la recherche de l'intermédiaire pour expliquer le méca-

nisme. Taylor, qui est l'un des fondateurs de cette théorie [25], a distingué l'adsorption chimique sur des centres actifs dus à la présence d'atomes superficiels coordinativement insaturés de l'adsorption physique due à la surface totale. L'énergie mise en jeu dans le premier type d'adsorption est du même ordre de grandeur de celle de la liaison chimique et peut expliquer l'analogie avec les composés intermédiaires postulés dans la première théorie. Le concept de centre actif va devenir ensuite un concept clé en catalyse, notamment pour déterminer la vitesse de formation des produits.

Catalyse d'autoxydation

La dernière partie du tome II du *Traité* de Grignard est réservée à la catalyse négative, notamment aux antioxygènes, substances qui ont la propriété d'empêcher la fixation d'oxygène libre sur de la matière spontanément oxydable. La présence de telles études se justifie en raison du grand nombre de composés organiques autoxydables, susceptibles de modifier la vitesse de fixation de l'oxygène.

Durant plus d'un siècle, les expériences sur la préservation contre l'oxygène s'accumulent dans plusieurs domaines. Une opinion assez répandue supposait que les préservateurs agissaient en consommant l'oxygène plus rapidement que la matière à protéger. Le caractère erroné de cette opinion, selon le texte de Dufraisse, renvoie à la nécessité de développer des notions scientifiques précises : « *Il ne suffit donc pas, pour conclure à un effet antioxygène, de montrer que la matière altérable a été préservée ; il faut en outre, établir que l'oxygène, pendant ce temps, est resté inactif sans être détourné de la dite matière par un processus fortuit quelconque, tel que raréfaction accidentelle, oxydation du corps protecteur, ou tout autre. En somme c'est plutôt l'oxygène qu'il faut surveiller que le corps oxydable, et le seul vrai critérium d'un effet antioxygène est la non-consommation d'oxygène* » (*Traité*, p. 1150).

La véritable nature du phénomène antioxygène s'était fait connaître avec les travaux de Moureu et Dufraisse en 1921. Après accumulation d'un grand nombre d'expériences, Dufraisse reconnaît la généralité du phénomène antioxygène : « *En résumé, il semble qu'aucune matière, quelle qu'elle soit, ne puisse être exclue du phénomène antioxygène, soit dans le rôle de corps à protéger, soit dans le rôle de corps protecteur. On a condensé cette notion dans les propositions géminées que voici : 1° toute autoxydation doit pouvoir être entravée par un antioxygène approprié ; 2° toute matière apte à réagir chimiquement doit pouvoir, dans des conditions expérimentales appropriées, fonctionner comme antioxygène* » (*Traité*, p. 1156).

En rassemblant les théories de l'action antioxygène, Dufraisse distingue celles où le corps empêchant a un rôle passif de celles où il a un rôle actif. Dans la première théorie, deux types d'action sont cités : soit le corps empêchant intervient à la façon d'un vernis étalé sur une surface, soit ce corps agit à la manière d'un écran qui brise la propagation des effets (énergies transmises ou chaînes) de l'autoxydation.

Dans le deuxième cas, Dufraisse note quatre actions possibles : l'empoisonnement, la neutralisation (combinaison entre l'antioxygène et un présumé catalyseur de l'autoxydation qui mettrait celui-ci hors d'état d'agir), la désactivation des molécules qui prennent part à l'autoxydation, et l'oxydation préventive qui est une sorte de formation de couche protectrice. Selon l'auteur, cette dernière ne peut être considérée comme un véritable mécanisme antioxygène.

Après une critique de toutes ces théories, l'auteur, reconnaissant la peroxydabilité comme la propriété commune à tous les antioxygènes, formule un autre point de vue sur le phénomène : « *En résumé, le pouvoir antioxygène doit s'exercer par voie chimique. Il semble lié à une certaine affinité du catalyseur pour l'oxygène, commune aux corps les plus variés, quand ils sont soumis à un potentiel d'oxydation assez élevé, comme c'est le cas en présence des peroxydes d'autoxydation. Mais l'oxydation du catalyseur ne peut être que transitoire, sinon, les longues durées du fonctionnement inhibiteur ne s'expliqueraient pas* » (*Traité*, p. 1172).

Moureu et Dufraisse ont développé en 1923 une autre théorie inspirée de la réduction mutuelle de deux peroxydes antagonistes avec libération de l'oxygène. Cette théorie a un pouvoir explicatif du phénomène indépendamment des corps impliqués, mais elle est loin d'être parfaite, notamment sur le choix des intermédiaires qui se forment. La complexité du phénomène antioxygène a amené l'auteur à conclure ainsi son analyse des phénomènes : « *En résumé, aucune des théories explicitées jusqu'ici ne peut être considérée comme donnant l'image exacte du phénomène antioxygène. On a même l'impression de n'avoir pas beaucoup progressé dans la connaissance du mécanisme, malgré le nombre de travaux qui lui ont été consacrés* » (*Traité*, p. 1174).

Conclusion

Le *Traité* rend compte de manière détaillée des progrès de la catalyse jusqu'à la date de sa rédaction et ne manifeste pas de désaffection envers le concept de catalyse, mais il reste curieusement très discret sur le mécanisme des phénomènes catalytiques.

L'étude de la catalyse constitue un domaine interdisciplinaire complexe où les progrès dans la compréhension des mécanismes et dans les applications dépendent incontestablement des progrès faits dans d'autres domaines. Ceci est clairement pris en compte dans le *Traité* où le support technologique est présenté comme décisif pour tester une variété plus large de réactions chimiques, autres que celles de décomposition.

Cependant, les deux théories, présentées d'ailleurs assez brièvement, ne sont pas confrontées aux autres explications et les nombreuses controverses aussi bien sur l'utilité du concept que sur les tentatives souvent infructueuses de théorisation du phénomène catalytique n'ont pas trouvé d'écho dans le *Traité*. Les aspects pratiques et empiriques des phénomènes y ont, de loin, une place privilégiée, comparativement aux aspects théoriques. L'origine de ce parti pris peut être attribuée à plusieurs raisons, parmi lesquelles :

- la multiplicité et la complexité des théories destinées à expliquer les relations entre le pouvoir catalytique et la nature du catalyseur,

- l'absence de consensus dans la communauté des spécialistes de l'époque et la valeur très inégale des explications fournies qui touchent aux disciplines les plus diverses,

- le manque de généralité des explications qui sont souvent propres à une réaction ou à un catalyseur, ou même simplement à un état physique donné de ce catalyseur,

- la grande variété des phénomènes que l'on range sous le nom de catalyse, qui induit le caractère spécifique et limité de beaucoup de théories.

L'analyse de l'évolution du concept de catalyse, depuis son invention au début du XIX^e siècle jusqu'à l'importante mise au point réalisée dans le *Traité* de Grignard environ un

siècle plus tard, permet de dégager un certain nombre de points acquis :

- la catalyse est un phénomène qui se rattache à la cinétique d'une réaction chimique ;
- son rôle ne se manifeste que pour les réactions qui peuvent se dérouler en son absence ;
- son effet d'accélération de la réaction n'est pas le même que celui de la chaleur ;
- la catalyse hétérogène est un phénomène de surface dans lequel certaines parties de la surface, appelées centres actifs, jouent un rôle privilégié ;
- le catalyseur peut évoluer d'une manière notable s'il est soumis à des variations des conditions mécaniques, physiques ou chimiques.

La réflexion sur le savoir scientifique est indissociable de la réflexion sur son évolution qui permet de mieux appréhender les difficultés et les obstacles. Le cas de la catalyse est un exemple particulièrement édifiant, car les concepts ont mis beaucoup de temps pour se construire.

L'utilisation de la catalyse est encore sujette actuellement à l'empirisme et on est encore loin du moment où le choix d'un catalyseur donné s'imposera pour une réaction donnée. L'état des connaissances sur le phénomène de catalyse est certes bien avancé sur le plan macroscopique. La compréhension du phénomène à l'échelle microscopique passe inévitablement par l'explication du comportement cinétique des molécules en transformation, domaine en cours d'exploration mais qui a déjà donné lieu au prix Nobel 1999 attribué à Zewail pour l'observation du mouvement des atomes au cours d'une réaction chimique grâce aux techniques laser.

Références

- [1] Berzelius J.J., *Rapport annuel sur les progrès des sciences naturelles*, 1835 (trad. française, Thomine, Paris, 1837).
- [2] Berzelius J.J., *Ann. Chim. Phys.*, 1836, 61, p. 146.
- [3] Eyring H., *J. Chem. Phys.*, 1935, 3, p. 107.
- [4] Evans M.G., Polanyi M., *Trans. Faraday Soc.*, 1935, 31, p. 875.
- [5] Oswald W., *L'évolution d'une science : La chimie*, Flammarion, Paris, 1909.
- [6] Désormes C.B., Clément N., *Ann. Chim. Phys.*, 1806, 59, p. 329.
- [7] Ben Kilani C., Batis H., Chastrette M., *L'Act. Chim.*, juillet-août 2001, p. 44.

- [8] Mitscherlich E., *Ann. Chim. Phys.*, 1834, 56, p. 433.
- [9] Berzelius J.J., in Simon L.J., *Bull. Soc. Chim.*, 1903, 29, p. I-XX.
- [10] Libavius A., in Partington J.R., *A history of Chemistry*, Mc Millan, New York, 1961, vol. 2, p. 254.
- [11] Berzelius J.J., *Traité de chimie minérale, végétale et animale*, 2^e éd. française, Firmin Didot, Paris, 1845, p. 111.
- [12] Blondel-Mégrelis M., *L'Act. Chim.*, mai-juin 2002, p. 5.
- [13] Liebig J., *Guide pour l'introduction à l'étude de la chimie*, trad. de l'allemand par C. Gerhardt, Eugène Lacroix, Paris, 1864.
- [14] Liebig J., *Ann. Chim. Phys.*, 1839, 71, p. 147.
- [15] Liebig J., *Lettres sur la chimie considérée dans ses applications à l'industrie, à la physiologie et à l'agriculture*, 1845, C. Gerhardt (éd.), Masson, Paris, 1847. 8^e Lettre, p. 87.
- [16] Salet G., *Dictionnaire de chimie pure et appliquée*, A. Wurtz (éd.), Hachette, Paris, 1870.
- [17] Naquet A., Hanriot M., *Principes de chimie fondée sur les théories modernes*, 4^e éd., F. Savy (éd.), Paris, 1883, Tome 1, p. 6.
- [18] Wilhelmy L., *Poggendorf Ann.*, 1850, 81, p. 413 et 499.
- [19] Loewental J., Lenssen E., *J. Prakt. Chem.*, 1862, 86, p. 321 et 421, cité par Partington J.R., *A history of Chemistry*, Mc Millan, New York, 1961, vol. 2, p. 584.
- [20] Berthelot M., Péan de Saint-Gilles, *Ann. Chim. Phys.*, 1862, 65, p. 385 ; 66, p. 5 ; 1863, 68, p. 225.
- [21] Harcourt A.V., Esson W., *Proc. Roy. Soc.*, 1865, A14, p. 470 ; *Phil. Trans.*, 1866, 156, p. 193 ; *Phil. Trans.*, 1867, 157, p. 117.
- [22] Henry W.C., *Phil. Mag.*, 1835, VI, p. 354 ; *Ann. Phys.*, 1835, XXXVI, p. 150.
- [23] De la Rive A.A., Lettre à Becquerel, *CRAS*, 1838, VII, p. 1061.
- [24] Sabatier P., *La catalyse en chimie organique*, Librairie Polytechnique, Paris, 1913, p. 46.
- [25] Taylor H.S., Burns R.M., *J. Am. Chem. Soc.*, 1921, 43, p. 1273.



H. Batis

Habib Batis

est professeur à la Faculté des sciences de Tunis*.

Maurice Chastrette

est professeur émérite à l'Université Claude Bernard Lyon 1**.



M. Chastrette

* Laboratoire d'études de solides catalyseurs, Faculté des sciences de Tunis, Département de chimie, 1060 Tunis (Tunisie).

** LIRDHIST, Université Claude Bernard-Lyon 1, 43 bd du 11 Novembre 1918, 69622 Villeurbanne.

Courriel : maurice.chastrette@wanadoo.fr

La rédaction de L'Actualité Chimique vous souhaite de bonnes vacances !

Au programme de la rentrée :
 en septembre, un numéro double sur le thème
Chimie et environnement
 et en novembre, un numéro spécial traitant de
Réflexions et pratiques autour de la vulgarisation de la chimie

Industrie

PCAS : bilan 2003
et perspectives 2004

C. Moretti, nouveau PDG de PCAS, a présenté en avril dernier les résultats consolidés 2003 de son groupe qui, comme tout le domaine de la chimie fine, a dû faire face à une conjoncture dégradée se manifestant notamment dans le secteur de la synthèse et de la formulation pharmaceutique, qui représente 57 % de son chiffre d'affaires (CA) (baisse des autorisations de mise sur le marché de nouveaux médicaments, gestion rigoureuse des dépenses de santé, sur-stockage des laboratoires pharmaceutiques), ainsi que dans le secteur parfumerie-cosmétique. PCAS a pu atténuer les effets de cette conjoncture grâce aux acquisitions réalisées en 2001-2002, à la grande réactivité de son personnel, à sa R & D performante (15 millions d'euros en 2003, soit 7,8 % du CA) et à sa forte relation avec ses clients.

Le CA 2003 s'est élevé à 190,6 millions d'euros, en diminution de 9,3 % par rapport à 2002, par suite de la dégradation du secteur pharmaceutique (voir ci-dessus) et de la baisse du dollar. Le résultat net avant amortissement des écarts d'acquisition s'élève à 900 000 euros, en très forte baisse par rapport à 2002 (9,5 millions d'euros).

Faits marquants et objectifs 2003/2004

- la reprise économique dans le secteur Photochimie-Nouvelles technologies ;
- la cession de l'activité Services analytiques (société Vernolab) acquise en 1999 et devenue le leader européen de l'analyse des huiles, mais marginalisée au sein de PCAS, au groupe international d'origine suisse SGS ;
- la création d'un pôle de formulation pharmaceutique unique sous le nom de Créapharm, regroupant les entités Créapharm/Euclidis et E-Pharma ;
- la mise en service d'un système intégré de gestion conforme aux standards cGMP et BPF, pour tous les sites dédiés à l'activité pharmaceutique ;
- un partenariat avec la société Aventis, qui se concrétisera par une prise de participation majoritaire dans le site Aventis de Villeneuve-la-Garenne et par un accord de production concernant la synthèse de certaines molécules clés d'Aventis (dont l'antithrombotique Lovenox®) ;
- une présence commerciale plus étoffée aux États-Unis.

Le secteur **Synthèse et formulation pharmaceutique** (57 % du CA) a diminué de 15,5 % dans la branche Synthèse pharmaceutique et de 6,6 % en Formulation pharmaceutique par rapport au CA 2002, baisse due à la conjoncture dégradée de ce secteur. Les fondamentaux restent néanmoins bons à moyen terme, notamment grâce au renforcement de l'externalisation des grands laboratoires pharmaceutiques, aux besoins des « start-up » et des entreprises de biotechnologie et à la position forte de PCAS dans ce secteur (portefeuille clients).

Le secteur **Parfumerie-Arômes-Cosmétique** (12 % du CA) a diminué de 15,3 % par rapport au CA 2002, baisse due à la conjoncture dégradée et à la forte concurrence asiatique. Dans ce secteur, PCAS dispose d'atouts (production de matières actives sur mesure, savoir-faire en synthèses à base d'acroléine) qui devraient lui permettre de redresser la situation en 2004.

Le secteur **Photochimie-Nouvelles technologies** (11 % du CA) a connu une reprise significative en 2003 (+ 30 % en volume), mais s'est stabilisé au même niveau de CA qu'en 2002 par suite de la faiblesse du dollar. Les perspectives 2004 sont une confirmation de la reprise en électronique et une montée en puissance des nouvelles technologies (écrans plats, polymères électroluminescents).

Le secteur **Spécialités chimiques industrielles** (additifs et fluides techniques pour les industries du pétrole, du graissage et de l'anticorrosion) (9,7 % du CA) a progressé de 13,7 % par rapport au CA 2002. La stratégie 2004 repose sur la poursuite de la croissance à l'international et le développement de projets importants en façonnage.

Le secteur **Chimie minérale fine** (7 % du CA) a baissé de 9,3 % par rapport au CA 2002, par suite notamment de la baisse des ventes des oxydométalliques et de la baisse du dollar. L'année 2004 verra la finalisation de sa réorganisation et l'émergence de nouveaux marchés en partenariat.

Perspectives 2004

La conjoncture reste difficile pour le secteur pharmaceutique mais porteuse d'espoir pour les autres secteurs. La stratégie de PCAS reposera sur une dynamique commerciale offensive, notamment aux États-Unis, et sur le développement de partenariats, en particulier avec Aventis dans le secteur pharmaceutique (si l'accord Sanofi-Aventis ne le remet pas en question). Hors pharmacie, les atouts sont le

développement de la chimie de l'acroléine, la montée en puissance des nouvelles technologies et le développement du façonnage. La fusion avec le holding Dynaction est prévue pour fin 2004, sous une forme encore indéterminée.

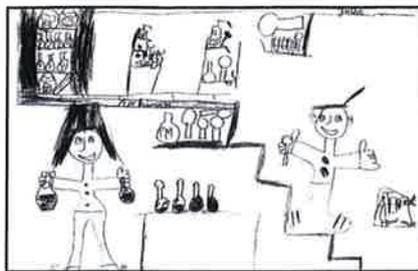
Yves Dubosc

Enseignement et formation

Penser avec les mains :
un défi partagé par enseignants,
scientifiques et ingénieurs

Le colloque sur l'Accompagnement en science et technologie à l'école primaire, organisé par l'École des Mines de Nantes, l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris, l'École Normale Supérieure et l'École Nationale d'Arts et Métiers, s'est tenu du 12 au 14 mai. Accompagner, c'est faire « avec » et non pas « à la place » de l'enseignant, pour rendre ce dernier de plus en plus autonome. De là est née la grande richesse de cette méthode, mais aussi l'existence de contraintes et de pièges à éviter. Le colloque a donc cherché à informer tous les acteurs présents des divers accompagnements existants et de leurs possibilités. Les organisateurs ont relevé ce défi par la mise en place de conférences plénières sur les enjeux et les risques de l'accompagnement scientifique à l'école primaire, de témoignages, et par la mise en situation des participants lors d'ateliers où ceux-ci pouvaient expérimenter la collaboration pédagogiques/scientifiques.

Georges Charpak a rappelé la place de la France comme centre de ressources européen et mondial, et a évoqué l'accompagnement scientifique en Europe. Lors des conférences plénières, Yves Quéré, membre de l'Académie des sciences, professeur émérite à l'École polytechnique et membre fondateur avec Pierre Léna et Georges Charpak de « La main à la pâte », a évoqué les avantages de cette collaboration pour les élèves. Cette opération, lancée en 1996, vise à promouvoir les démarches d'investigation scientifique à l'école primaire. Selon Yves Quéré, l'apprentissage de ces démarches a permis aux enfants d'acquérir des vertus morales, sociales et intellectuelles, comme la non-arrogance face aux faits et le respect de ceux-ci. A aussi été évoquée la nécessité d'un accompagnement d'une durée pertinente, permettant à la classe d'assister à l'échange accompli entre l'enseignement et l'accompa-



Dans le cadre d'une étude réalisée par Marie-Odile Lafosse-Marin (Espace des sciences de l'ESPCI), des élèves du CE2 au CM2 ont répondu en dessin à la question « Pour toi, qu'est-ce qu'un scientifique ? ». Jules, en CM1, a bénéficié d'un accompagnement scientifique, Quentin, en CE2, n'en a pas eu (on pourra remarquer la légende : « c'est un scientifique fou » et que cela se transmet de père en fils)...

gnateur, et lui offrant une prise de contact avec le réel et la découverte du travail en équipe.

Par ailleurs, différents points ressortent lors des témoignages. On constate que les séances formelles attirent moins que le suivi d'un fil conducteur (exemple : l'électricité). Pour que les enfants comprennent ce qui se passe, il est nécessaire de travailler avec du matériel simple. On arrive alors au fur et à mesure à la création d'hypothèses et de généralisations. Ce mode d'enseignement apporte une aide aux élèves en échec scolaire ou à ceux qui « décrochent » des sciences. Il provoque également une évolution de l'image du scientifique chez eux : il passe d'un homme de sciences seul et torturé à une vision plus positive et plus proche de la réalité.

La production de ressources pédagogiques, créées notamment par des institutions comme l'École centrale de Lyon et l'IUFM, testées et réajustées par les médiateurs, est un appui à la formation du maître, qui acquiert alors une culture et une démarche scientifique. Cette aide peut aussi intervenir par les sites en ligne de consultants, comme celui de « La main à la pâte ». Ce réseau, qui aide les enseignants avant, pendant et après l'activité en classe, est modéré, ce qui permet une meilleure compréhension des réponses et évite des redites dans les questions. Différents pièges de l'accompagnement ont, de plus, été mis en exergue. Jean Matricon, physicien et professeur émérite de l'Université Paris 7, a souligné le problème du langage qui doit, sans être trop simplifié, être compréhensible pour l'auditoire. L'accompagnement doit avoir lieu dans un dialogue avec les enfants, ne pas se faire à un rythme trop soutenu afin qu'ils assimilent les informations, et nécessite l'acceptation par le scientifique de leur ignorance. Les conclusions des débats ont été synthétisées par Richard-Emmanuel Eastes de l'ENS. Comme dit précédemment, l'enseignant doit être à

l'origine de la demande sans céder sa place à l'accompagnateur. Cette collaboration, pour qu'elle se déroule au mieux, doit s'inscrire dans la durée, être en adéquation avec le cadre institutionnel et menée en commun. De plus, le scientifique doit faire preuve d'humilité face à la classe, une bonne entente entre les médiateurs est indispensable et cette démarche scientifique doit donner à l'enfant le droit de s'exprimer librement et de se tromper.

Ces accompagnements sont apparus très différents les uns des autres et la mise en place d'un cadre de référence s'est révélée indispensable. Le dernier jour du colloque était donc destiné à un public institutionnel pour travailler à la mise en place d'une charte de l'accompagnement scientifique et à la constitution d'un Comité national. La charte définit notamment les cadres, rôles et objectifs de l'accompagnement et l'accompagnateur scientifique.

Émérance Marcoux

De technicien à ingénieur

Les titulaires de BTS ou de DUT souffrent d'une absence de perspective professionnelle et c'est pourquoi diverses écoles d'ingénieurs ont décidé de leur ouvrir leurs portes. Ainsi, les Écoles Nationales Supérieures de Chimie de Clermont-Ferrand, Lille, Montpellier, Mulhouse, Rennes et l'École Nationale Supérieure de Chimie et de Physique de Bordeaux se sont associées dans un service commun de formation continue. La vocation de ce service est de préparer les candidats à une entrée directe en 2^e année de la formation initiale dispensée, indifféremment, par l'un de ces établissements, le diplôme d'ingénieur obtenu par cette voie étant identique à celui sanctionnant la formation initiale.

Les candidats doivent :

- être titulaires d'un DUT ou d'un BTS en chimie, génie chimique ou mesures

physiques ou d'un diplôme sanctionnant une formation technologique équivalente ;

- justifier d'une activité professionnelle salariée de 3 ans au 1^{er} septembre de l'année d'inscription, dans les fonctions de technicien supérieur.

La formation est répartie sur trois années. Durant la première, les candidats conservent leur activité professionnelle et suivent un enseignement par correspondance. Ils cessent ensuite toute activité professionnelle, sans rompre leur contrat de travail avec l'employeur, et deviennent élèves réguliers de l'école pour laquelle ils ont opté. Au cours de leur scolarisation, les candidats (salariés ou demandeurs d'emploi) peuvent bénéficier des rémunérations prévues pour les stagiaires de la formation professionnelle.

Date limite de dépôt du dossier complet : **31 juillet 2004**.

- Administration du service commun : ENSCMu Service formation continue, 3 rue Alfred Werner, 68093 Mulhouse Cedex.
Courriel : fc.enscmu@uha.fr

La chimie au quotidien

Aspirine, un comprimé de chimie

Apparemment commune, mais pourtant peu banale aux yeux des praticiens, l'aspirine est centenaire.

La simplicité de sa structure moléculaire offre un prétexte pour découvrir quelques aspects de la chimie. Au-delà de l'histoire de l'aspirine, l'exposition apporte également quelques clés pour comprendre la genèse d'un médicament aujourd'hui. Elle montre comment chimistes, biologistes, pharmaciens galénistes, médecins et fabricants industriels travaillent de concert. Les thèmes se répartissent en quatre espaces : origines des médicaments, dans le laboratoire..., aspirine de la tête aux pieds... et industrie pharmaceutique. En « voyageant » d'une science à une autre et du laboratoire à l'usine, le visiteur ira de l'échelle de la molécule à celle de la production industrielle.

- Jusqu'au 6 juillet 2004.
Palais de la Découverte,
Avenue Franklin D. Roosevelt, 75008 Paris.
<http://www.palais-decouverte.fr>

Erratum

L'hommage à Jacqueline et Antoine Potier publié en avril (page 63) contient une erreur : Jacqueline Potier est née en 1925 et non en 1923 comme indiqué. Nos excuses à Jean-Louis Pascal.

Millipore

division LabWater

Adresse : BP 307, 78054 Saint Quentin en Yvelines Cedex

Téléphone : 0825 045 645

Télécopie : 0825 045 644

E-mail : H2O@millipore.com

Internet : www.millipore.com/H2O

√ **Activités principales :**

La société Millipore est une société leader dans l'industrie des techniques séparatives. La division *Purification d'eau* pour le laboratoire répond aux besoins en eau purifiée et ultra-purifiée notamment pour :

- **les applications analytiques en chimie, biochimie, anatomopathologie, pharmacie, microbiologie ...**
- **l'alimentation des analyseurs cliniques**
- **les services de stérilisation : autoclaves et autolaveurs.**

Les ingénieurs de Millipore offrent leurs compétences aux scientifiques afin de les aider à concevoir l'installation complète de leur unité de purification d'eau.

Depuis 1998, Millipore propose un programme complet de qualification des systèmes de purification d'eau. Destiné à faciliter les procédures de validation des laboratoires, il inclut les protocoles de qualification de l'installation (QI), de qualification opérationnelle (QO) et de qualification des performances (QP). Les certificats de calibration des cellules de mesure des systèmes sont disponibles sur simple demande.

√ **Produits proposés :**

Chaque application ayant des besoins différents en matière d'eau purifiée, notre gamme de produits propose un large choix de technologies (osmose inverse, électrodésionisation en continu, déminéralisation, adsorption sur charbons actifs, microfiltration, ultrafiltration, photooxydation UV, ...).

La nouvelle génération de systèmes de purification d'eau Millipore Elix® et RiOs™ constitue une révolution dans l'alimentation centralisée en eau pure.

Pouvant produire jusqu'à **8 000 litres d'eau pure par jour**, les nouveaux systèmes de purification d'eau Millipore offrent une **maîtrise totale de tous les paramètres de production, de stockage et de distribution de l'eau sur les différents points de puisage**. Une imprimante peut être directement reliée au système, via un port RS232, permettant un archivage quotidien des données.

√ **Principaux clients :**

Hôpitaux et cliniques (Institut Gustave Roussy, Hôpital Saint-Antoine Paris, Kremlin Bicêtre, HEGP, Hospices civils de Lyon,...)

Centre national de séquençage et Centre national de génotypage – Evry

Institutions publiques (INRA, INSERM, CNRS, ...)

Grandes écoles, universités (ENS, ...)

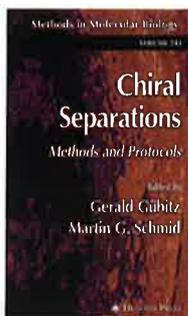
Industries pharmaceutiques (Aventis, Servier, GlaxoSmithkline, Eli Lilly, ...)

De nombreux systèmes Millipore sont également installés dans toutes les industries ou services requérant de l'eau purifiée ou ultra-purifiée.

√ **Certification :**

La fabrication et la distribution sont assurées à partir de notre site alsacien de Molsheim possédant le statut d'établissement pharmaceutique et la certification ISO 9001.

Livres



Chiral separations Methods and protocols

G. Gübitz et M.G. Schmid (éds)
432 p., 99,50 \$
Humana Press, 2004

A la suite des dramatiques problèmes posés par la thalidomide, la symétrie moléculaire (« chiralité ») est systématiquement prise en compte dans la conception, la synthèse et l'étude des effets biologiques et environnementaux de toute nouvelle molécule active. Environ 40 % des molécules biologiquement actives possèdent un centre d'asymétrie, mais seulement quelque 60 % de ces molécules chirales, soit près de 25 % des molécules actives, sont administrés sous la forme du seul énantiomère utile. Les quelque 40 % restant, soit environ 15 % des molécules actives, sont administrés sous forme de mélange racémique. Au XXI^e siècle, les organismes d'accréditation des médicaments considèrent un mélange racémique comme un produit ayant une pureté de 50 %. Il faut complètement justifier l'innocuité de l'isomère « inactif ». Il devient plus facile de faire accréditer une nouvelle molécule chirale sous forme d'énantiomère actif pur.

Dans tous les cas, que l'on recherche la purification, le suivi de synthèse ou le contrôle de produit fini, la séparation des molécules chirales devra être effec-

tuée. Ce sujet a été l'une des **grandes avancées de la chimie analytique** à la fin du siècle dernier. Si la séparation des énantiomères s'est grandement facilitée au point de devenir une analyse de routine dans de nombreux cas, elle reste l'objet d'intenses recherches et de développements continus. L'objectif de ce nouveau livre est de présenter l'état de l'art, en 2003, sur toutes les méthodes analytiques de séparation des molécules chirales. Il se positionne clairement sur **l'analyse ignorant délibérément toutes séparations chirales préparatives**.

En 25 chapitres, les 43 auteurs présentent les derniers développements des séparations chirales effectuées avec leurs techniques : chromatographie en couche mince (1 chap.), CLHP (8 chap.), chromatographie super-critique (1 chap.), électrophorèse capillaire (10 chap.) et électrochromatographie (4 chap.).

Le but de l'ouvrage est de mettre **l'accent sur la procédure** plutôt que sur les mécanismes théoriques de la séparation ou sur les paires d'énantiomères qui ont été séparées. Tous les chapitres décrivent soigneusement la méthode utilisée et, s'il y a lieu, la préparation de l'échantillon. Chaque étape est détaillée l'une après l'autre, au besoin en s'appuyant sur une riche liste de notes explicatives.

On trouve pourtant dans quelques chapitres une **compilation bibliographique** listant les paires d'énantiomères qui ont été séparées avec succès par le sélecteur chiral présenté et/ou la méthode étudiée.

Deux exemples pour illustrer le contenu de l'ouvrage : le chapitre 4 présente en 60 pages les sélecteurs chiraux de type macrocycliques glycopeptides (antibiotiques) en CLHP. L'auteur en est Armstrong, l'inventeur de ces sélecteurs. Il les décrit complètement, incluant avec les protocoles à suivre pour mettre au point une séparation, une liste de 220 énantiomères séparés

avec succès et les 142 références correspondantes.

Dans le chapitre 23, Chankvetadze décrit les séparations chirales possibles en électrochromatographie avec des sélecteurs de type polysaccharides. Il décrit complètement la délicate procédure de préparation de la colonne capillaire et donne les conditions expérimentales standard. La méthode étant très « pointue », le chapitre n'a que 11 pages incluant 23 références dont 13 appartiennent au XXI^e siècle. On regrettera pourtant **l'absence de la chromatographie en phase gazeuse** quand on connaît l'importance de la chiralité dans le domaine des odeurs. Ce livre sera très utile, aussi bien pour l'expert qui pourra approfondir sa connaissance des différentes méthodes de séparation chirale en se mettant à jour, que pour le débutant qui pourra sélectionner rapidement la ou les méthodes qu'il souhaite ou peut mettre en œuvre et connaître les protocoles expérimentaux de mise au point.

Alain Berthod

A signaler

- **Sécurité des procédés chimiques : connaissances de base et méthodes d'analyse de risques (Génie des procédés de l'École de Nancy)**

A. Laurent
488 p., 65 €
Lavoisier, 2003

- **Techniques de l'ingénieur - Corrosion, vieillissement**
G. Béranger, J. Pagetti, G. Pinard Legry (coord.)

2 vol., et/ou accès web, 2003

- **Étude et propriétés des métaux**

G. Béranger, B. Jouffrey, G. Murry (coord.)
5 vol., et/ou accès web, 2003
www.techniques-ingenieur.fr

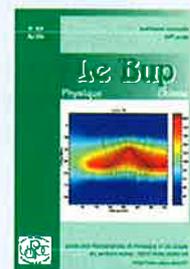
Bulletin de l'Union des professeurs de physique et de chimie (le « Bup »)

La rédaction de L'Actualité Chimique a sélectionné pour vous quelques articles plus axés sur la chimie.

N° 864 (mai 2004, 6,5 €)

- 2005 - Année mondiale de la physique : une chance à saisir, par S. Olivier.
- Incertitudes de mesure : une approche normative, par D. Barchiesi.
- La pratique de la transformée de Fourier rapide, par J.-L. Guilhem.
- Pourquoi dit-on qu'un noyau se désintègre « sans vieillir » ?, par J. Treiner.
- Nouveaux programmes de terminale S : un bilan mitigé, par P. Fretté.
- Des allègements de programmes en terminale S : est-ce raisonnable ?, par G. Bouyrie.

Sommaire complet et modalités d'achat sur <http://www.udppc.asso.fr/>



29 août-1^{er} septembre 2004**DCE 9***Behaviour of chemicals in the environment*

Bordeaux

(L'Act. Chim., fév. 2004, n° 272, p. 62)

- dce9@lptc.u-bordeaux.fr
- http://www.lptc.u-bordeaux.fr/DCE9

29 août-2 septembre 2004

MoDeSt 2004*3rd International conference on polymer modification, degradation and stabilisation*

Lyon

- modest@univ-lyon1.fr
- http://modest.unipa.it

4-9 septembre 2004

EuroConference*on new theoretical and spectroscopic approaches to inorganic chemistry problems*

San Feliu de Guixols (Espagne)

- euresco@esf.org
- http://www.esf.org/euresco

5-9 septembre 2004

Euradh 2004*7th European adhesion conference*

Freiburg im Breisgau (Allemagne)

- euradh2004@dechema.de
- http://www.euradh.org

8-13 septembre 2004

Euchem conference on nitrogen ligands in organometallic chemistry and homogeneous catalysis

Camerino (Italie)

- girolamo.lamonica@uninsubria.it
- http://www.unicam.it/discichi/nligands2004/index.htm

10-15 septembre 2004

Structure and dynamics of polymers and colloidal systems

Giens

- euresco@esf.org
- http://www.esf.org/euresco

11-16 septembre 2004

From clever molecules to smart materials EuroConference

Tomar (Portugal)

- euresco@esf.org
- http://www.esf.org/euresco

12-15 septembre 2004

XXI European colloquium on heterocyclic chemistry

Sopron (Hongrie)

- http://www.iupac.org/symposia/index.html

12-19 septembre 2004

ICTAC 13*13th International conference on thermal analysis and calorimetry*

Chia Laguna (Sardaigne, Italie)

- http://www.ictac13.com/

14-17 septembre 2004

21^e Congrès de spectrométrie de masse

Strasbourg

- 21jfm-infos@ecpm.u-strasbg.fr
- http://21jfm.u-strasbg.fr/

15-17 septembre 2004

5th International symposium on transition metals in organic synthesis

Glasgow (Royaume-Uni)

- conferences@rsc.org
- http://www.rsc.org/lap/cons/tmos5.htm

19-24 septembre 2004

JEPO 32*32^e Journées d'étude des polymères*

La Brosse Montceaux

- mtessier@ccr.jussieu.fr
- http://jepo32.espci.fr

25-30 septembre 2004

IRaP 2004*6th International symposium on ionizing radiation and polymer*

Houffalize (Belgique)

- apienaar@dkl.tu-darmstadt.de
- http://www.fundp.ac.be/irap2004

29 septembre-1^{er} octobre 2004**JIE 2004***Journées Information eaux*

Poitiers

- contact@apten.org
- http://www.apten.org

29 septembre-1^{er} octobre 2004*Chemical reactions in foods V*

Prague (Rép. Tchèque)

- Jiri.Davidek@vscht.cz
- http://nazv.vscht.cz/for

3-6 octobre 2004

8th International workshop on polymer reaction engineering

Hambourg (Allemagne)

- strauss@dechema.de
- http://www.dechema.de/pre04

3-6 octobre 2004

ANES 2004*Americas nuclear energy symposium*

Miami (FL, États-Unis)

- http://anes.fiu.edu/2004/

7-9 octobre 2004

Fluoropolymer 2004*Current frontiers and future trends*

Savannah (GA, États-Unis)

- dwsmith@clemson.edu
- http://www.polyacs.org/arcmeetings/fluoro.1004.shtml

10-13 octobre 2004

Nanotec 2004*6th International conference on nanotechnology in carbon*

Batz-sur-Mer

(L'Act. Chim., avril 2004, n° 274, p. 62)

Date limite d'inscription : 16 juillet 2004

- bonnamy@cnsr-orleans.fr
- http://www.cnsr-imn.fr/Nanotec04/

18-22 octobre 2004

SAJEC 2004*Symposium Sigma-Aldrich jeunes chimistes*

Dijon

- SAJEC2004@u-bourgogne.fr
- http://sajec2004.univ-lyon1.fr

19-21 octobre 2004

Mesurexpo 2004*Le forum de toutes les mesures*

Paris

- bfillon@exposium.fr
- http://www.mesurexpo.com

20-21 octobre 2004

EMN04*Advance and applications for micro and nano systems*

Paris

- http://tima.imag.fr/Conferences/EMN



Jean-Claude Balacéanu

Président de la Société Chimique de France de 1981 à 1983
nous a quittés le 2 avril 2004

J'ai eu la chance de faire une très grande partie de ma carrière sous sa direction lorsqu'il exerçait les fonctions de directeur des recherches avancées puis de directeur général de l'Institut Français du Pétrole. Nous lui consacrerons une notice dans un prochain numéro, mais déjà ceux qui le connaissaient peuvent porter témoignage que son action comme homme de science et manager de la recherche était éclairée par une étonnante curiosité, avec le goût de la découverte par l'exploration de nouveaux domaines et un énorme souci de la réussite industrielle.

Au nom de *L'Actualité Chimique*, dont il a bien voulu me dire plusieurs fois l'intérêt qu'il trouvait à sa lecture, et de la Société Française de Chimie, je veux lui rendre ici un hommage profondément attristé.

Bernard Sillion

Ancien rédacteur en chef de *L'Actualité Chimique*

Sections

Bourgogne Franche-Comté

Journée des doctorants

Les 6 et 7 mai derniers se sont déroulées à Besançon les Journées des Écoles doctorales Louis Pasteur (Université de Franche-Comté) et Carnot (Université de Bourgogne). Ces 5^e rencontres, organisées par l'École doctorale Carnot en collaboration avec la section régionale, ont réuni une centaine de participants (enseignants-chercheurs et étudiants de 3^e cycle). Leurs objectifs étaient, d'une part, d'apporter une vision élargie dans différents domaines de physique et chimie, et d'autre part, de permettre la remise des prix de thèse.

Quatre conférenciers ont animé la première journée :

- C. Madic (CEA-INSTN) : *Vers une nouvelle gestion des déchets nucléaires.*

- P.A. Buffat (EPFL, Lausanne, Suisse) : *Le microscope électronique : Pégase ou Chimère ?*

- J. Courtieu (Orsay) : *Reconnaissance chirale par RMN en milieu cristallin liquide : une affaire d'ordre.*

- H. Brune (EPFL, Lausanne, Suisse) : *Création de nanostructures en surface avec des propriétés magnétiques sur mesure.*

Deux prix de thèse ont été attribués :

- Le Prix EDF à F. Boschetti (LIMSAG, Dijon) : *Nouvelles synthèses du cyclène et de tétraazacycloalcanes N et C-fonctionnalisés utilisant des intermédiaires bisaminal.* F. Boschetti est lauréat du concours ANVAR pour la création de l'entreprise innovante

Chematech, soutenue par l'incubateur régional de Bourgogne.

- Le Prix Air Liquide à F. Lallemand (LCMI, Besançon) : *Dépôts électrolytiques d'alliages à base de cobalt-fer élaborés en présence d'additifs organiques : applications aux revêtements magnétiques de CoFeCr.*

Lors de la 2^e journée consacrée aux communications orales et aux posters, quatre prix ont été attribués :

- Le Prix de l'Union des Industries Chimiques (com. orale) à Jean-Baptiste Sanchez (LMN-Université de Franche-Comté) : *Apport des microtechnologies pour améliorer la sélectivité des capteurs à oxyde semi-conducteur : vers un capteur spécifique aux vapeurs d'acides fluorhydriques (HF).*

- Le Prix SFC-BFC-Shimadzu (com. orale) à Aude Brevet (LRRS, Université de Bourgogne) : *Étude par analyse de surfaces in situ des premiers instants de la croissance MOCVD de films minces de TiO₂.*

- Le Prix SFC-BFC-Sigma-Aldrich (poster) à Sébastien Clément (LCMI, Université de Franche-Comté) : *Synthèse de dérivés du paracyclophane en vue d'applications en optoélectronique.*

- Le Prix SFC-BFC-Acros (poster) à Fanny Chauv (LIMSAG, Université de Bourgogne) : *Nouvelle méthode de N-fonctionnalisation régiosélective du 1,4,7,10-tétraazacyclododécane (cyclène).*

Ces journées ont permis de rassembler plus d'une centaine de chimistes, y compris industriels, autour de sujets variés dans les domaines des matériaux, de l'analyse, de la synthèse ou de la catalyse.

Nouveau bureau

Président : Sylvain Jugé
Vice-président : Joël Vebrel
Trésorier : Yves Mugnier
Trésorier adjoint : Michael Knorr
Secrétaire : Claude Dubois
Secrétaire adjoint : Hélène Cattey

• Sylvain Jugé, Université de Bourgogne, LSEO,
6 bd Gabriel, BP 138, 21000 Dijon.
Tél. : 03 80 39 61 13. Fax : 03 80 39 60 98,
Sylvain.Juge@u-bourgogne.fr

Groupes

Club Histoire de la chimie

Nouveau bureau

Présidente : Marika Blondel-Mégrelis
Vice-président : Jacques Bourdais
Trésorier : Mohad-Eddine Brik
Secrétaire : Laurence Lestel
Chargé des relations avec la Société d'Histoire de la Pharmacie : Olivier Laffont

Prochaines réunions du club

- Le **23 octobre 2004**, à 9 h 30 à la Faculté de Pharmacie (Paris) : réunion commune avec la Société d'Histoire de la Pharmacie sur le thème des **colorants**.

- Les **10-11 décembre 2004**, à Louvain-la-Neuve (Belgique) : réunion commune avec Mémosciences (Société d'Histoire de la Chimie belge) sur le thème des **fraudes**.

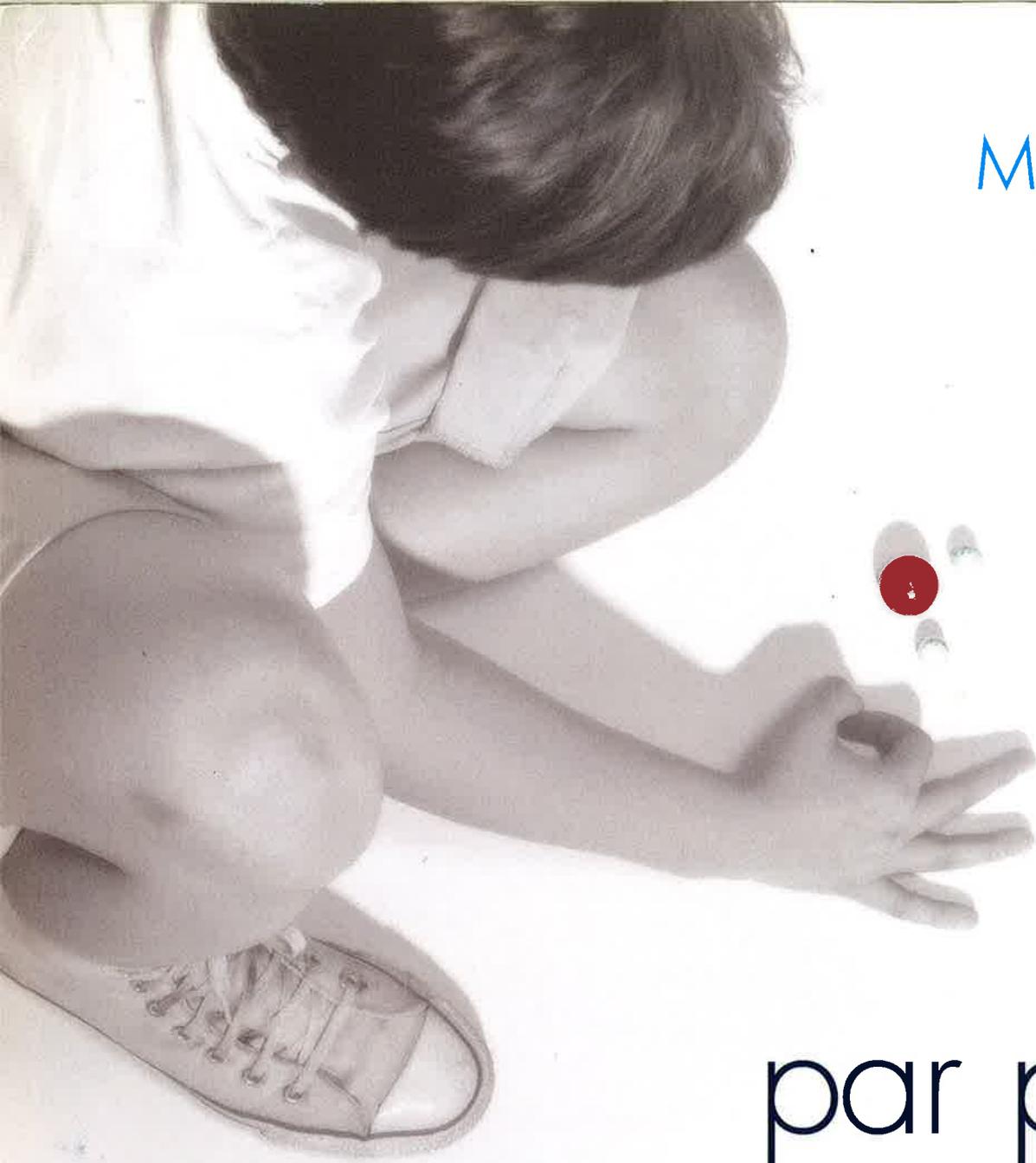
• marika.blondel-megrelis@libertysurf.fr

**XIV^e Rencontres CNRS
« Sciences & Citoyens »**
Poitiers, 22-24 octobre 2004



Vous avez de 18 à 25 ans, venez dialoguer avec des chercheurs de toutes disciplines au cours de ce rendez-vous annuel de réflexion.

• <http://www2.cnrs.fr/jeunes/>
(rubrique actions jeunes)



MILLIPORE

par pure passion

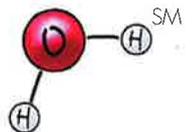
Olivier Gourdet, 27 ans

Ingénieur d'applications

Millipore Lab Water

Par pure passion, Olivier reproduisait cette molécule d'eau dans tous ses jeux. Cette passion l'a naturellement conduit à rejoindre Millipore. Au sein de l'équipe Lab Water, Olivier aide ses clients à définir leurs besoins en eau pure et ultra-pure ; il leur apporte conseils, méthodes et solutions high-tech. Nous partageons tous cette passion chez Millipore. Elle nous accompagne quotidiennement dans l'application que nous mettons à répondre à vos besoins.

Millipore fournit aux laboratoires les moyens de répondre à tous leurs besoins en eau purifiée. Une gamme élargie de systèmes de purification d'eau et des services qui répondent aux exigences de vos applications : Millipore, plus que jamais, accompagne l'évolution de vos travaux, par pure passion.



Pour plus d'informations sur les solutions de purification d'eau Millipore, contactez-nous :

Tel : 0 825 045 645 Fax : 0 825 045 644 Email : H2O@millipore.com Web : www.millipore.com/H2O