

l'actualité chimique

Le journal de la Société Chimique de France
Juin 2014 - N° 386

Quand l'alchimie était une science...

Et aussi :

**Détecter les additifs
dans les plastiques**

**Parcours de chimistes :
du public au privé**

**Déchets en mer :
une fatalité ?**



Société Chimique de France



Aix Marseille Université, le CNRS et l'Ecole Centrale Marseille unissent leurs compétences et savoir-faire en Recherche, au sein de la **Fédération de Recherche Sciences Chimiques – Marseille**

autour des axes :

Energie, Matériaux et Nanosciences, Sciences Moléculaires (chiralité, catalyse, chimie radicalaire, matériaux organiques et polymères), **Sciences Analytiques** (méthodes, astrochimie et environnement) et **Interfaces avec le vivant et la Santé**. Offre de formation variée tournée vers la recherche, l'innovation et les entreprises : Universités, Ecole Centrale - Marseille et l'Ecole Doctorale des Sciences Chimiques.

Une pratique forte du partenariat industriel au bénéfice de la Société via ses unités de recherche fondatrices, l'Institut Carnot Star et des plateformes analytiques pour explorer la matière de la molécule au matériau : **Spectropole** (RMN haut champ liquide et solide, spectrométries de masse (esi ms, malditof, ion mobility), analyse par diffraction des rayons X, IRTF, VCD, ...) et la **Plateforme de microscopie, microanalyse, et imagerie** (CP2M et PRATIM : HRTEM, MEB, nano-usinages, TEM environnemental, Confocal, Saxe)

Unités de recherche



300 Chercheurs
110 Ingénieurs & techniciens
250 Doctorants & postdocdoctorants



La fédération est présente sur les six campus scientifiques d'Aix-Marseille
Pour tout contact voir : fr-chimie.univ-amu.fr



Le Palais du Pharo depuis le toit du MUSEM

RÉDACTION

Rédactrice en chef : Rose Agnès Jacquesy

Rédactrice en chef adjointe :

Séverine Bléneau-Serdel

Secrétaire de rédaction : Roselyne Messal

Chef de rubrique, Collection « L'Actualité Chimique - Livres » : Minh-Thu Dinh-Audouin

Secrétariat : Martine Maman

Webmestre : Pierre Miquel

Comité des rubriques :

Recherche et développement : Rose Agnès Jacquesy, Industrie : Jacques Bousquet, Enseignement et formation : Katia Fajerberg, TP : Xavier Bataille, Histoire de la chimie : Marika Blondel-Mégrelis, Comment ça marche ? : Véronique Nardello-Rataj, Un point sur : Jean-Pierre Foulon, Chimie des aliments et du goût : Hervé This, En bref : Séverine Bléneau-Serdel et Roselyne Messal, Actualités de la SCF et Agenda : Roselyne Messal, Livres et médias : Yves Dubosc

Comité de rédaction :

P. Arpino, J. Belloni, E. Bordes-Richard, J. Buendia, C. Cartier dit Moulin, C. de Novion, R.-E. Eastes, J. Fournier, R. Lescouezec, P. Massiani, M.-T. Ménager, C. Monneret, N. Moreau, J.-M. Paris, P. Pichat, A. Picot, M. Quarton, J. Rangapanaiken, F. Rocquet, H. Toulhoat, L. Valade, P. Walter

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

Publication analysée ou indexée par :

Chemical Abstracts, base de données PASCAL

ÉDITION : Société Chimique de France

250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris

Rédaction : 28 rue Saint-Dominique, 75007 Paris

Tél. : 01 40 46 71 64 - Fax : 01 40 46 71 63

redaction@lactualitechimique.org

www.lactualitechimique.org

Directeur de la publication : Olivier Homolle,

président de la Société Chimique de France

Imprimerie : SPEI, BP 26, 54425 Pulnoy

Maquette articles : e-Press, Casablanca

Technopark, Route de Nouaceur, Casablanca (Maroc)

Maquette hors articles : Mag Design

www.magdesign.info

ISSN version papier 0151 9093

ISSN version électronique 2105 2409

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. 62

© SCF 2014 - Tous droits réservés

Dépôt légal : juin 2014

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 1^{er} 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 2014 - L'ACTUALITÉ CHIMIQUE

(11 numéros par an)

Abonnement papier + électronique

Particuliers : France 100 € - Étranger 105 €

Institutions : France 200 € - Étranger 210 €

Lycées : France 110 € - Étranger 130 €

Abonnement électronique seul (France/Étranger)

Particuliers : 55 € - **Institutions** : 155 € - **Lycées** : 70 €

Membres de la SCF : abonnement inclus

dans la cotisation ou à tarif préférentiel

Abonnement : SCF, Nadine Colliot

250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris

Tél. : 01 40 46 71 66 - Fax : 01 40 46 71 61

abonnement@lactualitechimique.org

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

Éditorial 3

Le principe de précaution, un principe d'action ?, par **R.A. Jacquesy** 3

Clin d'œil étymologique 4

À propos du nickel, par **P. Avenas** 4

Chroniques 5

Et revoilà l'hydrogène, par **J.-C. Bernier** 5

À propos de 7

Tuberculose, le retour ?, par **C. Monneret** 7

Recherche et développement 9

Cyrcé, un cyclotron pour la recherche et l'enseignement en Alsace, par **P. Marchand, A. Ouadi, M. Pellicoli et D. Brasse** 9

Prix de thèse 2012 de la division Chimie analytique

Identification des additifs dans les matériaux plastiques : analyse directe par spectrométrie de masse couplée à la mobilité ionique, par **C. Barrère, F. Maire, C. Afonso et P. Giusti** 15

Parcours de chimistes 21

Du monde académique au monde industriel : trois interviews, par **R.A. Jacquesy** 21

Enseignement et formation 27

Les Olympiades de la chimie autour du monde : comparaison des systèmes de sélection, par **D. Kandaskalov et S. Bléneau-Serdel** 27

Histoire de la chimie 32

Quand l'alchimie était une science, par **B. Joly** 32

Les chimistes, leurs institutions et leurs sociétés savantes entre les deux guerres. VI - Georges Urbain (1872-1938) et la « science sensualiste », par **F. Riou** 39

Sécurité et environnement 44

Les déchets plastiques en mer, un « 7^e continent » ?, par **R. Messal** 44

Le polonium, un poison frais (période 138 j !), par **E. Ansoberlo** 49

En bref 50

Livres et médias 55

Agenda 59

Actualités de la SCF 61

Un point sur 63

Les aimants permanents à base d'éléments de terres rares : un avenir en vert, par **D. Givord et N. Dempsey** 63



Couverture :

Sédimentation de rhodamine pendant une polyestérification, par **Simon Raffy** (doctorant au Laboratoire mixte CNRS-Rhodia (LOF)/Centre de Recherche Paul Pascal, Bordeaux), lauréat du concours « Images de chimistes » 2014 organisé par le club des jeunes de la section Aquitaine de la SCF (voir page 54).

Conception graphique Mag Design - www.magdesign.info

L'Actualité Chimique est un périodique mensuel qui permet d'assurer des échanges de connaissances, d'idées, de points de vue dans la communauté des chimistes. La revue publie des articles scientifiques de haut niveau sur les sciences chimiques, de l'approche fondamentale aux développements et aux applications industrielles dans de nombreux domaines. Les articles s'adressent donc à un large lectorat et sont lus par des chimistes spécialisés ou non dans un domaine (chercheurs, industriels), mais également par de jeunes scientifiques en formation et par leurs professeurs : ils doivent donc **être accessibles à l'ensemble du lectorat**.

Tout manuscrit adressé à la Rédaction est soumis à un (voire deux) experts du Comité de lecture.

L'acceptation finale d'un manuscrit pour publication est conditionnée à un éventuel travail de révision ou de réécriture de l'article par ses auteurs, sur la base des remarques ou suggestions émises par les experts.

Les articles de *L'Actualité Chimique* sont référencés dans *Chemical Abstracts*.

I – Recommandations pratiques pour rédiger votre manuscrit

Les recommandations qui suivent sont nécessaires au bon déroulement de la composition ; nous vous demandons donc de les respecter.

- Le titre de votre article devra être clair et « accrocheur ». Prévoir éventuellement un sous-titre pour éviter un titre trop long.
- Les articles doivent être rédigés en français (exceptionnellement en anglais, après accord de la Rédaction) et être relativement brefs (10-15 pages en times 12 et en double interligne). Le texte devra éviter toute rédaction ésotérique ; il est indispensable par exemple d'expliquer les sigles ou abréviations. Si nécessaire, prévoir un glossaire ou des encadrés explicatifs pour les termes ou expressions techniques. Certains compléments pourront être publiés sous forme d'annexes sur le site Internet de la revue.
- Pour faciliter la lecture de votre article, prévoir des paragraphes, introduits par des titres (voire des sous-titres).

Un manuscrit doit obligatoirement contenir :

- Le nom, prénom et fonction (professeur, directeur de recherche...) de tous les auteurs ainsi que leurs coordonnées respectives (adresse postale, téléphone et courriel) – préciser l'auteur correspondant. Joindre à l'article pour l'encadré auteurs, le fichier jpg de la photographie de chaque auteur (type identité, de préférence en couleur et de bonne définition).
- Le titre de l'article en anglais, un court résumé en français et en anglais (une dizaine de lignes), 5-6 mots-clés environ en français et en anglais. Le résumé, destiné également à notre base de données sur

Internet, doit faciliter la recherche ; il doit donc être bref et refléter l'esprit de l'article, en dégagant ses points essentiels. Éviter les détails ainsi que les formes personnelles (privilégier plutôt « Dans cet article, les auteurs... »).

- Des illustrations, de préférence en couleur, destinées à « accrocher » le lecteur et à favoriser la compréhension de l'article (photos, tableaux, figures, encadrés...). Accompagnées d'une légende et des sources éventuelles, celles-ci doivent être numérotées et appelées dans le texte, et leurs fichiers adressés indépendamment du texte en format tiff, jpg, gif... en bonne définition pour l'impression (300 dpi). Les encadrés sont utilisés pour expliciter ou mettre en relief un principe ou un fait particulier. Enfin, éviter les termes anglais figurant dans les illustrations et les traduire si possible.



Attention : l'auteur doit s'assurer des autorisations nécessaires à toute reproduction et s'acquitter des droits éventuels.

• Notes et références :

Limiter la bibliographie à une vingtaine de références les plus représentatives.

Les références doivent **être numérotées par ordre d'apparition dans le manuscrit** [numéros entre crochets] et **respecter le standard** suivant :

- [1] Dupont M., Durant J.-M. (nom, initiale du prénom), La chimie est belle (titre de l'article), *L'Act. Chim.* (titre de la revue en italique), **2011** (année en gras), 3(5) (volumes en ital), p. 5.
- [2] Martin J., *La chimie et la vie* (titre de l'ouvrage en ital), R. Dupont, J. Durant (éditeurs), Springer (édition), **2011**, p. 56-71 (éventuellement les pages s'il s'agit d'une partie de l'ouvrage).
- [3] Costa M., *Titre de la thèse* (en ital), thèse de doctorat, ENS Lyon, **1996**.
- [4] www.lactualitechimique.org (rubrique « Qui sommes-nous ? »).
- [5] Dupont, *Titre* (en ital), Brevet US 0148785, **1999**.

Les notes doivent également être appelées entre parenthèses et en exposant par ordre d'apparition dans le manuscrit (ex. : voir^[1]).



Attention, ne pas faire de liens : les notes et références risquant de disparaître lors du travail éditorial.

II – Envoi des manuscrits

Le manuscrit, obligatoirement **sous format word**, doit être adressé à la Rédaction par voie électronique (ou sur CD-Rom).

III – Publication

En cas d'acceptation, aucun engagement sur la date de publication ne peut être fourni, mais l'auteur sera informé au plus tôt.

L'auteur recevra les épreuves de son article pour vérification avant la publication.



Le principe de précaution, un principe d'action ?

Le principe de précaution, quels sont son énoncé et son sens ? Il impose une évaluation des risques quand, et uniquement quand, existe une suspicion – étayée – de menace de dommages graves et irréversibles pour l'environnement. Les autorités publiques doivent alors veiller à l'adoption de mesures – provisoires et proportionnées – choisies dans une gamme d'actions possibles (information, recherche, incitations, restrictions d'usages, etc.). Il s'applique aux risques incertains et non aux risques avérés auxquels s'appliquent les principes de prévention et de prudence.

Il est regrettable, mais fréquent, que le principe de précaution soit justement trahi par ceux qui s'en prévalent pour obtenir des décisions discrétionnaires, hors du cadre strict défini par le législateur. Ce sont de tels abus que le Comité d'évaluation et de contrôle des politiques publiques de l'Assemblée nationale a tenté de rationaliser en faisant voter, en février 2012, une résolution demandant expressément un éclaircissement sur l'utilisation du principe de précaution, une organisation transparente de sa mise en œuvre et un élargissement de l'expertise requise aux bénéficiaires des techniques ou substances suspectées, sans se limiter aux risques de dommages et sans confondre expertise et concertation avec les parties prenantes.

Dans son esprit même, le principe de précaution n'est nullement en contradiction avec l'idée de progrès scientifique et technique, avec la recherche ou le développement d'activités économiques. Il recommande au contraire de suivre les avancées de la science et de la technique, de mobiliser la recherche pour réduire les incertitudes et promouvoir ainsi une acceptation « durable » de ces progrès par les populations. Il s'agit bien d'accompagner l'innovation et la prise éventuelle de risques et non de les empêcher. Une notion importante puisqu'elle introduit, comme dans le cas des médicaments, celle du rapport bénéfice/risque.

Le cas du gaz de schiste est exemplaire en ce qu'il cumule les attitudes les plus tranchées, qui s'excluent mutuellement sans vouloir s'écouter. La fracturation hydraulique qui permet la libération du gaz et du pétrole de schiste consiste à fracturer la roche poreuse en injectant, grâce à la technique du forage horizontal, un fluide sous très haute pression. Elle utilise de très grandes quantités d'eau, de sable et un très faible pourcentage d'additifs chimiques, environ 0,5 % du volume total injecté.

Quels sont les principaux arguments des environnementalistes ? Ils dénoncent les dommages locaux à l'environnement induits par ces techniques : utilisation d'énormes quantités d'eau, insuffisance du traitement de ces eaux après usage et absence de régulation quant aux détergents utilisés, car leur composition serait « secret industriel » (à noter que les 0,5 % évoqués ci-dessus n'ont, semble-t-il, pas été comparés aux quantités d'eau polluée par les tensioactifs ménagers rejetées dans une ville moyenne). Ils s'inquiètent des conséquences sur la contamination des sols et la qualité de l'eau potable. Les perturbateurs endocriniens et les composés chimiques cancérigènes sont évidemment brandis comme une menace contre l'espèce humaine. La crainte est que les paysages soient « transformés en zones industrielles polluées », avec des nuisances comme le bruit, la perte de valeur immobilière des

habitations voisines, et même des risques de tremblements de terre.

Face à ces risques, potentiels et peu étayés, qu'une bonne approche technique permettrait de maîtriser, une attitude moins manichéenne devrait pouvoir être discutée sereinement. L'évolution, voire le bouleversement prévisible des équilibres géostratégiques lié à l'exploitation du gaz et du pétrole de schiste, en Amérique du Nord et bientôt en Chine – qui, bien que ne possédant pas actuellement les technologies adaptées, se prépare à suivre la même voie – risque d'être destructeur s'il est mal préparé. En effet, au-delà des avantages économiques et de l'indépendance énergétique des gouvernements vis-à-vis de pays exportateurs, la demande croissante et la raréfaction des ressources fossiles comme l'instabilité des équilibres actuels ne devraient-ils pas amener les acteurs responsables à entreprendre une réflexion raisonnée, ne serait-ce que pour assurer la période transitoire nécessaire pour passer de l'« ère énergie fossile » à l'« ère énergie renouvelable » ?

Comment traiter la question, puisque le changement climatique lui-même est appelé à la rescousse aussi bien par les partisans que par les opposants à la fracturation hydraulique ? Peut-être tout simplement en approchant, non pas globalement, mais au cas par cas, la manière la plus appropriée d'exploiter des réserves situées dans des environnements variés, nécessitant pour être protégés raisonnablement d'être analysés, et d'y appliquer les technologies les plus protectrices. C'est ce qu'a proposé en 2013 une équipe de chercheurs du Center for Energy Economics and Policy du RFF (*Resources for the future*), en intégrant les aspects réglementaires que devraient édicter les différents États concernés, dans une réflexion internationale*. La mise en commun des connaissances et la recherche de techniques variées permettraient alors d'opposer à une controverse technoscientifique – artificiellement transformée en une situation de contestation systématique – les acquis et les avancées de la science.

Contrairement au vœu du législateur, l'introduction du principe de précaution dans la Constitution et dans notre vie quotidienne exclut-elle tout espoir que le rationnel prenne le pas sur l'émotionnel dans un monde, le nôtre, qui ne souffre (pas encore ?) de la faim ou de la soif ? Qui a su, depuis la grande époque de l'industrialisation sauvage, se doter d'outils de surveillance et de contrôle ? Dans lequel la santé et le mieux-être ont indubitablement progressé ? Pour paraphraser Stephen Hawking, « *l'illusion de la connaissance est pire que l'ignorance* », et c'est à nous les scientifiques de faire progresser ces connaissances, de faire la part du probable, du possible et du certain. Et de faire nôtres les conclusions du Conseil économique, social et environnemental (CESE) du 10 décembre 2013 dans son étude « Principe de précaution et dynamique d'innovation » : « *Le principe de précaution peut être considéré comme un élément moteur d'une innovation au service de l'Homme et des générations futures, lorsque les conditions de sa juste application sont réunies.* »

Rose Agnès Jacquesy
Rédactrice en chef

*www.rff.org/shalegasrisks



À propos du nickel

Dans les dictionnaires étymologiques, au nom *nickel*, on fait référence à celui du *cobalt*, et réciproquement. En effet, ces deux métaux, situés côte à côte juste avant le cuivre dans la classification périodique, ont des noms d'une même origine, liée à la mythologie germanique.

Il est donc intéressant d'étendre au cobalt ce propos sur le nickel, et même de commencer par le cobalt, car son histoire est la plus ancienne des deux.

24 51,996	25 54,938	26 55,845	27 58,933	28 58,693	29 63,546	30 65,38	31 69,723	32 72,64	33 74,922
Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As
CHROME	MANGANÈSE	FER	COBALT	NICKEL	CUIVRE	ZINC	GALLIUM	GERMANIUM	ARSENIC

Tels deux frères inséparables, *nickel* et *cobalt* ont une origine commune.

Un métal énigmatique et des minerais malfaisants

L'histoire du cobalt commence avec celle des pigments minéraux, qui remonte à la plus haute Antiquité. Déjà en Égypte ancienne, on obtenait un verre d'une couleur bleue intense grâce à un pigment particulier, nommé beaucoup plus tard *bleu de cobalt* car il était basé sur ce métal resté longtemps inconnu.

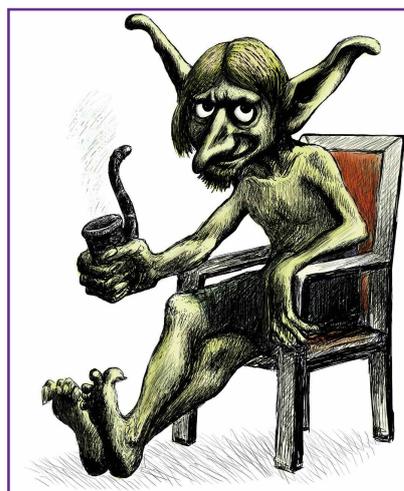


Masque mortuaire de Toutankhamon, mort vers 1 325 avant J.-C. Les bandes bleues sont en verre coloré par le cobalt.

On a continué à utiliser ce pigment (où le cobalt restait incognito), dans l'art des vitraux au Moyen Âge par exemple, mais il a pris une plus grande importance avec l'exploitation de minerais découverts au XV^e siècle en Europe, surtout en Saxe et en Bohême. Le pigment était alors obtenu par grillage de ces minerais, et on le nommait *saffre* (aujourd'hui *safre*), un nom lié à celui d'une pierre bleue, le *saphir* (du grec *sappheiros*, « saphir »). Cependant, les mineurs allemands rencontraient des difficultés de tous ordres. D'abord ils cherchaient, en vain, à extraire du cuivre de ces minerais, ce cuivre bien connu depuis l'Antiquité comme matériau et même comme base de pigments, tels que le *bleu égyptien* (d'un usage différent de celui du *bleu de cobalt*). En outre, les mineurs subissaient de graves intoxications dues aux fumées dégagées par le grillage des minerais, ce qui n'a rien d'étonnant si l'on sait qu'il s'agissait de sulfures ou d'arséniures. Pour toutes ces raisons, les mineurs détestaient ces minerais, qu'ils affublaient du nom allemand *Kobold* donné aux petits lutins de la mythologie germanique. Les Kobolds, gentiment taquins et facétieux dans la vie quotidienne, fréquentaient le monde des mines souterraines (d'ailleurs, les célèbres petits nains de Blanche Neige étaient de gentils Kobolds). Mais certains Kobolds pouvaient devenir malfaisants et dangereux dans ces mines ; on les accusait de détruire le travail des mineurs et de leur causer tous les ennuis possibles.

Le chimiste suédois Georg Brandt a finalement identifié le métal fantôme en 1735 et lui a donné le nom du minerai, en suédois *kobolt*, repris dans toutes les langues : *Kobalt* en allemand, *cobalt* en français et anglais, *cobalto* en espagnol...

Et la malédiction du cobalt s'est poursuivie avec celle du nickel.



Kobold, la créature du folklore germanique qui causait les accidents dans les mines.

© Jean-Noël Lafargue.

Un vrai faux minerai de cuivre

Parmi tous les minerais découverts à partir du XV^e siècle en Europe, il en était un dont les reflets rouges laissaient vraiment penser qu'il contenait du cuivre à coup sûr. Mais il s'avérait encore une fois impossible de tirer la moindre parcelle de ce métal, et le grillage du minerai dégageait encore des fumées toxiques. Et pour cause : c'était en fait de l'arséniure de nickel (NiAs), nommé aujourd'hui *nickeline*. Les mineurs se sentaient encore une fois harcelés par un Kobold, auquel ils ont donné, comme c'était la coutume, un petit surnom affectueux, comme pour l'amadouer : *Nickel*, diminutif de *Nikolaus*. Ils ont même nommé ce minerai *Kupfer-Nickel*, de l'allemand *Kupfer*, « cuivre », c'est-à-dire le « petit Nicolas du cuivre », parce qu'il fait semblant de contenir du cuivre, mais n'en donne point, pis encore, il empoisonne.

Le chimiste suédois Axel Frederik Cronstedt a finalement identifié le métal inconnu en 1751 et, s'inspirant manifestement du nom du *cobalt*, il l'a nommé *nickel*, repris tel quel dans beaucoup de langues (*niquel* en espagnol).

Par un curieux hasard, le nom allemand *Kupfernickel* s'utilise toujours aujourd'hui, mais pour désigner le bien réel *cupronickel*, l'alliage entre le cuivre et le nickel.

Épilogue

Le nom du *nickel*, issu de la mythologie germanique, semble indépendant de l'Antiquité gréco-latine tellement présente dans tout le vocabulaire de la chimie... du moins à première vue, car le nom *Nicolas* remonte au grec *Nikolaos*, du grec *nikê*, « victoire », et *laos*, « armée, foule, peuple ».

Notons enfin que Brandt, à côté du cobalt, a aussi identifié et nommé l'élément *arsenic*, alors que jusque-là ce nom *arsenic*, d'origine gréco-latine, désignait divers composés toxiques contenant du soufre ou de l'arsenic. Il a fait, si l'on ose dire, d'une pierre deux coups.



Pierre Avenas a été directeur de la R & D dans l'industrie chimique.

Courriel : pier.avenas@orange.fr

Et voilà l'hydrogène

Coucou ! À l'occasion de la « transition énergétique », voilà l'élément le plus simple du tableau périodique. Chouchouté lors de la décennie 70 après les succès des piles à hydrogène des capsules spatiales de la NASA et du moteur à hydrogène du 2^e étage de la fusée Ariane, il quitte l'Espace pour revenir sur Terre quand surviennent les deux crises pétrolières de 1973 et 1977 et la recherche de nouvelles sources énergétiques. Jamais plus qu'au cours de cette période, autant de chimistes ne s'investirent dans la décomposition de l'eau et le stockage par chimisorption de l'hydrogène. La baisse dès la décennie 80 du prix de l'or noir remisait au placard qui les photocatalyseurs, qui les poudres d'hydrures.

Mais heureusement, la recherche et le développement sur les piles à combustible PEMFC ou SOFC⁽¹⁾ ne furent pas mis en sommeil. Avec la prise de conscience de la fin inexorable des ressources fossiles, de la hausse continue du prix du pétrole et des avertissements du GIEC sur les gaz à effet de serre, la recherche de systèmes énergétiques diversifiés, renouvelables et propres, redonne une nouvelle jeunesse à l'hydrogène.

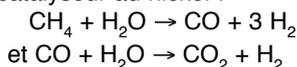
Rappelons d'abord que H₂ n'est pas une ressource énergétique, mais un vecteur d'énergie. Il n'est en effet pas très présent sous forme diatomique sauf sur quelques dorsales médio-océaniques, dans des roches périodiques⁽²⁾ ou quelques plaques continentales de Russie, dont l'exploitation reste très acrobatique. Il est par contre très abondant sous forme combinée, principalement dans l'eau (H₂O), dans la matière vivante, et associé au carbone dans des hydrocarbures (C_nH_m). Il nécessite donc des procédés chimiques ou électrochimiques d'extraction. Ses propriétés sont intéressantes (voir *tableau*). Gaz très léger, il a un pouvoir énergétique massique presque quatre fois plus élevé que l'essence. Sa combustion est très propre puisqu'elle ne génère que de la vapeur d'eau, et il est

aussi renouvelable par le cycle de l'eau. Son utilisation actuelle est à 98 % pour la synthèse de l'ammoniac et le raffinage en pétrochimie, et seuls 2 % sont consacrés à l'énergie.

La production mondiale d'hydrogène atteint 60 millions de tonnes par an dont 900 000 t en France.

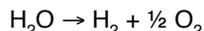
Deux procédés principaux sont utilisés :

- Le « steam reforming » (à 95 %), qui s'effectue à 850-900° sous 20 à 30 bars sur catalyseur au nickel :



Le rendement est de l'ordre de 80 % et le prix à la production se chiffre à 2 €/kg. On notera que la production de 1 kg de H₂ s'accompagne de l'émission de 10 kg de CO₂.

- L'électrolyse par décomposition (4 %) :



Elle se fait en milieu alcalin avec un rendement de 60 % ; les nouveaux électrolyseurs PEM à membrane font monter le rendement à 75 %. L'électrolyse à haute température (650 °C/100 bars) est encore au stade de développement. La consommation est de l'ordre de 5 à 6 kWh/m³ et le prix de revient est d'environ 4 €/kg, pour un prix d'électricité industrielle de 60 € le MWh.

- D'autres moyens de production par les algues, des hydrogénases, le vapo-reformage du biogaz, sont pour l'instant encore confidentiels.

Comment se présentent le transport et le stockage ?

L'hydrogène peut être transporté sous forme liquéfiée dans des citernes ou sous forme gazeuse comme le gaz naturel par réseaux de pipelines dédiés ; il en existe déjà 1 500 km en Europe pour le transport nord-sud. Son stockage pose plus de problèmes car il est sept fois plus léger que le gaz naturel et il jouit d'une réputation de dangerosité due au syndrome « Zeppelin Hidenburg ».

Si on le compare à d'autres vecteurs énergétiques comme l'essence, le gasoil ou le gaz naturel (voir *tableau*), on voit que sa très faible densité lui donne une énergie spécifique au litre sept fois plus faible que le gaz naturel. Il est donc indispensable de le comprimer car 1 kg d'hydrogène dans les conditions normales représente 11 m³. Sa compression (350 bars) consomme environ un quart de son énergie délivrable, et sa liquéfaction à - 353 °C, un tiers.

Quel rôle dans la transition énergétique ?

Les propriétés thermo-chimiques de l'hydrogène, hors de son utilisation en chimie et en raffinage, le destinent à un rôle croissant comme vecteur d'énergie.

- Sur zone fixe : son stockage peut être associé aux énergies renouvelables intermittentes, pour les fermes éoliennes et les centrales photovoltaïques. En période d'excès de production, l'électrolyse de l'eau permet d'obtenir une réserve d'hydrogène, par exemple sur hydrures solides ou absorption sur MOF, qui peut ensuite être brûlée pour actionner des turbines ou alimenter une pile à hydrogène pour fournir de l'électricité la nuit ou en l'absence de vent. C'est un créneau prometteur qui va booster le raccordement au réseau des fermes éoliennes ou photovoltaïques en lissant leurs productions. On peut citer la réalisation du CEA, à Myrte en Corse-du-Sud, qui alimente le réseau électrique. Quelques sociétés françaises, en collaboration avec Axane, filiale d'Air Liquide, fournissent déjà les systèmes d'alimentation pour balises ou relais de télécommunications ou des réseaux isolés. Cela remplace avec avantage les groupes électrogènes bruyants et émetteurs de CO₂.

- Pour les véhicules et les objets nomades : si pour des installations fixes, le stockage en volume ou en poids ne pose pas de problèmes, il n'en est pas de même pour l'automobile ou l'électronique nomade. La pile PEMFC couplée à une batterie va donner à la voiture électrique une vraie autonomie. On sait qu'avec un rendement à 75 % du moteur électrique et recharge lors du ralentissement ou freinage, 15 kWh suffisent pour faire parcourir 100 km à une vitesse moyenne (consommation thermique : 6 L pour 100 km) [1]. Avec 1 kg de H₂ et un rendement à 50 % de la pile à hydrogène, 1 kg de H₂ correspond à 100 km. Pour

Produit	Densité (kg/m ³)	MJ/kg	kWh/kg	kWh/litre
H ₂ gaz	0,09	142	32,4	3,5 x 10 ⁻³
H ₂ liquide	70	"	"	2,8
H ₂ 700 bars	62	"	"	2,42
Essence	750	42,7	11,82	9,4
Diesel	850	41,9	11,64	10
Gaz naturel	0,65	50,4	14	32,5 x 10 ⁻³
GPL	500	"	"	7,5

Tableau comparatif des pouvoirs énergétiques spécifiques.

une autonomie de 500 km, il faut alors 5 kg de H₂ et donc un réservoir de 80 L à 700 bars, ou 150 L à 350 bars. La seule automobile de série, non encore commercialisée en France, est coréenne : la ix35 Hyundai « Fuel Cell ». C'est un véhicule électrique de 136 CV (100 kW), équipé de deux réservoirs en composite de 104 L sous le coffre et de 40 L sous la banquette arrière, capables d'embarquer 5,6 kg d'hydrogène, et d'une batterie lithium-polymère de 24 kWh. Le surplus de 370 kg par rapport au véhicule version diesel donne cependant une autonomie supérieure à 500 km et une vitesse maximum de 160 km/h, dans une ambiance de « tapis volant », pour 70 000 €. Livrées en leasing, deux ix35 sont disponibles pour essais entre Lyon et Sassenage où Air Liquide dispose d'une station de remplissage d'hydrogène. Le marché des chariots élévateurs pour les entrepôts, les aéroports, les entreprises est en train d'être capté par HyPulsion qui équipe en piles à hydrogène IKEA en France et d'autres usines en Californie et au Canada. Pour l'électronique nomade sont développées des piles miniatures avec des sources d'hydrogène de type aérosol à 12 bars et hydrures métalliques.

Alors quel avenir et quels freins ?

Ceux-ci ont très bien été mis en exergue par le récent rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) [2].

Il faut d'abord dire que l'hydrogène n'est qu'un vecteur qui, pour l'instant, déporte ses émissions, car si dans son utilisation énergétique il n'émet localement que de la vapeur d'eau, tant qu'il ne sera majoritairement issu que du « steam reforming » du gaz, il émet aussi 10 kg de CO₂ par kilo. Ainsi, le véhicule qui consomme 1 kg d'H₂ par 100 km correspond à 100 g de CO₂/km, c'est-à-dire autant qu'un bon diesel.

Un deuxième obstacle est le coût ; les experts pensent que l'hydrogène sera compétitif si son prix à la distribution ne dépasse pas 10 €/kg, et si les équipements de production et de stockage d'hydrogène sont fabriqués en grandes séries. Pour les PEMFC, la quantité de métal précieux, le platine, a nettement diminué depuis vingt ans – on est en dessous de 0,1 mg/cm² sur la membrane – ; cela représente cependant en coût 50 % du cœur de la pile et 25 % du système PAC.

Enfin, le développement de la mobilité ne pourra se faire que si les infrastructures se mettent en place, et donc que si les stations distribuant l'hydrogène sont capables de délivrer 40 à 100 kg de H₂ par jour. Nous avons un champion européen en France : Air Liquide, qui a déjà implanté des stations en Allemagne, au Japon et aux États-Unis. L'Allemagne a un programme d'implantation de quinze stations d'ici 2015 et 400 pour 2025 ; les Japonais projettent l'implantation de cent stations en 2015, de

même pour la Corée du Sud. En France, à part une station de démonstration, la réglementation est un frein extrême au développement de cette infrastructure, car dès production et stockage d'une mole d'hydrogène s'applique la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), avec un dossier dont l'instruction par la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) et la Préfecture dure entre 12 et 18 mois ! Alors qu'en Allemagne, la réglementation est la même que pour les autres gaz énergétiques, il n'est pas possible en France pour une station service d'autoroute par exemple de proposer de l'hydrogène sous pression à côté du GPL. Il est donc urgent de légiférer sur ce point car nous avons des technologies de pointe développées par le CEA, le CNRS et des PME performantes – McPhy Energy, PaxiTech, HyPulsion, Symbio Fcell, Axane... – et un leader international, Air Liquide, qui attaquent des marchés à l'étranger faute de le pouvoir en France !

Les recommandations de l'OPECST sur ce point, sur le regroupement des diverses forces nationales, l'encouragement de stations de production locales, la multiplication des pactes régionaux, les investissements de structure de distribution, sont frappées au coin du bon sens.

Les organismes de recherche, les sociétés savantes [3] et les associations telles que l'AFHYPAC (Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible, ex AFH2) œuvrent pour une vraie gouvernance de cette filière d'avenir afin de faire sauter les verrous techniques, réglementaires et économiques qui brident encore son développement.



Jean-Claude Bernier,
le 8 mai 2014



Station de remplissage d'hydrogène sur le site Air Liquide à Sassenage (Isère). © Air Liquide.

(1) PEMFC : « proton exchange membrane fuel cell » ; SOFC : « solid oxide fuel cell ».

(2) Les roches périoditiques sont des résidus magmatiques d'origine volcanique que l'on trouve affleurant souvent près de ressources pétrolières en sous-sol ou au fond des mers.

[1] Bernier J.-C., La voiture électrique : virage ou mirage ?, *L'Act. Chim.*, 2010, 337, p. 3.

[2] L'hydrogène vecteur de la transition énergétique, Rapport de l'OPECST, déc. 2013.

[3] N° spécial « L'hydrogène, carburant de demain ? », *L'Act. Chim.*, déc. 2001.

Tuberculose, le retour ?

Claude Monneret

Le 24 mars dernier s'est déroulée la journée mondiale de lutte contre la tuberculose* sous l'égide de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS). Cette journée est consacrée aux trois millions de personnes atteintes de tuberculose « oubliées » par les systèmes de santé. En particulier, près d'un million d'enfants de moins de quinze ans développent la maladie chaque année dans le monde, selon une étude récente parue dans la revue médicale *The Lancet* [1]. Ce constat complète celui établi en 2012 par l'OMS qui écrivait : « *La tuberculose de l'enfant reste négligée, bien que les remèdes existent.* »

La tuberculose, due au bacille de Koch ou *Mycobacterium tuberculosis*, est une maladie très ancienne dont les premières traces furent mises en évidence sur des momies égyptiennes, comme chez cette femme de la haute société, morte il y a 2 600 ans [2]. Selon la paléomicrobiologie, on sait également que la tuberculose aurait existé sur le continent américain avant l'arrivée des colons puisque le bacille a été découvert chez une momie péruvienne datant de la civilisation précolombienne, soit de plus de mille ans [3].

Au fil des siècles, plusieurs épidémies auront lieu, notamment en Europe et en Amérique du Nord, et le déclin progressif de la maladie dans les pays industrialisés ne surviendra qu'à la moitié du XX^e siècle. À cette période, elle est encore omniprésente dans certains milieux car, indépendamment de son caractère très contagieux, elle est liée à la pauvreté et au manque d'hygiène. Surnommée « peste blanche », ou « white plague » en anglais, elle reste un fléau international et est toujours synonyme de rejet social.

Bien que redoutable, contrairement au cancer considéré comme l'empereur de toutes les maladies [4], la tuberculose a longtemps été associée à une forme de romantisme, car elle ne produisait pas de lésions répulsives mais embellissait plutôt le malade : minceur, teint vif, regard aguicheur car brûlant... Elle était presque estimée comme inévitable pour les gens d'esprit, garante de ce mal-être qui sous-tend toute création littéraire. Ce fut le cas de Lord Byron, source d'inspiration pour les sœurs Brontë, mais aussi de Dostoïevski et de Frédéric Chopin. Elle fut même magnifiée dans *La Montagne magique* de Thomas Mann.

La tuberculose sera finalement l'une des premières maladies infectieuses à être traitée de manière rationnelle. L'âge d'or de la découverte d'agents antituberculeux a non seulement abouti à une variété de nouveaux médicaments, mais a aussi donné naissance à la polychimiothérapie. La découverte de la streptomycine en 1944 par Selman Waksman et Albert Schatz a été une révolution dans ce domaine où, hormis la prévention et les sanatoriums, n'existait jusqu'ici aucune parade [5].

Très vite, les premières résistances à la streptomycine sont apparues, jugulées par son association avec, soit l'acide para-aminosalicylique (PAS) découvert en 1948, soit avec l'isoniazide découvert en 1952. Afin de répondre aux problèmes de résistance, sont par la suite arrivés en clinique,

le pyrazinamide (1954), la kanamycine (1957-8), l'éthionamide (1961), la rifampicine (1963), la capréomycine (1963), l'amikacine (1972), l'ofloxacine (1980) et enfin la lévofloxacine (1992). L'éradication de la maladie semblait alors chose faite jusqu'à ce qu'en 2006, on voit apparaître les premières notifications de tuberculose ultrarésistante – une forme de résistance aux médicaments encore plus grave que la tuberculose multirésistante.

Selon le rapport de l'OMS [6], la tuberculose multirésistante est définie comme une résistance à l'isoniazide et à la rifampicine, assortie ou non d'une résistance à d'autres médicaments de première intention. La tuberculose ultrarésistante est pour sa part définie comme la résistance, au moins à l'isoniazide et la rifampicine, à n'importe quelle fluoroquinolone et à l'un des trois médicaments injectables de deuxième intention (amikacine, capréomycine et kanamycine). Une personne sur trois dans le monde est infectée par des germes de tuberculose dormants. La maladie se développe seulement lorsque les bactéries deviennent actives, à la faveur de tout ce qui peut réduire l'immunité de l'individu porteur – comme le VIH, la vieillesse ou certaines conditions médicales –, d'où la recrudescence actuelle.

Selon une méta-analyse réalisée en 2012 [7], 8,8 millions de personnes ont été frappées par la tuberculose et 1,4 million sont décédées des suites de la maladie, ce qui en fait la seconde cause de décès par un agent infectieux au monde. Plus de 95 % de ces décès sont enregistrés dans les pays à revenus faibles ou intermédiaires, notamment la Russie, l'Europe de l'Est et l'Asie centrale, poussant le monde industrialisé à croire qu'il est à l'abri et sonnait ainsi le glas du développement de nouveaux traitements. En fait, aucun pays n'a totalement éradiqué la maladie et selon les statistiques de l'OMS, la plupart des nouveaux cas (49 %) se situent dans les zones peuplées d'Asie (Bangladesh, Pakistan, Inde, Chine et Indonésie), mais on observe aussi une augmentation des cas rapportés en Europe de l'Est, notamment en Russie. En 2014, la tuberculose tue encore sept personnes par heure.

Devant l'inertie de l'industrie pharmaceutique – et ce n'est pas la récente fermeture du centre indien sur les maladies infectieuses d'AstraZeneca qui le démentira –, dans la foulée du 7^e Programme Cadre de Recherche et Développement européen (FP7) initié début 2011, des scientifiques ont créé la fondation iM4TB (pour « Innovative Medicines for Tuberculosis » [8]) sous l'égide de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, ou EPFL. Celle-ci s'est donné pour but : « plus de recherches pour lutter contre la tuberculose multirésistante ».

Confronté à la frilosité des industriels du médicament face au manque de profit, une nouvelle étape a été franchie récemment : la création d'une autre fondation en mars 2014, sous l'égide de l'EPFL et de l'Institut Bach de Moscou, afin de développer un nouvel antibiotique portant le nom de code

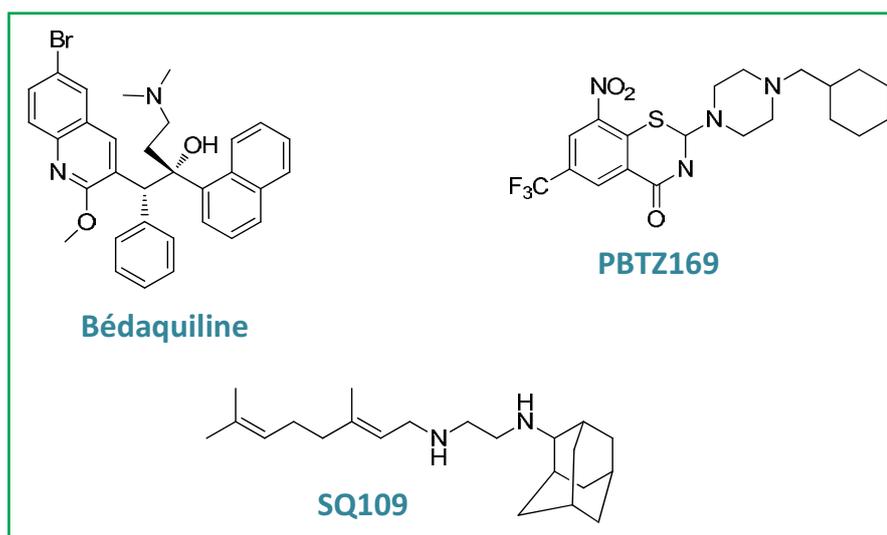
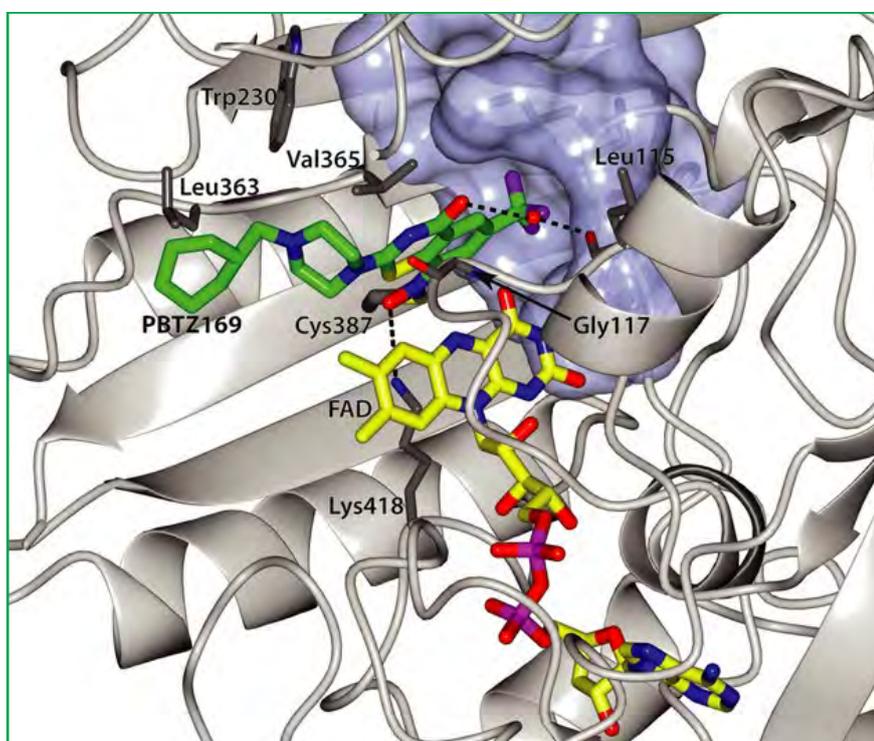


Figure 1.

Figure 2 - Structure cristalline du complexe PBTZ169 et *Mycobacterium tuberculosis*. © 2014, Makarov *et al.*, *EMBO Mol. Med.* ([9]).

PBTZ169 (voir *figure 1* et 2) [9]. Les chercheurs ont pu démontrer que celui-ci est extrêmement efficace en trithérapie, c'est-à-dire en combinaison avec un traitement standard, la pyrazinamide, ainsi qu'avec un médicament plus récent, la bédaquiline (*figure 1*), que l'Union européenne et la FDA américaine ont déjà approuvé pour les cas de multirésistance aux antibiotiques [10]. Parmi les autres candidats au développement, figure le SQ109 (*figure 1*) [11], dont la caractéristique est d'agir simultanément sur plusieurs cibles du

Mycobacterium tuberculosis, augmentant ainsi les chances de succès. Bien toléré durant les essais de phases I et II et efficace sur des souches sensibles et résistantes, il devrait bientôt arriver en clinique.

Il existe parallèlement un réseau du nom de TB-VAC pour la recherche de nouveaux vaccins ainsi qu'un « Réseau Tuberculose » qui regroupe une dizaine d'instituts du Réseau international des Instituts Pasteur, qui participent activement aux programmes nationaux de lutte contre la tuberculose dans différents pays.

Alors, l'éradication pour demain ?

Note et références

- * Journée internationale organisée tous les 24 mars qui a pour but de sensibiliser à l'épidémie mondiale de tuberculose et aux efforts entrepris pour éliminer cette maladie (www.who.int/campaigns/tb-day/2014/fr).
- [1] Jenkins H.E. *et al.*, Incidence of multidrug-resistant tuberculosis disease in children: systematic review and global estimates, *The Lancet*, 24 mars 2014 (www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736%2814%2960195-1/fulltext).
 - [2] Donoghue H.D. *et al.*, Tuberculosis in Dr Granville's mummy: a molecular re-examination of the earliest known Egyptian mummy to be scientifically examined and given a medical diagnosis, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 277, p. 51 (<http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/early/2009/09/29/rspb.2009.1484.full>).
 - [3] Salo W. *et al.*, Identification of *Mycobacterium tuberculosis* DNA in a pre-Columbian Peruvian mummy, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 1994, 91, p. 2091.
 - [4] Mukherjee S., L'empereur de toutes les maladies : une biographie du cancer, Flammarion, 2014.
 - [5] Schatz A., Waksman S.A., Effect of streptomycin and other antibiotic substances upon *Mycobacterium tuberculosis* and related organisms, *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, 1944, 57, p. 244.
 - [6] www.who.int/tb/challenges/mdr/rr
 - [7] Ahuja S.D. *et al.*, Multidrug resistant pulmonary tuberculosis treatment regimens and patient outcomes: An individual patient data meta-analysis of 9,153 patients, *Plos One*, 28 août 2012 (www.plosmedicine.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pmed.1001300).
 - [8] <http://im4tb.org>
 - [9] Makarov V. *et al.*, Towards a new combination therapy for tuberculosis with next generation benzothiazinones, *EMBO Mol. Med.*, 2014, 6, p. 372.
 - [10] de Jonge M.R. *et al.*, A computational model of the inhibition of *Mycobacterium tuberculosis* ATPase by a new drug candidate R207910, *Proteins*, 2007, 67, p. 971.
 - [11] Sacksteder K.A. *et al.*, Discovery and development of SQ109: a new antitubercular drug with a novel mechanism of action, *Future Microbiol.*, 2012, 7, p. 823.



Claude Monneret

est directeur de recherche émérite au CNRS* et membre de l'Académie nationale de pharmacie.

* Institut Curie, 26 rue d'Ulm, F-75248 Paris Cedex 05.
Courriel : claudio.monneret@curie.fr

Cyrcé, un cyclotron pour la recherche et l'enseignement en Alsace

Patrice Marchand, Ali Ouadi, Michel Pellicioli et David Brasse

Résumé	L'imagerie nucléaire, souvent considérée à tort comme un domaine à part, est née de la fusion et de la synergie entre la physique, la chimie, la biologie et la médecine. Cette imagerie fonctionnelle bénéficie de l'extrême sensibilité de détection des radio-isotopes et se base sur un ensemble de développements scientifiques et techniques. Cyrcé, un cyclotron installé à Strasbourg, est dédié à la recherche clinique et préclinique, mais aussi à l'enseignement et aux collaborations pharmaceutiques. Il rejoint le réseau des cyclotrons français déjà en activité.
Mots-clés	Imagerie nucléaire, cyclotrons, radionucléides, tomographie, radiochimie.
Abstract	Cyrcé, a cyclotron for research and teaching in Alsace Nuclear imaging, often considered as a speciality, arised from the combined efforts of physics, chemistry, biology and medicine. This functional imaging modality is based on technical and scientific developments and benefits from the high sensitivity of detection of radio-isotopes. Cyrcé, a cyclotron set up in Strasbourg, merges into the French national network of cyclotrons dedicated to clinical and preclinical research but also designed for teaching and pharmaceutical collaborations.
Keywords	Nuclear imaging, cyclotrons, radionuclides, tomography, radiochemistry.

Contexte national

L'imagerie médicale et les radionucléides

L'imagerie médicale, dont les débuts peuvent être identifiés aux travaux de W.C. Röntgen en 1895 [1], se subdivise en deux grandes catégories :

- *L'imagerie anatomique*, qui permet d'obtenir des informations anatomiques et structurales : radiographie, scanner, ultrasons et imagerie par résonance magnétique nucléaire ou IRM (reprenant les avancées de la RMN chère aux chimistes).
- *L'imagerie fonctionnelle*, qui s'intéresse au fonctionnement des cellules et des organes : scintigraphie gamma, tomographie par émission monophotonique (TEMP) et tomographie par émission de positons (TEP, apparue durant les années 1960), puis plus récemment, en 1990, l'IRM fonctionnelle, appliquée principalement en neurosciences et sciences cognitives.

L'imagerie nucléaire, basée sur l'utilisation de radio-isotopes ou radionucléides, est une imagerie fonctionnelle bénéficiant d'une grande sensibilité de détection pouvant atteindre l'échelle picomolaire. Cette technique d'imagerie permet un suivi temporel de la distribution d'un radiotraceur ainsi que sa quantification. Deux techniques se distinguent selon la nature de l'isotope considéré (*figure 1*) :

- la scintigraphie gamma et sa version 3D, la tomographie par émission monophotonique (TEMP), avec des émetteurs gammas ;
- la tomographie par émission de positons (TEP), qui utilise des émetteurs de positons générant deux rayonnements

gamma après annihilation du positon avec un électron du milieu.

L'imagerie fonctionnelle *in vivo*, qui utilise des marqueurs radioactifs, est la technique qui aboutit aux explorations des systèmes biologiques les plus complètes en raison de la variété des traceurs. Dans ce domaine, les imageries TEMP et TEP donnent accès à des explorations du vivant à l'échelle de la picomole, permettant leur application dans des domaines aussi variés que la neurologie, l'oncologie et la cardiologie. L'imagerie TEP, en particulier, offre ainsi une résolution moléculaire et métabolique correspondant à la visualisation, et surtout la quantification de ces processus à différentes échelles, depuis le gène, le récepteur cellulaire, jusqu'au tissu, à l'organe dans son ensemble et enfin au corps entier. L'imagerie *in vivo* préclinique contribue ainsi efficacement aux études longitudinales à grande échelle des souris et des rats comme modèle animal nécessaire à de nombreux projets scientifiques.

Dans le domaine clinique, chaque année à travers le monde, environ 40 millions d'exams de médecine nucléaire sont réalisés à partir de ces deux modalités d'imagerie et d'un ensemble de radio-isotopes [2].

L'imagerie nucléaire peut être décomposée selon une cascade de processus allant de la production de l'isotope, la radiochimie, à l'acquisition des données, la création de l'image et son analyse. L'une des pierres d'achoppement est la mise à disposition de traceurs visant à explorer des voies métaboliques, des récepteurs ou des activités enzymatiques. Dans tous les cas, la production d'isotopes constitue le premier maillon de cette chaîne.

La diversité des molécules et des systèmes biologiques à imager requiert une variété d'isotopes possédant des

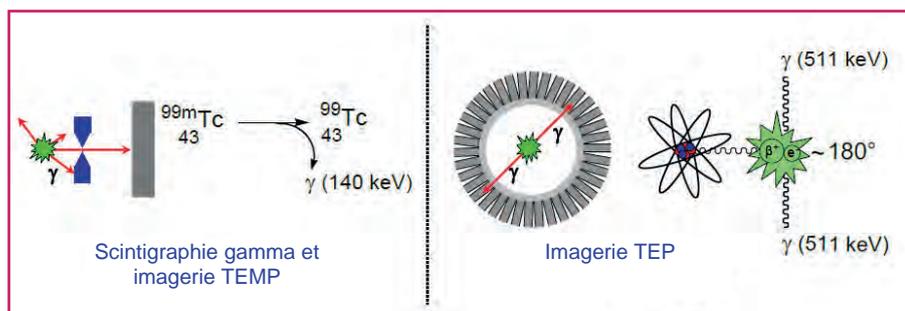


Figure 1 - Représentation schématique des deux modalités d'imagerie nucléaire TEMP (à gauche) et TEP (à droite).

Isotopes et molécules

Seule une poignée de molécules dispose d'une autorisation de mise sur le marché (AMM) pour l'imagerie TEP, alors qu'environ 70 composés sont labellisés pour l'imagerie TEMP. La majeure partie des cyclotrons n'exploite qu'un seul isotope (le fluor-18) à des fins commerciales, et seuls quelques rares cyclotrons de recherche fournissent des molécules d'intérêt pour des études cliniques ou précliniques et peu sont à même d'assurer une fourniture d'isotopes en parallèle de leurs activités de recherche ou de production.

Tableau I - Les principaux isotopes utilisés en imagerie nucléaire et leurs périodes.

*Isotopes disponibles via un générateur ($^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, $^{82}\text{Sr}/^{82\text{m}}\text{Rb}$, $^{68}\text{Ge}/^{68\text{Ga}}$).

		Périodes ($t_{1/2}$)
Isotopes pour imagerie TEP	^{15}O	2,03 min
	^{13}N	9,9 min
	^{18}F	109,7 min
	^{11}C	20,4 min
	^{64}Cu	12,70 h
	^{89}Zr	3,26 j
	^{124}I	4,18 j
	^{68}Ga	67,71 min*
Isotopes pour imagerie TEMP	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6,02 h*
	^{123}I	13,2 h
	^{201}Tl	3,04 j
	^{111}In	2,80 j

demi-vies variées et pouvant être utilisés pour le marquage de molécules simples (ou de petites tailles), mais aussi de structures plus complexes comme les peptides ou les anticorps. Les radio-isotopes, le plus souvent incorporés dans des composés radiopharmaceutiques utilisés à l'état de traces, sont produits en majorité dans des cyclotrons (et des accélérateurs de particules) ou des réacteurs nucléaires et présentent pour la plupart des demi-vies (ou périodes) de quelques minutes à quelques jours (voir *tableau I* et *encadré 1* pour le cas du technétium-99m). Onze des treize isotopes parmi les plus employés dans le monde en imagerie sont actuellement produits par des cyclotrons. Les productions de cuivre-64 et de technétium-99 métastable (via le ^{99}Mo) par des cyclotrons sont quant à elles en cours de développement.

Les cyclotrons

En 2011, la France comptait 29 cyclotrons de basse et moyenne énergie (entre 11 et 70 MeV). Parmi ce parc, 22 cyclotrons servent à la fabrication quotidienne de médicaments destinés aux besoins de l'imagerie médicale (voir *figure 2*) [3].

Encadré 1

Un radio-isotope courant : le technétium-99m

Le technétium-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$), produit fils du molybdène-99 (^{99}Mo), est le radio-isotope médical le plus couramment utilisé dans le monde (sous la forme de générateur $^{99}\text{Mo}-^{99\text{m}}\text{Tc}$) : il représente à lui seul environ 80 % de toutes les procédures diagnostiques de médecine nucléaire, soit 30 millions d'exams par an (en 2011). 95 % de sa production, basée sur l'utilisation d'uranium hautement enrichi, est assurée par seulement cinq réacteurs vieillissants à travers le monde. Les ruptures d'approvisionnements observées ces dernières années impactent fortement sur l'activité et l'organisation des services de médecine nucléaire, qui connaissent depuis 2008 un manque de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ récurrent*. Ces crises d'approvisionnement en technétium soulignent la nécessité d'une stratégie complémentaire.

Parmi les solutions retenues, se trouvent l'utilisation d'uranium faiblement enrichi (permettant de réduire l'utilisation et le transport d'uranium hautement enrichi) et le développement d'un réseau de cyclotrons à même de produire cet isotope de façon quotidienne.

Le gouvernement canadien, en relation avec les industries spécialisées en médecine nucléaire, plusieurs universités, les centres de recherche et les hôpitaux, a proposé de mettre en place un réseau national de cyclotrons qui répondrait de manière rapide, rentable et de façon fiable aux besoins de l'ensemble du Canada.

L'option retenue est la production directe de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ à partir de ^{100}Mo . Cette production de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ par cyclotron nécessite de remplir certaines exigences :

1. L'utilisation d'une cible de ^{100}Mo hautement enrichie pour limiter la formation d'impuretés (radionucléides tels que le $^{95\text{m}}\text{Tc}$, le $^{96\text{m}}\text{Tc}$...).
2. La séparation radiochimique immédiatement après l'irradiation avec une bonne efficacité de recyclage pour limiter le coût lié à l'utilisation de ^{100}Mo et assurer une qualité comparable à celle du $^{99\text{m}}\text{Tc}$ issu des générateurs.
3. Un calendrier de production quotidienne imposé par la demi-vie de 6 heures.
4. Une logistique de distribution efficace en direction des laboratoires et hôpitaux proches.

En raison de la courte demi-vie du $^{99\text{m}}\text{Tc}$, seuls les hôpitaux à proximité d'un cyclotron peuvent être desservis, et l'option cyclotron ne constitue donc pas une solution globale pour résoudre le problème d'une éventuelle pénurie mondiale. Toutefois, cette option représente une solution complémentaire fiable qui, en coexistant avec l'utilisation des générateurs $^{99}\text{Mo}-^{99\text{m}}\text{Tc}$, permet de réduire l'impact des défaillances ponctuelles dans la chaîne d'approvisionnement.

*L'approvisionnement en radio-isotopes médicaux, Étude économique de la chaîne d'approvisionnement en molybdène-99, *Rapport OCDE 2010*, NEA n° 6970 (www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2010/6970-radioisotopes-synthese.pdf).



Figure 2 - Répartition des différents cyclotrons en France métropolitaine et DOM-TOM en 2011.

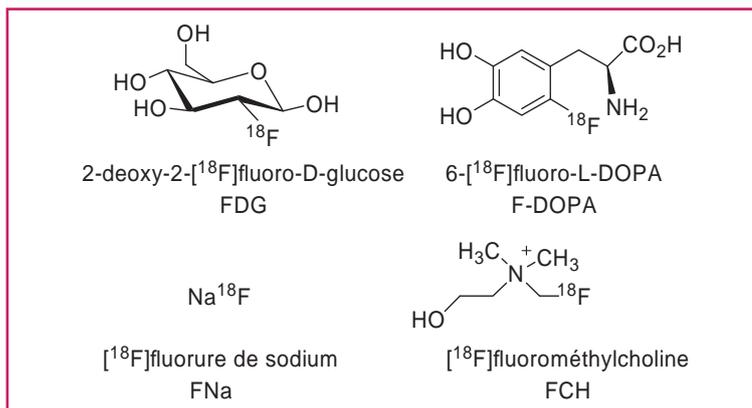


Figure 3 - Composés radiofluorés bénéficiant d'une autorisation de mise sur le marché français (AMM).

Il ressort que le parc actuel de cyclotrons est majoritairement destiné à la production commerciale d'un nombre très limité de molécules marquées (FDG, FNa, FCH et F-DOPA) bénéficiant d'une AMM (figure 3).

Si d'un point de vue économique, les structures mixtes impliquant un centre de recherche et un industriel qui se partagent le temps de fonctionnement sont attractives, elles ont souvent tendance à atteindre leurs limites en termes de flexibilité, voire d'indépendance, par exemple dans le choix des différents isotopes produits.

À ce constat s'ajoute le très faible nombre de cyclotrons équipés de lignes de faisceaux pour extraire les protons à des fins d'études radiobiologiques ou pour toute autre activité nécessitant l'interaction de ces particules avec la matière.

Suivi de la molécule radiomarquée dans l'organisme

Une fois la molécule radiomarquée puis injectée au patient, sa biodistribution dans l'organisme est visualisée par imagerie TEP dans le cas d'isotopes émetteurs de positons ou par imagerie TEMP pour tous les isotopes émetteurs de simples photons. Fin 2001, cinq caméras TEP cliniques composent le parc de machines français contre 80 en Allemagne et 15 en Belgique. Pour combler ce retard, la carte sanitaire créée début 2002 prévoyait au terme de cinq ans une machine par million d'habitants, soit 60 systèmes TEP en France.

Fin 2011, nous dénombrons 106 caméras TEP réparties sur le territoire, la plupart d'entre elles étant jumelées avec l'imagerie X. Chaque caméra réalise en moyenne une quinzaine d'examen TEP par jour. La mise à disposition sur le marché d'équipements combinés TEP/IRM et l'engouement rencontré par cette combinaison de modalités devraient accroître le parc actuel, et donc nécessiter un surcroît de production de radiotraceurs [4].

Description du projet Cyrcé

Cyrcé est une plateforme scientifique élaborée autour d'un cyclotron fabriqué par la société ACSI (Advanced Cyclotron System Inc.). Cet accélérateur de particules est hébergé au sein de l'IPHC, un laboratoire pluridisciplinaire du CNRS et de l'Université de Strasbourg (UMR 7178), qui offre une parfaite maîtrise et connaissance du domaine nucléaire et des accélérateurs de particules. Lancé en 2012, cet ambitieux projet a été initié en 2004 et a vu le jour grâce à des financements locaux, nationaux et européens [5] pour un total de 4,85 millions d'euros.

Choix du cyclotron

Le cyclotron retenu pour Cyrcé est un TR24 (figure 4) avec une énergie moyenne qui présente l'avantage de pouvoir générer un faisceau de protons dont l'énergie peut varier de 16 à 25 MeV, avec une intensité réglable de quelques nA à 300 µA (pour les faisceaux protons). Il répond pleinement aux exigences fixées, c'est-à-dire de pouvoir fournir à la communauté scientifique différents



Figure 4 - Le cyclotron TR24 au cœur de sa casemate.

isotopes pour des applications dans le domaine préclinique et clinique. En dehors des isotopes classiquement utilisés en TEP (^{18}F , ^{11}C , ^{15}O , ^{13}N), il offre la possibilité de produire des ^{124}I , ^{64}Cu , ^{89}Zr , mais aussi une gamme d'isotopes pour l'imagerie TEMP (^{123}I , ^{111}In , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{67}Ga , ^{57}Co ...).

Ses caractéristiques le placent dans une gamme intermédiaire entre les cyclotrons de grande puissance (supérieure à 30 MeV, tel celui d'Arronax [6]) et les cyclotrons de type classique produisant majoritairement du fluor.

Objectifs scientifiques

L'un des axes de recherche à l'initiative du projet Cyrcé est l'étude de la distribution, du devenir et de l'utilisation des substrats énergétiques par l'organisme dans des situations d'altération du métabolisme énergétique liées à un déficit ou à une pléthore énergétique. Ce projet s'appuie sur l'expertise des biologistes du département d'Écologie, physiologie et éthologie du laboratoire. L'objectif de ce projet est donc à la fois :

- méthodologique, car il devrait permettre le développement de nouveaux radiotraceurs en imagerie TEMP ou TEP dévolus à l'étude du métabolisme énergétique ;
- fondamental, en apportant de nouvelles connaissances des flux de substrats et du métabolisme régional dans des situations de déséquilibre énergétique ;
- appliqué au domaine biomédical, en offrant de nouvelles perspectives dans la réalimentation de sujets sévèrement dénutris.

D'un point de vue plus global, le projet Cyrcé est de mettre à disposition et d'utiliser une variété d'isotopes pour l'élaboration de radiotraceurs et le marquage de molécules d'intérêt à destination de la communauté scientifique. En dehors de ces activités, une place importante est réservée pour l'enseignement des différentes techniques mises en œuvre dans la production d'un radiotraceur, telles que la production d'isotopes, la radiochimie, mais aussi le contrôle qualité, la radioprotection et les techniques d'imagerie préclinique.

Un regard attentif sera porté sur l'optimisation des éléments principaux dans l'élaboration d'une molécule marquée pour rendre plus accessible l'imagerie préclinique TEP et TEMP. Cela passe par exemple par l'optimisation de la configuration des cibles, la synthèse automatisée des molécules radiomarquées et les performances des systèmes d'imagerie.

Conception, contraintes et installation d'une plateforme de production de radio-isotopes

Infrastructure

Pour mener à bien ces objectifs scientifiques et être à même de produire et d'utiliser différents isotopes sous formes liquide, gazeuse ou solide, la plateforme autour du cyclotron a été aménagée selon les exigences maximales en termes de flexibilité et de radioprotection. L'ensemble comprend :

- 250 m² de laboratoires, dont 100 m² de salles blanches ;
- quatre cellules blindées destinées à la recherche et à la mise au point des procédés ;
- deux cellules blindées pour la réception et le traitement des cibles solides ;
- quatre cellules blindées pour la production et une cellule sous flux laminaire pour la distribution des radiopharmaceutiques ;

- 200 m² de zones techniques dédiées à la ventilation, la régénération de l'air, aux systèmes de refroidissement et à l'alimentation électrique du cyclotron ;

- une casemate dont les cloisons de deux mètres ont nécessité mille tonnes de béton pour abriter le cyclotron.

Contraintes de radioprotection

Pour se conformer aux exigences réglementaires et assurer la protection des intervenants, l'ensemble de la plateforme est équipé de détecteurs de contamination d'ambiance et de sondes dosimétriques permettant de mesurer en temps réel le niveau de radioactivité dans les aires techniques où se trouve le cyclotron, dans les laboratoires de radiochimie et en différents points du système de ventilation. Un jeu de pressions différentes selon les salles assure une sécurité optimale des opérateurs en limitant les risques de contamination et est complété par un ensemble de détecteurs, tels que des détecteurs pieds-mains en sortie de zones surveillées. À cet ensemble s'ajoute une série de relevés dosimétriques réguliers dans les différentes pièces de l'installation. Ces dispositions permettent d'être en conformité avec les exigences de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), seul organisme habilité à autoriser le fonctionnement d'une telle plateforme.

Contraintes radiochimiques

La radiochimie autour d'un cyclotron implique une diversité de techniques et de compétences incluant la chimie organique, la chimie de complexation dans le cas des métaux (^{64}Cu , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{89}Zr par exemple), l'automatisation des procédés, l'analyse (HPLC, spectrométrie de masse, spectrométrie gamma, ICP-MS).

Les étapes de radiochimie interviennent après la phase d'irradiation et incluent le traitement de la cible suivi de la purification de l'isotope, la synthèse du radiotraceur, sa purification, sa formulation et finalement le contrôle qualité. L'ensemble de ces opérations doit être réalisé dans un délai compatible avec la demi-vie de l'isotope considéré, idéalement deux périodes après la fin de l'irradiation.

Ces différentes étapes varient d'un isotope à un autre : dans le cas du fluor-18 [7-8] et du carbone-11 [8-10], l'isotope est directement disponible après irradiation de la cible et seule sa transformation en une espèce réactive est nécessaire (figure 5).

En revanche, dans le cas des cibles solides, des procédés d'extraction sélectifs, rapides et reproductibles sont nécessaires et doivent être développés, puis automatisés [11-14]. Ces procédés doivent souvent inclure une étape permettant de récupérer et recycler l'élément constitutif de la cible (figure 6).

Quel que soit l'isotope considéré, la notion principale reste celle du radiotraceur, à savoir des synthèses à l'échelle nanomolaire impliquant des isotopes radioactifs, et donc des contraintes supplémentaires en termes de radioprotection, de temps de synthèse et de purification.

Positionnement et structuration du projet

La gouvernance de Cyrcé se compose d'un comité de pilotage, d'un conseil scientifique et d'un conseil d'administration.

Au niveau régional, la structure complète les plateaux techniques strasbourgeois autour de l'imagerie clinique et

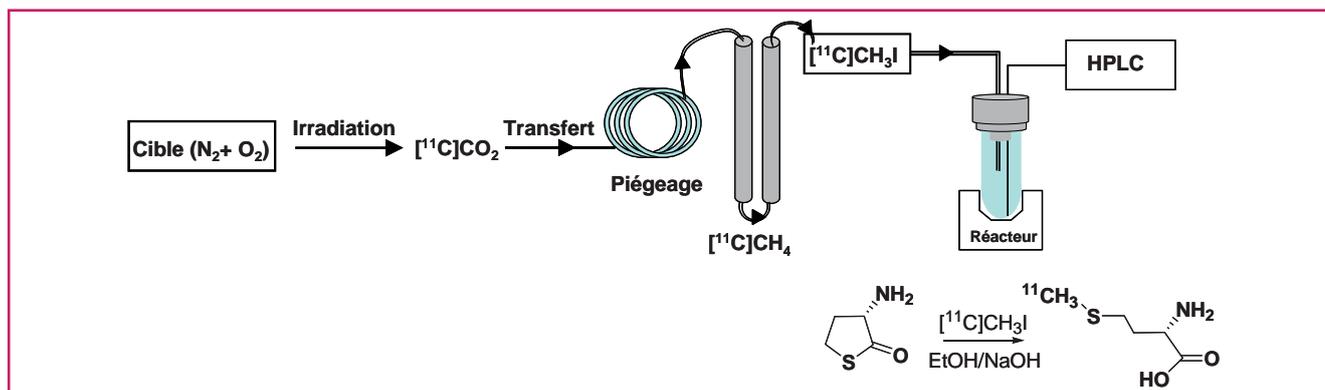
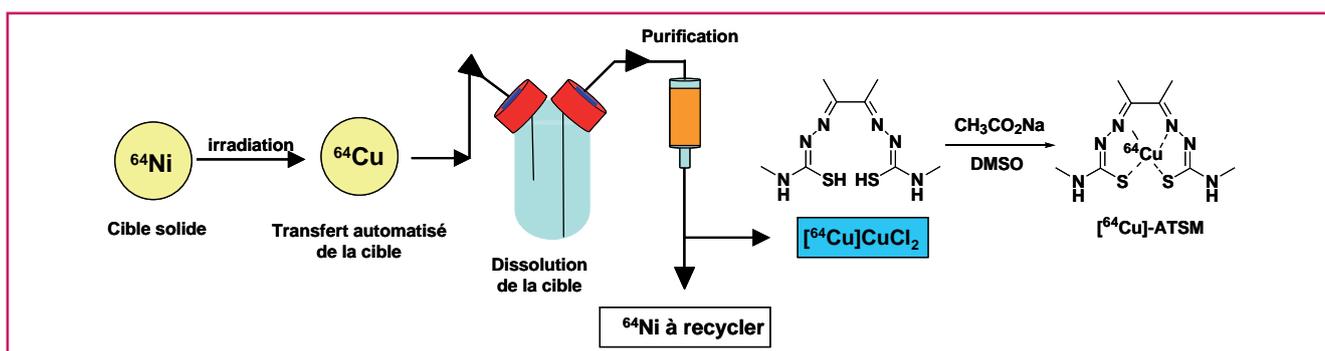
Figure 5 - Procédé classique de synthèse de la $[^{11}\text{C}]$ -méthionine.

Figure 6 - Procédé de synthèse de l'ATSM marqué au cuivre-64.

préclinique, et offre une plateforme accessible dans le cadre de collaborations académiques et industrielles. Cette installation permet aussi d'envisager toute une série d'enseignements pratiques autour de ces équipements.

Au niveau national, Cyréc est associé au Labex IRON et figure au Club français des radiopharmaceutiques (voir encadré 2).

Encadré 2

Les principaux réseaux regroupant les cyclotrons en France et en Europe

- Le Club français des radiopharmaceutiques⁽¹⁾ est un groupement d'intérêt scientifique (GIS) qui regroupe plus de vingt laboratoires de recherche français travaillant dans le domaine de la synthèse, du marquage, de la mise en forme galénique et de l'étude du devenir biologique de nouveaux médicaments radioactifs à visée diagnostique et/ou thérapeutique pour la médecine nucléaire.
- France Life Imaging (FLI)⁽²⁾ est une infrastructure de recherche visant à établir un réseau coordonné et harmonisé pour l'imagerie biomédicale en France. Ce projet a été récemment sélectionné à l'appel à projets des Investissements d'avenir « Infrastructure en biologie et santé ».
- Le Labex IRON⁽³⁾ est un réseau national réparti sur huit villes : Angers, Caen, Nantes, Orléans, Rennes, Strasbourg, Toulouse et Tours. Il fédère plus de 160 chercheurs regroupés dans douze équipes de recherche et implique une large communauté scientifique pluridisciplinaire : chimie, radiochimie, formulation, biologie, médecine nucléaire, physique médicale, sciences humaines et sociales. IRON s'inscrit dans une démarche nationale qui vise au développement préclinique et clinique de radiopharmaceutiques innovants dans le domaine du diagnostic en cancérologie, en neurologie, ainsi que dans le développement de nouveaux protocoles thérapeutiques.

(1) <https://its.aviesan.fr/index.php?pagendx=281>

(2) <https://its.aviesan.fr/index.php?pagendx=291>

(3) www.labex-iron.com

Conclusions

L'installation d'un cyclotron et de ses laboratoires associés représente un enjeu important, plein de défis techniques et de promesses scientifiques. Une étroite collaboration pluridisciplinaire aux niveaux local aussi bien que national est nécessaire pour permettre le développement des applications liées à un tel outil.

Une grande diversité de molécules peut être marquée, des simples molécules de faibles poids moléculaires jusqu'aux nanoparticules et aux anticorps. Chaque espèce impose sa propre chimie, mais aussi ses techniques de purification et d'analyse. La production et la mise à disposition d'isotopes encore peu utilisés, car peu disponibles, doivent permettre le développement de nouveaux outils pour l'imagerie préclinique et clinique.

Notes et références

- [1] Wilhelm Conrad Röntgen, prix Nobel de physique 1901 « in recognition of the extraordinary services he has rendered by the discovery of the remarkable rays subsequently named after him » (www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1901/rontgen-facts.html).
- [2] Sibille L., Nalda E., Collombier L., Kotzki P.-O., Boudousq V., La médecine nucléaire, *L'Act. Chim.*, 2011, 352, p. 16.
- [3] Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2012 (www.asn.fr/Informations/Publications/Rapports-de-l-ASN/La-surete-nucleaire-et-la-radioprotection-en-France-en-2012).
- [4] Livre blanc de la Médecine nucléaire, CNP/SFMN, 2012 (www.sfmn.org/images/pdf/actions_2012/LivreBlancMedecineNucleaire.pdf).
- [5] Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, le CNRS, la Région Alsace, le Conseil général du Bas-Rhin, la Communauté urbaine de Strasbourg, le Fonds européen de développement régional (FEDER) et l'Université de Strasbourg.

- [6] Arronax (accélérateur pour la recherche en radiochimie et oncologie à Nantes Atlantique) : www.cyclotron-nantes.fr
- [7] Cai L., Lu S., Pike V.W., Chemistry with [¹⁸F]fluoride ion, *Eur. J. Org. Chem.*, **2008**, 7, p. 2853.
- [8] Ametamey S.M., Honer M., Schubiger P.A., Molecular imaging with PET, *Chem. Rev.*, **2008**, 108, p. 1501.
- [9] Lodi F., Malizia C., Castelluci P., Cicoria G., Fanti S., Boschi S., Synthesis of oncological [¹¹C]radiopharmaceuticals for clinical PET, *Nucl. Med. Biol.*, **2012**, 39, p. 447.
- [10] Rotstein B.H., Liang S.H., Holland J.P., Collier T.L., Hooker J.M., Wilson A.A., Vasdev N., ¹¹CO₂ fixation: a renaissance in PET radiochemistry, *Chem. Comm.*, **2013**, 49, p. 5621.
- [11] Wadas T.J., Wong E.H., Weisman G.R., Anderson C.J., Copper chelation chemistry and its role in copper radiopharmaceuticals, *Curr. Pharm. Des.*, **2007**, 13, p. 3.
- [12] Smith S.V., Molecular imaging with copper-64, *J. Inorg. Biochem.*, **2004**, 98, p. 1874.
- [13] Hou X., Jacobsen U., Jorgensen J.C., Separation of no-carrier-added ⁶⁴Cu from a proton irradiated ⁶⁴Ni enriched nickel target, *Appl. Radiat. Isotopes*, **2002**, 57, p. 773.
- [14] Kim J.Y., Park H., Lee J.C., Kim K.M., Lee K.C., Ha H.J., Choi T.H., An G.I., Cheon G.J., A simple Cu-64 production and its application of Cu-64 ATSM, *Appl. Radiat. Isotopes*, **2009**, 67, p. 1190.



D. Brasse



M. Pellicoli



A. Ouadi



P. Marchand

David Brasse (*auteur correspondant*)* est directeur de recherche au CNRS, responsable de l'équipe IMABIO et responsable scientifique de Cyclic. **Michel Pellicoli** est ingénieur de recherche au CNRS et responsable technique de Cyclic. **Ali Ouadi** et **Patrice Marchand** sont ingénieurs de recherche CNRS dans l'équipe IMABIO.

* IMABIO, Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC), UMR 7178 CNRS/ Université de Strasbourg, 23 rue du Loess, F-67037 Strasbourg Cedex 02. Courriel : david.brasse@iphc.cnrs.fr

EVAPORATEUR ROTATIF RC 900

Nouveauté 2014

Pompes pour le laboratoire

ERGONOMIE ET SECURITÉ.

Pour une évaporation plus simple, plus efficace et plus sûre :

- Pilotage par télécommande sans fil
- Fixation rapide du ballon en un clip
- Réglage de l'inclinaison du ballon par un bouton pratique
- Large ouverture de nettoyage du condenseur
- Protection des personnes par écran polycarbonate

La combinaison du RC 900 avec le groupe de pompage SC 920 et le chiller C 900 constitue un système homogène, efficace et ergonomique dont vous apprécierez les qualités au quotidien.



Pour toutes questions et requêtes pour vos applications Gaz ou Liquides, contacter nous !

www.knf.fr • info@knf.fr • 03 89 70 35 00



Identification des additifs dans les matériaux plastiques

Analyse directe par spectrométrie de masse couplée à la mobilité ionique

Caroline Barrère, Florian Maire, Carlos Afonso et Pierre Giusti

Résumé	La caractérisation des matériaux plastiques s'avère particulièrement difficile puisque ce sont des mélanges complexes, souvent très peu solubles dans les solvants usuels. Une stratégie analytique innovante, basée sur l'utilisation d'une sonde d'analyse de solide à pression atmosphérique (ASAP) couplée à la mobilité ionique (IM) et la spectrométrie de masse (MS) a été mise au point. Rapide et ne nécessitant pas de préparation d'échantillon, cette méthode permet l'identification d'additifs dans des matrices polymères complexes, telles que des polypropylènes commerciaux, grâce à leur mise en évidence sur une carte bidimensionnelle (m/z en fonction du temps de dérive) obtenu par IM/MS.
Mots-clés	Plastiques, polypropylène, additifs, sonde d'analyse de solide à pression atmosphérique, mobilité ionique, spectrométrie de masse.
Abstract	Characterization of additives in plastics: direct analysis by IM/MS The structural characterization of plastics is particularly difficult because they are low solubility complex mixtures. An innovative strategy, based on atmospheric-pressure solid analysis probe (ASAP) coupled with ion mobility (IM) and mass spectrometry (MS) was developed. This method is quick and does not require any sample preparation. It allows the identification of additives to be performed in complex polymeric matrix such as commercial polypropylene by using their highlighting in the bi-dimensional m/z vs drift time plot obtained by IM/MS.
Keywords	Plastics, polypropylene, additives, atmospheric-pressure solid analysis probe, ion mobility, mass spectrometry.

Les matériaux polymères synthétiques, aussi appelés « plastiques », sont depuis de nombreuses années parmi les matériaux les plus utilisés dans notre société. L'engouement pour ce type de matériaux s'explique par la grande diversité des propriétés accessibles à un coût de production avantageux, et pour des applications aussi diverses que l'emballage alimentaire, le matériel médical, le textile, l'ameublement ou les lubrifiants.

Depuis la prise de conscience des risques liés à la présence d'un perturbateur endocrinien – le bisphénol A – dans les plastiques destinés aux nourrissons en 2010, l'identification des additifs dans ces matériaux est devenue un enjeu sociétal majeur, mais n'en reste pas moins un réel défi analytique. En effet, la caractérisation des matériaux plastiques s'avère particulièrement difficile puisque, d'une part, ce sont des mélanges complexes, et, d'autre part, ils sont souvent très peu solubles dans les solvants usuels. De nombreuses stratégies d'analyse par spectrométrie de masse ont été reportées, mais elles s'avèrent longues et contraignantes à mettre en œuvre, puisqu'elles demandent des étapes d'extraction des additifs de la matrice polymère [1-2].

Les travaux de recherche présentés ici ont été menés conjointement par le laboratoire de recherche Chimie Organique Bioorganique, Réactivité et Analyse (COBRA) et la société Total. Ils ont permis de mettre au point une stratégie

analytique rapide et sans préparation préalable d'échantillon. Elle est basée sur l'utilisation d'une sonde d'analyse de solide à pression atmosphérique (« atmospheric solid analysis probe », ASAP) couplée à la mobilité ionique (IM) et la spectrométrie de masse (MS) pour l'identification d'additifs dans des matrices polymères complexes, telles que des polypropylènes commerciaux, plastiques parmi les plus utilisés.

Le couplage de la mobilité ionique à la spectrométrie de masse constitue l'un des derniers développements technologiques majeurs en spectrométrie de masse, qui est devenu récemment accessible grâce à la mise sur le marché d'un instrument par la société Waters. Les principes généraux de ce couplage, ainsi que le fonctionnement de la source ASAP seront décrits dans une première partie. Les résultats de l'analyse de deux polypropylènes formulés commerciaux seront ensuite détaillés.

Le couplage ASAP-IM/MS

Source d'ionisation ASAP

La sonde d'analyse de solides à pression atmosphérique (ASAP), récemment introduite par McEwen [3], est constituée principalement d'une tige de verre sur laquelle est déposé

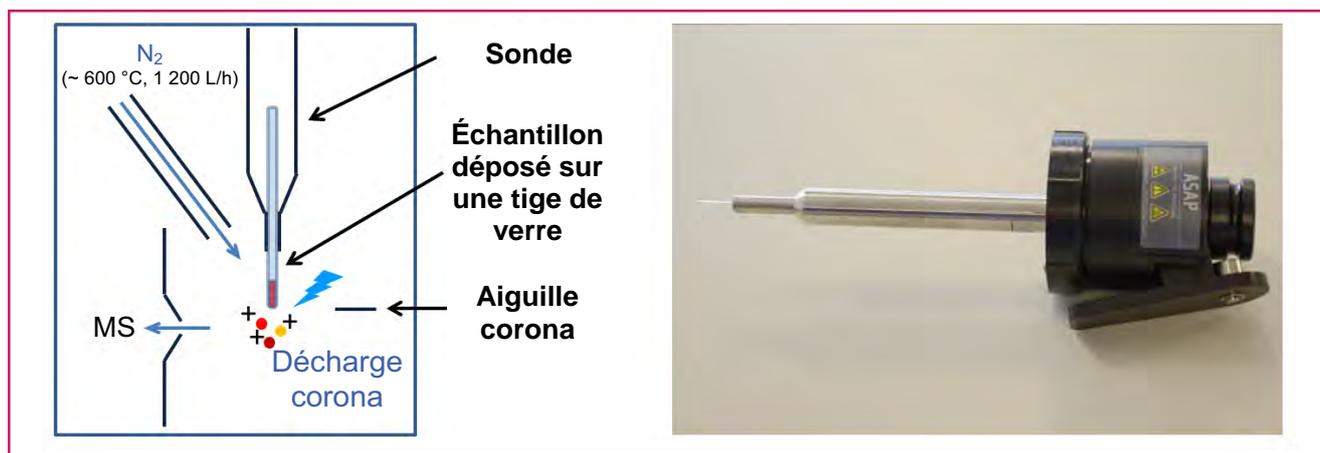


Figure 1 - Principe de la source ASAP (à gauche) et photographie de la sonde (à droite). Ce dispositif permet l'ionisation d'échantillons complexes de polarités variées par analyse directe.

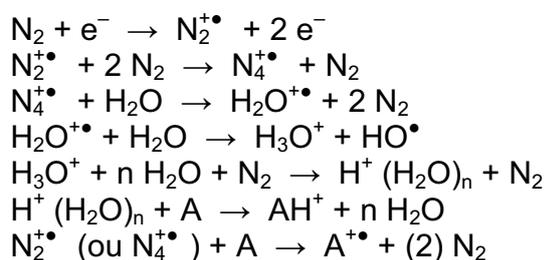


Figure 2 - Mécanisme des réactions induites dans la source ASAP par la décharge corona en mode d'ionisation positif, conduisant à l'ionisation d'un analyte A par transfert de proton ou par transfert de charge [3].

l'échantillon (figure 1, gauche) et d'une aiguille corona (figure 1, droite). Un flux de gaz de désolvatation, généralement de l'azote, chauffé entre 50 et $650\text{ }^\circ\text{C}$ permet de désorber thermiquement et/ou pyrolyser l'échantillon en fonction de la température utilisée et du caractère plus ou moins volatil de l'échantillon. Une fois en phase gazeuse, les analytes sont alors ionisés à l'aide du plasma généré à la pointe de l'aiguille corona sur laquelle est appliquée une tension de plusieurs kV (formation d'une décharge électrique « corona » due à l'ionisation du milieu grâce au fort potentiel électrique appliqué).

Les analytes issues de l'échantillon, notées A, sont ionisées soit par transfert de charge, ce qui conduit à la formation de cations ou d'anions radicalaires ($A^{+\bullet}$), soit par transfert de proton, formant ainsi des molécules protonées $[A+H]^+$ ou déprotonées $[A-H]^-$, selon une cascade de réactions décrites par le mécanisme de la figure 2 pour le mode d'ionisation positif.

L'ionisation d'un analyte A en $A^{+\bullet}$, $[A+H]^+$ ou $[A-H]^-$ se fera préférentiellement par l'une ou l'autre de ces voies, en fonction de son affinité protonique (ou acidité) et de la présence de trace de solvant protique dans l'atmosphère de la source. Il est cependant courant d'observer un mélange d'ions provenant de ces deux voies. Il est intéressant de noter que les processus de transfert de proton ou de transfert de charge peuvent être favorisés en modifiant l'atmosphère de la source, par ajout respectivement de solvant protique (eau, méthanol...) ou de solvant aromatique (benzène, toluène...) [3]. En effet, la présence de solvant protique dans l'atmosphère de la source va permettre une plus grande disponibilité des protons nécessaires à la première voie d'ionisation. Les traces de solvant aromatique vont quant à elles facilement s'ioniser de manière radicalaire dans la source et promouvoir ainsi l'ionisation par transfert de charge des analytes.

Cette source d'ionisation permet l'analyse rapide et sans traitement de l'échantillon, qui peut être solide et déposé en frottant l'extrémité du capillaire sur la surface de l'échantillon, ou liquide, et dans ce cas déposé par trempage de l'extrémité de la tige de verre. Comme ce dispositif permet d'ioniser des composés de polarités très variées, son utilisation s'est donc rapidement étendue à une large gamme d'analytes : biologiques (nucléosides, tissus), molécules organiques (pesticides) ou polymères synthétiques ainsi que leurs additifs [4-6].

Intérêt de l'analyse par IM/MS

La spectrométrie de mobilité ionique (IM) est fondée sur le mouvement des ions à travers un gaz neutre sous l'influence d'un champ électrique. Le principe général de cette technique est illustré sur la figure 3.

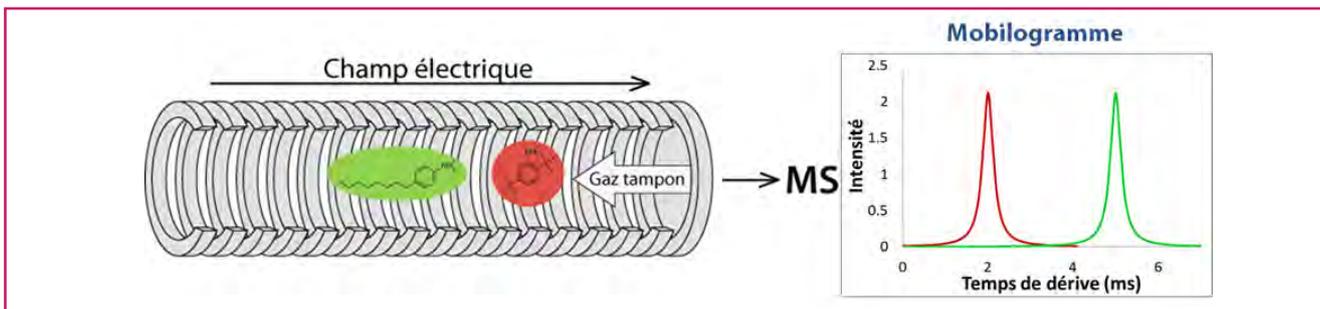


Figure 3 - Principe d'une cellule de mobilité ionique. Les pics des ions sont détectés à des temps de dérive variables selon leur section efficace de collision avec le gaz tampon.

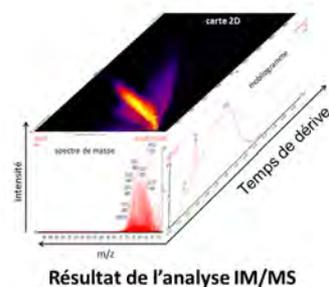
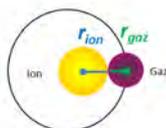
La mobilité ionique pour un tube de dérive [7]

- **Mouvement** des ions dans un gaz sous la contrainte d'un **champ E**.
- La **vitesse** de l'ion est proportionnelle à **E** : $V_d = KE = L/t_d$.
- Le **coefficient de mobilité (K)** est fonction de l'ion et du gaz tampon :

$$K = \frac{(18\pi)^{1/2}}{16} \frac{e}{N(K_b T)^{1/2} \Omega} \frac{z}{\sqrt{(m_{\text{gaz}} + m_{\text{ion}})(m_{\text{gaz}} m_{\text{ion}})}}$$

- La **section efficace de collision d'une sphère (Ω)** = compacité/conformation d'un ion.

$$\Omega = \pi(r_{\text{ion}} + r_{\text{gaz}})^2$$



L : longueur du tube de dérive ; K_b : constante de Boltzmann ; N : densité du gaz ; e : charge de l'électron ; T : température ; z : charge de l'ion.

En pratique, les mesures expérimentales du temps de dérive permettent d'obtenir des informations sur la structure spatiale des ions en phase gazeuse, au travers de leur section efficace de collision. Par ailleurs, l'ajout de la dimension du *temps de dérive* à une analyse par spectrométrie de masse permet de représenter les données sous la forme d'une carte bidimensionnelle (en fonction de m/z et t_d), et ainsi d'augmenter le nombre de signaux séparés et de faciliter l'analyse de mélanges complexes. Dans des conditions favorables, cette carte facilite l'interprétation des données en permettant de distinguer des ions isomères (de même formules brutes et donc de même rapport m/z) qui auraient des structures tridimensionnelles différentes, et en mettant en évidence des ions de faibles intensités. Par exemple, nous pouvons voir sur la *figure 4* la comparaison des résultats obtenus par ASAP-MS et ASAP-IM/MS pour un polypropylène commercial standard (Sigma Aldrich).

On remarque, comme l'ont déjà montré Trimpin et McEwen, que l'analyse par ASAP-MS ne permet de mettre en évidence dans l'échantillon qu'un additif à m/z 530,5 [5]. L'ion à m/z 474,4 se révèle être un fragment de l'ion à m/z 530,5, et celui à m/z 277,1 est un ion de

bruit de fond de la source ASAP ($[M-H]^+$ de l'oxyde de triphénylphosphine, $C_{18}H_{14}PO^+$ à m/z 277,0777) qui peut être utilisé comme étalon interne pour des mesures de masses précises. En revanche, comme on peut le voir sur la carte bidimensionnelle (*figure 4, droite*), l'ajout de la dimension de mobilité ionique permet de mettre en évidence un grand nombre de signaux supplémentaires, répartis sur plusieurs diagonales. Le fait que ces ions appartiennent à une même diagonale suggère qu'ils présentent une conformation similaire et peuvent correspondre à des espèces d'une même série ou famille. Le couplage ASAP-IM/MS est donc particulièrement pertinent pour mettre en évidence des additifs présents en très faible quantité dans des matrices complexes telles que les polypropylènes.

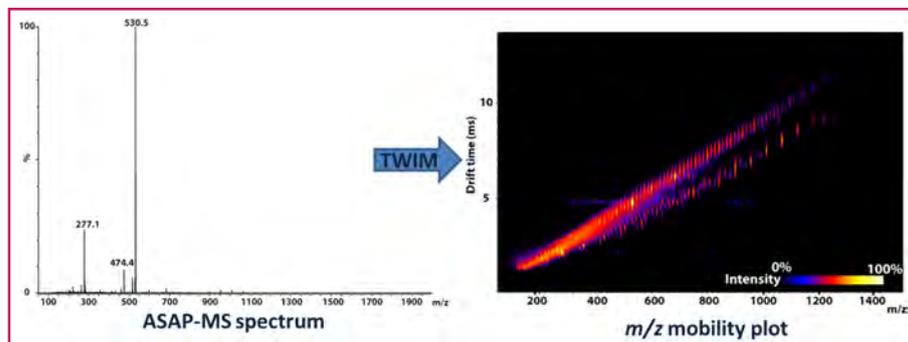


Figure 4 - Comparaison entre les résultats obtenus par ASAP-MS et ASAP-IM/MS pour un polypropylène commercial standard (Sigma Aldrich). Reproduit de [9] avec permission.

À gauche, la méthode ASAP-MS fait apparaître seulement deux ions à m/z 530,5 et 474,4 correspondant à un additif et un fragment. À droite, la méthode ASAP-IM/MS permet de représenter les données sous la forme d'une carte bidimensionnelle (en fonction de m/z et t_d) sur laquelle les signaux d'ions présentant des conformations similaires sont regroupés sous forme de « diagonales » dont l'expérimentateur peut extraire manuellement le spectre de masse correspondant.

Dans un tube de dérive à champ uniforme, les ions sont accélérés par le champ électrique et ralentis par les collisions avec un atome (ou une molécule) de gaz. Ce mouvement se traduit expérimentalement par un coefficient de mobilité des ions (K) inversement proportionnel à leur temps de dérive (t_d en ms), qui correspond au temps mis par les ions pour traverser la cellule de mobilité. La théorie régissant le mouvement des ions au sein du tube de dérive à champ uniforme, développée dans les années 1970 par E.W. Mason et E.A. Mc Daniels, met en évidence que la structure tridimensionnelle d'un ion, au travers de sa section efficace de collision (Ω) et de sa charge (z), influencent son coefficient de mobilité [7]. En effet, lorsque z augmente, le temps de dérive des ions t_d diminue, et lorsque la section efficace de collision Ω augmente, t_d augmente (voir encadré).

Les résultats présentés ici ont été obtenus avec une cellule de mobilité à champ périodique de type TWIM (« traveling-wave ion mobility ») qui nécessite l'utilisation d'étalons pour obtenir les sections efficaces de collision à partir de temps de dérive expérimentaux [8].

Caractérisation de polypropylènes commerciaux

Deux échantillons de polypropylènes commerciaux ont été analysés au cours de cette étude : un polypropylène commercial standard (Sigma Aldrich) et un cône de pipette, respectivement dénommés A et B. Les résultats ASAP-IM/MS obtenus pour le polypropylène commercial A sont présentés sur la *figure 5*.

La carte bidimensionnelle de la *figure 5a* montre deux diagonales principales dont les spectres extraits sont donnés sur les *figures 5b* et *5c*. Ces spectres mettent en évidence trois additifs regroupés dans le *tableau 1*. L'identification de ces additifs est confirmée par la mesure de leur masse précise ainsi que par les différents ions fragments observés. En effet, un grand nombre de pics correspondant à des ions fragments formés en source ont été détectés et identifiés à l'aide d'expériences de spectrométrie de masse en tandem qui ont permis de confirmer qu'il s'agit d'ions issus d'une fragmentation en source des différents additifs identifiés. Par ailleurs, le spectre de la *figure 5c* montre six distributions d'ions correspondant

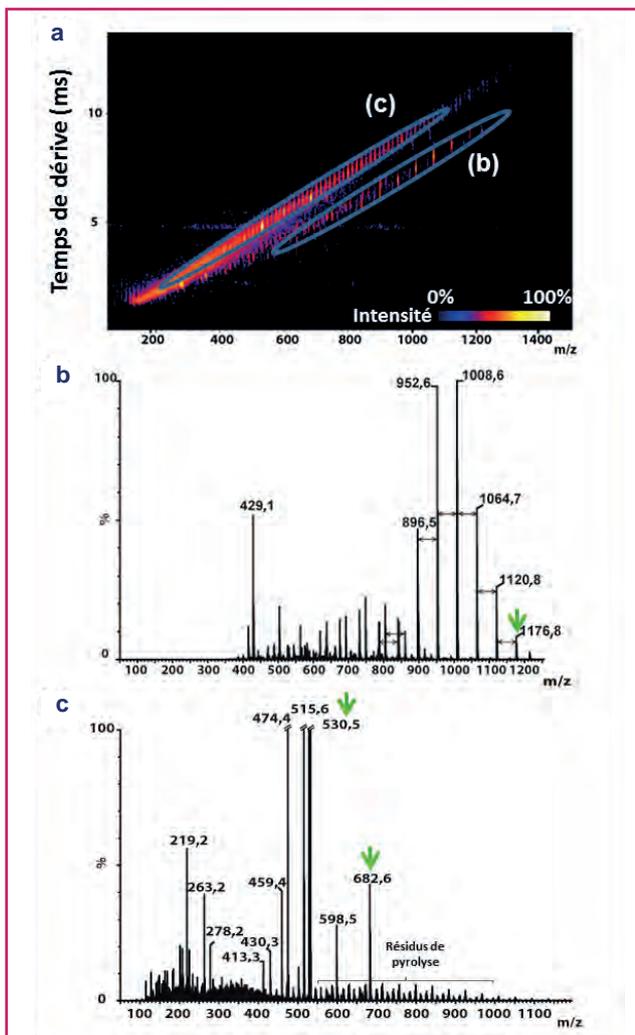


Figure 5 - (a) Carte bidimensionnelle m/z en fonction de t_d obtenue par analyse ASAP-IM/MS du polypropylène commercial A et spectres de masse extraits à partir des diagonales basse (b) et haute (c).

Les flèches vertes indiquent les pics correspondant aux additifs intacts. Adapté de [9] avec permission.

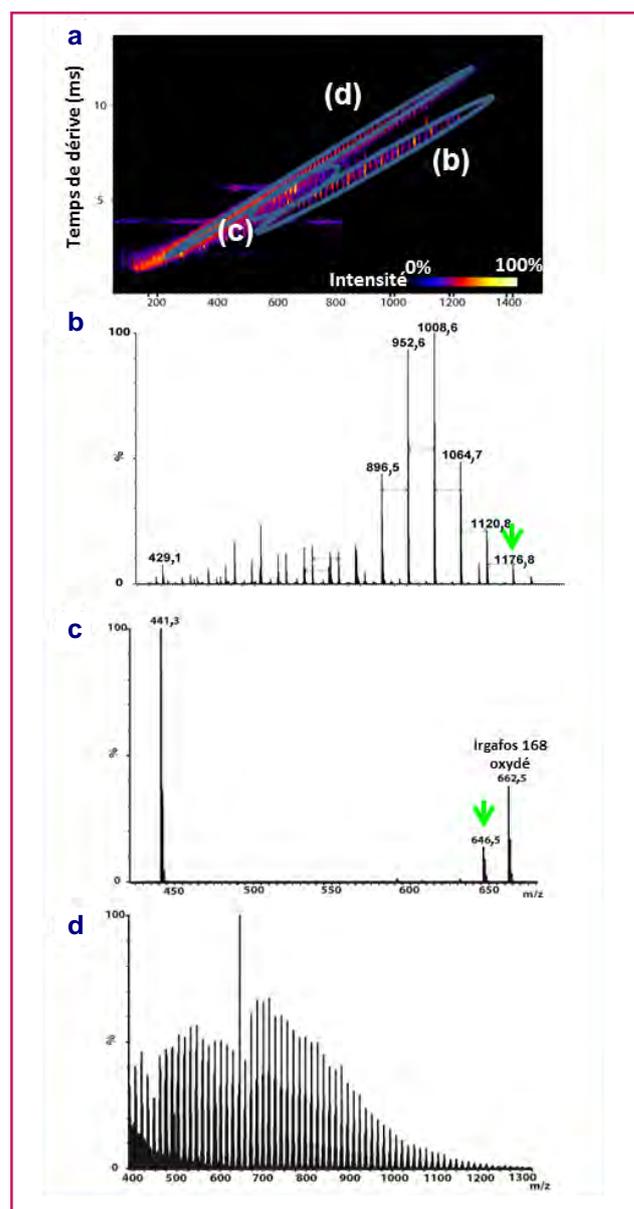


Figure 6 - (a) Résultats ASAP-IM/MS pour le polypropylène commercial B et spectres extraits des diagonales basse (b), médiane (c) et haute (d).

Les flèches vertes indiquent les pics correspondant aux additifs intacts. Adapté de [9] avec permission.

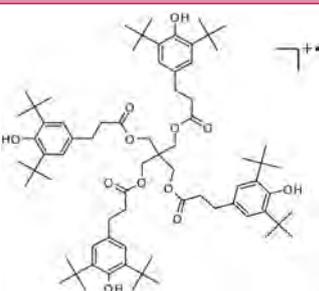
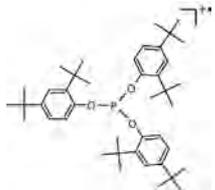
Tableau I - Additifs identifiés pour le propylène commercial A.

Nom	Structure	m/z théorique	m/z expérimental	$\Delta m/z$ (ppm)
Irganox 1010	<chem>CC(C)(C)C1=CC=C(C(C)(C)C)C(C1)COC(=O)CCOC(=O)C1=CC=C(C(C)(C)C)C(C1)O</chem>	1176,7835	1176,7760	- 6,4
Irganox 1076	<chem>CC(C)(C)C1=CC=C(C(C)(C)C)C(C1)COC(=O)CCOC(=O)C1=CC=C(C(C)(C)C)C(C1)O</chem>	530,4693	530,4700	+ 1,3
Irganox PS802	<chem>CCCCCCCCCCCCCCCC(=O)OCCCCCCCCCCCCCCCC(=O)O</chem>	682,5928	682,5901	- 4,0

aux résidus de pyrolyse de la matrice polymère. Les distributions détectées à A : m/z $42,047n$, B : m/z $42,047n+14,016$, C : m/z $42,047n+28,031$, E : m/z $42,047n+12,000$ et F : m/z $42,047n+40,031$, avec n le nombre d'unités répétitives, sont identiques à celles obtenus par pyrolyse classique couplée à la spectrométrie de masse. Une dernière distribution X observée à m/z $42,047n+26,015$ peut être expliquée par un processus de dégradation dans la source d'ionisation ASAP.

Les résultats ASAP-IM/MS obtenus pour le polypropylène commercial B sont présentés figure 6. On remarque trois diagonales sur la carte bidimensionnelle de la figure 6a. Comme pour le polypropylène A, la diagonale la plus haute, dont le spectre de masse extrait est donné sur la figure 6d, correspond aux résidus de pyrolyse de la matrice polymère. Les deux autres diagonales permettent d'identifier deux additifs présentés dans le tableau II.

Tableau II - Additifs identifiés pour le propylène commercial B.

Nom	Structure	m/z théorique	m/z expérimental	$\Delta m/z$ (ppm)
Irganox 1010		1176,7835	1176,7777	- 4,9
Irgafos 168		646,4509	646,4495	- 2,2
Irgafos 168 oxydé	$[C_{42}H_{63}O_4(M)P]^+$	662,4458	662,4446	- 4,9

On peut remarquer sur le spectre donné à la figure 6c que l'Irgafos 168 est détecté sous forme d'ion moléculaire $M^{+\bullet}$ et sous forme oxydée $[M+O]^{+\bullet}$, comme cela a été déjà observé par d'autres auteurs [5].

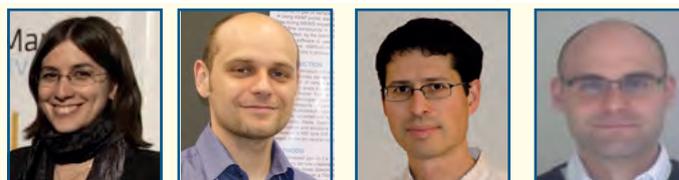
Conclusion

Bien que l'intérêt de la source ASAP dans l'analyse des plastiques et de leurs additifs soit déjà bien connu, l'utilisation de cette source en combinaison avec la mobilité ionique et la spectrométrie de masse n'avait jamais été reportée pour l'étude globale d'échantillons industriels. Cette étude a permis de montrer le potentiel de ce couplage original comme outil puissant pour l'identification d'additifs dans les matrices polymères [9]. En effet, cette technique s'avère particulièrement rapide (quelques minutes) et ne nécessite pas de préparation préalable des échantillons. En pratique, beaucoup d'additifs ont une structure compacte et sont souvent différenciés des ions correspondant aux polymères sur la carte moléculaire bidimensionnelle. L'identification sans ambiguïté des additifs peut être obtenue grâce aux mesures de masses précises et à l'interprétation des ions fragments obtenus. D'autres études sont en cours pour améliorer encore le potentiel d'analyse de ces échantillons complexes, en s'intéressant notamment aux aspects quantitatif et exhaustif de ce couplage ASAP-IM/MS.

Références

[1] Schwarzinger C., Gabriel S., Beibmann S., Buchberger W.J., Quantitative analysis of polymer additives with MALDI-TOF MS using an internal standard approach, *J. Am. Soc. Mass. Spectrom.*, **2012**, 23, p. 1120.

- [2] Lowe T.A., Paine M.R.L., Marshall D.L., Hick L.A., Boge J.A., Barker P.J., Blanksby S.J., *J. Mass Spectrom.*, **2010**, 45, p. 486.
- [3] McEwen C.N., Atmospheric-pressure solid analysis probe (ASAP), *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, John Wiley & Sons, **2006**.
- [4] McEwen C.N., McKay R.G., Larsen B.S., Analysis of solids, liquids, and biological tissues using solids probe introduction at atmospheric pressure on commercial LC/MS instruments, *Anal. Chem.*, **2005**, 77, p. 7826.
- [5] Trimpin S., Wijerathne K., McEwen C.N., Rapid methods of polymer and polymer additives identification: Multi-sample solvent-free MALDI, pyrolysis at atmospheric pressure, and atmospheric solids analysis probe mass spectrometry, *Anal. Chim. Acta*, **2009**, 654, p. 20.
- [6] Hacıoğlu J., Mass spectrometry of polymers, *New Techniques, Advances in Polymer Science*, M. Hakkarainen (ed), Springer, **2012**, p. 69-103.
- [7] McDaniel E.W., Mason E.A., *The Mobility and Diffusion of Ions in Gases*, John Wiley & Sons, **1973**.
- [8] Giles K., Pringle S.D., Worthington K.R., Little D., Wildgoose J.L., Bateman R.H., Applications of a travelling wave-based radio-frequency only stacked ring ion guide, *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, **2004**, 18, p. 2401.
- [9] Barrère C., Maire F., Afonso C., Giusti P., Atmospheric solid analysis probe-ion mobility mass spectrometry of polypropylene, *Anal. Chem.*, **2012**, 84, p. 9349.



C. Barrère

F. Maire

C. Afonso

P. Giusti

Caroline Barrère (auteur correspondant)

est post-doctorante dans le groupe de Spectrométrie de masse moléculaire et supramoléculaire de l'UMR CNRS 6014 COBRA, Université de Rouen⁽¹⁾. Elle a reçu le prix de thèse 2012 de la division Chimie analytique de la Société Chimique de France.

Florian Maire

est post-doctorant à l'Université de Leiden (Pays-Bas), au sein de la division Analytical BioSciences du Leiden Academic Centre for Drug Research⁽²⁾.

Carlos Afonso

est professeur à l'Université de Rouen et dirige le groupe de Spectrométrie de masse moléculaire et supramoléculaire de l'UMR CNRS 6014 COBRA⁽¹⁾.

Pierre Giusti

est docteur en chimie et dirige le Service de séparation et d'identification moléculaire du département Analyse de la direction Recherche au sein de la branche Raffinage-Chimie de Total à Gonfreville l'Orcher, près du Havre⁽³⁾.

⁽¹⁾ UMR 6014 COBRA, Laboratoire de Spectrométrie de masse moléculaire et supramoléculaire, IRCOF, 1 rue Tesnières, F-76131 Mont-Saint-Aignan Cedex. Courriels : caroline.barrere@univ-rouen.fr ; carlos.afonso@univ-rouen.fr

⁽²⁾ Universiteit Leiden, LACDR, Division of Analytical Biosciences, Einsteinweg 55, PO Box 9502, NL-2300 RA Leiden (Pays-Bas).

⁽³⁾ TRTG – Total Raffinage Chimie-Normandie, Département Analyse, BP 27, F-76700 Harfleur. Courriel : pierre.giusti@total.com

Connaissez-vous le site de l'AC ?

lactualitechimique.org



Alors, vite à votre souris !



Le Bup
une revue scientifique

Tous les Bup
de 1907 à ce jour
en téléchargement gratuit
pour toute adhésion
et abonnement
abonnement@udppc.asso.fr

 Rejoignez-nous !
UDPPC
facebook

CONGRÈS
Lyon
26-29 oct.
2014

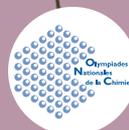
CONSULTEZ
BupDoc



<http://udppc.asso.fr/bupdoc>

ENVOYEZ
DES
ARTICLES

lebup.secretaire@udppc.asso.fr



Du monde académique au monde industriel : trois interviews

Rose Agnès Jacquesy

L' interview du professeur Henri Kagan publié dans *L'Actualité Chimique* à l'occasion des Journées de chimie organique 2013* a montré, s'il en était besoin, la richesse et l'intérêt des entretiens avec des chimistes au parcours original et instructif.

Instructif pour les jeunes générations et les moins jeunes également, et quoi de plus significatif alors que la prise de risque d'un passage du monde académique au monde industriel ? Certes, il s'agit du monde de la recherche industrielle, et pas celui de la production ou des services. Mais à la lumière des trois entretiens publiés ici se découvrent la personnalité de l'interviewé et celle de l'entreprise.

Leur exemplarité vient d'abord de leurs différences.

Dans le premier cas, un chercheur répond à une annonce, quitte le cocon d'un laboratoire d'excellence (celui de Jean-Marie Lehn) pour créer *de novo* un département chimie dans une petite société d'instrumentation, qu'il transformera en numéro un mondial grâce à son empathie avec les chercheurs, leurs besoins, voire leurs rêves.

Dans le second, un jeune chercheur d'un institut prestigieux du CNRS (l'Institut de chimie des substances

naturelles de Gif-sur-Yvette) est recruté par la société Roussel-Uclaf dont la recherche était alors menée par des personnalités d'exception. Un parcours lié aux aléas de la structuration industrielle l'amènera à créer sa propre entreprise, qui a réussi à passer le cap difficile de la crise de 2008.

Le troisième exemple décrit le parcours académique, d'abord au CNRS puis comme professeur d'université, d'un scientifique connu nationally et internationalement pour ses travaux, qui n'a jamais cessé de faire de la science et de publier à tous les niveaux de responsabilité qu'il a occupés jusqu'à une date récente, lorsqu'un grand industriel de la chimie l'a convaincu de le rejoindre pour occuper un poste stratégique en R & D.

Leur exemplarité vient aussi de leurs similitudes : aimer la science et toutes les manières de la faire, savoir saisir les opportunités ou les créer, et être passionnés donc passionnants pour mieux partager les réalités sans les priver de leur auréole de mystère tentateur.

* Balavoine G., Sur la route d'Henri Kagan, dialogue..., *L'Act. Chim.*, 2013, 377, p. 7.

Christian Brevard et l'aventure Bruker

Christian Brevard quitte son Algérie natale en 1962, à l'âge de 18 ans, pour rejoindre la métropole où il effectue des études supérieures, et plus particulièrement Strasbourg, où il est élève de l'École de chimie (dont le nom a varié au cours du temps) à partir de 1963. Pourquoi cette école d'ingénieurs là alors qu'il avait réussi plusieurs concours ? Pour sa réputation d'excellence en physico-chimie : Jean-Marie Lehn, futur jeune prix Nobel de chimie (1987), y enseigne la mécanique quantique... et la RMN, jeune science à l'époque et pour laquelle il se prend d'une passion qui ne l'a plus quitté.

Son diplôme d'ingénieur en poche, il se présente à Jean-Marie Lehn chez qui il prépare une thèse en dynamique moléculaire et RMN, puis part au Canada chez Ronald J. Gillespie où il travaille sur la RMN des superacides, sujet délicat mais prometteur (son pape George A. Olah aura le prix Nobel de chimie en 1994).

Alors que Jean-Marie Lehn part pour Harvard, Christian Brevard trouve en 1973 une annonce émanant d'une petite société allemande implantée à Karlsruhe depuis 1960, la société Bruker, qui recherche un docteur es sciences intéressé à créer *ex nihilo* un laboratoire de chimie à Wissembourg (dans un environnement essentiellement électronique) pour y développer les applications concrètes de la RMN, faire évoluer les spectromètres en réponse aux demandes



des clients, et faire connaître une entreprise un peu confidentielle face aux géants de l'époque, notamment Varian et son A60 (l'équivalent d'une 2 CV et de la coccinelle dans un autre créneau). Ce sera le début de l'aventure !

Dans une pièce uniquement meublée d'une table de camping et d'un téléphone, il se fait connaître ainsi que la société en suivant tout ce qui se publie dans le domaine, en

demandant des tirés à part auprès de tous les auteurs plus ou moins proches de la RMN et en participant, à peine installé, aux premières journées méditerranéennes sur la RMN (Marseille, mars 1973). Le 18 décembre de la même année, avec son collègue et ami Pierre Granger, il réussit une première mondiale : la RMN du xénon.

Puisqu'il s'agissait de réaliser des expériences avec des atomes inhabituels, un domaine en plein essor ouvrait des perspectives particulièrement excitantes : celui des complexes organométalliques, s'il était possible d'examiner de près le métal de transition, dont certains éléments caractéristiques échappaient jusqu'alors à la connaissance physique et chimique. Par RMN de l'atome, on avait une chance d'atteindre le détail de son environnement et sa topologie, son état électronique, les phénomènes de relaxation, etc.

Détaché du CNRS et très longtemps seul, mais fort de ses contacts personnels, de ses compétences et de son enthousiasme, de son insatiable curiosité et de son goût pour les défis, il a recherché tout ce qui, en RMN, relevait de la chimie et sortait de l'ordinaire (le proton et le carbone 13 étaient déjà classiques). Il a ainsi monté des « manips » plus exotiques les unes que les autres, enchaînant, pour répondre aux questions posées par des collègues français et étrangers, les innovations, notamment instrumentales, que seule la proximité physique et intellectuelle avec les autres ingénieurs du centre permettaient.

Deux expériences méritent d'être rapportées. Sur le modèle des UMR CNRS-industrie, il a été à l'origine de la création, sur le campus de Strasbourg, d'une unité mixte de chimie (et non d'électronique) qui a réuni jusqu'à six ou sept chercheurs pendant ses cinq ans d'existence. Plus surprenante est la saga des « Martin de Nantes ». Parrain de Christian Brevard au CNRS (un suivi personnalisé existait alors) et membre de son jury de thèse, le professeur Gérard Martin s'adresse à lui car après avoir testé la RMN de l'azote 15, il a envie de s'attaquer à un atome simple, connu, mais invisible car les appareils du marché sont verrouillés (« lock ») sur le deutérium et les constructeurs ne veulent pas s'investir dans un autre système. Christian Brevard et ses collègues de Bruker construisent une sonde spéciale, « lock fluor », avec des crédits ANVAR, et le deutérium en abondance naturelle devient observable. À ce moment-là, la Direction générale des impôts (DGI) lance un appel d'offres doté d'un million de francs pour une méthode permettant de détecter les fraudes en œnologie, chaptalisation et autres. Pour choisir l'heureux bénéficiaire, des agents de la DGI viennent avec des flacons numérotés de 1 à 4, contenant qui de l'alcool de pomme de terre, qui de l'alcool de riz, etc. Seule l'équipe de Nantes sera capable de déterminer lequel est lequel, et décrochera le contrat, dont l'argent sera réinvesti dans le laboratoire.

Gérard et Maryvonne Martin ont deux fils, l'un centralien, Gilles, qui revient de son post-doc aux États-Unis, et Loïc, polytechnicien. La méthode de son père homologuée à Bruxelles, Gilles se convainc, et convainc son entourage, que le procédé Martin a un brillant avenir devant lui. Christian Brevard et Bruker également, qui prêtent un 500 MHz que les Martin remboursent petit à petit au rythme des prestations qu'ils fournissent. Mieux encore, Bruker aide la jeune start-up, Eurofins, créée par les fils, après que Bruker et le CNRS propriétaires du brevet le cèdent gracieusement au



père, convaincus qu'un brevet qui dort est un brevet perdu, et pas si certains que l'un ou l'autre des propriétaires sera susceptible de le valoriser. Eurofins, avec un business plan à l'américaine, est maintenant implanté dans le monde entier, emploie 6 000 personnes et réalise un chiffre d'affaires de 1,5 milliards de dollars...

La société Bruker aussi a grandi, mais selon un mode entrepreneurial très différent, que Christian Brevard qualifie de capitalisme rhénan. Devenu directeur général de la société en 1989, il a continué comme son fondateur à privilégier une stratégie industrielle forte et innovante plutôt que le rachat d'autres sociétés, le réinvestissement de 100 % des bénéfices dans la société plutôt que les dividendes, la reconnaissance des hommes et leur promotion interne en leur accordant liberté et autonomie. Ces dernières vingt années se sont organisées sur un mode proche de celui de sa vie de chercheur public ou privé. Le groupe s'est diversifié avec l'infrarouge, la spectrométrie de masse, les rayons X... Bruker France est passé de 50 à 400 personnes ; le groupe s'est agrandi avec des premières techniques remarquables, par exemple en développant et en installant à Lyon le premier spectromètre de RMN 1 GHz, même si l'implantation géographique de Bruker est plus variée et sa stratégie mondiale.

Pour Christian Brevard, une entreprise comme Bruker vit un peu comme un laboratoire universitaire. Dans les deux cas, la reconnaissance vient de la qualité et de la fiabilité, par les pairs pour le second, par le marché pour le premier. Si Christian Brevard a su construire une stratégie industrielle, c'est par analogie avec sa pratique de la stratégie de recherche, et il a toujours refusé de combattre ce qu'il appelle « son syndrome universitaire prononcé ». Pour lui, un bon président, c'est 1 % de pouvoir de décision et 99 % de conviction et de persuasion.

À la retraite depuis fin 2010, Christian Brevard, qui est membre de l'Académie des technologies, s'est notamment investi fortement dans l'Institut européen entreprise et propriété intellectuelle*, fondé il y a dix ans par l'INPI et le Ministère de l'Industrie. Son but est de former les cadres des PME et TPI dans la défense du patrimoine d'innovation de la France. Environ 10 000 personnes ont déjà pu être formées.

* www.ieepi.org

Jean-Louis Brayer, du CNRS à la création de Diverchim



© Diverchim

Le parcours de Jean-Louis Brayer, « Parigot pur sucre » de 60 ans, est exemplaire. Titulaire d'un bac F6 (un des tout premiers bacs techniques), il a poursuivi par un BTS au cours duquel un professeur de chimie (Jacques Bourdet) l'a poussé à poursuivre ses études. Quelques épisodes et une mise à niveau en maths et en physique plus tard, le voilà, à 22 ans, appelé par un jeune chargé de cours en mécanique quantique, un dénommé Denis Gratias (un des pères des quasi-cristaux) ; il sera accepté comme auditeur libre à l'ENSCP en cours et en TP, sous réserve que ses résultats soient à la hauteur des ambitions qu'on a pour lui. Engagement respecté !

Passionné par les travaux de théoriciens comme Nguyễn Trong Anh et Alain Devaquet qui avaient introduit en France les premiers calculs mécanistiques, il passe DEA et microthèse en troisième année d'école, croise Olivier Kahn et ses travaux... pour finalement bénéficier d'une bourse de docteur ingénieur (BDI) en 1979, passer sa thèse en juin 1982 dans le laboratoire de Pierre Potier (le découvreur d'anticancéreux d'origine naturelle) et se lancer dans la synthèse totale de produits naturels. Jury prestigieux, avec Sir Derek Barton (prix Nobel de chimie 1969), Henri Kagan (qui aurait dû l'être – voir l'hommage rendu dans *L'Act. Chim.**) et Edmond Toromanoff, grand scientifique du secteur industriel et tuteur désigné par le CNRS pour suivre les travaux de Jean-Louis Brayer. Ce dernier lui propose un poste de chimiste de synthèse chez Roussel-Uclaf, dans le département Chimie agronomique où, pendant dix-huit mois, il construira des dérivés cyclopropaniques et/ou fluorés.

C'était l'époque où la Direction éclairée du Département Chimie du CNRS avait lancé diverses innovations destinées à favoriser la collaboration entre les secteurs public et privé : outre les BDI réservées aux ingénieurs et financées à parité par les deux secteurs, les projets à moyen terme les associant (les groupements scientifiques), et les laboratoires

mixtes, appelés UMR à l'époque. En 1984, Jean-Louis Brayer créera et dirigera un tel laboratoire consacré à la synthèse totale associant Roussel-Uclaf et le CNRS. En 1987, il laisse cette direction à Robert Lett pour revenir au sein de l'entreprise comme responsable du service recherche « fongicides et herbicides » (une vingtaine de collaborateurs).

Arrive l'année 1991, avec une nouvelle PAC (politique commune agricole) dessinée à Bruxelles et qui entraînera l'écroulement du marché « agro » car 30 % des terres agricoles seront gelées. Il en résulte, et pas seulement pour Roussel-Uclaf, une valse de fusions-acquisitions. Hoechst et Schering, des industriels solides, absorbent la division agro de Roussel-Uclaf, créant la société Agrevo (1992-97) qui organise la R & D entre plusieurs sites (anglais, allemands, français). La prise de direction de la société Hoechst, jusqu'alors tenue par des scientifiques, par un banquier sonnera le glas de la stratégie de recherche, entraînera la réorganisation en « business units », la disparition d'Agrevo et la création de HMR (Hoechst-Marion-Roussel)... la seconde entreprise pharmaceutique mondiale.

Alors que de Roussel-Uclaf, créé en 1911, était un groupe innovateur, structuré et animé, au moins pour une part importante, comme un laboratoire académique, avec une brochette de scientifiques connus internationalement pour la qualité de leurs travaux et leurs publications, le climat change. Jean-Louis Brayer quitte la société et rejoint cette année 1997 Glaxo-Wellcome, spécialiste de la chimie médicamenteuse, société organisée à l'anglo-saxonne, avec la définition sur trois à cinq ans d'objectifs, sujets et budgets, une pratique extensive de la sous-traitance (« outsourcing ») et la création de « spin off ». Devant prendre la direction de l'une des sociétés, déjà aguerri à la collaboration externe, notamment avec des éléments de ses *alma maters*, l'ENSCP et le CNRS, il s'initie donc au business plan... et se frotte, pourquoi pas, à l'idée de créer sa propre entreprise, Diverchim, ce qu'il fera en décembre 1999.

Comment crée-t-on une entreprise ? Saga !

Malgré un carnet d'adresses bien garni dans le domaine de la pharmacie s'engageant à lui sous-traiter des besoins, compétent en synthèse et en chimie combinatoire, habitué au management d'équipes et aux collaborations, nanti d'un projet et d'un business plan solides, il se heurte aux hésitations des banquiers qui conditionnent leur aide éventuelle à du concret existant (laboratoire(s), personnel(s)...). Il associe un collègue de l'ENSCP à son projet et tous deux y placent toutes leurs économies et s'adressent à leurs familles pour compléter à hauteur de 150 k€, de quoi construire le labo « témoin ». Mais où ?

À cette même époque, l'Université de technologie de Compiègne (UTC), fidèle à sa vocation, s'intéresse aux jeunes entreprises, crée un fond pour aider à leur création et une pépinière pour les accueillir. Proposition alléchante avec l'offre d'un demi-poste d'enseignant... mais qui n'aboutira pas. L'année suivante, dans un salon spécialisé dans la création d'entreprises, Jean-Louis Brayer rencontre des représentants institutionnels (chambres de commerce, édiles...) avec lesquels, et grâce à diverses facilités proposées, il fera affaire, et le

1^{er} janvier 2000, le laboratoire est opérationnel ! Diverchim signe quelques contrats avec des industriels pour la fourniture de produits chimiques et la société Bruker participe à l'acquisition d'un spectromètre de RMN 300 MHz en 2002. Les années les plus difficiles passées, la société emploie 46 personnes en 2012, dont 16 docteurs es sciences (ingénieurs pour moitié, universitaires pour l'autre), le reste étant des bac + 2 ou + 3. Jean-Louis Brayer recrute à partir des annonces de l'association Bernard Grégory ou lorsque des collègues lui signalent des jeunes particulièrement prometteurs. Les uns et les autres sont formés à l'esprit et à la compétence « maison » (les questions amènent des solutions), les échanges sont constants entre tous les niveaux et la « consanguinité » est exclue (jamais plus de deux personnes issues de la même formation initiale). Le personnel féminin, plus nombreux que le masculin, est traité à égalité et une crèche sera créée en 2014 pour leur faciliter le retour à l'emploi actif.



© Diverchim

Arrive la crise de 2008, une diminution drastique (30 %) des perspectives financières et un choix crucial pour Diverchim : licencier ou changer de stratégie ? Jusqu'alors, l'entreprise répondait aux commandes d'industriels extérieurs ; a-t-elle les moyens de se doter d'une politique d'innovation basée sur des projets de recherche internes ? Le risque sera pris et une « cellule innovation » est créée. Le développement nécessaire pour une croissance externe élargie (notamment à l'export) s'accompagnera de la création d'un poste de commercial. Quelques déboires conforteront la conviction de Diverchim de s'appuyer sur l'évolution et la promotion de son personnel : un technicien devenu cadre dirigera le laboratoire « procédés industriels » et la première collaboratrice se formera pour diriger un nouveau département « qualité » (référentiel CGMP, « current good manufacturing practice »). Le poste de commercial sera pourvu par une jeune ingénieure chimiste nantie d'un master spécialisé d'une école de commerce réputée.

Ce choix sera payant : la cellule innovation compte cinq personnes et est à l'origine du prix Pierre Potier reçu par Diverchim en 2013. La société s'impose des obligations basiques qui gagnent la confiance de ses donneurs d'ordres : pas de compétition avec les clients, s'appuyer sur la chimie familière à l'entreprise, créer des synthons originaux et utiles dans le domaine thérapeutique... Elle propose maintenant un catalogue de 1 500 références de briques, disponibles du gramme au kilogramme. L'export dans vingt-cinq pays représente désormais 10 % de son chiffre d'affaires.

Comment réussir ?

Prendre des risques calculés, et « y aller » quand la décision est prise. Multiplier les réunions internes et informelles.

Privilégier le développement interne en s'appuyant sur les compétences acquises et en les complétant par un recrutement externe, comme tout récemment un modélisateur moléculaire. Développer, en finançant des thèses, les collaborations avec le secteur académique. Une gestion au service de l'entreprise, et qui, comme la R & D, a davantage tendance à trouver des solutions que des problèmes !

Les difficultés ?

Un enseignement, en chimie organique et analytique, qui favorise le savoir formel et non le savoir-faire : par exemple, le recours à des équipements lourds, voire très lourds, alors que la simple chromatographie en couche mince donne des informations pertinentes, plus vite et moins cher. Le soutien du CNRS trop systématiquement dirigé vers la méthodologie de synthèse au détriment de la synthèse totale qui exige créativité et large culture scientifique...

Et après ?

Fin 2012-début 2013, Jean-Louis Brayer, en collaboration et avec l'appui d'un groupe pharmaceutique français, a lancé un nouveau défi : une UMR « à l'ancienne » (trois chercheurs Diverchim, trois chercheurs du partenaire pharmaceutique), implantée dans le tout nouvel Institut du Cerveau et de la Moelle épinière**, fondation d'utilité publique inaugurée en septembre 2010 et rattachée à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière. Sujet : « Comment évolue une cellule vivante dans le temps ? ». Objectif : approcher la compréhension des maladies neurodégénératives grâce à un nouveau concept, la chemogénétique...

* Balavoine G., Sur la route d'Henri Kagan, dialogue..., *L'Act. Chim.*, 2013, 377, p. 7.

** <http://icm-institute.org>

Régis Réau, du CNRS jusqu'à Air Liquide

Le parcours de Régis Réau est jalonné de rencontres qui ont guidé ses choix. Sans plan de carrière, sa curiosité

et le bonheur de relever des défis lui auront ouvert une vie professionnelle aux multiples réalisations et rebondissements.

Son fil conducteur ? Faire de la science, et la faire dans des contextes différents, sur des sujets variés, avec la conviction qu'il y a plusieurs manières de faire de la science.

Durant ses études à Poitiers, il effectue un stage de maîtrise à Lyon dans l'Institut de recherche sur la catalyse (IRC), alors important laboratoire propre du CNRS. Il y rencontre Danielle Balivet-Tkatchenko et Igor Tkatchenko. Ce dernier, dont la démarche scientifique est marquée par la rigueur, enrichie d'une vaste culture et pimentée d'un sens de l'humour unique, le convainc de faire une thèse. Séduit, il le suivra à Toulouse, où Igor Tkatchenko est nommé directeur du Laboratoire de chimie de coordination (LCC), un autre important laboratoire propre du CNRS, également figure de proue de la recherche française et internationale dans le domaine.

Alors qu'il est *a priori* attiré par une carrière industrielle plutôt qu'académique, Régis Réau part faire un post-doc en Allemagne, comme son premier mentor Igor Tkatchenko, chez le professeur W. Keim à Aachen, muni d'une bourse von Humboldt. Une nouvelle rencontre change le cours de son périple : le jour de sa soutenance de thèse, il est abordé par Guy Bertrand, un autre membre éminent du LCC, qui sera à l'origine de la création en 2001 du Joint Research Chemistry Laboratory, unité mixte internationale avec le CNRS et l'Université de Californie (Riverside puis San Diego), et futur membre de plusieurs académies dont l'Institut de France. Guy Bertrand, autre aventurier de la science, le décide à rejoindre à son retour son groupe au LCC, où il s'attaque aux espèces réputées instables et à leurs applications. Recruté au CNRS comme chargé de recherche en 1990, Régis Réau rejoint donc l'équipe de Guy Bertrand, qu'il décrit comme une sorte de start-up de la recherche.

Toujours enclin à diversifier ses activités, il prend la direction du département de Chimie organique du CNAM de Toulouse. Cette expérience conforte son désir de faire de l'enseignement, et au bout de sept ans de CNRS, il répond positivement à une suggestion de Pierre Dixneuf, directeur d'une UMR à l'Université de Rennes 1 et sa troisième grande rencontre : concourir pour un poste de professeur à Rennes. Le poste a pour thématique générale « Matériaux organométalliques pour l'optoélectronique ». Un nouveau défi scientifique, une chance qui lui est offerte par Pierre Dixneuf de créer son propre groupe, totalement indépendant sur le plan scientifique, et pour lequel le CNRS et l'Université de Rennes lui attribueront respectivement un ingénieur d'étude, Valérie Deborde, et un maître de conférences, Muriel Hissler. Ce trio de choc sera à l'origine d'une passionnante aventure jalonnée de nombreux travaux originaux, d'une reconnaissance nationale et internationale. Régis Réau s'investit simultanément dans l'enseignement et sa gestion (licence, master, école doctorale), dans la vie de l'université (membre du Conseil scientifique) et dans l'action menée en direction des jeunes et des non-scientifiques par l'Espace des sciences de Rennes.

En 2001, il postule comme membre junior de l'Institut universitaire de France en présentant ses travaux récents sur la chimie des matériaux organophosphorés pour des applications en optoélectronique. Pendant cinq années, ce tremplin lui permettra de bénéficier d'un certain nombre d'ouvertures et d'une reconnaissance, certes nationale, mais également internationale.

Il devient expert auprès du Ministère chargé de la Recherche de 2002 à 2007. En 2007, il rencontre une autre

figure de la chimie, Max Malacria, qui l'incite à participer aux travaux de l'AERES (Agence pour l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur), tout juste mise en place, dont il deviendra délégué scientifique adjoint. Il est essentiel que des scientifiques actifs, reconnus dans leur domaine, soient moteurs dans cette nouvelle agence, dont l'objectif est de créer une structure homogène pour toutes les disciplines et d'être garante de la qualité du système public. Il en fera partie jusqu'en 2011, lorsqu'il est appelé par Alain Fuchs à la tête de l'Institut de chimie du CNRS. Une nouvelle rencontre clef. Travailler sous la direction d'Alain Fuchs au service du CNRS et de la communauté scientifique est une expérience passionnante et très riche. Il y met une condition qui sera respectée durant tout son mandat : continuer à faire de la science au sein de son équipe rennaise et à publier.



Cette intense activité nationale n'empêche nullement une implication non moins importante au niveau international. Il est membre du comité d'organisation de la conférence internationale sur la chimie du phosphore. Il séjourne comme « guest » ou « visiting professor » à Durham et à Regensburg, et il dirige l'UMI CNRS-Université de Zengzhou « Matériaux organophosphorés fonctionnels » de 2009 à 2012. Durant cette même période, il est membre du comité et responsable de l'action « Science des matériaux et nanosciences » du réseau européen COST PhosciNet, lequel aura une influence très positive en rassemblant toute la communauté du phosphore et en y associant tous les jeunes chercheurs européens du domaine.

Il anime simultanément un groupe à l'Université de Rennes 1, qui s'est structuré et diversifié au cours du temps, notamment avec l'arrivée de jeunes chercheurs du CNRS. Ce groupe multiplie les collaborations internationales avec le secteur privé. Régis Réau totalise ainsi durant cette partie de sa carrière treize brevets, 146 publications dans des revues traitant aussi bien de chimie organique, inorganique, biologique que de matériaux, des conférences, cinq chapitres de livres...

C'est dans ce contexte d'une remarquable diversité qu'il sera contacté en 2013 afin de devenir directeur scientifique de la R & D du groupe Air Liquide. Il sera chargé de développer des projets à long terme basés sur des ruptures scientifiques, et de favoriser l'innovation en ouvrant encore plus la R & D vers le monde académique, en ciblant les investissements et les collaborations. Un exemple marquant est le Centre de recherche Paris-Saclay d'Air Liquide basé aux Loges-en-Josas au cœur de l'écosystème Paris-Saclay. Ce dernier ambitionne de devenir d'ici 2020 l'un des dix principaux clusters d'innovation mondiaux*. Air Liquide est implanté dans 80 pays et possède des sites de recherche en France, Allemagne, États-Unis, Japon, Chine et Corée du Sud. Chacun de ces sites est organisé par compétences (matériaux, combustion, mathématiques appliquées, sciences

© Air liquide



découvertes faites dans le monde académique dans tous les domaines d'intérêt pour Air Liquide. La grande différence réside dans la capacité de financement des projets, une fois les décisions prises, qu'il s'agisse de court ou de long, voire très long terme.

Pour Régis Réau, ce nouveau défi, qui en est un par l'ambition et la diversité des projets que la R & D d'Air Liquide couvre, démontre que la R & D industrielle peut être aussi riche d'initiatives personnelles et de dialogues avec les pairs. Si les questions de financement et de personnel sont d'un autre ordre que dans le secteur public, celles liées aux constantes de temps et à la nécessité d'explorer le monde de l'application autant que celui de la réflexion théorique apportent une dimension qui nourrit un esprit curieux, à l'affût des nouveautés, et que le changement stimule. Il s'agit encore et toujours de faire

de la science, la meilleure et la plus originale, afin d'être à un niveau d'excellence mondiale et de créer de la valeur, qu'elle soit scientifique ou économique.

* voir *L'Act. Chim.*, 2014, 385, p. 55.

du vivant-santé)... avec à sa tête un directeur qui, comme le directeur de la R & D actuel, est un scientifique. Les compétences sont organisées en réseaux transverses, en contact permanent, formant des « Global Labs » thématiques et internationaux. Régis Réau en chapeaute les directeurs, en charge de la définition des compétences nécessaires à court et long termes, des feuilles de route qui dessinent les sujets à développer et les technologies clés de l'avenir.

Dépaysé, Régis Réau ? Il ne semble pas ! Après une année passée au sein d'Air Liquide, il ressent une forme de continuité entre les mondes académique et industriel, et s'épanouit dans un environnement dont les valeurs sont les siennes et qui s'appuie sur une exigence d'excellence, liée à un très haut niveau technologique. On y discute pareillement science ; on y évoque tous les sujets et on y piste toutes les



Rose Agnès Jacquesy

est rédactrice en chef de *L'Actualité Chimique**.

* Courriel : redac-chef@lactualitechimique.org

<http://culturesciences.chimie.ens.fr>

Le site CultureSciences-Chimie est conçu pour assurer une formation scientifique de haut niveau, accessible à tout utilisateur, en particulier aux enseignants.

Ce site constitue un centre de ressources pour enseigner la chimie, en lien direct avec l'avancement des connaissances au sein des laboratoires de recherche.

Alors vite à vos souris !

Les Olympiades de la chimie autour du monde

Comparaison des systèmes de sélection

Dmytro Kandaskalov et Séverine Bléneau-Serdel

- Résumé** Les Olympiades internationales de chimie (IChO) jouent un rôle important dans le développement intellectuel des élèves et leur attraction pour la chimie. Cet article décrit leur évolution et compare leur déroulement entre 2007 et 2013 en France et dans huit autres pays : l'Ukraine, la Russie, les États-Unis, l'Australie, l'Espagne, l'Argentine, le Japon et Chypre.
- Mots-clés** **Olympiades, IChO, épreuve de sélection, historique, évolution, enseignement.**
- Abstract** **The International Chemistry Olympiads around the world**
The role of the International Chemistry Olympiads (IChO) is important for the intellectual development of school-students and their attraction for chemistry. This article describes their evolution and the comparison of their organization from 2007 to 2013 in France and in eight other countries: Ukraine, Russia, USA, Australia, Spain, Argentina, Japan, and Cyprus.
- Keywords** **Olympiads, IChO, task of selection, history, evolution, teaching.**

Il est important de trouver différents moyens d'intéresser les élèves aux sciences. L'un d'entre eux est d'organiser des olympiades scientifiques, qui se rapprochent des compétitions sportives, mais où les principaux « équipements » des participants sont leur connaissance profonde d'un sujet, l'érudition et la logique [1]. Les olympiades apportent une solide formation complémentaire au programme scolaire et leurs exercices donnent lieu à de nombreuses applications [2].

Les premières olympiades nationales ont eu lieu à Leningrad (URSS) en 1939 ; c'étaient des olympiades de mathématiques. Par la suite, d'autres disciplines scientifiques – physique, chimie, astronomie, biologie et informatique (voir *tableau 1*) – se sont inspirées de ce modèle.

Concernant la chimie, les premières olympiades ont été organisées par l'Union soviétique dans les années 1960 et les premières Olympiades internationales (IChO) ont eu lieu en 1968 en Tchécoslovaquie [3] avec trois participants : le pays organisateur, la Pologne et la Hongrie. Peu à peu, le nombre de pays impliqués a augmenté (voir *figure 1*), les pays de l'Ouest sont entrés dans la compétition au milieu des années 1970 : treize pays y ont pris part en 1980, 28 en 1990, 54 en 2000, 69 en 2011 à Ankara (Turquie) et 77 en 2013 à Moscou (Russie). Les 46^e Olympiades auront lieu à Hanoï (Viêt Nam) en juillet prochain [4].

Les principaux objectifs des Olympiades de la chimie sont d'intéresser les jeunes étudiants à la chimie, de stimuler leur développement intellectuel, d'approfondir leurs connaissances en chimie, de leur permettre d'établir des contacts et de partager leurs expériences avec d'autres jeunes étudiants du monde entier ayant la même passion.

Actuellement, des pays de tous les continents prennent part aux IChO, chacun étant représenté par quatre participants [5-6] – et ce, quelle que soit la taille de sa population –, suite à une soigneuse sélection en plusieurs étapes au niveau national durant l'année scolaire. Il existe des différences significatives d'un pays à l'autre dans la façon de préparer ces sélections. Certains ont une longue expérience, comme la Russie, la Pologne ou l'Allemagne, et font de la « sélection de haut niveau ». D'autres, novices, tentent de prendre une place au soleil...

La participation, même au niveau de la sélection, donne droit aux élèves de certains pays d'intégrer des établissements d'enseignement supérieur sans examen (dans les pays d'Europe de l'Est comme l'Ukraine, la Russie, la Roumanie, etc.). Dans les pays où ce régime n'existe pas, comme en France, la solide formation complémentaire

Tableau 1 - Les premières olympiades scientifiques et quelques données sur les olympiades de 2011.

Discipline	Abréviation	Année	Lieu	Nombre de participants/pays en 2011
Mathématiques	IMO	1959	Braşov, Roumanie	564/101
Physique	IPhO	1967	Varsovie, Pologne	393/84
Chimie	IChO	1968	Bratislava, Tchécoslovaquie	267/69
Informatique	IOI	1989	Pravets, Bulgarie	308/78
Biologie	IBO	1990	Olomouc, Tchécoslovaquie	227/58
Astronomie	IAO	1996	Nizhniy Arkhyz, Russie	95/19

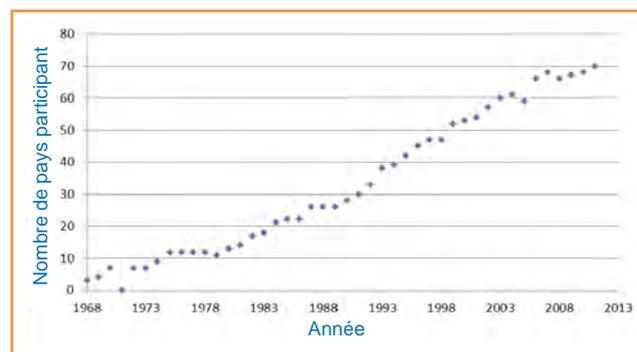


Figure 1 - Évolution du nombre de pays participant aux IChO.

à leur programme scolaire que les élèves acquièrent pendant la préparation augmente cependant beaucoup leurs chances de réussir les concours d'entrée aux établissements d'enseignement supérieur. On retrouve par exemple de nombreux anciens candidats aux sélections parmi les étudiants du magistère de chimie de l'École Normale Supérieure et les élèves chimistes de 3^e année à l'École polytechnique [5].

Le but de cet article est de regarder les systèmes et niveaux des exercices de huit pays de différents horizons et la participation des équipes de ces pays au niveau international pour avoir un point de comparaison assez large.



Figure 2 - La délégation française des IChO de 2011, de gauche à droite : Martin Rieu (médaillé d'or), Louis Breyton (argent), Guillaume Fraux (or), Matthieu Rummens (bronze). Et au centre, Kokoch, l'éternelle mascotte...

Les systèmes de sélection pour les IChO

Cette partie présente le déroulement des sélections en France, en Ukraine, en Russie, aux États-Unis, en Australie, en Espagne, en Argentine, au Japon et à Chypre. Des exemples d'énoncés sont donnés en *annexe* sur le site*.

En France

La France présente une équipe depuis 1981 [5, 7]. En plus que trente ans de participation, elle a collecté six médailles d'or – dont quatre au cours des sept dernières éditions –, 41 médailles d'argent et 61 médailles de bronze [5, 7]. En 2011, l'équipe française a renouvelé le succès de 1992 en remportant deux médailles d'or (Martin Rieu, Toulouse, et Guillaume Fraux, Versailles, voir *figure 2*).

La constitution de la délégation se fait en plusieurs étapes, coordonnées par « Sciences à l'École » [8]. Les quatre candidats sont sélectionnés essentiellement parmi des élèves de classes de terminale scientifique et de première année de classes préparatoires (MPSI, PCSI, TPC, BCPST).

Durant les deux premiers trimestres, les candidats bénéficient d'une préparation encadrée par des professeurs de classes préparatoires et des étudiants des grandes écoles, sous forme de compléments de cours dispensés dans un des 34 centres régionaux [9] (20 h au total, à raison de 2 h par semaine).

Le programme de préparation, défini par la coordination nationale, rassemble les grands thèmes exigibles pour l'épreuve de présélection [7] :

- **Chimie organique** : outils du raisonnement, composés halogénés, alcools, alcènes, organomagnésiens mixtes, composés carbonylés, acides et dérivés ;
- **Chimie physique** : structure de la matière, méthodes spectroscopiques, cinétique chimique ;
- **Chimie des solutions** : acido-basicité de Brønsted, réactions d'oxydoréduction, principe des indicateurs colorés.

Au terme de cette préparation, une épreuve théorique de 4 h est organisée au niveau national. Généralement, 210 à 260 candidats y participent. Cette épreuve consiste en un QCM d'une vingtaine de questions et 3-4 exercices sur des sujets variés (en 2014 : halogènes, spectroscopie photoacoustique et synthèse d'un alcaloïde) [10].

Après la présélection nationale, les 22 candidats retenus arrivent à Paris courant mai pour y suivre une semaine intensive de perfectionnement expérimental et de visites liées à la chimie (dans des laboratoires de recherche notamment). À l'issue

Dernière minute !

À la suite de la semaine de préparation, la liste des étudiants constituant la délégation française pour la 46^e compétition internationale qui se tiendra à Hanoï du 20 au 29 juillet prochain a été annoncée le 17 mai, au moment du bouclage de ce numéro.

Ce sont donc **Hugo Cui** (terminale S, lycée Louis-le-Grand, Paris) – qui a fini second des Olympiades nationales le 11 avril dernier* ! –, **Lisa Gourdon** (PCSI, lycée Marcelin Berthelot, Saint-Maur des Fossés), **Robin Quessard** (PCSI, lycée Henri IV, Paris) et **Thomas Vialon** (PCSI, lycée Pierre de Fermat, Toulouse) qui partiront représenter la France.

Bon voyage et bonne chance à eux !

* Voir *L'Act. Chim.* 385, p. 56.

de cette semaine, l'équipe des quatre élèves qui représentera la France lors de la compétition internationale est constituée après une seconde épreuve de sélection écrite et une épreuve de travaux pratiques.

Une dernière semaine de révision intensive, basée sur les exercices du recueil envoyé par le pays organisateur, est organisée avant le départ pour le concours international en juillet.

En Ukraine**

Les premières Olympiades nationales de la chimie ont été organisées en Ukraine en 1963. Comme actuellement en France, elles comportaient deux épreuves : une régionale et une nationale. Le système a beaucoup changé depuis. À la différence de la plupart des pays d'Europe, l'Ukraine prévoit quatre séries d'énoncés destinés aux élèves des classes de 8^e, 9^e, 10^e et 11^e (l'équivalent de la terminale française ; pour une comparaison des systèmes d'éducation primaire et secondaire Ukraine/France, voir en *annexe* sur le site*) ; l'âge des participants varie donc de 13 à 17 ans. Le pays participe aux IChO depuis 1994. Quatre étapes précèdent la sélection finale pour choisir les quatre meilleurs de la classe de 11^e : étape du lycée, de la ville, régionale et nationale (*figure 3*).

- **1^{ère} étape (le lycée)** : elle se déroule dans les lycées durant les vacances d'automne (fin octobre), souvent par correspondance. Le nombre de candidats n'est pas limité (253 000 en 2011). La complexité des exercices ne dépasse pas le cadre du programme de lycée. Des spécialistes des méthodes d'enseignement de chaque région préparent des séries d'énoncés, mais chaque professeur est libre de choisir ses propres énoncés.

- **2^e étape (la ville)** : elle a lieu début décembre (46 000 candidats en 2011). La date peut varier d'une région à l'autre, mais au sein d'une même région, l'épreuve se déroule le même jour avec les mêmes énoncés. Elle consiste à traiter 5-6 problèmes théoriques en 4 h. Tous les participants ayant obtenu plus de 80 % de bonnes réponses sont acceptés pour l'étape suivante.

- **3^e étape (régionale)** : l'Ukraine, un des plus grands pays d'Europe par sa superficie, est composée de 24 régions et de la république autonome de Crimée. L'étape régionale a lieu fin janvier-début février (2 500 candidats en 2011). En général, chaque région prépare sa série de problèmes, mais un énoncé unique pour toutes les régions est

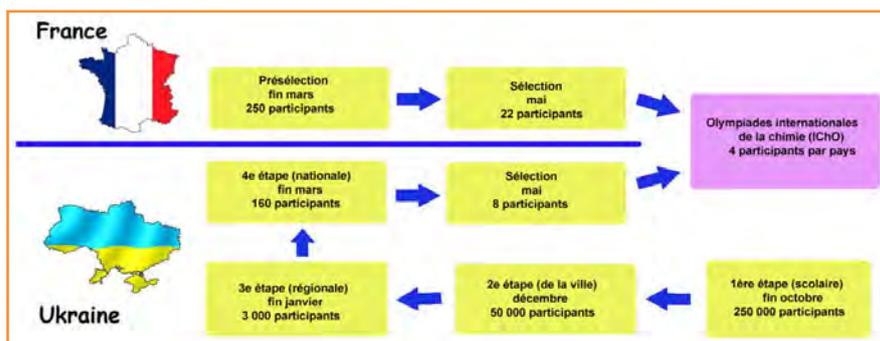


Figure 3 - Comparaison des étapes de présélection en France et en Ukraine.

parfois donné par le Ministère de l'Éducation. Les sujets de cette étape sont plus difficiles, complexes et diversifiés, avec par exemple des problèmes de cinétique, thermodynamique, détermination de différentes constantes, du pH d'une solution ou d'un produit de solubilité, stéréochimie, spectroscopie RMN, IR, UV et de masse... Une préparation complémentaire approfondie est nécessaire, et à la différence de la France, il n'y a pas de cours collectifs.

L'étape régionale comporte généralement une épreuve théorique de 6-7 exercices à résoudre en 4 h, avec parfois une épreuve pratique (TP). À Kiev, ce TP a lieu une semaine après l'épreuve théorique avec 8 à 10 des meilleurs élèves de chaque classe. L'épreuve pratique est parfois remplacée par un problème complémentaire appelé « expérience imaginaire », épreuve pratique mais sans manipulations.

Selon des directives du Ministère de l'Éducation, 50 % des élèves peuvent franchir cette étape (à condition que leur note soit supérieure à un certain seuil). On leur délivre les diplômes de premier, deuxième, troisième niveaux dans un rapport 1 : 2 : 3. Par exemple, si 36 élèves participent à une olympiade régionale, 18 d'entre eux peuvent gagner et il aura trois diplômes de premier niveau (médaille d'or), six de deuxième niveau (médaille d'argent) et neuf de troisième niveau (médaille de bronze).

Après cette étape, les meilleurs sont réunis pour une préparation complémentaire et une sélection ultérieure par quelques épreuves écrites pour l'étape nationale. Les élèves perfectionnent leurs acquis dans la résolution des problèmes, font des tests, des travaux pratiques, souvent aidés par des étudiants bénévoles.

Les participants des 10^e et 11^e classes qui ont gagné l'étape régionale peuvent se voir faciliter l'entrée dans un établissement d'enseignement supérieur.

- **4^e étape (nationale)** [11-12] : elle a lieu durant une semaine des vacances de printemps (fin mars) dans un chef-lieu d'une région d'Ukraine. Vingt-huit équipes y participent : 24 équipes de régions, une équipe de Crimée et trois équipes de grandes villes. Environ 160 élèves y prennent part (40 pour chaque classe). Chacun a déjà franchi de nombreuses épreuves et représente sa région. C'est un événement important dans la vie de chaque participant, et en particulier pour les terminales qui auront la possibilité de représenter leur pays au niveau mondial.

En plus des candidats, sont présents les mentors des équipes, un représentant de Ministère de l'Éducation, un comité d'organisation et 30 à 50 membres du jury (professeurs des universités et des lycées, chercheurs, parfois des thésards et des étudiants). La plupart des membres de jury ont eux-mêmes participé et gagné de précédentes olympiades.

Le nombre de participants varie de 4 à 11 par équipe régionale. Il est défini par la cote R_x qui est la somme de deux coefficients d'efficacité, C_{x-1} et C_{x-2} , donnés par :

$$C_n = \frac{5 \times N_I + 3 \times N_{II} + N_{III}}{N_\Sigma} \quad (1)$$

où N_I , N_{II} , N_{III} sont les quantités de diplômes des premier, deuxième et troisième niveaux, et N_Σ le nombre des participants dans cette région.

La cote pour l'année 2012 (R_{2012}) est la somme des coefficients d'efficacité pour deux années précédentes (C_{2011} et C_{2010}) :

$$R_{2012} = C_{2011} + C_{2010} \quad (2)$$

Plus la cote d'une région est élevée, plus elle aura de représentants à l'épreuve nationale de l'année suivante : onze pour l'équipe ayant la meilleure cote (l'équipe de Lviv en 2011), neuf pour les deuxième et troisième cotes, etc., et quatre pour les treize dernières équipes.

L'étape nationale consiste en deux épreuves théoriques et un TP. La première épreuve théorique (4 h) comporte 5-7 problèmes non standards et difficiles, mais qui restent dans le cadre du programme de préparation aux olympiades donné par le Ministère de l'Éducation. La seconde épreuve théorique (4 h) a 6-7 problèmes plus difficiles, nécessitant beaucoup de logique et le « sens de la chimie ». Cette épreuve a été nommée « super-épreuve ». Enfin, le TP permet de vérifier le savoir-faire des élèves.



Figure 4 - Les équipes de France et d'Ukraine lors de l'inauguration des IChO 2010 à Tokyo (Japon). De gauche à droite : Christine Hirschler, Sergiy Shyshkanov, Cédric Martin, Rémi Patin, Baptiste Couet, Antton Curutchet, Dmytro Kandaskalov et Vladyslav Panarin.

La moitié des participants peut franchir l'étape des épreuves régionales (à condition que leur note soit supérieure à un certain seuil) et on leur délivre des diplômes de premier, deuxième, troisième niveaux dans un rapport 1 : 2 : 3. Les huit meilleurs de la 11^e classe intègrent l'équipe nationale des IChO et les quatre meilleurs de la 10^e classe sont candidats aux Olympiades internationales de Mendeleïev – qui ont fait suite aux Olympiades de l'Union soviétique après l'effondrement de l'URSS [13].

La sélection de l'équipe finale a lieu en mai. Durant dix jours, les élèves suivent différents cours, s'entraînent aux exercices, passent des tests et manipulent. Les quatre meilleurs sont sélectionnés pour les IChO (la délégation 2013 est revenue avec 3 médailles d'or !). Ils pourront intégrer un établissement d'enseignement supérieur sans examen d'entrée.

En Russie

C'est en Russie que les premières Olympiades de la chimie ont été organisées [14]. En 1960, après la première Olympiade de Moscou, le président de l'Université a signé une ordonnance et en 1965, la première olympiade de niveau national avait lieu officiellement. L'Union soviétique prend part aux IChO depuis 1970.

Le système de sélection date de 1975 et suit quatre étapes : scolaire (500 000 participants), régionale (100 000 participants), par zones (5 000 participants) et finale (200 participants). Le déroulement de ces étapes et le programme de préparation sont très proches de ceux de l'Ukraine, avec quelques différences dont les plus importantes sont :

- La première étape concerne des élèves de la 5^e (10 ans) à la 11^e année d'études (16-17 ans) ; la seconde, ceux de la 7^e à la 11^e année ; la troisième et la quatrième, ceux de la 9^e à la 11^e.
- La deuxième épreuve théorique du concours final consiste en une liste commune aux trois classes de seize exercices répartis en quatre domaines : chimie inorganique, chimie physique, chimie analytique et chimie organique (4 exercices par domaine). Chaque participant doit choisir quatre exercices parmi les seize proposés dans un minimum de deux domaines pour les élèves de 9^e, de trois domaines pour les 10^e et dans chacun des domaines pour les 11^e.
- Une école d'hiver et une école d'été (1-2 semaines) de préparation aux IChO sont organisées pour les élèves de 10^e et de 11^e.
- Les Olympiades de Mendeleïev entrent dans le processus de sélection aux IChO.

Aux États-Unis

Les premières Olympiades de la chimie, nationales et internationales, datent de 1984 [15]. Comme en France, la sélection passe par

deux étapes – régionale et nationale – et l'équipe sélectionnée suit une préparation intensive à la veille des IChO. La participation est ouverte à tous les élèves âgés de 13 à 18 ans.

L'épreuve régionale a lieu en mars et quelques 10 000 jeunes y prennent part dans cent sections locales. Elle consiste en un QCM de 60 questions à résoudre en 110 minutes.

Chaque section envoie ses dix meilleurs candidats à l'épreuve nationale fin avril. Pour pouvoir y participer, il faut être citoyen des États-Unis, avoir moins de 19 ans, ne pas participer à des olympiades nationales en biologie, mathématiques ou physique, et un même établissement ne peut pas présenter plus de deux candidats.

L'épreuve est constituée d'un QCM de 60 questions couvrant largement le programme de chimie (90 min), d'une série de huit exercices (105 min) et d'un TP (75 min). Les candidats obtiennent une des notes suivantes : « excellent », « très bien », « bien » ou « assez bien ».

Courant juin, les vingt meilleurs suivent deux semaines de cours intensifs de niveau universitaire et de travaux pratiques dans un camp préparatoire à l'« US Air Force Academy » de Colorado Springs. Les élèves ayant participé au camp de l'année précédente sont admis automatiquement pour cette épreuve. La composition de l'équipe qualifiée est donnée à la fin du camp.

En Australie

L'Australie organise des Olympiades de chimie depuis 1988 [16]. Elles font partie des trois olympiades scientifiques (chimie, biologie et physique) sponsorisées par « Australian Science Innovations » et se déroulent en deux étapes intitulées « Qualifying Exams for Chemistry » et « Science Summer School ».

La première, qui réunit environ 300 candidats, a lieu fin août. Elle s'adresse à tous les élèves, citoyens australiens, âgés de 11 à 19 ans désirant y participer (dans la limite de 4 pour un même établissement). Cette épreuve est composée d'un QCM et de trois exercices à résoudre à choisir parmi les quatre proposés (un obligatoire et deux au choix parmi les trois restant). Les participants disposent de quinze minutes pour prendre connaissance des énoncés (24 à 30 pages) et ont alors deux heures pour résoudre les exercices. Leur complexité et leur construction sont comparables à celles de l'épreuve de présélection française.

Les 24 meilleurs élèves participent à l'école d'été à l'Université de Monach de Melbourne en janvier. Comme dans le camp préparatoire américain ou pendant la semaine préparatoire en France, les participants suivent des cours, travaux dirigés et travaux pratiques qui correspondent au programme de la première année universitaire.

En mars, les 24 candidats passent un « examen final » qui permet de composer la délégation australienne. Avant les IChO, l'équipe suit une préparation complémentaire.

En Espagne

Les Olympiades de la chimie y sont organisées depuis 1987 [17] dans le but d'inciter les jeunes à s'intéresser à la chimie et de préparer des bacheliers qualifiés. Elles comportent également deux épreuves (régionale et nationale).

L'étape régionale a lieu en février-mars dans quinze régions. Son niveau ne dépasse pas le cadre du programme d'étude. Elle consiste en un QCM de 40 questions. L'élève donnant une mauvaise réponse perd des points (en se basant par exemple sur une note de + 1 point par bonne réponse, une mauvaise entraînera une perte de 0,25 points). Ce système est intéressant car il limite la possibilité de répondre « au hasard ». Les trois meilleurs de chaque région prennent part à l'étape nationale.

Les candidats sélectionnés se réunissent durant quatre jours fin avril dans une ville universitaire espagnole. L'épreuve nationale comporte une épreuve théorique (3 h) – 45 questions de type QCM et quatre exercices dont la complexité dépasse le programme du lycée – et une épreuve pratique (3 h). En 2010, 135 élèves s'étaient ainsi retrouvés à Séville.

L'Espagne participe aux IChO depuis 1996 et également aux Olympiades ibéro-américaines, compétition qui réunit Argentine, Bolivie, Brésil, Chili, Colombie, Costa-Rica, Cuba, Guatemala, Salvador, Espagne, Mexique, Pérou, Portugal, Uruguay et Venezuela [18].

En Argentine

Les Olympiades nationales de chimie sont organisées depuis 1991 et le pays prend part aux IChO depuis 1995. La sélection de la délégation des IChO se déroule en quatre étapes [19] : collégiale, intercollégiale, régionale et nationale.

La particularité de l'Argentine est qu'il y a quatre séries d'exercices pour les élèves des différents niveaux d'études – niveau 1 pour les plus jeunes, niveau 2, niveau 2+ (mélange des niveaux 2 et 3) et niveau 3 –, et que les élèves qui le désirent peuvent choisir un niveau supérieur à celui qui leur correspond.

Le programme de préparation pour chaque niveau se divise en quatre séries suivant un système assez complexe vu de l'extérieur : les exercices de la première étape (collégiale) se basent sur le programme de la première série, ceux de l'étape intercollégiale sur le programme des première et deuxième séries etc. (voir *tableau II*). L'âge des participants n'est pas pris en compte.

Les collèges et lycées désirant faire participer leurs élèves s'inscrivent en mars. En août, l'étape collégiale réunit chaque année environ 3 000 candidats issus de 200 établissements. L'épreuve intercollégiale a lieu deux semaines plus tard et l'épreuve régionale (trois exercices pour chaque niveau) en octobre. Chacune de ces épreuves se déroule en 3 h et les candidats ayant obtenu une note supérieure à un certain seuil accèdent à l'étape suivante.

La sélection nationale réunit environ 300 candidats pendant deux jours fin octobre. Les élèves de niveau 3 ont des travaux pratiques le premier jour, et le deuxième jour a lieu l'épreuve théorique avec quatre exercices pour chaque niveau. Pour les élèves de niveau 3, l'épreuve théorique est notée sur 70 points et l'épreuve expérimentale sur 30 points. Des médailles d'or récompensent les 5 premiers pourcents du classement, d'argent les 10 % suivants et de bronze les 15 % d'après.

Le jury de l'épreuve nationale et le comité des olympiades choisissent au minimum vingt élèves parmi les étudiants des niveaux 2, 2+ et 3 pour participer aux Olympiades internationales et aux Olympiades ibéro-américaines.

Au Japon

C'est plus récemment que le Japon a pris part aux IChO : en 2003 [20]. La sélection japonaise, nommée « Grand Prix de Chimie », a débuté en 1999 avec 316 candidats de 15 à 17 ans et en comptait 3 257 en 2011. Elle se déroule en trois étapes. La première épreuve a lieu en juillet (l'année scolaire débute le 1^{er} avril) dans une cinquantaine de centres. C'est une épreuve théorique (2,5 h) de 4 à 6 exercices. Les 80 meilleurs accèdent à la deuxième épreuve, un TP de 4 h, qui a lieu en août. Une sélection de vingt candidats participe à une préparation aux IChO en mai, qui se termine, comme en France, par une épreuve théorique et une épreuve pratique pour arriver à la délégation finale.

À Chypre

Chypre organise des olympiades depuis 1995 pour des jeunes de 15 à 18 ans. Environ 500 candidats (sur les quelques 50 000 élèves de cette classe d'âge à Chypre) participent à la sélection régionale et les trente meilleurs passent le concours national. Ils sont départagés d'abord par une épreuve théorique (3 h) fin février (QCM de quinze questions et 6-7 exercices) et les dix meilleurs ont une

Tableau II - Déroulement de la sélection aux olympiades en Argentine. S représente la série et N le niveau.

Épreuve	Niveau 1 (N1)	Niveau 2 (N2)	Niveau 2+ (N2+)	Niveau 3 (N3)
Collégiale	S ₁ de N1	S ₁ de N2 pour deux niveaux		S ₁ de N3
Intercollégiale	S ₁₊₂ de N1	S ₁₊₂ de N2 pour deux niveaux		S ₁₊₂ de N3
Régionale	S ₁₊₂₊₃ de N1	S ₁₊₂₊₃ de N2	S ₁₊₂₊₃ de N2 et S ₁ de N3	S ₁₊₂₊₃ de N3
Nationale	S ₁₊₂₊₃₊₄ de N1	S ₁₊₂₊₃₊₄ de N2	S ₁₊₂₊₃₊₄ de N3 et S ₁₊₂ de N3	S ₁₊₂₊₃₊₄ de N3

Tableau III - Comparaison des résultats des huit pays examinés dans cet article.

Année	France	Ukraine	Russie	États-Unis	Australie	Espagne	Argentine	Japon	Chypre
2013	0/1/3/0	3/0/1/0	2/2/0/0	2/2/0/0	0/2/2/0	0/0/2/1	0/0/3/0	0/4/0/0	0/0/3/1
2012	0/0/4/0	1/2/1/0	3/1/0/0	1/3/0/0	0/1/3/0	0/0/1/0	0/3/1/0	2/2/0/0	0/0/0/0
2011	2/1/1/0	0/1/3/0	3/1/0/0	2/2/0/0	0/3/1/0	0/0/1/1	0/1/3/0	1/3/0/0	0/0/1/1
2010	0/2/2/0	0/2/2/0	1/2/1/0	2/1/1/0	0/1/3/0	0/0/3/0	1/0/3/0	2/2/0/0	0/0/1/1
2009	1/1/1/1	0/1/3/0	3/1/0/0	1/3/0/0	0/3/1/0	0/0/1/1	0/1/2/0	2/1/1/0	0/0/1/0
2008	0/1/3/0	3/1/0/0	4/0/0/0	0/1/3/0	0/3/1/0	0/0/1/0	1/0/1/2	0/0/4/0	0/0/0/0
2007	1/0/1/1	0/1/3/0	4/0/0/0	0/4/0/0	0/2/2/0	0/0/1/0	0/1/3/0	0/0/4/0	0/0/0/0
Total	4/6/15/2	7/8/13/0	20/7/1/0	8/16/4/0	0/15/13/0	0/0/10/3	2/6/16/2	7/12/9/0	0/0/6/3
k	0,429	0,548	0,851	0,619	0,423	0,119	0,369	0,571	0,071

retrouve certains participants des ONC parmi ceux des IChO l'année suivante). Les candidats sont essentiellement issus des classes préparatoires ;

- les IChO ne semblent pas assez reconnues et soutenues par le système éducatif. Par exemple, il n'y a pas, comme dans certains autres pays, d'incitation à participer avec des facilités d'entrée dans les établissements d'enseignement supérieur.

Les IChO sont fortement dominées par l'Europe de l'Est et l'Asie. Les pays retenus ici ne donnent bien sûr qu'un aperçu des différents modes de sélection qui se pratiquent

Tableau IV - Comparaison des différents systèmes de sélection.

Pays	k	Nombre d'étapes de sélection	Nb de participants initial	Nb de participants à la sélection finale	Entrée aux IChO
France	0,429	2	250	22	1981
Ukraine	0,548	5	250 000	8	1994
Russie	0,851	5	500 000	8	1970
États-Unis	0,619	3	10 000	20	1984
Australie	0,423	2	300	24	1988
Espagne	0,119	2	1 500	18	1987
Argentine	0,369	5	3 000	20	1996
Japon	0,571	4	3 000	20	2003
Chypre	0,071	2	500	10	1990

épreuve de TP (3 h) un mois après pour sélectionner la délégation présente aux IChO. L'équipe chypriote a remporté sa première médaille de bronze en 2009.

Résultats de la participation de ces pays au niveau international

Le tableau III donne, à titre de comparaison, le nombre de médailles obtenues par ces différents pays entre 2007 et 2013 sous la forme de quatre chiffres : **nombre de médailles d'or/médailles d'argent/médailles de bronze/mentions honorables**. La difficulté des épreuves variant d'une année à l'autre – les Olympiades internationales organisées en Europe de l'Est étant réputées plus difficiles par exemple.

Le coefficient k est un indice mesurant l'efficacité de la participation de chaque pays. Plus il est proche de 1, meilleur il est. Il est défini par :

$$k = \frac{6n + 3m + 2l}{168}$$

où n , m et l sont respectivement les nombres de médailles d'or, d'argent et de bronze ; 168 représente le score maximal possible. Les coefficients avant n , m et l ont été choisis en fonction du mode d'attribution des différentes médailles (rapport 1 : 2 : 3). La mention honorable n'a pas été prise en compte.

En général, la réussite de la participation (k) de l'équipe de chaque pays dépend de trois facteurs :

- le système et le niveau de l'enseignement secondaire du pays (qui n'est pas débattu dans cet article) ;
- l'efficacité et l'expérience dans la préparation aux olympiades ;
- la durée de la préparation.

Il est difficile d'établir des conclusions à partir des données du tableau, mais on peut voir plusieurs raisons, absentes dans la plupart des huit autres pays cités, aux résultats de la France :

- la compétition semble peu connue en France et peu valorisée. Certains candidats qui l'ont découverte tout seuls éprouvent des difficultés à trouver un centre de formation ;
- les élèves de terminale seraient probablement de bons candidats pour participer aux IChO, mais la préparation des examens de fin d'année leur prend beaucoup de temps, et ils en ont donc peu à consacrer aux IChO. Ils sont davantage impliqués dans les Olympiades nationales de la chimie (ONC), plus proches de leur programme (on

retrouve certains participants des ONC parmi ceux des IChO l'année suivante). Les candidats sont essentiellement issus des classes préparatoires ;

dans le monde et de la portée des olympiades dans chacun des pays participant. Il serait intéressant de s'attarder sur d'autres pays, notamment la Chine dont les candidats se classent souvent très bien au concours international (3 médailles d'or en 2013, comme la Corée, Singapour, Taïwan et l'Ukraine, dont les deux premières places du podium !) et sur la quasi absence de l'Afrique. Cette étude pose néanmoins quelques problèmes : le temps à y investir et surtout la barrière de la langue.

Notes et références

- * Annexes téléchargeables librement à partir de la page du site www.lactualitechimique.org liée à cet article.
- ** NDLR : cette partie de l'article a été préparé avant la crise qui touche le pays actuellement.
- [1] Lavalée D., Can you believe that a high school student knows... this?, *ChemTech*, **1999**, 19, p. 272; Eremin V.V., Gladinin A.K., International chemistry olympiad and its role in chemical education, *Russian Journal of General Chemistry*, **2013**, 83, p. 830.
 - [2] Breyfogle B.E., Using the science olympiad to prepare preservice chemistry teachers, *J. Chem. Educ.*, **2003**, 80, p. 1165.
 - [3] www.iuventa.sk/en/Subpages/ICHO/History-of-the-ICHO.alej
 - [4] <http://icho2014.hus.edu.vn>
 - [5] Eastes R.-E., Lalande J., Serani A., Lavergne D., Les Olympiades internationales de chimie, 30 ans déjà... et des médailles chaque année !, *L'Act. Chim.*, juil.-août **2000**, p. 36.
 - [6] Apotheker J., The International Chemistry Olympiad, *Chemistry International*, **2005**, 27, p. 3.
 - [7] www.olympiades-de-chimie.org
 - [8] « Sciences à l'École » est un dispositif d'initiative ministérielle qui a pour but de soutenir et inciter des projets de culture scientifique dans l'enseignement du second degré (collèges, lycées, lycées professionnels, classes préparatoires) et de contribuer ainsi au développement de vocations scientifiques chez les jeunes (www.sciencesalecole.org).
 - [9] Amiens, Bayonne, Besançon, Bordeaux, Caen, Clermont-Ferrand, Dijon, Douai, Evreux, Grenoble, La Rochelle, Le Mans, Lille, Limoges, Lorient, Lyon, Marseille, Metz, Montpellier, Mulhouse, Nancy, Nantes, Nice, Orléans, Paris, Reims, Rouen, Saint-Maur-des-Fossés, Sophia-Antipolis, Toulon, Toulouse, Tours, Valence et Versailles [7].
 - [10] Les annales des épreuves de présélection depuis 2001 et les corrigés sont regroupés dans la rubrique « Documents » du site des Olympiades [7].
 - [11] www-chemo.univer.kharkov.ua/olympiad.htm
 - [12] Kandaskalov D., Olympiade de la chimie nationale 2009 en Ukraine, *Bulletin de l'ACLG*, janvier-février-mars **2010**, p. 39.
 - [13] Kandaskalov D., Olympiade Internationale de chimie de Mendéléev, *Bulletin de l'ACLG*, avril-mai-juin **2012**, p. 10.
 - [14] Kozliak E.I., Chemical education in countries of the former Soviet Union, *J. Chem. Educ.*, **2000**, 77, p. 870.
 - [15] www.acs.org/content/acs/en/education/students/highschool/olympiad.html
 - [16] https://www.asi.edu.au/site/programs_aso.php
 - [17] <https://olimpiadasquimica.es> (en espagnol).
 - [18] http://es.wikipedia.org/wiki/Olimpiada_lberoamericana_de_Qu%C3%ADmica
 - [19] www.oaq.uba.ar
 - [20] www.csj.jp/cs/en/activities/edu/olympiad.html



D. Kandaskalov

Dmytro Kandaskalov

est post-doctorant dans l'équipe « Métallurgie et Surfaces », Institut Jean Lamour (Nancy)*. Il a codirigé l'équipe ukrainienne en 2010 (Tokyo, Japon), plusieurs fois membre du jury international, comme à Moscou en 2013, et a rédigé 76 exercices pour des olympiades nationales (Ukraine, Russie, France et Venezuela) et internationales (IChO 2013, Olympiades de Mendeleïev).

Séverine Bléneau-Serdel

est rédactrice en chef adjointe de *L'Actualité Chimique***.



S. Bléneau-Serdel

* Institut Jean Lamour, Université de Lorraine, UMR CNRS 7198, Parc Saurupt, F-54011 Nancy. Courriel : dmytro.kandaskalov@ensiacet.fr

** SCF, 28 rue Saint-Dominique, F-75007 Paris. Courriel : bleneau@lactualitechimique.org

Quand l'alchimie était une science

Bernard Joly

Résumé On s'imagine souvent que l'alchimie s'oppose à la chimie, avec d'un côté les curieuses divagations de l'irrationnel, et de l'autre la rigueur et le sérieux de la science. Les choses ne sont pas aussi simples : jusqu'au début du XVIII^e siècle, l'alchimie était tout simplement l'autre nom de la chimie. En examinant quelques moments importants de l'histoire de l'alchimie, depuis ses débuts aux premiers siècles de notre ère jusqu'à l'époque de la révolution scientifique, on pourra se débarrasser des illusions qui empêchent trop souvent de bien comprendre la véritable histoire de la chimie ancienne.

Mots-clés Alchimie, chimie, rationalité, irrationalité.

Abstract When alchemy was a science

It is often supposed that alchemy is opposed to chemistry: the strange rambling of irrationality has nothing to do with the rigour and the seriousness of the science. But in fact the situation is not so simple: until the early 18th century, alchemy was the other name of chemistry. By means of an examination of some important periods of the history of alchemy, since the first works during the early centuries A.D. until the time of the scientific revolution, it will be possible to abandon any illusions that prevent us from a right understanding of the true history of the ancient chemistry.

Keywords Alchemy, chemistry, rationality, irrationality, history of science.

L'idée de considérer l'alchimie comme une science peut sembler bien étrange. En effet, les alchimistes voulaient transmuter les métaux vils en or, ils affirmaient posséder la recette d'un élixir leur permettant de vivre plusieurs siècles et prétendaient parfois pouvoir faire renaître une plante de ses cendres (la palingénésie). Nous savons aujourd'hui que tout cela est impossible et l'alchimiste viendrait alors prendre rang parmi ces savants fous qui, précisément, ne sont plus des savants parce qu'ils ont perdu la raison. L'alchimie est ainsi devenue pour beaucoup le symbole même de l'ésotérisme ou de l'occultisme, mouvements qui se sont développés à partir du XIX^e siècle en s'opposant aux développements de la science moderne : il s'agirait de découvrir la « véritable sagesse » qu'auraient possédée les anciens, et qui se transmettrait aux adeptes sous le voile de symboles et de formules codées.

À l'opposé de ces thèses, qui s'appuient le plus souvent sur des contresens historiques et une lecture fragmentaire et biaisée des textes anciens, je voudrais rendre à l'alchimie sa véritable dimension chimique, par le moyen d'une étude de ses textes et d'une remise de ses théories et pratiques dans leur contexte historique. On peut ainsi échapper, me semble-t-il, à la fois à l'approche réductrice d'un scientisme qui voudrait ne retenir de l'alchimie que quelques heureuses découvertes faites par hasard dans un océan d'absurdités, mais aussi aux récupérations ésotériques d'un occultisme dont les reconstructions aventureuses oublient la réalité historique.

La rationalité de l'alchimie

Mon hypothèse centrale est la suivante : l'alchimie exprime une volonté de comprendre la structure de la matière, et en particulier des corps mixtes, qui a été, pendant de nombreux siècles, l'une des formes rationnelles de la réflexion scientifique et philosophique sur la matière, et qui constituait

le socle théorique sur lequel s'est développée cette chimie ancienne que l'on appelait alchimie [1]. En fait, nous avons oublié qu'aux XVII^e et XVIII^e siècles, « chymie » (comme on l'écrivait alors) et « alchimie » étaient deux synonymes ; tout le monde savait bien à cette époque que « al » n'était que l'article arabe apposé devant « chimie ». Cet oubli conduit à projeter sur cette époque une opposition factice entre une alchimie déclinante et une chimie qui se développerait à la faveur de la révolution scientifique. Pourtant, sous le nom de « chymie », c'est bien une science héritière des doctrines alchimiques du Moyen Âge et de la Renaissance qui se pratiquait à l'âge classique et que connaissaient des personnalités comme Descartes, qui la rejetait, ou Newton, qui la pratiquait [2].

Nulle césure n'apparaît entre chimie et alchimie que l'on puisse invoquer en faveur d'une opposition du rationnel et de l'irrationnel, de la science et de son contraire. Il faudra attendre la seconde moitié du XVIII^e siècle pour que l'opposition entre les deux termes commence à prendre le sens que nous lui reconnaissons aujourd'hui et qu'elle signifie le rejet en dehors du champ de la rationalité d'une « alchimie » qui se détournera des travaux de laboratoire et se réfugiera alors dans le symbolisme.

Cette rationalité de l'alchimie, qui signale sa dimension scientifique, se manifeste notamment par trois traits essentiels sur lesquels je voudrais insister, avant d'en venir à une très brève histoire de l'alchimie : c'est une pensée cohérente, immanente et qui peut s'enseigner [3].

La doctrine alchimique est cohérente

Certes, il a existé au cours des siècles bien des variations et des évolutions dans les doctrines alchimiques, bien des querelles aussi entre différents alchimistes et différentes écoles. Mais on peut cependant rassembler les points essentiels

autour de quelques thèmes qui résument l'unité et la solidité de la doctrine, telle qu'elle se présentait souvent au XVII^e siècle, dans sa forme la plus achevée. L'alchimie se fonde sur une théorie des métaux et de leur formation dans les mines. Tous les métaux sont formés de deux principes, le Mercure et le Soufre, auxquels le XVI^e siècle ajoutera un troisième, le Sel. Ces principes ne doivent pas être confondus avec les substances chimiques du même nom. Ils sont principes au sens philosophique du terme, c'est-à-dire qu'ils confèrent aux corps, dans lesquels ils se trouvent mélangés selon diverses proportions avec d'autres substances comme les « terres », leurs principales propriétés : le Mercure est le principe de la fusibilité et de la fluidité des métaux, tandis que le Soufre est le principe de leur combustibilité et de leur solidité, cette dernière propriété étant par la suite attribuée au Sel. Pourquoi le Mercure et le Soufre ? C'est sans doute l'expérience de production du mercure à partir de son minerai, le cinabre, qui servit de modèle. Nous savons en effet aujourd'hui que le cinabre est un sulfure de mercure dont le grillage fait apparaître à la fois du mercure et du soufre. La plupart des minerais utilisés à l'époque étant des sulfures, on pouvait supposer que tous les métaux possédaient leur soufre (partant en chaleur et en fumées) et leur mercure (la coulée de la fonte), alors considérés comme leurs principes constitutifs.

La doctrine s'était complexifiée par la suite en supposant que ces deux principes provenaient d'une « semence » d'origine astrale qui produisait les métaux en venant se nicher dans les anfractuosités des mines [4]. Mélangée aux impuretés de la terre, contrariée dans sa production par des chaleurs inadaptées, elle produisait le plus souvent les métaux imparfaits, comme le cuivre, le plomb, le fer ou l'étain, au lieu de l'or et de l'argent qui étaient les métaux purs et véritables, échappant à la corruption que nous appelons aujourd'hui leur oxydation. Le travail de l'alchimiste consistait donc à retrouver la pureté métallique, en réactivant et en extrayant cette semence métallique par des procédés de calcination, de distillation et de sublimation avec l'usage de diverses substances, comme le vitriol ou l'antimoine, dont le choix constituait le véritable secret de fabrication. On espérait alors obtenir une poudre appelée Pierre philosophale (*Lapis philosophorum*), véritable semence métallique : projetée sur un métal vil, elle le pénètre, réactive le processus de maturation interrompu dans la nature, et porte le métal imparfait à sa perfection. Cette doctrine, qui associe sans cesse la construction théorique des concepts dans de longs traités et les activités de laboratoire, suppose bien sûr que les métaux soient des corps mixtes, ce qui ne pourra être définitivement réfuté que vers la fin du XVIII^e siècle.

L'alchimie est une pensée immanente

Loin de tout mysticisme ou de tout ésotérisme, l'alchimie se présente comme une « philosophie naturelle », terme par lequel on désignait, jusqu'au XVIII^e siècle, l'ensemble des savoirs rationnels concernant la nature et ses lois. Le travail de l'alchimiste se fonde en effet sur le seul usage de la raison, sans se référer à des puissances divines ou diaboliques, ou encore à des forces occultes. Bien sûr, l'alchimiste invoque au début de ses travaux l'aide de Dieu, comme cela se fait souvent en pays musulman ou chrétien, mais il n'emploie jamais de formules magiques ou incantatoires ; il ne fait rien qu'il ne comprenne, ni qu'il ne puisse justifier. Il est important de souligner que l'alchimie ne relève pas de la magie ; d'ailleurs, elle fut rarement condamnée en tant que telle par

l'Inquisition [5]. Les textes que lit l'alchimiste et dont il s'inspire pour ses travaux et ses nouvelles productions théoriques ne sont pas le résultat d'une révélation divine ou du dévoilement d'un secret caché par les anciens ; ils sont plutôt le fruit d'un travail lent et progressif dont il convient de saluer les principaux représentants historiques.

Les doctrines alchimiques peuvent s'enseigner et se communiquer

L'alchimie peut s'enseigner, et les alchimistes ont toujours eu le souci de communiquer les résultats de leurs recherches. Loin d'être des marginaux, la plupart des alchimistes des XVI^e et XVII^e siècles étaient des médecins réputés, qui ne craignaient pas les conflits que faisait naître leur médecine chimique. Leur présence était recherchée et de nombreux princes allemands, italiens ou français les accueillaient à leur cour où ils finançaient volontiers leurs travaux. Les manuscrits circulent largement et, dès l'invention de l'imprimerie, les alchimistes font un large usage de cette nouvelle technique. On a pu dire qu'aux XVI^e et XVII^e siècles, la presse et l'alambic furent les deux principaux instruments du développement de l'alchimie. La diffusion de son savoir fut assurée par de nombreux traités et recueils de textes qui circulèrent au grand jour.

Ainsi sont publiés : à Strasbourg, en 1602, un *Theatrum chemicum* en six volumes qui regroupe 200 traités ; à Francfort, en 1625, un *Musaeum Hermeticum Reformatum et amplificatum* contenant 25 traités. À Londres, en 1652, un *Theatrum Chemicum Britannicum* est consacré à des auteurs anglais. En 1672, paraît à Paris la *Bibliothèque des philosophes chimiques*, rééditée en 1740 avec 34 traités traduits en français. En 1702, le médecin Jean-Jacques Manget publie à Genève la *Bibliotheca chemica curiosa* qui regroupe 140 traités. Enfin, paraît en 1727 à Nuremberg, un *Deutsches Theatrum Chemicum* en trois volumes qui reprend des traités d'auteurs allemands.

Il ne s'agit là que de quelques exemples. On est loin de la rétention d'information et du goût du secret, qui n'était le plus souvent que l'expression du souci d'un artisan ou d'un apothicaire de conserver l'exclusivité commerciale d'une recette de son invention. D'ailleurs, dans la préface de leurs ouvrages, les alchimistes affirment fréquemment leur volonté de rendre publique leur science et de dévoiler les secrets de la nature, c'est-à-dire d'expliquer la théorie de la matière et des principes qui est au cœur de leur doctrine.

Certes, l'alchimie parviendra rarement à enseigner sa doctrine dans des institutions publiques. Elle semble, en particulier, avoir toujours été absente des universités médiévales qui, toutes entières centrées sur la lecture et la discussion des livres, ne pouvaient accueillir une science qui exigeait le recours au laboratoire. Mais les choses vont changer à partir de la fin du XVI^e siècle, avec le succès des nombreux « cours de chimie » qui se développent en marge des institutions. Ce qui conduira en France le pouvoir royal, à l'instigation de Richelieu, à institutionnaliser ces enseignements en créant une chaire de chimie au Jardin royal des plantes, ancêtre de l'actuel Muséum d'histoire naturelle. Le premier cours public de chimie fut ainsi donné en France, et sans doute en Europe, le 23 juillet 1648, par un médecin d'origine écossaise, William Davison, qui était un alchimiste.

Pendant tout le XVII^e siècle, les cours de chimie ne relèvent plus seulement d'un enseignement oral ; ils débouchent sur la publication de très nombreux traités, intitulés précisément « Cours de chimie » ou « Traités de chimie », qui regroupent des recettes chimiques destinées aux apothicaires. S'appuyant

sur la tradition alchimique et la doctrine des trois principes, ils intègrent de longs développements de philosophie naturelle, délibérément anti-aristotéliens, qui apportent aussi leur contribution à ce que l'on appelle la révolution scientifique. Mais ils présentent aussi les divers appareils en usage dans les laboratoires. Le plus célèbre sera celui de Nicolas Lémery paru en 1675 et réédité jusqu'au milieu du XVIII^e siècle. Lémery sera l'un des premiers membres de l'Académie royale des sciences, et Fontenelle, dans l'éloge qu'il en fera à sa mort, n'hésitera pas à l'appeler « le Descartes de la chimie ».

La dimension historique de l'alchimie

Les origines de l'alchimie

Il serait vain de vouloir rechercher les origines de l'alchimie en des temps très reculés, du côté de l'Égypte ancienne ou de la Mésopotamie. Certes, il y eut une alchimie en Chine [6], et peut-être en Inde, mais cela n'eut aucune influence sur l'alchimie occidentale. L'alchimie est née dans les premiers siècles de notre ère, à Alexandrie, qui était alors le principal centre intellectuel du bassin méditerranéen.

Aussi curieux que cela puisse paraître, la pensée scientifique antique, jusqu'aux premiers siècles de notre ère, n'avait

guère développé de théorie chimique, le concept même de métal n'étant pas clairement défini. Le mot grec *metallon* désigne la mine, il n'existe aucun terme générique pour désigner le métal. C'est ce vide conceptuel qui va peu à peu se combler dans les premiers siècles de notre ère, l'alchimie se présentant essentiellement comme une chimie des métaux.

Les manuscrits alchimiques les plus anciens que nous ayons conservés sont écrits en grec et datent des premiers siècles de notre ère (IV^e-VIII^e siècles). Ils ont été rassemblés au XII^e siècle dans ce que l'on appelle le « Corpus gréco-alexandrin ». À la fin du XIX^e siècle, le chimiste Marcelin Berthelot fut le premier à le transcrire, l'éditer, le traduire et le commenter, sous le titre de *Collection des anciens alchimistes grecs* (Paris, 1888).

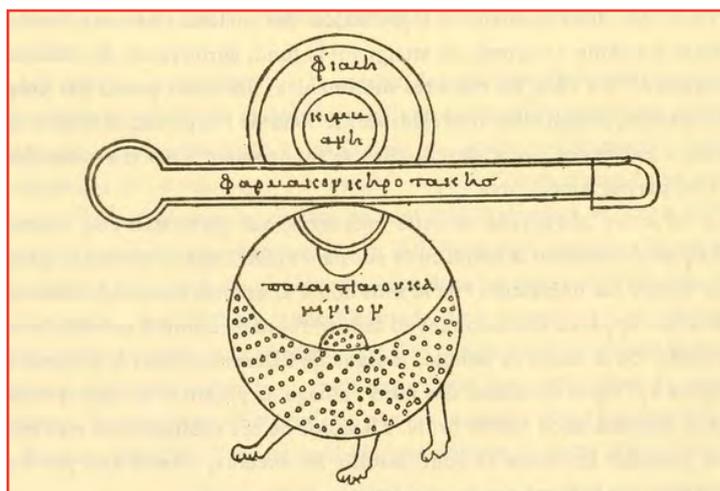
L'auteur le plus célèbre de l'époque, le plus fréquemment cité par la suite, est un certain Zosime de Panopolis, qui vécut sans doute vers le début du IV^e siècle de notre ère [7]. Zosime développe une théorie qui fait du mercure le composant essentiel de tous les corps, celui à partir duquel leur nature pourra être transformée en or ou en argent. On trouve dans l'ouvrage un mélange de recettes et de considérations symboliques, mais son grand intérêt vient de la description très précise de divers appareils, en particulier des alambics.

Ces premières élaborations chimiques résultent du mélange de trois types de sources :

- Tout d'abord, une littérature de recettes concernant la manière de réaliser des alliages ou de donner à des métaux les aspects de l'argent et de l'or, mais aussi des procédés de fabrication de pierres artificielles et de teinture des tissus. Quelques papyrus qui datent des premiers siècles de notre ère nous permettent de connaître certaines de ces recettes. Il est difficile de dire s'il ne s'agit que de procédés techniques visant l'imitation ou la falsification de pierres et de métaux précieux (*aurifiction*), ou si derrière ces recettes se cachent déjà des intentions de transmutation (*aurifaction*) [8]. Mais en fait, lorsque le métal modifié finit par présenter toutes les caractéristiques de l'or, ne faut-il pas penser que l'on est sur le chemin d'une véritable transformation d'un métal imparfait en un métal parfait ? En particulier, grande est la tentation d'opérer un rapprochement avec les opérations de la teinture des tissus : le produit tinctorial ne se contente pas de déposer la couleur à la surface du tissu, il pénètre au cœur même de la trame et la transforme. De la même façon, on imagine alors qu'au-delà des procédés superficiels de dorure, il est possible de faire pénétrer dans un métal une substance qui le teindra en or, c'est-à-dire qui modifiera chimiquement ses propriétés métalliques. C'est cette substance que l'on appellera par la suite « Pierre philosophale », et quelquefois « teinture des métaux ».

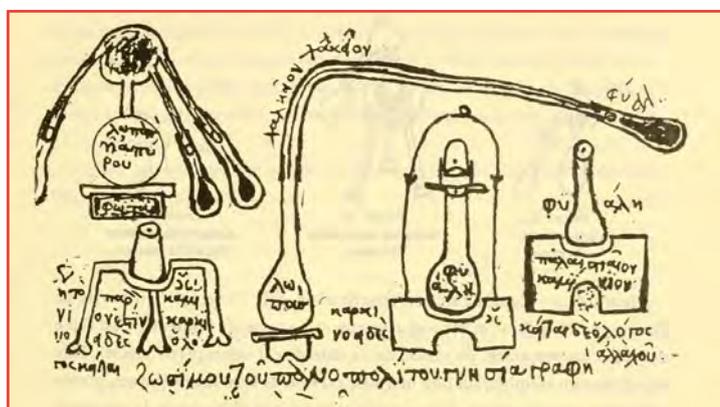
- Une seconde source de l'alchimie gréco-alexandrine est constituée par les théories antiques de la matière, qu'il s'agisse des réflexions sur les quatre éléments héritées des philosophes présocratiques que l'on retrouve ensuite chez Platon et Aristote, mais aussi des réflexions esquissées par ce dernier sur la formation des substances minérales à partir d'exhalaisons souterraines qui sont sèches (les minéraux) ou humides (les métaux).

- La littérature hermétique qui se développe à cette époque à Alexandrie constitue une troisième source. Il s'agit d'un ensemble de textes attribués à un certain Hermès Trismégiste (« trois fois très grand »), personnage mythique que les Latins associent à Mercure, derrière lequel se cachent plusieurs auteurs qui restent anonymes [9]. Ce sont des élaborations mystico-philosophiques, s'inspirant librement



Bain-marie à kérotakis. Les appareils à kérotakis jouent un grand rôle chez les alchimistes grecs.

Figure extraite de *Introduction à l'étude de la chimie des Anciens et du Moyen Âge* de Marcelin Berthelot (Georges Steinheil éditeur, Paris, 1889), p. 146.



Alambics et vases à digestion.

Figure extraite de *Introduction à l'étude de la chimie des Anciens et du Moyen Âge* de Marcelin Berthelot (Georges Steinheil éditeur, Paris, 1889), p. 163.

des philosophies grecques antiques et de diverses croyances religieuses alors en vogue dans l'Égypte hellénisée. Les propos sur la « spiritualisation » de la matière ont pu être interprétés en un sens chimique. Il est important de ne pas surévaluer l'influence, réelle mais finalement assez discrète, de ces idées « hermétiques » sur l'alchimie. En fait, l'alchimie arabe et médiévale a le plus souvent ignoré les textes attribués à Hermès Trismégiste, qui ne furent redécouverts qu'au milieu du XV^e siècle.

L'alchimie arabe

Dès les débuts de l'hégire, les savants de langue arabe font traduire les traités alchimiques grecs dans leur langue et donnent à la doctrine une rigueur nouvelle. Sous le nom de Jābir ibn Hayyān, sont rédigés vers le IX^e siècle de multiples traités qui expliquent la formation des métaux dans les mines par un mélange proportionné de soufre et de mercure [10]. On suppose que chaque métal contient, caché à l'intérieur de lui-même, un métal opposé qu'il est possible de faire apparaître par l'action d'un produit appelé *élixir*, obtenu par la distillation de substances organiques, où le sel ammoniac joue un rôle important. Dans les *Livres des Balances*, Jābir élabore même une théorie chimique quantitative, où il donne les proportions qu'il faut respecter dans la fabrication de cet *élixir*, et où il attribue à chaque produit un nombre qui exprime sa puissance opératoire.

À la même époque, un médecin perse nommé Ar-Rāzi se livre à un important travail de classification des diverses substances chimiques connues à son époque, en particulier les sels [11]. Dans ses traités, qui ont inspiré plusieurs ouvrages médiévaux latins, lui aussi met en évidence le rôle de l'*élixir*, médicament universel qui guérit les métaux en leur donnant la perfection de l'or, mais qui guérit aussi les êtres vivants, en délivrant leur corps des impuretés qui provoquent la maladie et en leur conférant ainsi la longue vie. Il est le premier à établir une étroite connexion entre l'alchimie et la médecine.

L'alchimie médiévale

Le Moyen Âge chrétien hérite d'une double tradition. D'une part, les recettes de teinturerie, de verrerie, d'orfèvrerie se transmettent sans discontinuer depuis l'Antiquité tardive. D'autre part, la grande entreprise de traduction des traités venus des Arabes met à la disposition des intellectuels du XIII^e siècle un ensemble de doctrines philosophiques, médicales et chimiques qu'il n'est pas toujours facile de concilier entre elles. Si les enseignements médicaux de Galien semblent bien cadrer avec la doctrine d'Aristote, par contre les théories alchimiques exigent, pour être bien comprises, une théorie de la matière différente de celle transmise par la philosophie grecque [12].

Ainsi, on lit dans un traité du philosophe et médecin arabe Avicenne, qui suit de près les enseignements d'Aristote et qui sera rapidement traduit en latin, l'injonction suivante : « *Qu'ils sachent, les techniciens de l'alchimie [artifices alchemiae], qu'il n'est pas possible de transformer les espèces des métaux.* » Vouloir transformer une espèce métallique en une autre serait agir contre la nature. On ne peut pas davantage transformer du plomb en or qu'un chien en chat. Ceux qui



Alchimiste dans son atelier, David Teniers Le Jeune (1610-1690), milieu du XVII^e siècle. Courtesy of the Chemical Heritage Foundation Collections.

prétendent malgré tout le faire ne peuvent être que d'habiles faussaires ou de diaboliques magiciens. On voit apparaître ici l'une des raisons de l'hostilité à l'alchimie.

On trouve cependant dans la suite du texte d'Avicenne une précision – sans doute une interpolation – qui apporte aux alchimistes le moyen d'y parvenir : on ne peut transformer les espèces des métaux, « à moins de les réduire en leur matière première ». Qu'il existe une matière première des métaux, et que celle-ci puisse être isolée en laboratoire, voilà ce qui constitue désormais la double conviction des alchimistes.

C'est un auteur anonyme, qui se cache derrière le nom de « l'Arabe Geber », qui réfute les objections aristotéliennes dans la *Summa perfectionis*, texte écrit en latin vers la fin du XIII^e siècle, où se trouvent développés de manière systématique les principaux points de l'alchimie médiévale, le Soufre et le Mercure étant alors érigés au rang de « principes chimiques » [13]. Une doctrine cohérente de la structure de la matière et de ses transformations peut ainsi se déployer, qui s'émancipe de la tutelle de l'aristotélisme, mais qui, de ce fait, renonce alors à la légitimité sociale et professionnelle que les institutions universitaires apportent à la médecine ou au droit.

Quelques années plus tard se développent les théories et pratiques liées à la quintessence. Johannes de Rupescissa écrit en 1352 le *De quinte essentia* [14], traduit en français et imprimé pour la première fois sous le titre *La vertu et propriété de la quinte essence de toute chose* (Lyon, 1549). La publication du texte latin n'interviendra qu'en 1561. On peut évoquer trois sources de la théorie de la quintessence : la cinquième essence ou éther d'Aristote, matière impérissable des astres ; les nouvelles pratiques de distillation pour fabriquer l'alcool (alambic à chapiteau) ; l'*élixir* des alchimistes arabes.

Le produit de la distillation du vin est appelé *aqua vitae*. C'est seulement au XVI^e siècle qu'on l'appellera « alcool ». Se développe alors l'idée selon laquelle on peut tirer la quintessence de toute chose, y compris des minéraux. Les pratiques

s'appliquent cependant essentiellement aux substances végétales [15].

Le rôle du laboratoire

Plus que jamais, le recours au laboratoire devient la marque spécifique de la science alchimique [16]. Certes, il ne remplit pas les mêmes fonctions que dans les sciences modernes ; il n'est pas question de mettre des hypothèses à l'épreuve, ou d'entreprendre la réfutation des théories. La pratique n'est que le prolongement de la théorie, dont elle manifeste progressivement la vérité. Dans ces conditions, lorsque l'alchimiste n'obtient pas dans son laboratoire la Pierre philosophale, cela ne signifie pas que la théorie était fautive, mais seulement que l'alchimiste s'est trompé : il n'a pas choisi les bons matériaux, il n'a pas su régler convenablement ses feux, il a voulu aller trop vite. Mais qu'importe, finalement : l'échec de l'opération finale n'a pas empêché la réussite des opérations intermédiaires. Au fil de ses travaux de laboratoire, l'alchimiste a appris à connaître les propriétés des diverses substances qu'il utilise, à codifier les opérations portant sur les acides et les alcalis, le soufre, le mercure et les autres métaux.

Ainsi, l'alchimiste pourra mieux qu'un autre comprendre la nature et produire une science qu'il affirmera être supérieure à celle que délivrent les universités, où l'on garde les yeux rivés sur les textes d'Aristote. Il n'y a donc rien de magique dans les pratiques et les savoirs de l'alchimiste. Si son action est efficace, c'est parce qu'elle se fonde sur une connaissance vraie des œuvres de la nature, dont il s'agit d'imiter les procédés. C'est cette connaissance, bien davantage que la réussite de la transmutation, qui manifeste le succès de l'alchimie. L'alchimie médiévale, dans sa volonté de ne point séparer la théorie de la pratique, constitue ainsi l'une des premières manifestations de l'esprit technologique qui caractérise le monde occidental.

La renaissance paracelsienne

La diffusion des œuvres de Paracelse va prolonger de deux siècles le succès de l'alchimie. De son vrai nom Philippus Aureolus Theophrastus Bombast von Hohenheim (1493-1541), ce médecin helvétique contemporain de Luther représente de manière exemplaire l'alchimiste en révolte contre les savoirs établis et dogmatiques [17]. Son œuvre, pourtant composée d'un grand nombre de traités confus et de lecture difficile, s'est largement diffusée dans toute l'Europe dès la seconde moitié du XVI^e siècle grâce aux travaux de médecins publiant des lexiques et des ouvrages de synthèse. Refusant la médecine des livres et le savoir des universités, Paracelse cherche la science là où les doctes ne voient qu'objets de mépris. C'est dans la multitude des remèdes populaires recueillis au cours de longs voyages à travers l'Europe, et non pas en lisant les traités d'Hippocrate et de Galien, qu'il veut jeter les fondements d'une médecine nouvelle dans sa doctrine aussi bien que dans ses pratiques. C'est en observant la multitude des objets que nous offre la nature, et en recherchant les correspondances qui se tissent entre eux, et non pas en suivant les enseignements des universités, qu'il entend construire des savoirs nouveaux.

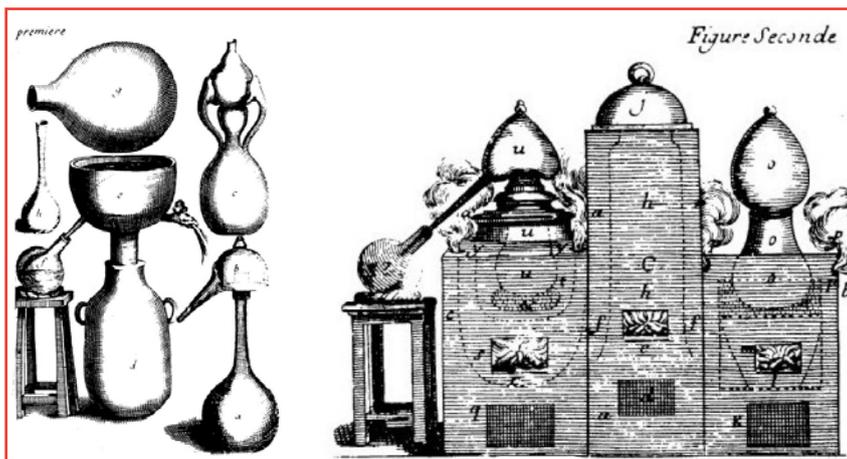
Paracelse est médecin avant d'être alchimiste. Mais pour parvenir à la guérison, il faut

connaître la maladie, et donc comprendre la nature de l'homme chez qui elle survient, c'est-à-dire reconnaître les multiples liens qui le relie à l'univers, ce qui permettra de déterminer la substance susceptible de le guérir, ce qu'il appelle l'arcane. L'art des hommes qui cuisent, dissolvent et distillent rejoint l'action de la nature dans la digestion de l'estomac, la germination de la graine ou la croissance du métal. Partout, la nature agit par dissolutions, calcinations et distillations. Tout, dans la nature aussi bien que dans le corps humain, se ramène au fonctionnement de l'alambic, qui est à la fois le modèle des opérations naturelles et physiologiques et l'instrument privilégié des activités de laboratoire, puisque c'est par lui que s'effectue la séparation des trois principes constitutifs des minéraux aussi bien que des animaux et des végétaux, Paracelse ayant ajouté le Sel au Mercure et au Soufre de la tradition médiévale.

L'apogée à l'âge classique

L'alchimie connaît une fortune immense au début du XVII^e siècle [18]. De tous côtés, des médecins s'en réclament pour mettre en œuvre de nouvelles pratiques. Car l'alchimie du XVII^e siècle est d'abord au service d'une médecine nouvelle, qui se nomme volontiers hermétique, non pas pour marquer son obscurité, mais pour mieux s'opposer à la médecine galénique. À ceux qui invoquent les travaux d'Aristote et de Galien, les médecins paracelsiens opposent une tradition qui, en deçà de Paracelse et des alchimistes médiévaux ou arabes, remonterait jusqu'à Hermès Trismégiste que l'on croit avoir été un contemporain de Moïse... Un peu partout en Europe éclatent alors des querelles entre les médecins (al)chimistes et les dirigeants des facultés de médecine qui les accusent d'être des empoisonneurs en voulant utiliser des médicaments chimiques d'origine minérale, et en particulier l'antimoine. Les apothicaires constituent une cible privilégiée pour la médecine chimique, et c'est pour eux que se donnent puis s'impriment les nombreux « cours de chymie » rédigés en français que nous avons déjà évoqués.

D'autres préfèrent se consacrer aux développements et à la défense de la théorie. Ils s'emploient, dans de longs traités, à exposer et à perfectionner la doctrine, dont ils entendent montrer le caractère encyclopédique, comme Fabre dans son *Abrégé des secrets chimiques* paru en 1636 [19]. L'alchimie devient pour eux la clé permettant d'interpréter et d'éclairer



Fourneau et appareils extraits du *Traité de la Chymie, Enseignant par une brieve & facile Méthode toutes ses plus nécessaires préparations* de Christophle Glaser (Jean d'Hovry éditeur, Paris, 1663). On retrouve des appareils très similaires à ceux présents dans le tableau de Teniers Le Jeune (voir p. 35).

les phénomènes naturels, mais aussi d'expliquer les obscurités de la mythologie antique ou de la religion chrétienne.

Les œuvres du chimiste flamand Jean-Baptiste Van Helmont, publiées par son fils en 1648, quatre ans après sa mort, contribuent au succès de la « chymie » en ce milieu du XVII^e siècle [20]. Van Helmont réforme la médecine en découvrant le rôle des acides dans les processus de digestion ; il émet l'hypothèse d'un dissolvant universel, appelé *alkahest*, qui pourrait, mieux que la distillation, séparer les principes chimiques, au premier rang desquels il met l'eau. Surtout, il découvre l'existence d'une substance impalpable, qu'il nomme « gas », et dans laquelle nous reconnaissons notre gaz carbonique. C'est donc bien un médecin alchimiste qui a découvert les gaz.

Newton aussi s'intéressait à l'alchimie [21]. La surprise fut grande lors de la découverte de ses manuscrits alchimiques à l'occasion d'une vente aux enchères à Londres en 1936. Il avait écrit bien plus de pages sur l'alchimie que sur les mathématiques ou l'optique. Mais on a fini par comprendre que cela n'avait rien d'étonnant : il s'intéressait à ce qui constituait pour lui le meilleur de la chimie de son temps, et il consacra d'ailleurs aussi beaucoup de temps à des expériences dans son laboratoire de Trinity College à Cambridge. Il était aussi en contact avec d'autres savants et philosophes anglais, comme Robert Boyle ou John Locke, qui marquaient le plus grand intérêt pour les recherches alchimiques. L'essentiel de ses écrits sont des copies de livres et d'imprimés et il ne semble pas avoir beaucoup apporté à la chimie de son temps, si ce n'est en effectuant des rapprochements entre l'attraction universelle et les opérations chimiques, ce qui inspira les travaux du XVIII^e siècle sur les affinités chimiques. L'inventeur de cette doctrine, Étienne-François Geoffroy, qui rendit publics ses travaux sur la *Tables des différents rapports entre les différentes substances* en 1718, était lui-même un lecteur assidu des textes alchimiques du siècle précédent, comme le montrent ses communications à l'Académie royale des sciences sur ce que l'on appelait alors la fabrication artificielle des métaux [22]. C'est en se référant explicitement aux enseignements de l'alchimiste allemand Johann-Joachim Becher (1635-1682), et à travers lui à ceux de la *Summa perfectionis* de la fin du XIII^e siècle, qu'il tentait d'expliquer la composition des métaux.

Conclusion

L'alchimie fut donc une science. Certes, c'était à l'époque une science contestée, parce qu'elle ne s'inscrivait pas dans le schéma traditionnel des savoirs encore sous l'influence de la pensée scolastique issue de la philosophie et de la science médiévales. Elle apparaissait alors comme un savoir rebelle, prenant place parmi les innovations que beaucoup considéraient comme conduisant au scepticisme ou à l'athéisme. Cela peut nous sembler étonnant, mais les alchimistes, malgré leur attachement à la tradition, étaient aussi des hommes de progrès, introduisant dans la recherche scientifique l'exigence du recours au laboratoire et du passage par les opérations techniques, là où l'on avait tendance à privilégier le recours exclusif aux débats d'école et à l'argumentation démonstrative. La connaissance de la matière ne se réduisait pas pour eux à des considérations théoriques, elle passait par des travaux salissants, pénibles et dangereux. Ainsi a-t-on pu insister sur la dimension technologique de leur science [23], ou encore sur certains aspects matérialistes de leurs doctrines [24].

Certes, l'alchimie nous apparaît aujourd'hui comme une « science périmée » puisque c'était la chimie d'une époque dont les doctrines furent progressivement remplacées par les découvertes de la seconde moitié du XVIII^e siècle de Lavoisier, de Priesley et de bien d'autres. L'obscurité de l'alchimie ne tient donc pas à son ésotérisme, mais bien plus simplement au fait qu'il est nécessaire, pour dégager la signification de ses textes, d'en passer par les contraignantes méthodes de l'histoire des sciences et de l'histoire de la philosophie qui nous aident à replacer ses écrits et ses pratiques dans le contexte de leur époque. De telle sorte que débarrassée des interprétations récentes qui occultent sa dimension essentiellement chimique et qui exagèrent le rôle de ses images et de ses symboles, l'alchimie puisse être enfin comprise comme la véritable science chimique du passé. En 1953, Gaston Bachelard affirmait dans *Le matérialisme rationnel* que « *La chimie est une science d'avenir parce qu'elle est, de plus en plus, une science qui déserte son passé.* » L'exemple de Geoffroy et de sa table des affinités nous montre le contraire : c'est parce qu'elle s'enracinait dans son passé que la chimie de Geoffroy eut un avenir. Je ne crois pas qu'une science gagne beaucoup à oublier son passé.

Notes et références

- [1] Voir Joly B., *Histoire de l'alchimie*, Vuibert-Adapt, 2013 (Ndlr : le lecteur pourra lire la recension de cet ouvrage dans la rubrique Livres et médias du numéro de février-mars 2014, p. 124, rubrique téléchargeable librement sur le site à partir de la page www.lactualitechimique.org/spip.php?numero163).
- [2] Sur l'identité de l'alchimie et de la chimie, voir : Principe L., Newman W., Some problems with the historiography of alchemy, in *Secrets of Nature: Astrology and Alchemy in Early Modern Europe*, W. Newman, A. Grafton (eds), MIT Press, 2001, p. 385-431 ; Principe L., Newman W., Alchemy vs. chemistry, the etymological origins of a historiographical mistake, *Early Science and Medicine*, 1998, 3, p. 32 ; Joly B., A propos d'une prétendue distinction entre la chimie et l'alchimie au XVII^e siècle : questions d'histoire et de méthode, *Revue d'Histoire des Sciences*, 2007, 60-61, Sciences, textes et contextes, en hommage à Gérard Simon, p. 167.
- [3] Je résume ici les thèmes que j'ai développés dans *La rationalité de l'alchimie au XVII^e siècle, avec le texte latin, la traduction et le commentaire du Manuscritum ad Fridericum de Pierre Jean Fabre*, Vrin, Paris, 1992.
- [4] Sur le développement d'un concept de semence métallique dans la minéralogie de la Renaissance, voir : Hirai H., *Le concept de semence dans les théories de la matière à la Renaissance de Marsile Ficin à Pierre Gassendi*, Brepols, Turnhout, 2005.
- [5] Voir Baud J.-P., *Le procès de l'alchimie. Introduction à la légalité scientifique*, Cerdic, Strasbourg, 1983.
- [6] Needham J. et coll., *Science and Civilization in China*, Cambridge University Press, 1974-1983, vol. V, parties 2 à 5.
- [7] Voir *Les alchimistes grecs*, t. IV, *Zosime de Panopolis, Mémoires authentiques*, texte établi, traduit et commenté par M. Mertens, Les Belles Lettres, Paris, 2002.
- [8] Cette distinction a été proposée par Joseph Needham, op. cit. in [6], vol. V, partie 2, p. 10-11.
- [9] Le *Corpus Hermétique* a été publié et traduit par A.-J. Festugière et A. Nock, *Corpus Hermeticum*, 4 vol., Les Belles Lettres, Paris, 1954-1960, avec un commentaire de Festugière, sous le titre *La révélation d'Hermès Trismégiste*, Les Belles Lettres, 1949-1954.
- [10] Voir Kraus P., *Jābir ibn Hayyān. Contribution à l'histoire des idées scientifiques dans l'Islam*, 2 vol., Le Caire, 1942 ; seul le second volume a été réédité à Paris (Les Belles Lettres, 1986).
- [11] Voir Stapleton H.E., Azo R.F., Husain M.H., Chemistry in 'Irāq and Persia in the tenth century A.D., *Memoirs of the Asiatic Society of Bengal*, Calcutta, 1929, vol. VIII (1922-1929), p. 315-417.
- [12] On trouvera une brève mais remarquable introduction à l'alchimie médiévale dans Halleux R., *Les textes alchimiques*, Brepols, Turnhout, 1979.
- [13] Voir Newman W., *The Summa perfectionis of pseudo-Geber. A Critical Edition, Translation and Study*, Brill, Leiden, 1991.
- [14] Voir Halleux R., Les ouvrages alchimiques de Jean de Rupescissa, in *Histoire littéraire de la France*, Imprimerie nationale, Paris, 1981, t. XLI, p. 241-277.
- [15] Voir Forbes R.J., *A short history of the art of distillation*, Brill, Leiden, 1948-1970.
- [16] On remarquera que jusqu'à la fin du XVII^e siècle, le laboratoire est défini par rapport à la « chymie », comme l'indique le *Dictionnaire* de Furetière

Les chimistes, leurs institutions et leurs sociétés savantes entre les deux guerres

VI - Georges Urbain (1872-1938) et la « science sensualiste »

Florence Riou

Résumé	Georges Urbain, chimiste réputé en France et à l'étranger pour son travail sur les terres rares, s'investit dans la période de l'entre-deux-guerres dans diverses sociétés savantes et institutions. Cet article met en lumière une facette moins connue du personnage, celle de l'artiste-musicien, du philosophe défenseur d'une « science sensualiste ». Dans la querelle entre atomistes et énergétistes, sa vision est originale, qualifiée « d'atomisme poétique ». Ses conceptions à la frontière de plusieurs domaines vont ainsi jouer un rôle dans la diffusion de la chimie au début du XX ^e siècle.
Mots-clés	Georges Urbain, Jean Perrin, science et art, Institut de biologie physico-chimique (IBPC), diffusion scientifique.
Abstract	Georges Urbain (1872-1938) and the « sensualist science » Georges Urbain, a well-known chemist in France and abroad for his work on rare earths, was involved in various learned societies and institutions in the inter-wars years. This article brings to light a less-known facet of this character, as artist, musician and a philosopher defending a “sensualist science”. In the quarrel between atomic and energetists, his vision is original, described as “poetic atomism”. His ideas on the border of several areas will play a role in the dissemination of chemistry in the early 20 th century.
Keywords	Georges Urbain, Jean Perrin, science and art, Institut de biologie physico-chimique (IBPC), scientific popularization, history of science.

« Il y a deux choses que j'ai toujours aimées passionnément, et auxquelles je dois les plus nobles émotions, les plus belles joies intellectuelles qui puissent embellir une existence : la science et l'art », **Georges Urbain** [1].

Chimiste inorganicien réputé en France et à l'étranger pour son travail sur les terres rares, Georges Urbain est aussi un poète et philosophe des sciences moins connu [2]. Figure intéressante de l'entre-deux-guerres, au carrefour de multiples institutions et sociétés savantes, Urbain permet de relier la vision du chimiste à celle de l'artiste confirmé dans cette période mouvementée.

Musicien reconnu, Urbain écrit ses premières compositions importantes en 1921 et ne cessera de le faire jusqu'à sa mort. Parallèlement, il développe une réflexion philosophique sur une « science sensualiste » dans *Les disciplines d'une science* (1921), prenant en considération l'interaction entre l'observateur et l'objet étudié. Il en découle une comparaison entre l'art et la science, et une réflexion sur l'esthétique musicale dans *Le tombeau d'Aristoxène* écrit en 1924 [3].

Cet article propose d'analyser en quoi cette « science sensualiste » s'insère dans la remise en question du regard en science dans la période de l'entre-deux-guerres. Quels impacts vont avoir ces réflexions philosophiques sur la diffusion de la chimie à cette période ? Impliqué dans différentes sociétés savantes et institutions, Urbain est aussi l'ami de Jean Perrin. Quelle influence a-t-il pu exercer sur ce dernier, qui usera des termes de « beauté de la science pure » lors de

la croisade pour la science menée auprès du public de l'Exposition internationale de Paris en 1937 ?

La conception d'une « science sensualiste »

Pour le compositeur Henry Mesnier : « *Esprit puissant, s'intéressant avec le même enthousiasme à toutes les manifestations intellectuelles. Georges Urbain était un musicien né. Doué d'une sensibilité exquise d'artiste, il trouvait dans la musique, non seulement un dérivatif, un repos à sa prodigieuse activité de savant, mais la réalisation de nobles aspirations* » [4].

De par sa sensibilité de musicien, Urbain s'interroge sur le statut de la subjectivité et des sensations en science. Dans son ouvrage *Les disciplines d'une science*, il développe sa réflexion selon laquelle « *il serait illusoire et vain de parler de science absolue et parfaite* » [5a]. Ce livre s'adresse à la jeunesse comme une leçon de modestie vis-à-vis d'un idéal scientifique pouvant exercer une « *attraction irrésistible et religieuse* ». Pour Urbain, il est important de redonner à la science son côté humain, et donc de s'interroger sur ces notions

de perception et de sensation qui interviennent dans toute démarche scientifique.

Dans le milieu des scientifiques français de l'entre-deux-guerres, la fonction de la science est de donner une image du réel en conformité avec des principes ; un réel qui existe « en soi ». La question des sensations se pose en général comme une plus ou moins grande précision des mesures, dans une relation d'un objet, outil d'observation, à un autre, objet étudié. Or selon Urbain, Mach et Poincaré, nous ne connaissons des objets étudiés seulement ce que les sens nous permettent de connaître. La science ne peut prétendre atteindre que des rapports entre les choses, non des vérités isolées. La relation à considérer est donc celle qui s'établit entre l'être, le scientifique qui étudie, et les objets.

Par ces questions, Urbain se situe parfaitement en accord avec son époque. En effet, la naissance de la physique moderne, par l'étude du monde microscopique, remet en cause les certitudes issues d'une pensée scientifique du XIX^e siècle. La science dite « classique » repose alors sur le postulat du déterminisme et sur celui d'une absence d'interaction entre observateur et l'objet observé. L'étude des phénomènes atomiques contredit ce schéma épistémologique et pousse le scientifique à s'interroger sur la connaissance qu'il se fait de la réalité extérieure ; il est désormais nécessaire de prendre en compte l'outil d'observation et du jugement humain dans ce rapport à la réalité, car susceptible de modifier le résultat. Toute observation et toute mesure sont les résultats d'une interaction entre la réalité physique étudiée, les instruments utilisés, l'observateur lui-même...

Urbain pointe l'aspect humain et donc faillible de toutes perceptions à l'origine de la science, et développe l'idée d'une science dite « sensualiste » : l'univers est accessible à l'homme sous forme de sensations, que notre raison et notre jugement traduisent en perceptions. Il définit la science expérimentale comme une « adaptation de nos moyens intellectuels aux données sensibles de l'univers » [5b]. Car entre sensation et perception, il existe des jugements humains susceptibles d'erreurs : « nos perceptions et nos concepts résultent d'un accord entre nos sensations et notre raison » [5c]. Or Urbain déplore qu'il est exceptionnel que les perceptions soient sujet de discussion entre savants de laboratoire.

De ces réflexions découle une comparaison entre l'art et la science, développée dans *Le tombeau d'Aristoxène*. Pour l'auteur, si le scientifique cherche à minimiser l'écart entre sensation et perception, pour être au plus près de la réalité extérieure, l'artiste lui, laisse libre cours à sa sensibilité et à son imagination, qui reflètent alors sa personnalité. Sa capacité à s'imprégner des sensations doit, à l'inverse du scientifique, être maximale. La double approche d'Urbain, tout à la fois artiste et scientifique, est la marque de sa singularité.

D'un point de vue scientifique, Urbain va adopter, dans la querelle entre atomistes et énergétistes, une position originale, que José Manuel Claro-Gomes qualifie « d'atomisme poétique » : l'atome est pour Urbain une œuvre d'art, une création de scientifique présentant à la fois des avantages cognitifs et une certaine beauté. C'est une image mentale et

visuelle issue de l'imagination, plus qu'un concept issu du raisonnement nécessitant de repenser l'édifice de la chimie. Si Urbain adhère donc à l'hypothèse atomique dans la lignée de ses maîtres – les chimistes alsaciens Charles-Adolphe Wurtz et Charles Friedel –, il refuse les théories électroniques de la liaison chimique, les électrons n'étant à ses yeux que des « poussières d'atomes » [6]. Dans cette querelle, il se montre conciliateur, considérant avant tout les techniques et les résultats plutôt que les théories elles-mêmes, faisant un parallèle entre science et art : « *Un pragmatisme amoral convient à l'amoralité de la science et de l'art. Manet peignait au pinceau et Courbet au couteau. Ils ont fait tous les deux des chefs d'œuvres. Les critiques d'art qui discuteraient de la valeur de leurs techniques seraient mal venus* » [5d]. Urbain continuera à chercher la réconciliation entre atomisme et énergétisme durant les années 1920 [7] et apportera son soutien à Perrin dans les Conseils Solvay de chimie [8].

D'un point de vue artistique, il ne s'agit pas pour Urbain de traiter de l'esthétique musicale d'une manière scientifique ; la beauté étant subjective, il considère que « *la science ne saurait traiter de ce qui change d'un homme à l'autre.* »

Mais il s'agit de tirer du caractère social de la musique des principes d'esthétique par analogie aux « sciences à principes ». En analysant la tradition, cet « ensemble de courants présentant un caractère historique » (équivalant au principe de l'invariant en science) et l'évolution musicale, il cherche ainsi à « *pénétrer le devenir de notre musique contemporaine.* » N'hésitant pas à transgresser dans ce domaine des règles plus ou moins conventionnelles, il s'appuie sur ses connaissances techniques et scientifiques pour développer des vues nouvelles en musique.

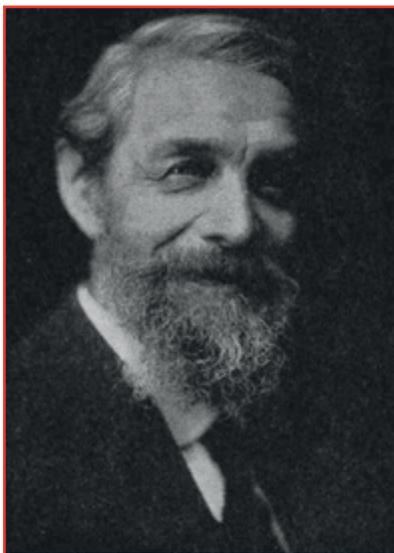
Du livre *Le tombeau d'Aristoxène*, le compositeur Henry Mesmin dira : « [il] reste un monument de claire et juste analyse, de parfaite logique. Dès l'introduction, Georges Urbain présente avec audace des vues nouvelles, sur la méthode comparée en science et en art. Se référant à ses idées scientifiques – voir

Les disciplines d'une science : la Chimie – il établit un parallélisme de démarche spirituelle entre ces deux fonctions. Ainsi en science comme en art, dit-il, il faut admettre des conventions, et le critique musical ne peut être plus difficile que le savant » [4].

La diffusion de la chimie à la frontière entre plusieurs domaines

Ces conceptions d'Urbain entre art et science, à la frontière entre plusieurs domaines, sont en phase avec les réflexions de son époque, comme celles qui président à la création de l'Institut de cinématographie scientifique (ICS) en 1930 ou encore à celle de l'Institut de biologie physico-chimique en 1927. Quelle va être l'implication d'Urbain et l'influence de ses conceptions au sein des institutions et sociétés savantes qui diffusent la chimie dans l'entre-deux-guerres ?

En 1930, la création de l'ICS [9] répond à une volonté de développer et mettre en commun l'outil cinématographique pour la science et sa diffusion. Les interactions entre la



Georges Urbain (1872-1938).
Avec l'aimable autorisation de la SCF, DR.

caméra, outil d'investigations scientifiques, l'observateur et l'objet observé sont aussi des domaines de réflexions privilégiés chez le scientifique et réalisateur Jean Painlevé, créateur de l'ICS. Il n'est donc guère étonnant de retrouver Urbain nommé président de l'ICS, en 1930, tandis que d'autres personnalités scientifiques reconnues s'engagent dans le Bureau : Arsène d'Arsonval (1851-1940), professeur au Collège de France, membre de l'Institut, en est le président d'honneur. Georges Bohn (1868-1948), maître de conférences en zoologie, est le vice-président.

Lieu de rencontre entre l'art et la science, entre cinéastes et scientifiques de divers horizons, l'ICS se situe ainsi à la frontière entre les deux domaines. Cette approche transversale de la science et cette volonté de faire se côtoyer différents domaines de pensée sont le point commun qui réunit les scientifiques présents. En tant que véritable lieu de sociabilité caractéristique de cette époque, un parallèle peut être fait avec la création de l'Institut de biologie physico-chimique (IBPC) [10]. En effet, cet établissement que Perrin codirige avec Urbain [11] fait travailler côte à côte des chercheurs de disciplines différentes sur des problèmes aux frontières les unes des autres. C'est le modèle à suivre selon Jean Perrin, qui rêve d'en généraliser le principe pour l'élaboration du futur CNRS et développe dans ce but la « croisade pour la science » auprès du public.

Dans le cadre de cette croisade, Urbain joue là encore un rôle déterminant pour la diffusion au public de la chimie. La communauté scientifique va en effet aller à la rencontre du grand public et développer une stratégie de diffusion culturelle de la science. Paul Langevin, promoteur d'une diffusion interdisciplinaire, est le personnage clé des grands projets de vulgarisation dans l'entre-deux-guerres, véritable « penseur de la culture » [12]. Le Palais de la découverte est inauguré au sein de l'Exposition internationale de Paris en 1937 et intègre cette réflexion menée sur la place de la science dans la culture [13]. Dès les premières réunions, en janvier 1935, Urbain souligne l'intérêt de faire appel aux films dans le domaine de la chimie. Il y voit une ressource moderne pour rendre attrayante cette partie de l'Exposition, et envisage la projection de films pour les applications industrielles et dans

les différents domaines de la chimie. L'enjeu est important : les expériences étant moins visuelles qu'en physique, le film est chargé de pallier cet inconvénient. « *Hautement conquérante comme la Physique, la Chimie se prête un peu moins souvent à des expériences rapides, le rôle du film cinématographique y sera donc plus grand. Nous pensons que, au total, l'attrait pour le public sera au moins égal à celui qu'aura la Physique* » [14].

Pour leur réalisation, outre les vingt-six manipulateurs et démonstrateurs indispensables, il est spécifié qu'« *un cinéma scientifique et industriel est un complément nécessaire aux démonstrations et expériences* » [14]. Le projet, coordonné par Perrin et Urbain [15], aura ainsi recours au film en chimie biologique ou au dessin animé en chimie organique. Tandis qu'un programme contenant seize films sur la chimie est projeté dans la salle de cinéma du Palais et fait salle comble [16].

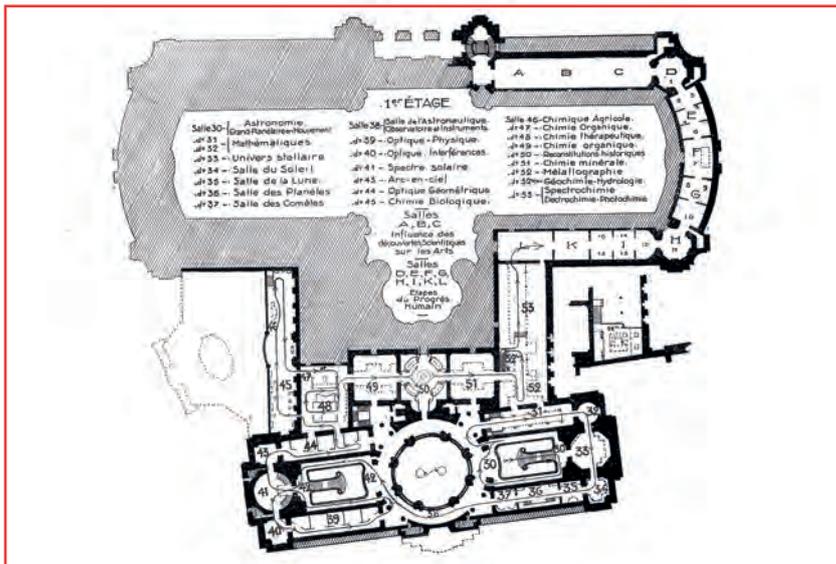
Si Urbain a donc directement une responsabilité dans la diffusion des films de chimie auprès du public de l'Exposition de 1937, de façon plus large, quelle est l'influence de ses vues artistiques et philosophiques sur son époque ? Plus particulièrement, peut-on établir un lien entre ses écrits et « *la beauté de la science pure* », selon l'expression de Jean Perrin ?

Une influence sur son époque ? De l'enjeu de la « beauté de la science pure »

À une époque où le fascisme et la violence vont s'amplifier dans les années 1930, que des milliers de savants vont fuir l'Allemagne, en France, Jean Perrin, Paul Langevin et Émile Borel, entre autres, fondent dès 1930 l'Union rationaliste [17], pour tenter de restaurer auprès du grand public la confiance en la science, une science trop souvent synonyme de danger depuis les incertitudes engendrées par la Première Guerre mondiale. Georges Urbain adhère à l'Union rationaliste dès sa création. Dès 1921 en effet, il ressent cette image de danger véhiculée par la science auprès de la société et la nécessité d'y remédier : « *Son utilité est parfois contestée sous prétexte qu'elle ne saurait améliorer que le bien-être matériel de l'homme... Je suis même tout prêt à reconnaître qu'elle peut être nuisible. Il est clair que les explosifs de guerre et les gaz asphyxiants ne font honneur ni à la science, ni à l'humanité* » [5e].

Mais de se limiter à ces conséquences néfastes serait selon lui des préjugés développés par la méconnaissance de la science ou la peur qu'elle inspire : la science apparaît alors « *sèche et rebutante* ». Il se place en tant qu'artiste tout autant que scientifique en réponse à ceux qui propagent ce préjugé : « *Si, la connaissant mieux, ils devenaient capables [d]'apprécier [la science], ils sauraient qu'un savant doit déployer au moins autant d'imagination qu'un artiste ou un poète pour faire une œuvre durable. L'œuvre de science, comme l'œuvre d'art, évoque des images. Elle a les mêmes droits à la beauté* » [5e].

Le rapport entre science et art tel qu'il est avancé par Urbain dans ses écrits de 1921 et 1924 peut être mis en parallèle avec le programme de l'Union rationaliste de 1931. À quelques années d'intervalle, ce sont en effet les mêmes termes que nous retrouvons dans ce programme qui dénonce le préjugé « *d'une science*



Brochure du Palais de la découverte, 1937. Plan du 1^{er} étage.
Section de Chimie. Président : G. Urbain ; Secrétaire : G. Champetier. Salle 45 : chimie biologique
Salle 46 : chimie agricole. Salles 47 et 49 : chimie organique (Delepine ; Ramart ; G. Dupont)
Salle 51 : chimie minérale. Salle 52bis : géochimie et hydrologie (Lemoine, Soyler ; P. Urbain)
Salle 53 : spectrochimie, électrochimie et photochimie (J. Job ; R. Audubert).

vue sous l'angle d'une sagesse froide et insuffisante,... [qui] tue la poésie et barre la route à l'enthousiasme. Nous voudrions dissiper ce préjugé. C'est ignorer la science que de lui prêter ce pouvoir desséchant. Il n'est pas de poésie plus ample ni plus profonde que celle qui se dégage de l'étude passionnée du réel » [18].

Selon Urbain, l'imagination et la création d'images sont les points communs dans la démarche scientifique et artistique qui aboutissent au même « droit à la beauté ». Perrin, en 1933, dans *La nouvelle espérance*, fait référence à cette même « beauté profonde de la science », à la poésie incluse dans la vérité scientifique [19]. Cette corrélation entre beauté, poésie et raison scientifique va dès lors être associée à la croisade pour la science pure : « Je veux maintenant vous parler de la recherche qui n'a pas d'objectif utile mais que guide seulement notre curiosité et le sens aigu d'une certaine beauté... C'est la recherche pure, désintéressée, poursuivie pour sa seule valeur artistique dont je veux maintenant démontrer la puissance » [20].

Par ce terme de « science pure », Perrin prend parti pour une recherche dite de nos jours « fondamentale » ; située en amont de toute préoccupation utilitaire, conçue comme un art et ressentie comme une véritable passion, la poésie issue de la science et de la connaissance offrant la « joie la plus pure et la plus complète. » Pour l'Union rationaliste, il s'agit de « faire connaître notre idéal » et « le faire aimer » dans une réévaluation du rôle social du savant [21]. Mais le but de cette comparaison entre art et science diffère chez Perrin, Langevin et Urbain. Pour Perrin, la science pure, en tant qu'art, n'admet aucun compromis, la beauté et la pureté étant les garants de l'indépendance de la science vis-à-vis du politique. Langevin ne considère pas la science pour elle-même, mais comme guide pour l'humanité, comme moyen pour accéder à la paix, en répandant l'esprit et la méthode de l'esprit scientifique dans le grand public. Urbain, quant à lui, ne cherche pas à diffuser la science, il ne croit pas non plus à la possibilité d'unité de la connaissance. Son intérêt est de tirer de l'analogie entre savant et artiste des « conséquences d'ordre pratique » relativement à la musique. Il conçoit l'art et la science comme différentes visions du monde, complémentaires : « Le savant et l'artiste créateurs sont, d'un point de vue intellectuel, des frères jumeaux. L'un et l'autre s'efforcent de donner des images du monde, et ils créent des synthèses à partir de données analytiques. Ils mettent en œuvre, pour y parvenir, la logique, l'intuition, l'expérience et une dose plus ou moins grande de sensibilité. Ce sont des hommes semblables qui cultivent des domaines distincts. La science est un reflet du monde extérieur, et l'art, surtout l'art musical, est un reflet du monde intérieur. L'ensemble de ces deux mondes est tout l'univers » [22].

Par comparaison, la référence à l'art et à la beauté, dans les propos de Perrin, semblent plus tenir d'un discours idéologique visant à rendre la science plus humaine aux yeux du public de l'Exposition, dans un but d'organisation de la recherche. Il s'agit d'une vision du monde plus restrictive. Cela pousse à s'interroger sur l'influence qu'a pu avoir Urbain sur ses contemporains, et notamment sur son ami Perrin.

Tous deux professeurs à la Sorbonne, Urbain et Perrin collaborèrent comme codirecteurs à l'Institut de biologie physico-chimique et contrôlèrent de 1928 à 1940 (directement ou indirectement) les deux plus importantes sociétés savantes de chimie : la Société Chimique de France et celle de Chimie-Physique. Quelles sont donc les relations au cœur de ce que certains nomment le « tandem Perrin-Urbain » ? Nous avançons l'idée que si Urbain admire Perrin pour sa personnalité



Médaille Paul Langevin réalisée par Georges Urbain.
ESCP, DR.

et sa formation scientifique, Perrin admire Urbain pour sa culture et sa réflexion liant l'art et la science. Leur rencontre, au mariage de leur ami commun Paul Langevin, se fait déjà sous le sceau de l'art : « Là, j'ai vraiment compris cette prodigieuse richesse de ta nature, dont j'avais l'intuition dès l'abord. Je t'ai entendu interpréter Wagner, et jouer ta propre musique ; [...] j'ai admiré le buste de ton père, que devaient suivre bientôt celui de Friedel, celui aussi qui m'a stylisé, comme tu dis, en « Dyonisos » (sic), et tant d'autres qui ont prouvé que tu aurais pu être aussi grand sculpteur que tu fus grand chimiste : je t'ai connu aussi comme poète et garde encore un sonnet dédié au « Ciseleur des atomes légers » » [23].

Cette admiration de Perrin pour Urbain conforte l'idée que Perrin, sensible à l'art, se soit inspiré des réflexions d'Urbain dans le rapport de l'art à la science afin de mener à bien la « croisade ». Ami et collègue, Urbain se présente donc comme un allié inconditionnel de Perrin, liés par la « beauté de la science pure ».

Conclusion

Par sa double approche, tout à la fois artistique et scientifique, Georges Urbain nous apporte un regard singulier sur son époque. Dans le cadre de sa théorie sur la « science sensualiste », il pointe l'aspect humain et donc faillible des perceptions à l'origine de la science expérimentale, soulignant la nécessaire prise en considération de l'interaction entre l'objet étudié et l'observateur. Par ailleurs, ses réflexions philosophiques sur le rapport entre art et science permettent de mieux comprendre son positionnement à l'époque dans la querelle entre atomistes et énergétistes.

Il ne cherche pas à séparer le savoir de l'émotion : l'émerveillement et la curiosité en sont pour lui les racines communes. Dans le cadre de la diffusion de la science dans l'entre-deux-guerres, ses conceptions semblent influencer son ami Jean Perrin : la « beauté profonde de la science » sera le credo de la « croisade pour la science pure » qui mènera à la création du CNRS. Mais chez Perrin, ces propos relèvent avant tout d'un discours de séduction visant à rendre la science plus humaine aux yeux du public. La poésie tend à soutenir une vision unique du monde, la vision scientifique.

Or pour Urbain, la comparaison entre art et science, thématique à nouveau actuelle, est l'occasion de revendiquer la coexistence d'une multiplicité de regards, comme autant de langages complémentaires permettant d'explorer différentes facettes du monde. La vision artistique côtoie la vision scientifique, toutes deux se renforçant mutuellement dans un but de description, de compréhension du monde.

La chimie entre les deux guerres : l'affirmation d'une profession dans le contexte d'une profonde recomposition industrielle

Faisant suite au colloque organisé à Nantes en 2011, dont sont issus les sept articles parus dans *L'Actualité Chimique* d'octobre 2013 à juin 2014 sous l'intitulé « Les chimistes, leurs institutions et leurs sociétés savantes entre les deux guerres », le Club d'Histoire de la Chimie (SFC) a organisé un nouveau colloque sur cette période historique dans le cadre du congrès de la Société d'histoire des sciences et des techniques (Lyon, 29-31 avril 2014). Onze communications ont été présentées*.

L'après première guerre mondiale a été un déclencheur pour la professionnalisation de la chimie en France, parallèlement à une recomposition importante de l'industrie chimique dans un cadre économique profondément modifié. Les organisations professionnelles et la formation des chimistes, notamment dans les écoles d'ingénieurs, ont constitué un premier volet du colloque.

La place de la région lyonnaise dans ces différentes évolutions scientifiques et industrielles a ensuite été mise en valeur avec l'étude d'entreprises et de filières industrielles en relation avec des recherches académiques.

D'autres aspects régionaux (Nantes, Bordeaux, Toulouse) ont enfin été abordés, soulignant les réorganisations intervenues dans la chimie après la guerre.

Gérard Emptoz et Danielle Fauque

* Pour le programme détaillé, voir l'annexe 1 de la *Lettre du Club d'histoire de la chimie* n° 57, février-mars 2014, p. 4-5 (www.societechimiquedefrance.fr/IMG/pdf/chc-lettre_no57.pdf).

Notes et références

- [1] Urbain G., Réponse de M. le Professeur Urbain à M. le Président et collègues, Hommage à Georges Urbain, Allocutions prononcées à la Maison de la Chimie, le 10 juin 1938, Archives Académie des sciences (dossier G. Urbain).
- [2] Claro-Gomes J.-M., Georges Urbain (1872-1938) : chimie et philosophie, thèse de doctorat, Université de Paris-10, 2003 ; Claro-Gomes J.-M., Georges Urbain (1872-1938), *Itinéraires de chimistes, 1857-2007. 150 ans de chimie en France avec les présidents de la SFC*, L. Lestel (coord.), EDP Sciences, 2007, p. 525.
- [3] Urbain G., *Le tombeau d'Aristoxène, essai sur la musique*, Éd. Gaston Doin, Paris, 1924.
- [4] Mesmin H., G. Urbain, compositeur, *Hommage à G. Urbain, Allocutions prononcées à la Maison de la Chimie, le 10 juin 1938*, Archives Académie des sciences (dossier G. Urbain).
- [5] Urbain G., *Les disciplines d'une science*, Éd. Gaston Doin, Paris, 1921, a) p. 1 ; b) p. 7 ; c) p. 20 ; d) p. 30 ; e) p. 6-7.
- [6] Les raisons de ce refus, précise J.M. Claro-Gomes, semblent avoir leur source dans le désir d'unification de la chimie et de la physique qui motive Urbain, l'énergétisme étant à cet égard plus séduisant et vu comme un

- instrument permettant de faire converger ces deux disciplines. Voir Claro-Gomes J.M., *op. cit. in* [2], p. 191.
- [7] Alors même que la controverse semble close vers 1913 par une victoire de l'atomisme.
 - [8] Dans les « Conseils Solvay » de chimie de 1922, 1925 et 1928, notamment au sujet de la théorie radiative de la réactivité, émise par Perrin en 1915 et reconnue fautive à l'étranger dès 1925.
 - [9] L'ICS, association loi 1901, est déclarée le 24 décembre 1930 au *Journal officiel*.
 - [10] Morange M., L'Institut de biologie physico-chimique de sa fondation à l'entrée dans l'ère moléculaire, *La revue pour l'histoire du CNRS*, 2002, 7 (<http://histoire-cnrs.revues.org/538>).
 - [11] Et avec les physiologistes Pierre Girard, André Mayer et le chimiste André Jacob.
 - [12] Bensaude-Vincent B., *Langevin, science et vigilance*, Belin, 1987, p. 149.
 - [13] Langevin P., Le problème de la culture générale, *La Pensée et l'action*, Éditeurs français réunis, Paris, 1950, p. 239, texte publié en préface à *L'Évolution humaine des origines à nos jours*, Quillet, Paris, 1934.
 - [14] Archives du Palais de la découverte, Archives nationales, Centre de Fontainebleau, carton 66 : « Palais de Découverte, 4^e section : Chimie », non daté.
 - [15] La commission d'organisation pour la section de chimie se compose en outre de : M. Delépine, membre de l'Institut ; P. Lebeau, professeur à la Faculté de pharmacie ; G. Bertrand, professeur à la Faculté des sciences et membre de l'Institut ; A. Damiens, professeur à la Faculté de pharmacie ; P. Jolibois, professeur à l'École des mines ; P. Ramart-Lucas, professeur à la Faculté des sciences ; G. Champetier, assistant du directeur du service de chimie à l'IBPC.
 - [16] Sur les films présents, voir Riou F., Le cinéma à l'Exposition internationale de 1937 : un média au service de la recherche scientifique, 1895, *Revue de recherche sur l'histoire du cinéma*, oct. 2009, 58, p. 31.
 - [17] L'Union rationaliste, mouvement combatif, est fondée le 10 mars 1930 par Henri Roger. Perrin et Langevin y adhèrent dès sa création. Douze personnes figurent alors au comité d'honneur, dont des scientifiques amis de ces derniers : Émile Borel, Paul Appel, Georges Urbain et Louis Lapicque.
 - [18] Manifeste « Notre programme », premier numéro des *Cahiers Rationalistes*, publié par l'Union rationaliste, janv. 1931, 1, p. 1.
 - [19] Perrin J., La nouvelle espérance, *La science et l'espérance*, PUF, 1948, p. 133.
 - [20] Perrin J., extrait d'une conférence donnée en décembre 1935 à l'Union rationaliste, Archives nationales, F/12/12306, « Procès-verbaux et comptes rendus des réunions des comités de classes 1 à 9 ».
 - [21] *Programme de l'Union rationaliste*.
 - [22] Urbain G., *op. cit. in* [3], p. IX.
 - [23] Perrin J., allocution au jubilé de G. Urbain, « Georges Urbain », in *La science et l'espérance, op. cit. in* [19], p. 91.



Florence Riou

est chercheuse associée au Centre François Viète d'épistémologie et d'histoire des sciences et des techniques de Nantes*. Elle a soutenu en 2008 une thèse sur « la diffusion des sciences par le cinéma, des précurseurs à Jean Painlevé ».

- * UFR Sciences et Techniques, Centre François Viète, 2 rue de la Houssinière, BP 92208, F-44322 Nantes Cedex 3.
Courriel : flo-riou@wanadoo.fr

La SCF sur Facebook, vous aimez ?
Parlez-en autour de vous,
et invitez vos amis et collègues à nous rejoindre !

www.facebook.com/SocieteChimiquedeFrance?ref=profile

Les déchets plastiques en mer, un « 7^e continent » ?

Roselyne Messal

Chaque seconde, 80 à 120 tonnes de déchets (sur les 4 milliards produits annuellement) finissent en mer, dont une grande partie est constituée de matières plastiques. Objets flottants ou microparticules, ils se déposent sur les plages, se dispersent en mer, se retrouvent sur les fonds marins. Quels effets ont-ils sur l'homme et son environnement ? Connaître pour pouvoir agir, c'est un nouveau défi relevé par plusieurs organismes de recherche publique, comme principalement l'Ifremer (Institut de recherche pour l'exploitation de la mer).

Quels sont ces déchets et d'où viennent-ils ?

La production mondiale de plastiques augmente chaque année (288 millions de tonnes, soit + 2,9 % en 2012), en lien direct avec l'accroissement de la population, avec pour conséquence l'augmentation de la quantité de déchets. Pourquoi ce succès ?

Apparus dans les années 1950, ces matériaux pluriels répondent à de multiples usages et sont aujourd'hui incontournables. Du fait de leurs qualités particulières – hygiène, résistance aux chocs et aux variations de température, facilité de mise en forme... et imputrescibilité (une qualité, mais un défaut majeur !) –, on les croise à chaque instant de notre vie quotidienne, en particulier sous la forme d'emballages, qui représentent actuellement 66 % des déchets plastiques.

La production mondiale de sacs plastiques a explosé dans les années 1970, jusqu'à atteindre 4-5 milliers de milliards par an... En France, 16 milliards de sacs étaient encore distribués en 2000, avec, depuis, une baisse spectaculaire de 90 %, soit 1 milliard quand même !

Ni collectés ni recyclés, la plupart des déchets finissent par emprunter le chemin des égouts, des rivières... poussés par les pluies, les courants, les vents... (voir encadré 1). **Les apports terrestres représentent ainsi 80 % des déchets qui arrivent en mer.**

À côté de la négligence, des catastrophes naturelles (crue, tsunami, glissement de terrain de décharge en bord de littoral...), des accidents (perte de conteneurs – 150 t de granulés plastiques industriels furent retrouvés sur les plages de Hong Kong en juillet 2012), c'est l'activité économique qui reste le principal vecteur (industries, activités urbaines et portuaires, zones de pêche, décharges à ciel ouvert, tourisme...). On a constaté par exemple une augmentation de 75 % du volume des déchets en Méditerranée en période estivale près des zones touristiques.

Quant aux déchets marins, on constate qu'ils sont majoritairement d'origine maritime en Atlantique (zone de pêche et de transports maritimes) et terrestre en Méditerranée (tourisme, urbanisation). Six millions de tonnes de débris sont rejetés chaque année par les navires (dont des containers...).

Encadré 1

Quels déchets ?

Inventaire réalisé en 2013 sur 100 m d'une berge entièrement nettoyée un an auparavant, située à 80 km en amont de l'estuaire de la Seine :

- 139 bouteilles en plastique
- 20 bouteilles en verre
- 1 654 capsules et bouchons en polyéthylène
- 2 681 emballages alimentaires ou de confiserie
- 89 gobelets et 254 pailles
- 900 bâtons de sucettes
- 91 briquets et 189 stylos
- 193 jouets en plastique
- 19 balles de tennis en caoutchouc
- 11 ballons de baudruche
- 2 980 cotons-tiges
- 204 médicaments dont 100 unidoses
- 71 seringues ou aiguilles (dont stylos à insuline)
- 85 applicateurs de tampons et 24 préservatifs
- ... et plus de 5 000 morceaux de plastique d'origines inconnues !

Source : SOS Mal de Seine 2013-Ospar (extrait de [1]).

Dans la mer du Nord, 90 % des débris rencontrés sont des emballages en plastique (sacs, bouteilles).

En fonction de leurs propriétés et de leur épaisseur, ces déchets ont des durées de vie diverses : 1 à 5 ans pour le fil de nylon, 1 à 20 ans pour les emballages plastiques fins, jusqu'à 450 ans pour les bouteilles plastiques et 600 ans pour les fils de pêche en nylon.

Visibles à l'œil nu, bouteilles et sacs plastiques, morceaux de polystyrène... constituent des macrodéchets qui, sous l'effet de l'érosion et de la dégradation (favorisée par la lumière et l'oxygène), finiront par se transformer en microparticules (taille inférieure à 5 mm). On rencontre en grand nombre d'autres sources de microdéchets tels les petits filaments issus du lavage des textiles synthétiques.

Les déchets d'origine industrielle ne représentent que 10 % et sont principalement constitués de granulés plastiques destinés à être transformés. Ces perles de plastiques, des microdéchets d'un demi-centimètre de diamètre, de formes et de couleurs variées, que l'on retrouve sur toutes les mers du globe, sont surnommées par l'Ifremer « les larmes des sirènes », en référence aux perles de nacre et aux morceaux de verre multicolores érodés par les vagues que l'on trouvait autrefois sur les plages... (figure 1).

Où les retrouve-t-on ?

La dispersion des plastiques en mer est devenue un problème mondial. Alors que les polychlorures de vinyle ont une densité supérieure à celle de l'eau de mer et coulent



© Laurent Colasse.

Figure 1 - Granulés industriels perdus sur une plage de Normandie : des « larmes de sirènes »...



© F. Gaigani/J.H. Heoq.

Figure 2 - Diversité des microparticules en mer Méditerranée.

immédiatement, les microdébris de polyéthylène, de faible densité, restent en surface. Selon les estimations, 30 à 40 000 tonnes de microplastiques flottent sur les océans et peuvent parcourir de longues distances, parfois des milliers de kilomètres d'un continent à l'autre, au gré des courants, vents et marées (figure 2).

Au début des années 2000, des alertes ont été lancées après la découverte de zones d'accumulation de déchets plastiques flottants, ce que certains appellent le « 7^e continent ». Pour l'Ifremer, c'est un abus de langage. La zone de l'Atlantique nord, la mieux connue des scientifiques, fait état de seulement 1 100 t de microplastiques. Dans le Pacifique nord, on estime la présence de microplastiques à quelques cm² par hectare.

Il existe cependant des zones d'accumulation, comme en Méditerranée, une zone plus exposée aux déchets marins de par ses courants et marées faibles, et une urbanisation et un tourisme importants. Les plastiques y représentent 70 à 80 % des déchets observés sur le littoral, en surface et sur les fonds, avec des différences notables selon les zones : « Dans certains golfes d'Afrique du Nord, par exemple, les pêcheurs arrivent à pêcher 50 % de déchets et 50 % de poissons ! » [1], alors que dans le golfe du Lion, on note une baisse de 20 %.

En réalité, aucune étude n'est suffisamment complète actuellement pour donner des réponses sur les quantités globales de microplastiques flottant en mer dans le monde ou de macrodéchets sur les plages

© Michel Gunther/WWF-Canon.



© Ifremer/F. Gaigani.

Figure 3 - Plongée en submersible de l'Ifremer par mille mètres de fond, à 20 km au large de la Méditerranée française.

ou les fonds marins. « Les densités sur les fonds varient de 0 à 150 000 objets au km² et les densités de microplastiques varient en surface de 0 à 900 000 objets au km² » [1]. Les vitesses de dégradation *in situ*, estimées en laboratoire, sont également mal connues.

Et il reste encore beaucoup à découvrir sur l'accumulation des déchets dans les fosses abyssales où leur temps de dégradation est d'autant plus long qu'il y manque lumière et oxygène (figure 3).

Quels effets sur l'environnement ?

Le premier effet est un impact visuel : déchets échoués sur les bords des rivières, des plages, amas d'objets flottants en mer... Mais plus sévères sont certains effets moins directement évidents. Les filets dits « fantômes », abandonnés ou perdus accidentellement, très résistants, sont une cause de mortalité importante ; les associations estiment à 100 000 le nombre de mammifères marins et à un million celui des oiseaux qui meurent par étranglement ou étouffement dans ces pièges à travers le monde (figure 4). L'ingestion de déchets est une autre cause de mortalité, qui affecte environ 660 espèces. Les oiseaux de mer piquent les morceaux de plastique flottants, et les tortues les confondent avec des méduses.



Figure 4 - Tortue étranglée dans un filet.



Figure 5 - Coupe histologique de glande digestive d'huître creuse *Crassostrea gigas* contenant des billes de polystyrène fluorescent.

Les grands cétacés à fanons filtrent l'eau de mer, ingérant d'importantes quantités de microplastiques. Les mollusques, telles les moules, filtrent des m³ d'eau contenant des micro-particules (figure 5). Des microdéchets peuvent être ingérés également par le plancton, les invertébrés ou les poissons de petites tailles. Le taux d'ingestion reste cependant très anecdotique pour les espèces consommées (moins de 0,01 % des poissons commerciaux) et on n'en retrouve pas trace dans nos assiettes. Car si les microdéchets peuvent bloquer les systèmes digestifs et respiratoires de certains individus, ils ne sont pas digérés du fait de l'absence d'équipement enzymatique adapté.

En raison de leurs composants (plastifiants, additifs) et du possible relargage de contaminants adsorbés, les plastiques sont suspectés par ailleurs d'être une source de contamination des eaux. Mais en réalité, les concentrations mesurées sont trop faibles pour que les substances relarguées lors de leur dégradation constituent un risque important de toxicité. Le taux de contaminants chimiques (PCB, pesticides...) reste limité, mais plus dangereux pour les organismes marins filtreurs qui les accumulent.

Pour François Galgani (Ifremer), **le vrai danger est l'altération de l'équilibre des écosystèmes** engendrée par le transport d'espèces invasives sur de longues distances. « *Comment ne pas considérer comme un problème majeur l'arrivée de 54 espèces nouvelles sur les côtes du Canada, fixées sur des débris de grosse taille, ayant circulé des mois dans le Pacifique nord après le tsunami de 2011 au Japon ?* » [1]. Certains déchets sont en effet d'efficaces supports flottants pour des bactéries (certaines pathogènes pour les organismes marins comme pour l'homme, les *vibriosis* par exemple), des unicellulaires ou des invertébrés, vers, insectes..., capables de s'acclimater dans une zone autre que leur biotope d'origine, notamment en relation avec le changement climatique. « *La découverte récente de l'insecte Halobates sericeus vivant sur des plastiques flottants dans le Pacifique en est une parfaite illustration. Une étude réalisée*



Figure 6 - Algues ayant colonisé un fragment de microplastique.

en 2005 a démontré que la propagation des espèces dans les eaux subtropicales a quasiment doublé du fait des débris. Elle a triplé dans les eaux tempérées » [1].

Peu d'études ont été menées sur ce thème, mais le risque est bien là, avec ses conséquences environnementales, sanitaires et économiques (algues invasives, bactéries dans les zones ostréicoles ou de pisciculture...) (figure 6).

Alors, que faire pour remédier au problème ?

Les impacts sociaux et économiques se chiffrent en millions d'euros et les solutions sont difficiles à mettre en œuvre (barrages sur rivière, filets en mer, nettoyage des chaluts, des plages, opérations de ramassage, bénévolat...). La plupart des ports n'ont pas encore d'infrastructure pour récupérer les déchets et certains équipements de pêche obsolètes. Des programmes de surveillance locale des déchets ont été mis en place, mais la surveillance des océans à l'échelle mondiale est complexe et encore plus coûteuse. Trois techniques satellitaires sont actuellement à l'étude pour suivre le devenir des macrodéchets en mer (les microplastiques ne peuvent être concernés par cette méthode).

Une bonne partie des déchets se trouve dans des zones internationales, le problème est donc à régler à l'échelle mondiale. Nombre de lois, conventions et engagements ont déjà été mis en place : loi sur les déchets en France du 15 juillet 1975 (complétée en 1992), loi sur l'eau du 3 janvier 1992, politique d'application de la directive Habitats réseau Natural 2000 ; Grenelle de l'environnement, Grenelle de la mer ; conventions MARPOL de Londres et de Bâle (qui interdisent le rejet en mer de tous déchets, notamment en matière plastique) ; directive européenne Stratégie Marine (2008) ; engagements d'Honolulu, de Berlin ; Conférence environnementale de 2013...

Les industriels du plastique se sont organisés pour réagir ensemble et se sont engagés dans des actions de sensibilisation. À l'initiative des industriels européens, ils ont signé en mars 2011 un engagement mondial, la **Déclaration de Hawaï**, avec pour objectifs de mieux comprendre et traiter la question (voir encadré 2). À ce jour, 58 membres, 34 pays

Encadré 2**L'industrie des plastiques s'engage****La Déclaration de Hawaï et ses six axes stratégiques :**

- développer les partenariats public/privé visant à prévenir les déchets marins ;
 - soutenir la recherche pour mieux comprendre le problème et identifier des solutions ;
 - promouvoir l'élaboration de politiques globales et une meilleure application des lois existantes ;
 - diffuser les « bonnes pratiques » en matière de gestion des déchets plastiques ;
 - augmenter les capacités de recyclage et de valorisation énergétique des déchets plastiques ;
 - éviter la dispersion de granulés plastiques dans l'environnement (production et logistique).
- www.marinelittersolutions.com

se sont engagés et plus de 140 projets sont en cours (47 membres, 27 pays, 100 projets en 2011). Les actions sont organisées en trois zones (Amérique, 35 % ; Europe/Moyen-Orient/Afrique, 40 % ; Asie/Pacifique, 25 %).

Dans le cadre du soutien aux efforts de recherche, on peut citer le programme mondial de recherche sur les microplastiques, GESAMP GT 40, financé à hauteur de 320 000 euros par PlasticsEurope et l'American Chemistry Council (ACC). Démarré en février 2012, GESAMP GT 40 (groupe de travail du « Group of experts on the scientific aspects of marine environmental protection ») doit permettre une évaluation des sources des déchets, du comportement et des effets des microplastiques dans l'océan, avec un plan d'action mené en trois phases (voir encadré 3). Après les ateliers de Paris (2012), Londres (2013) et Séoul (2014), un rapport sera présenté à Barcelone en novembre prochain (CIO-UNESCO).

Plusieurs projets de ce type existent dans le monde, fournissant des informations précises sur l'état des lieux. D'après PlasticsEurope, « *le bilan actuel n'est pas si catastrophique [...] car malgré une production en hausse, la quantité de déchets n'augmente pas.* »

Comme la plupart des déchets ne devraient pas arriver en mer, il est donc essentiel de les collecter sur terre. Les déchets plastiques, qui sont pratiquement 100 % valorisables, soit par recyclage, soit par valorisation énergétique, constituent une ressource renouvelable mal exploitée à ce jour. Rappelons qu'en Europe, les industriels de la filière se sont lancés le défi d'atteindre « zéro déchet plastique en décharge en 2020 » [2].

En France, il y a une réelle prise de conscience politique qui se traduit sur la feuille de route de la Conférence environnementale 2013 où figurent : le déploiement pour les emballages ménagers de la collecte de tous les plastiques (dont les films et barquettes) afin d'en permettre le recyclage ; la possibilité pour l'État de limiter la mise en décharge aux seuls flux non valorisables (ce qui revient à interdire la mise en décharge des plastiques) ; le développement de filières pérennes de marchés capables d'utiliser des matières plastiques recyclées. Il reste néanmoins beaucoup de progrès à faire [2], la valorisation des déchets plastiques n'atteignant en 2012 que 62 % en France.

Les industriels du plastique européens sont également impliqués dans des actions de sensibilisation et d'éducation, comme « **Vacances propres** », un programme créé en 1971 à l'initiative des entreprises pour lutter contre les déchets sauvages et les incivilités, qui bénéficie de l'appui des collectivités locales, et bien sûr des citoyens qui ont adopté les gestes propres, répondant au slogan : « Notre environnement n'est

Encadré 3**GESAMP (GT 40) : un programme mondial de recherche sur les microplastiques****Plan d'action 2012-2015 en trois phases :**

1. Estimation des apports en microplastiques (granulés, abrasifs, produits de beauté et d'hygiène) et plastiques (principaux types de polymères), incluant l'élaboration d'une méthodologie, l'utilisation de données de suivi, l'identification des vecteurs (concentration de populations, couloirs de navigation, zones touristiques).
2. Modélisation des zones de transport, de répartition et d'accumulation.
3. Examen des procédés (physiques, chimiques et biologiques) qui gouvernent le rythme de fragmentation et de dégradation, avec estimation des comportements à long terme.
4. Poursuite de la modélisation en utilisant les informations des étapes 1 et 3.
5. Absorption par le biote et impacts biologiques.

• www.gesamp.org

Encadré 4**« Vacances Propres »**

• « Vacances Propres », c'est en 2013 : 30 000 t de déchets collectés ; 2 468 000 sacs utilisés par les collectivités et les manifestations partenariales nationales et locales (tour de France, village du Vendée Globe, Transat Jacques Vabre...); plus de 1 200 nouveaux collecteurs installés pour atteindre le chiffre d'environ 30 000 ; 1 000 communes et communautés de communes, sites de vacances ou de loisirs partenaires du programme ; 20 600 affiches visibles partout en France durant l'été.

• C'est aussi l'opération « **Je navigue, je trie** », lancée en juin 2013 : 25 ports participants labellisés pavillon bleu (Oustreham, Paimpol, Morgat, La Rochelle, Argelès-sur-Mer, Dieppe, Saint-Denis d'Oléron, Le Lavandou, Saint-Pierre des Embiez, Le Grau du Roi...), 90 000 plaisanciers sensibilisés (juillet-août), 40 000 flyers distribués, 36 000 sacs pour les ordures ménagères, 34 000 cabas réutilisables pour le tri des déchets recyclables.

• « Vacances Propres » est membre du Clean Europe Network, le « réseau européen de la propreté », créé le 18 mars 2013 à Bruxelles et qui rassemble des associations européennes leaders dans la prévention des déchets sauvages, des autorités locales européennes et des représentants de l'industrie.

• www.vacancespropres.com

pas une poubelle » (encadré 4). Si on estime que 4 millions de personnes ont été sensibilisées, on trouve encore malgré tout plus de 33 000 t de déchets sauvages en France (déchets collectés à la main) : près de 20 000 t sur les routes (en particulier juste après la sortie des stations-service !), 10 000 t dans les cours d'eau (rives et flottaison), 3 000 t sur les plages, 350 t en montagne... Et ces chiffres sont probablement en dessous de la réalité. Parmi ces déchets : 41 % de mégots (quoique dégradables, un autre fléau !), 12 % de

chewing-gums, 9 % d'emballages pour boissons (plastiques, 3,6 % ; cannettes, 3,6 %).

En complément, l'opération « **Je navigue, je trie** », soit « Rien par-dessus bord, tous mes déchets au port ! », parrainée par la navigatrice Catherine Chabaud, a permis de constater en 2013 une augmentation du tri de 80 % dans les 25 ports concernés. En 2014, 100 % des ports inscrits au programme sont motivés pour renouveler l'opération.

Une dernière action concerne la lutte contre la dispersion des granulés plastiques. Lancée en 1992 par les Américains, suivie par le Canada en 1999 puis par les Britanniques en 2009, l'opération « **Clean Sweep®** » a pour objectif « zéro perte de granulés » à toutes les étapes de la filière (production, transport, transformation). En France et en Europe, dans les usines et les ateliers, le balai est là pour remplacer le nettoyage à l'eau... ! [3].

Pourrait-on envisager moins d'emballages plastiques de la part des industriels de l'agroalimentaire ou des cosmétiques... ? On peut surtout imaginer d'accroître la recherche de nouveaux polymères. Les années à venir devraient favoriser l'utilisation pour les emballages de polymères biodégradables, souvent d'origine naturelle comme l'amidon, la cellulose, l'acide polylactique. Les biopolymères, transformés chimiquement, le sont fréquemment pour conserver certaines propriétés et ne sont alors dégradables que dans des unités de compostage industriel. « *Pour la mer, il reste l'espoir [de concevoir] des matériaux originaux [...] se dégradant rapidement, sans conséquence [pour l'environnement, tout en gardant leurs propriétés d'usage]. Un prochain prix Nobel pour un plastique dégradable dans l'eau de mer !* » [1]. Ou encore des bactéries qui s'attaqueraient aux matières plastiques, comme celles qui sont capables de dégrader jusqu'au bitume des routes ? Une étude originale sur la dégradation de trois classes de plastiques les plus retrouvées en mer – polyéthylène téréphtalate (PET), polyéthylène (PE) et polypropylène (PP) – est en cours au Laboratoire d'océanographie microbienne de Banyuls-sur-Mer (projet PlasticMicro) [4]. À noter qu'une nouvelle mission de Tara, « Tara Méditerranée », vient d'être lancée, avec un volet scientifique sur la « pollution plastique » coordonné par le laboratoire d'océanographie de Villefranche-sur-Mer (CNRS/UPMC) (quantification et qualification des déchets, étude des polluants organiques) [5].

Le problème des déchets marins est d'une grande complexité et chacun y a un rôle à jouer. Les scientifiques participent à l'amélioration des connaissances et à l'identification de possibles solutions. L'engagement des politiques est nécessaire pour atteindre plus rapidement les objectifs en matière de gestion des déchets plastiques (collecte, tri et traitement). Une attitude citoyenne de « bonnes pratiques » par l'ensemble des industriels concernés (producteurs et utilisateurs de matières plastiques) et leur participation généralisée aux actions collectives de prévention, tous ces efforts devraient permettre une réduction significative des dégâts.

Cependant, comme le déplore François Galgani, « *la négligence reste le pire des maux* ». L'éducation et la sensibilisation du public sont donc primordiales pour préserver notre environnement, notamment nos océans.

Source : Conférence de presse, Paris, 3 avril 2014, avec François Galgani, responsable de projets à l'Ifremer, auteur d'*Une mer propre, mission impossible* [1], et Michel Loubry, directeur général Région ouest Europe, PlasticsEurope.

Références

- [1] Galgani F., Poitou I., Colasse L., *Une mer propre, mission impossible ? 70 clés pour comprendre les déchets en mer*, Éditions Quae, 2013.
- [2] Messal R., La valorisation des déchets plastiques en Europe et en France : encore des progrès à faire..., *L'Act. Chim.*, 2013, 371-372, p. 12.
- [3] www.opcleansweep.fr
- [4] http://lomic.obs-banyuls.fr/fr/axe_4_ecotoxicologie_et_ingenierie_metabolique_microbienne/plasticmicro.html
- [5] Expédition à suivre sur www.taraexpeditions.org



Roselyne Messal

est journaliste à *L'Actualité Chimique**.

* SCF, 28 rue Saint-Dominique, F-75007 Paris.
Courriel : redaction@lactualitechimique.org
www.lactualitechimique.org



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

Le polonium, un poison frais (période 138 j !)

Éric Ansoborlo

Le polonium a été découvert en 1898 par Pierre et Marie Curie, qui cherchaient la cause de la radioactivité résiduelle de la pechblende, un minerai d'uranium, après extraction des principaux constituants. Cette découverte, controversée à l'époque – des scientifiques allemands, dont W. Marckwald, ont proposé les noms de « bismuth activé » et de « radiotellurium » –, valut à Marie Curie le prix Nobel de chimie en 1911 et le nom de son pays d'origine, la Pologne, fut attribué à cet élément.

Le polonium est le deuxième élément du tableau périodique après le technétium dont tous les isotopes sont radioactifs ; il possède une quarantaine d'isotopes de masse atomique variant entre 187 et 227. Sept isotopes sont présents dans les trois familles radioactives naturelles : celle du thorium 232 (Po-212, Po-216), de l'uranium 235 (Po-211, Po-215) et de l'uranium 238 (Po-210, Po-214, Po-218). Aucun de ces isotopes ne s'accumule dans les milieux naturels en raison de leur courte période radioactive. Po-210

est le plus abondant dans la nature à l'état de traces avec une période de 138,4 jours. Sa concentration dans les différents milieux est faible ; cependant, son activité spécifique très élevée ($1,66 \times 10^{14} \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$) souligne son importance en protection radiologique. Dans l'environnement, une bioaccumulation du polonium (quelques Bq/kg) peut se produire dans les feuilles de tabac, soit par la voie racinaire due à la fixation du polonium (descendant de U-238) sur les engrais phosphatés, soit par dépôt sur les feuilles (descendance du radon, Rn-222) : c'est elle qui peut être à l'origine de l'exposition des fumeurs (une cigarette contient en moyenne 10 à 20 mBq de Po-210).

Po-210 peut également être produit artificiellement : soit par bombardement neutronique de Bi-209 dans un réacteur nucléaire – Po-210 est obtenu par désintégration bêta de Bi-210 avec une période de cinq jours – ; soit par bombardement alpha (37 MeV) de Bi-209, générant At-210 qui se transforme en Po-210 par émission bêta. En 2012, le laboratoire français SUBATECH à l'École des mines de Nantes a produit quelques picogrammes de Po-210 sur le cyclotron ARRONAX par cette dernière technique (thèse de A. Younes, 2013).

L'élément chimique est assez mal connu. Le polonium est un élément du groupe VI des chalcogènes (O, S, Se, Te, Po) du tableau périodique : il a une température de fusion basse (254 °C) et est volatil dès 55 °C. Il possède plusieurs états d'oxydation (- II, + II, + IV, + VI), l'état tétravalent étant le plus stable en solution. Il forme des sels solubles avec les chlorures, les bromures, les acétates, les nitrates et d'autres anions inorganiques. Une propriété importante du point de vue biologique est sa tendance à s'hydrolyser et à former des colloïdes (particules en suspension dans un fluide).

Après ingestion de polonium *via* l'alimentation, le coefficient d'absorption intestinal (f_1) retenu par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) est de 0,5 pour un adulte du public. Une fois dans le sang, Po-210 se lie à l'hémoglobine des globules rouges, ainsi qu'aux protéines plasmatiques, puis est distribué rapidement dans les tissus cibles mous : foie (30 %), reins (10 %), rate (5 %), moelle hématopoïétique (10 %), autres (45 %). Sa période biologique est d'environ 50 jours, et il est éliminé davantage dans les selles que dans les urines.

Po-210, qui est un émetteur alpha pur de courte période (138,4 j), est un radiotoxique très puissant que l'on peut qualifier de « poison frais » : l'empoisonnement de l'ancien espion russe Alexander Litvinenko en 2006 (quelques microgrammes dans une tasse de thé) a suscité un nouvel intérêt pour cet élément, ainsi que, plus récemment en 2012, les soupçons démentis d'empoisonnement de Yasser Arafat.

Le traitement recommandé en France par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en cas de contamination est le dimercaprol (ou BAL, British Anti-Lewisite).

La revue *Nature Chemistry* publie tous les mois sur invitation une fiche par élément du tableau périodique de Mendeleiev, similaire à celle-ci consacrée au polonium, publiée en ligne en mai dernier, et que l'auteur a traduit spécialement en vue d'une parution dans nos colonnes. À ce jour, une soixantaine d'éléments ont été publiés et sont disponibles en ligne*.

* <http://blogs.nature.com/thescepticalchymist/2012/09/in-your-element-round-up.html>

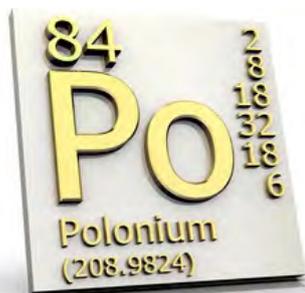
Pour en savoir plus

- Ansoborlo E., Poisonous polonium. In your element, *Nature Chem.*, 2014, 6, p. 454.
- Persson B., Holm E., Polonium-210 and lead-210 in the terrestrial environment: a historical review, *J. Environ. Radioact.*, 2011, 102, p. 420.
- Ansoborlo E., Berard P., Den Auwer C., Leggett R., Menetrier F., Younes A., Montavon G., Moisy P., Review of chemical and radiotoxicological properties of polonium for internal contamination purposes, *Chem. Res. Toxicol.*, 2012, 25, p. 1551.



Éric Ansoborlo est expert international « Radiotoxicologie » au CEA-Marcoule*.

* CEA-Marcoule, DEN/DRCP/CETAMA, BP 17171, F-30207 Bagnols-sur-Cèze Cedex.
Courriel : eric.ansoborlo@cea.fr



Distinctions

Médailles de l'innovation 2014 du CNRS

Depuis 2010, les Médailles de l'innovation récompensent chaque année des personnalités dont les recherches exceptionnelles ont conduit à des innovations marquantes sur le plan technologique, économique, thérapeutique ou sociétal. Cette prestigieuse distinction a été attribuée cette année à la biologiste Barbara Demeneix (endocrinologue) et à une chimiste, un physico-chimiste et une spécialiste du traitement et de la valorisation des eaux usées :



© CNRS
Photothèque/
Thibaut Vergoz.

Claude Grison, professeure à l'Université Montpellier 2 et directrice du laboratoire Chimie bio-inspirée et innovations écologiques (CNRS/Université Montpellier 2/Stratoz), est internationalement reconnue pour ses travaux

dans le domaine de la chimie verte en phytoremédiation des sols miniers [1]. Ses activités sont orientées autour d'une chimie éco-inspirée s'appuyant sur des matières premières naturelles, la mise en œuvre de procédés écocompatibles et la résolution de problèmes écologiques et environnementaux liés aux déchets miniers. Elle a été la première à développer en laboratoire des traitements chimiques, non polluants et transposables à grande échelle, de plantes hyper accumulatrices de zinc, de manganèse, de cuivre et de nickel sous une forme utile et porteuse de développements majeurs dans le domaine de la synthèse organique. Ses travaux ont permis de préparer de nouveaux catalyseurs polymétalliques de réactions chimiques organiques d'origine végétale issus de la biomasse contaminée par les métaux lourds et donnant accès à des molécules à haute valeur ajoutée. Ces nouvelles molécules trouvent des débouchés dans l'industrie alimentaire, pharmaceutique et cosmétique. Ses recherches, à l'interface entre l'écologie et la chimie, ont déjà suscité l'intérêt de deux grands groupes industriels de la chimie européenne et asiatique à travers des contrats de collaboration. Les résultats sont à l'origine de la création de Stratoz, jeune société innovante en chimie verte qui met en place les outils nécessaires au développement industriel de cette nouvelle filière verte.



© Lazarova.

Valentina Lazarova, experte en génie des procédés en traitement et valorisation des eaux usées chez Suez Environnement, est l'une des principales références mondiales sur la réutilisation de l'eau. Son parcours professionnel représente un exemple exceptionnel du transfert d'une expertise académique et de recherche fondamentale dans la recherche industrielle multidisciplinaire et appliquée. Ses travaux de recherche dans le domaine du traitement avancé et de la réutilisation des eaux usées ont abouti au développement de nouveaux concepts de réacteurs biologiques, à des procédés innovants de désinfection des eaux usées, à des bioréacteurs à membrane, ainsi que des filières avancées de réutilisation de l'eau. Ces innovations ont eu un impact majeur dans le monde de l'eau et ont été mises en œuvre sur plusieurs installations dans le monde entier. Ses travaux novateurs visent une meilleure gestion des ressources en eau et de l'énergie dans un contexte de stress hydrique et de changement climatique accélérés. Sa forte implication internationale, appuyée par des publications de référence, lui ont valu l'élection comme membre à vie de l'Académie internationale de l'eau.



© Saint-Gobain.

Didier Roux, directeur de recherche au CNRS et directeur de la recherche et de l'innovation au sein du groupe Saint-Gobain, dont le parcours professionnel est un remarquable

exemple d'une carrière de recherche fondamentale de haut niveau menée en parallèle d'une activité extrêmement fructueuse de transfert des connaissances vers les domaines industriels [2]. Une de ses découvertes emblématiques est celle de la « phase éponge »

résultant de ses études du comportement physique des interfaces fluctuantes. Dans la même lignée, son exploration de la dynamique des fluides organisés l'amène à mettre en évidence de nouveaux objets macroscopiques baptisés par la suite « oignons » qui trouvent maintes utilisations sous forme de microréacteurs chimiques, de vecteurs biologiques ou de microcapsules permettant d'enfermer et de transporter un principe actif et qui ont trouvé, par la suite, des applications dans l'industrie pharmaceutique et cosmétique. Didier Roux a créé les entreprises Capsulis et Rheocontrol afin de valoriser les applications de ses recherches. La découverte de ces structures en oignons marque le véritable début de son aventure vers l'entrepreneuriat et l'industrie où il occupera d'importantes fonctions de direction scientifique dans des sociétés comme Rhône Poulenc, Rhodia, et plus récemment Saint-Gobain où il impulse de nombreuses collaborations académiques internationales, notamment avec le CNRS.

Benoît Hamon, ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, remettra le 18 juin prochain la Médaille de l'innovation 2014 du CNRS aux quatre lauréats.

• Source : CNRS, 12/05/14.

[1] Voir Grison C., Escarré J., Berthommé M.-L., Couhet-Guichot J., Grison C., Hosi F., Thlaspi caeruleus, un indicateur de la pollution d'un sol ? Réflexion partagée entre étudiants et chercheurs autour d'un problème environnemental, *L'Act. Chim.*, 2010, 340, p. 27.

[2] Voir Roux D., Interaction industrielle et transfert de technologie au CRPP, *L'Act. Chim.*, 2009, 336, p. 46.

Recherche et développement

Une stratégie simple et inédite pour réparer des organes

Un formidable bond en avant se prépare dans la pratique chirurgicale et la médecine régénératrice. Une équipe dirigée par Ludwik Leibler* du laboratoire



Étape 1
Plaie cutanée



Étape 2
Application
de la solution



Étape 3
Accolement
des berges par
pression



Étape 4
Fermeture
de la plaie

Illustration de la première expérience réalisée par les chercheurs sur des rats : réparation d'une plaie profonde par application de la solution aqueuse de nanoparticules. La fermeture de la plaie s'effectue en trente secondes.

© Laboratoire « Matière molle et chimie » (CNRS/ESPCI ParisTech).

Matière molle et chimie (CNRS/ESPCI ParisTech) et Didier Letourneur du Laboratoire de recherche vasculaire translationnelle (Inserm/ Universités Paris Diderot et Paris 13) vient de démontrer que le principe d'adhésion par des solutions aqueuses de nanoparticules peut être utilisé *in vivo* pour réparer des organes « mous » et des tissus. Cette méthode de collage, extrêmement simple d'utilisation, a été testée sur les rats. Appliquée à la peau, elle permet de fermer des blessures profondes en quelques secondes et d'obtenir une cicatrisation de qualité et esthétique. Elle a également été éprouvée avec succès pour réparer des organes difficiles à suturer tels le foie. Enfin, sur le cœur battant, cette solution a permis de fixer un dispositif médical, démontrant ainsi le potentiel de la méthode pour délivrer des médicaments ou renforcer les tissus. Ces travaux ont été publiés sur le site de la revue *Angewandte Chemie* [1].

* Source : CNRS, 17/04/14.

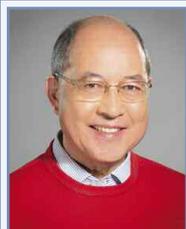
* Ludwik Leibler a notamment reçu le Grand Prix Pierre Sûte de la Société Chimique de France en 2009, le Grand Prix de la Fondation de la Maison de la Chimie en 2012 et la Médaille de l'innovation du CNRS en 2013.

[1] Meddahi-Pellé A., Legrand A., Marcellan A., Louedec L., Letourneur D., Leibler L., Organ repair, hemostasis, and *in vivo* bonding of medical devices by aqueous solutions of nanoparticles, *Angew. Chem., Int. Ed.*, publié en ligne le 16 avril 2014 (DOI 10.1002/anie.201401043).

REALCAT : des catalyseurs pour les bioraffineries industrielles

Inaugurée en mai dernier, REALCAT* est une plateforme haut débit dédiée à la catalyse sous toutes ses formes (enzymatiques, hétérogènes, homogènes, systèmes hybrides), ouverte aux recherches menées dans des domaines cruciaux tels que l'énergie, la santé, la nutrition et l'environnement. Inscrit dans l'axe 2 de la Stratégie nationale de recherche et d'innovation (SNRI) lancée par le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, ce projet de recherche doit pouvoir répondre aux attentes en termes d'urgence environnementale et d'écotechnologies.

Implantée sur le domaine universitaire de Villeneuve d'Ascq, cette plateforme unique au monde dédiée au développement de catalyseurs pour les bioraffineries industrielles apportera une contribution significative à de nombreuses opérations d'envergure de l'Institut Chevreul et de l'Unité de catalyse et de chimie du solide, notamment au travers du projet européen EuroBioRef et des Instituts de transition énergétique PIVERT et IFMAS.



Michel Che, lauréat du Faraday Lectureship Prize 2014

Seuls deux Français l'ont précédé dans cette distinction : Jean-Baptiste Dumas (1869), premier lauréat de ce prix, et Charles-Adolphe Wurtz (1879), qui fut le préparateur de Dumas.

Ce prix prestigieux, attribué tous les deux ans par la Royal Society of Chemistry (RSC), récompense des contributions exceptionnelles en chimie physique ou théorique. Parmi les récipiendaires, on peut citer S. Arrhenius, S. Cannizzaro, E. Fischer, D.I. Mendeleiev, N. Bohr, I. Langmuir, R. Robinson, C.K. Ingold, C.A. Coulson, J.M. Thomas, A. Pines et G. Ertl.

Les travaux de Michel Che concernent la réactivité de surface, plus précisément la fonctionnalisation des oxydes inorganiques et la catalyse hétérogène. Il a introduit une approche moléculaire, basée sur les complexes de métaux de transition pris comme sondes et des techniques isotopiques et physiques spécifiques, qui a conduit à l'émergence d'une chimie de coordination interfaciale.

Pour la RSC, son œuvre a largement contribué à une meilleure connaissance des processus élémentaires impliqués en catalyse à l'échelle du laboratoire et de l'industrie et à l'établissement de relations entre les catalyses homogène et hétérogène.

Depuis peu professeur émérite à l'Université Pierre et Marie Curie, il a été membre senior de l'Institut Universitaire de France. Il a été le président fondateur de l'EFCATS, la Fédération européenne des sociétés de catalyse (1993-1995), et a lancé en 1993 la série des congrès biennaux « EuropaCat », devenus un événement majeur de la communauté des « catalyses ». Il a été président de l'Association internationale des sociétés de catalyse (2000-2004) et a fortement contribué à l'organisation de son 13^e Congrès international à Paris en 2004.

Rappelons enfin que Michel Che a œuvré pour la SFC/SCF en tant que président de la division Catalyse (DivCat), vice-président de la SCF (2007-2009), et qu'il est actuellement chargé de la mission d'accroître le nombre d'adhérents à notre association.

Igor Tkatchenko

* Source : Université de Lille 1, 25/04/14.

* REALCAT : plateforme intégREe AppLIquée au criblage haut débit de CATalyseurs pour les bioraffineries.

Enseignement et formation

Retour sur le Village de la chimie, des sciences de la Nature et de la vie 2014



Organisé à l'initiative de l'UIC Île-de-France et du Centre de Formation d'Apprentis AFi24, en partenariat avec la Région Île-de-France, le MEDEF Île-de-France, les entreprises et les établissements de formation des disciplines scientifiques concernées, le Village de la chimie s'est tenu les 14 et 15 mars dernier au Parc Floral de Paris (bois de Vincennes). Cette rencontre annuelle est soutenue par les trois académies d'Île-de-France, l'ONISEP, Universcience, la Fondation internationale de la Maison de la Chimie, le Collège de France, la Société Chimique de France, des fédérations de parents d'élèves et des associations familiales. Elle a pour objectif prioritaire

d'éveiller, ou de confirmer, auprès des jeunes des vocations scientifiques et technologiques en leur présentant, d'une part la diversité des métiers exercés dans une grande variété d'entreprises, d'autre part les formations qui y conduisent.

Il s'agit de montrer que la chimie est présente dans un nombre d'activités toujours plus important et qu'elle est de plus en plus un élément essentiel du développement des autres sciences (physique, biologie, biotechnologie). La participation de jeunes chercheurs et de scientifiques de haut niveau permet aux visiteurs – groupes d'élèves menés par leurs enseignants, ou jeunes parfois accompagnés de leurs parents – de découvrir la modernité des métiers offerts par la chimie et son rôle fondamental dans de nombreuses innovations.

De la classe de troisième jusqu'aux étudiants des écoles d'ingénieurs et docteurs, le Village offre la possibilité de se documenter et d'assister à des démonstrations et expériences auprès de spécialistes des parcours de formation (y compris en alternance) et de professionnels des entreprises, ainsi que d'assister à de multiples démonstrations et expériences aussi amusantes qu'constructives. Grâce à ces contacts et échanges, notamment avec les professionnels présents, des vocations se déclareront, des projets professionnels se construiront, au plus grand bénéfice des aspirations de chacun et de notre avenir à tous, dans l'enseignement, la recherche, l'industrie...

Arnaud Montebourg, à l'époque ministre du Redressement productif, l'avait souligné dans l'éditorial du *Catalyseur* « Spécial Village de la chimie »* : « *En tant que mère de toutes les industries, la chimie aura un rôle majeur à jouer dans la résolution des défis environnementaux de l'avenir. L'industrie chimique française est déjà l'un des acteurs les plus avancés dans le développement d'une économie durable* », précisant en outre que : « *La chimie, mère de toutes les industries, a besoin des bras, des têtes et des cœurs de jeunes diplômés...* » La chimie, au cœur des sciences de la matière et du vivant, implique aussi d'être au cœur des indispensables collaborations entre sciences, qui ainsi s'enrichissent mutuellement et s'influencent, souvent en étant engagées dans des projets communs pluridisciplinaires. Nos entreprises, c'est d'abord la capacité à innover, à mieux produire ; celle aussi de s'épanouir dans une carrière variée et enrichissante qui permet de participer à la recherche et au développement, à la production, au management des hommes, au marketing, etc. Pour cela, des compétences scientifiques initiales sont un levier exceptionnel pour occuper ultérieurement des postes de responsabilité, comme c'est à nouveau le cas dans la plupart des grands secteurs industriels en France et dans le monde. Pour les jeunes à la recherche de leur premier emploi, le Village offre l'opportunité de confronter des expériences, de s'informer auprès d'entreprises de toutes tailles et de nombreux domaines d'activité. L'insertion professionnelle des jeunes : c'est la mission que s'était fixée plus précisément le Village 2014, année de son dixième anniversaire. L'utilisation des moyens numériques (réseaux sociaux, vidéos utilisables avant, pendant et après le Village) n'a pas été oubliée, avec la collaboration de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie. Rendez-vous en 2015 pour la onzième édition !

Gérard Roussel

Président du Village de la chimie

* www.villagedelachimie.org

* N° 85, mars 2014. Cette revue, éditée par l'UIC Île-de-France, est en téléchargement libre sur www.uic-idf.fr/Actualites-publications/Publications/Le-Catalyseur.

ChembioTech, un nouveau diplôme d'ingénieur

L'École européenne de chimie, polymères et matériaux (ECPM) et l'École supérieure de biotechnologie de Strasbourg (ESBS) se sont associées pour créer un nouveau diplôme d'ingénieur

à l'interface de la chimie et de la biotechnologie. Habilité par la Commission des titres d'ingénieur (CTI), ChembioTech répond à une demande de la part des industriels tant en France qu'à l'étranger dans les secteurs de la santé, des cosmétiques, des matériaux renouvelables et biodégradables ou de l'environnement. Très axée sur la pratique (40 % de TP), la formation (trilingue français, anglais, allemand) se déroulera alternativement à l'ECPM et à l'ESBS. La première promotion accueillera 14 élèves dès septembre 2014.

• Source : *ecpm infos*, avril 2014.
Contact : chembiotech@unistra.fr

MOOC : la Chine s'en mêle...

L'*Actualité Chimique* avait attiré l'attention de ses lecteurs sur la révolution en cours de l'enseignement supérieur⁽¹⁾ et sa généralisation aux autres niveaux et types de formation⁽²⁾. C'est l'Université de Shanghai (Jiao-Tong University), connue pour son classement mondial des universités, qui a pris l'initiative de fédérer 19 établissements chinois d'enseignement supérieur pour promouvoir les cours en ligne et également créer une plate-forme interactive⁽³⁾. Certains cours seront sous-titrés en anglais pour attirer le maximum d'étudiants étrangers ; la reprise de cours des meilleures universités du monde suit la même logique.

(1) Voir Bernier J.-C., *Des universités sans amphî ?*, *L'Act. Chim.*, 2013, 377, p. 5.

(2) Jacquesy R.A., *Formation ou information ? Des MOOC aux OER...*, *L'Act. Chim.*, 2014, 382-383, p. 1.

(3) www.cnmooc.org

Sécurité et environnement

Perturbateurs endocriniens : le retour

Le 29 avril dernier, le Conseil national de la transition écologique a adopté à l'unanimité le plan « Stratégie nationale contre les perturbateurs endocriniens » (SNPE). La ministre en charge de l'Écologie, Ségolène Royal, souhaite que la France montre l'exemple et entraîne ainsi l'Union européenne. D'autres plans sont en préparation, comme le 3^e plan national santé-environnement, ou envisagés, comme le plan sur les micropolluants.

La SNPE s'articule autour de quatre axes : recherche et surveillance sanitaire et environnementale ; expertise sur les substances ; réglementation et substitution des substances ; formation et information du public et des professionnels.

Bien qu'aucun consensus n'existe sur la définition elle-même d'un perturbateur endocrinien, sur la mise en évidence de cette perturbation et comment la mesurer – certaines associations vont jusqu'à considérer qu'il en existe des millions, voire que toutes les substances chimiques, de synthèse bien sûr, mais pourquoi pas naturelles en font partie –, le gouvernement confie à l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail) l'évaluation en trois ans de quinze substances suspectes.

Les cinq substances retenues pour la première année sont présentes dans les quelques 800 produits les plus consommés en France :

- **les parabènes**, qui sont des conservateurs largement utilisés dans les aliments, boissons, cosmétiques..., déjà largement rejetés, comme en témoignent de multiples affichages, à l'origine de l'apparition sur le marché de produits « sans parabène » ;

- **le BHA** (mélange de 2-tBu et 3-tBu-4-hydroxyanisole), connu sous la dénomination E 320, qui est un des antioxydants les plus utilisés dans l'industrie alimentaire, notamment pour éviter le rancissement des graisses et huiles. Il est suspecté d'être cancérigène, mais seulement classé 2B ;

- **l'acide borique** (B(OH)₃), grand classique dans la panoplie si prisée des « remèdes de bonnes femmes », qui est un antiseptique léger, voire un insecticide, largement utilisé en ophtalmologie et dans de nombreuses préparations pharmaceutiques (borax, eau boriquée, etc.). Il est maintenant reconnu comme présentant un risque reprotoxique sérieux, fortement déconseillé aux femmes enceintes et aux jeunes enfants. Utilisé à fortes doses, il est susceptible de provoquer des réactions allant jusqu'à la mort et est classé 1B*. Il est utilisé dans l'industrie alimentaire comme conservateur ;

- **DINCH** (diisononyl-cyclohexane-1,2-dicarboxylate) et **DEHTP** (di-(2-éthylhexyl) téréphtalate), qui forment une catégorie à part, celle des plastifiants largement utilisés dans de nombreuses industries fabriquant des objets en « plastique » de consommation courante, notamment des jouets et articles de puériculture. Ils participent de la chasse aux phtalates dangereux pour les enfants ;

- la ministre va de plus demander à la grande distribution un engagement volontaire : supprimer **le BPA** (bisphénol A) dans les tickets de caisse.

Rose Agnès Jacquesy

* www.ansm.sante.fr

L'Actualité Chimique s'invite sur Futura-Sciences !

Il nous aura fallu un peu de temps depuis le premier dossier publié en juin 2012 (« Le végétal, une alternative au pétrole ? » de Minh-Thu Dinh-Audouin⁽¹⁾), mais l'aventure continue, cette fois-ci avec la RMN.

Vous avez sûrement déjà visité Futura-Sciences. Pas étonnant : ce « magazine online de la découverte, de la science et de l'innovation » qui édite des magazines d'information à visée grand public sur les sciences, l'environnement, la santé et l'informatique, compte parmi les plus visités et est une référence en la matière ! Il est mis à jour en permanence et richement illustré avec un suivi quotidien de l'actualité, des dossiers de fond, de nombreux forums de débats et de discussions et une multitude d'autres espaces de connaissance.

Depuis notre premier dossier, le site a évolué et propose dorénavant dix magazines thématiques, dont « Matière »⁽²⁾ qui fait la part belle à la chimie. C'est dans celui-ci que se situe **notre nouveau dossier**, « **RMN, tout sur la résonance magnétique nucléaire** »⁽³⁾, adapté de l'article d'Alexandre Zagdoun et Lyndon Emsley paru dans le numéro consacré à la RMN en 2012. Il a été mis en ligne fin avril et sa publication a été relayée sur les réseaux sociaux. À suivre...

(1) www.futura-sciences.com/fr/doc/t/developpement-durable/d/vegetal-alternative-petrole_1513/c3/221/p1

(2) www.futura-sciences.com/magazines/matiere

(3) www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/dossiers/d/chimie-rmn-tout-resonance-magnetique-nucleaire-1860

[1] Zagdoun A., Emsley L., La RMN à haut champ : soixante ans à révolutionner la science, *L'Act. Chim.*, 2012, 364-365, p. 20.



Vivre est mortel...

Nos lointains ancêtres le savaient et s'en accommodaient. Nous découvrons que notre environnement, apparemment sécurisé et confortable dans les pays avancés, est mortifère. Danger d'autant plus terrifiant qu'il est, comme le diable, caché dans les détails.

Après les perturbateurs endocriniens, l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail) s'interroge et nous interroge sur **les nanomatériaux** (500 000 tonnes par an dont 220 000 importés). Reconnaissons un effort important de mise en perspective des difficultés rencontrées pour une protection totale, comme on dit, des crèmes solaires, elles-mêmes mises en cause, et nombre de substances chimiques de taille nanométrique, de produits manufacturés impliqués dans de nombreux domaines d'application...

Par ses caractéristiques physico-chimiques, chaque nanomatériau posséderait un risque propre, différent selon sa taille légèrement plus faible ou plus élevée, dans un environnement autre, etc. Le défi en l'occurrence est donc de mettre en place des méthodes d'approche originales qui n'exigent pas d'étudier la toxicité produit par produit, mais d'une manière que l'on pourrait qualifier de « générique », en organisant la réflexion catégorie(s) par catégorie(s)

de nanomatériaux. Il faudrait aussi croiser le danger (faible, moyen, fort) à l'exposition (un peu, beaucoup, fréquemment, ponctuellement).

Un premier tableau publié par l'ANSES décrit une dizaine de types de nanomatériaux (noirs et nanotubes de carbone, fullerènes, dendrimères, quantum dots, etc.), leurs domaines d'utilisation et quelques exemples de produits finis – cellules photovoltaïques, mascaras, films alimentaires, écrans souples, peintures, pneumatiques, etc. À noter qu'une douzaine de ces substances chimiques sont utilisées à plus de 100 t/an. D'une manière générale, la toxicité d'un produit serait donc liée à sa formulation. Une question délicate à aborder sur le fond.

Notons que la Commission européenne a lancé une consultation publique (en particulier de l'industrie chimique) sur l'enregistrement des nanomatériaux qui s'étendra du 13 mai au 5 août 2014*. Le thème central de cette consultation est l'accès à l'information sur la présence de nanomatériaux dans les produits.

Rose Agnès Jacques

* Source : conférence de presse de l'ANSES, 15/05/14.

Voir le rapport « Évaluation des risques liés aux nanomatériaux. Enjeux et mise à jour des connaissances », avril 2014, en ligne sur le site de l'ANSES : www.anses.fr/fr/documents/AP2012sa0273Ra.pdf
* http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/chemicals/reach/nanomaterials/public-consultation_en.htm#

Industrie

La voiture, un avenir pour la chimie durable



La Smart forvision. © BASF.

Créer de la chimie pour un avenir durable est l'ambition légitime de tous ses acteurs depuis le possible, grâce à la science et la technologie, jusqu'à l'acceptable par la société, en contradiction parfois avec ce qu'attend chacun en tant que client. La durabilité comme moteur d'innovation et de croissance ? C'est dans l'automobile, notamment avec PSA Peugeot Citroën que BASF exprime cette stratégie. La « Smart forvision », petite urbaine hybride, conjugue réduction de la consommation d'énergie et accroissement de l'autonomie. La chasse aux kilos se fait à tous les niveaux : allègement des structures grâce aux « plastiques nouveaux » en lieu et place de matériaux métalliques (jantes, portières, sièges, etc.) – l'architecture de la voiture est repensée avec les constructeurs dès sa conception –, nouvelles mousses isolantes pour l'équilibre thermique intérieur et peintures de carrosserie contenant des pigments absorbant les infrarouges pour limiter la consommation énergétique. Des batteries avec de nouveaux matériaux de cathode participent de cette R & D, qui conduit à un doublement de l'autonomie du véhicule (près de 300 km). Un revêtement catalytique original des radiateurs permet la réduction à la source de la formation d'ozone... L'industrie chimique moderne se targue, non d'être le problème, mais bien au contraire, de faire partie des solutions.

* Source : Conférence de presse de BASF, 20/05/14.

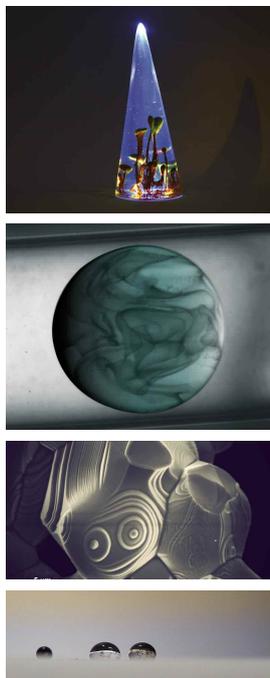
D'autres actualités vous attendent en première page du site www.lactualitechimique.org

Images de chimistes

Le concours photos « Images de chimistes »* organisé par le club de jeunes de la section Aquitaine de la SCF** et ouvert à tous les étudiants chimistes du campus bordelais en est à sa quatrième édition. Cette année encore, cette initiative – suivie par les quatre membres du Bureau de ce club dynamique : Marine Cadet, Lise Edembe, Milica Sentic et Éric Schoeten – a rencontré un large succès et le choix a été difficile pour départager les gagnants.

* Pour une description plus détaillée du concours, les photos et leurs légendes détaillées, voir www.lactualitechimique.org/spip.php?article16

** www.societechimiquedefrance.fr/fr/aquitaine.html



Les trois premiers prix

1^{er} prix : *Sédimentation de rhodamine pendant une polyestérification*, Simon Raffy (doctorant LOF/CRPP) (en couverture de ce numéro)

La polymérisation est catalysée par voie radicalaire. Après le mélange, elle est introduite dans un moule de forme conique. De la rhodamine 6G est incorporée dans un peu de résine, qui est ensuite introduite à la seringue sous la surface de la solution. Selon le taux de charge de la rhodamine, la sédimentation va plus ou moins vite et il faut régler le temps de polymérisation en fonction de cela. L'objet est ensuite poncé et poli. Suivant la lumière, ce pigment fluorescent peut avoir des teintes vertes, rouges ou oranges.

2^e prix : *Diffusion du tartre dans une goutte*, Romain Jagu (master 1, LCPO)

Cette goutte a été immortalisée dans le cadre d'une étude réalisée lors d'un stage au LOF sur la précipitation du tartre (carbonate de calcium) dans des tubes millifluidiques. La formation de gouttes est générée par la rencontre de deux fluides non miscibles, l'huile et l'eau, et ce grâce à l'imbrication de tubes les uns dans les autres. Ces gouttes circulent dans une phase d'huile porteuse : ce sont des mini-réacteurs fermés en mouvement dans un autre fluide. La goutte sert ainsi de réacteur pour permettre la réaction du calcium avec le carbonate, ce qui conduit à la formation de carbonate de calcium. La photographie, capturée à l'aide d'une caméra placée sur une binoculaire, illustre la formation du tartre, qui n'est autre que le nuage de particules se diffusant à l'intérieur de la goutte par le biais de la diffusion moléculaire.

3^e prix ex-aequo : *TiO₂ Ninja Turtle*, Julien Lesseur (doctorant ICMCB) et Marion Gayot (ingénieure ICMCB)

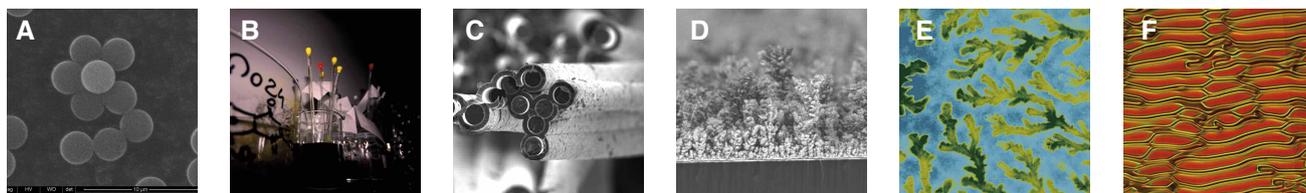
Il s'agit d'une micrographie d'une particule de TiO₂ frittée à 1 400 °C.

3^e prix ex-aequo : *Billard lunaire*, Marie Haddou et Vivien Sébire (master 1, CRPP)

Cette photo résulte de la superhydrophobie à la surface d'une lame de verre recouverte de suie.

Les six autres finalistes

A) *Le printemps est arrivé !*, Laura Alvarez (CRPP) ; B) *Du jeu de l'ombre et de la lumière*, Stéphanie Antunes (IECB) ; C) *Fibres et leur manteau de SiC*, Charlotte Chanson (LCTS) ; D) *Gold forest*, Aleksandar Karajic (ISM) ; E) *Forêt d'algues*, Anna Hofmann ; F) *Photographie d'un cristal liquide cholestérique (ZLI 3488)*, Mayada Selmi (CRPP).



Simon Raffy, lauréat 2014 du concours : un chimiste-artiste

Simon Raffy, doctorant en physico-chimie de la matière condensée, est passionné par la sculpture depuis ses 14 ans, et c'est cette passion qui l'a conduit vers la chimie après le bac « *afin d'accroître [sa] connaissance en matériaux.* » Il « *sculpte la science* », cherche à rapprocher les arts et les sciences, avec pour ambition de réaliser des œuvres où plusieurs effets physiques et/ou chimiques cohabiteraient afin d'éveiller la curiosité d'un public non scientifique qui n'aurait pas les clés pour comprendre ce qu'il voit : « *Dans un monde où les technologies sont omniprésentes, je trouve cela intéressant de confronter les gens à l'inconnu de ce qu'ils manipulent. C'est une sorte de sensibilisation aux sciences par l'émerveillement. Le but est le même que la vulgarisation scientifique, mais l'approche est différente.* »

Fasciné par la matière, il cherche ses différentes interprétations à travers la chimie, la physique et la sculpture, et compte poursuivre cette recherche sur l'art et la science en post-doctorat. Il fourmille d'idées, comme « *sculpter le gel de silice, faire des résines transparentes achromatiques (amplification de la diffraction de la lumière), faire des sortes de sabliers liquides (milli-microfluidique 3D), générer des écoulements granulaires par électrostatique et acoustique* »... On peut découvrir une partie de ses réalisations sur son portfolio et son blog*, comme le « *Chalk nougat* », formé à partir d'un bloc de polyuréthane dans lequel il a incrusté des craies de tableau (CaCO₃) de différentes couleurs. La craie étant un matériau poreux, la résine a imbibé les parois extérieures pendant sa polymérisation. Il s'est alors servi d'acide chlorhydrique pour dissoudre le calcaire non protégé par la résine et a obtenu des trous aux parois colorées traversant le bloc de part en part. Tout un univers à découvrir et à suivre !

Voir aussi son interview réalisée par Knock Knock Doc**, émission sur le web qui avait pour but de faire découvrir les coulisses de la formation doctorale.

* <https://www.behance.net/simouss>, <http://simoussproduct.blogspot.fr>

** www.mysciencework.com/news/10849/knock-knock-doc-episode-10-saison-2

Livres



Conception raisonnée des aliments Une approche multidisciplinaire de la formulation

Les cahiers de formulation, vol. 16

C. Michon, J.P. Canselier (coord.)

169 p., 43 €

EDP Sciences, 2013

Cet ouvrage fournit une synthèse très intéressante des approches actuelles de la conception de nouveaux aliments, par l'association de chapitres complémentaires judicieusement choisis. Ils couvrent le domaine agroalimentaire de la formulation et de la transformation des aliments, mais aussi les secteurs plus transversaux de la nutrition, la toxicologie, la biodisponibilité ou l'environnement.

Il est divisé en deux parties complémentaires, une première s'intéressant à la formulation et à la déformulation des aliments, une seconde plus centrée sur la caractérisation structurale, texturale et sensorielle des produits. Ce livre couvre les différents axes de la formulation alimentaire pour le développement d'aliments fonctionnels par une approche multi-échelle allant du « nano » au « macro ». Une approche socio-économique permet d'y associer le comportement alimentaire et les enjeux sociétaux.

L'ouvrage est clairement à destination des scientifiques et industriels s'intéressant à la formulation de nouveaux produits. Dans les différents chapitres, des exemples concrets d'aliments sont choisis pour illustrer les concepts développés. Les apports des démarches scientifiques et des études du comportement sont succinctement présentés et procurent des voies de réflexion pour la conception intégrative de nouveaux aliments. Les différents aspects de structures, d'organisation, de transfert de matière, de procédés, de digestibilité, de sensorialité et de contraintes économiques sont abordés. Pour une bonne compréhension, le lecteur devra être familier des approches intégratives de la conception alimentaire. De plus, il faut préciser que si la majorité de l'ouvrage est rédigée en langue française, deux chapitres sont en anglais.

Après sa lecture, le scientifique ou l'industriel pourra développer ses formulations en associant les principes scientifiques aux critères réglementaires et économiques pour une conception raisonnée de nouveaux produits. Bien sûr, étant donné le large spectre couvert par l'ouvrage, les chapitres relativement courts ne font que balayer un certain nombre de concepts sans les approfondir vraiment, mais la clarté des explications et des cas très illustrés permettent une prise de conscience globale des nouvelles technologies, approches, réglementations et attentes du consommateur.

En conclusion, cet ouvrage présente un beau panorama des tendances actuelles pour la conception de nouveaux aliments, allant de l'aliment traditionnel à la cuisine « note à note », en décrivant parfaitement les enjeux technologiques et socio-économiques.

Stéphane Desobry



Sécurité des procédés chimiques Connaissances de base et méthodes d'analyse des risques, 2^e éd.

A. Laurent

607 p., 75 €

Tec & Doc, Lavoisier, 2011

L'ouvrage d'André Laurent, professeur émérite de l'École nationale supérieure des Industries chimiques de Lorraine, est incontestablement un modèle moderne en ce qui concerne l'analyse des risques chimiques. Il est indéniable que la maîtrise des risques technologiques et industriels est actuellement une exigence sociétale majeure. À la suite de l'accident d'AZF à Toulouse en 2001, dont les origines restent mystérieuses, un foisonnement de protocoles et d'applications réglementaires a induit une évolution de la conception du danger et de la notion de risque, qui a conduit au passage d'une évaluation déterministe à une causalité probabiliste.

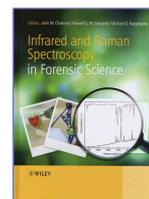
Ce livre vise à fournir les outils permettant d'appréhender l'analyse du risque et l'appréciation des conséquences. La terminologie y est actualisée avec les nouveaux termes d'aléa, d'enjeux, d'intensité, de cinétique et de vulnérabilité. Les connaissances de base sont présentées suivant les récentes typologies

classiques des caractéristiques des effets des phénomènes de dangers.

Outre les méthodes simples et classiques d'analyse des risques (APR, HAZOP, Arbres), l'aspect méthodologique est complété par la présentation de la méthode du nœud papillon et de quelques nouvelles méthodes systémiques intégrées (MOSAR, ARAMIS, LOPA). La démarche de la maîtrise des risques est enrichie d'une revue très complète des concepts de défense en profondeur, de couches de protection, de lignes de défense, de fonctions de sécurité et de différentes barrières rarement proposés simultanément. Enfin, le contenu de l'étude de dangers est décrit d'après la base réglementaire de leur guide d'élaboration.

Beaucoup de données théoriques très pointues en font un ouvrage surtout réservé aux spécialistes. Il s'adresse en particulier aux ingénieurs industriels, techniciens, cadres des services publics, des communautés urbaines et des collectivités territoriales, enseignants, chercheurs... Bien entendu, les élèves ingénieurs des grandes écoles scientifiques et les étudiants en master et doctorat des universités y trouveront des données précieuses, dans un domaine où il existe peu d'ouvrages si complets. De plus, une bibliographie très documentée sera d'une grande aide pour ceux qui veulent approfondir leurs connaissances sur la sécurité des procédés chimiques.

André Picot



Infrared and Raman spectroscopy in forensic science

J.M. Chalmers, H.G.M. Edwards,

M.D. Hargreaves (eds)

618 p., 110 £

Wiley, 2012

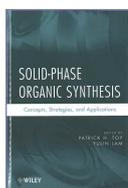
Cet ouvrage volumineux est un recueil d'une trentaine d'articles rédigés par 58 auteurs majoritairement anglais ou américains. Chaque article est une revue bibliographique riche, dédiée à une thématique précise tournée vers les sciences forensiques au sens large du terme, c'est-à-dire que la thématique ne se limite pas aux domaines usuellement pratiqués par « les experts », mais va bien au-delà (objets d'art, contrefaçons, bijoux...).

Il doit être envisagé comme un guide qui ouvrira au lecteur la voie des nombreuses applications offertes par les spectroscopies Raman et infrarouge. En aucun cas il ne faut l'aborder comme un manuel qui détaillerait des méthodes, et bien souvent, les articles soulèvent des questions techniques qui ne pourront être satisfaites qu'en étudiant les publications référencées. D'autant plus que certains auteurs semblent parfois très optimistes vis-à-vis de la facilité d'emploi de la technique ou de sa capacité analytique.

Riche d'exemples et couvrant de façon exhaustive, ou tout du moins s'en approchant, les possibilités d'utilisation de ces deux spectroscopies vibrationnelles dans le domaine forensique, ce livre trouvera naturellement sa place dans toute bibliothèque scientifique. Plus particulièrement adapté à des novices dans le domaine (étudiant, jeune technicien ou nouvel utilisateur), il devrait combler les attentes des lecteurs. Seul point négatif, certainement inhérent à ce type d'ouvrage, l'impression de lire plusieurs fois la même chose, principalement dans les parties introductives des articles, est omniprésente.

En conclusion, c'est un livre que je recommande sans aucune restriction.

Stéphane Milet



**Solid-phase organic synthesis
Concepts, strategies,
and applications**

P.H. Toy, Y. Lam (eds)
536 p., 90,50 £
Wiley, 2012

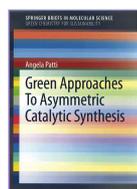
Ce livre multi-auteurs s'adresse aux personnes spécialisées dans la synthèse organique supportée sur une phase solide. L'idée est d'utiliser des connecteurs qui possèdent un groupe fonctionnel permettant d'attacher un substrat sur un support solide pour le relâcher plus tard au moyen d'un cocktail de clivage.

On y trouve dans une première partie une liste exhaustive de tous les connecteurs qui ont été utilisés à ce jour, ainsi que tous les tests colorimétriques développés pour suivre le déroulement des réactions. Les appareillages utilisables en synthèse combinatoire ainsi que les synthèses visant à développer une bibliothèque de petites molécules (y compris dérivés

polyhétérocycliques) sont aussi décrits de manière exhaustive. Le chapitre le plus intéressant concerne l'amélioration qu'apporte ce type de synthèses pour résoudre les problèmes posés par la régiosélectivité ou la chimiosélectivité. La deuxième partie présente des applications de ce type de synthèses dans les domaines de la synthèse asymétrique, la synthèse d'hétérocycles assistée par micro-ondes ou impliquant des peptides et des amino-acides, la génération de bibliothèques hétérocycliques à visée thérapeutique, les avancées dans le domaine des cycloadditions 1,3-dipolaires, l'emploi des sulfones dans la synthèse d'hétérocycles, les radiosynthèses, la synthèse de colorants pour la bioimagerie, la synthèse de molécules dendritiques et la synthèse d'oligosaccharides. Il s'agit donc essentiellement d'une compilation très spécialisée, visiblement très complète, de techniques expérimentales visant à fabriquer des molécules principalement hétérocycliques ayant des intérêts thérapeutiques ou aidant au diagnostic médical.

On ne trouve ici aucun mécanisme réactionnel permettant de rationaliser la foisonnante liste de réactions chimiques étudiées. Un livre visiblement fait par des expérimentateurs pour des expérimentateurs. Le fait que chaque chapitre soit écrit par des auteurs différents et qu'il n'y ait aucun chapeau introduisant le sujet ou concluant pour des perspectives futures rend l'ouvrage assez indigeste, le cantonnant à un simple rôle d'aide ponctuelle pour voir ce qui a déjà été fait sur un point très précis. Je ne le recommanderais donc pas à des personnes souhaitant démarrer une activité de synthèse organique sur support solide. Il ravira en revanche celles déjà fortement impliquées dans ce type de synthèse qui y trouveront une bibliographie très complète.

Marc Henry



**Green approaches to asymmetric
catalytic synthesis**

Springer briefs in molecular science
A. Patti
140 p., 49,95 €
Springer, 2011

La docteure Angela Patti propose un fascicule dédié à l'approche

« durable » ou « verte » ou « écologique » de la catalyse asymétrique. Cette analyse est particulièrement bienvenue puisque la production de molécules énantiopures est nécessaire chaque fois que des principes actifs chiraux entrent en interaction avec les systèmes vivants. Cela a été pris en compte dès les années 1960 pour les médicaments, en grande partie après le désastre de la thalidomide, mais ne s'applique aux produits de spécialité (cosmétiques, entretien, pesticides, additifs pour polymères...) que depuis quelques années, et là aussi, sous pression de problèmes de pollution bien réels.

Les méthodes d'accès aux molécules chirales – utilisation de matières premières naturelles chirales, de réactifs chiraux, de techniques de dédoublement ou de catalyseurs – sont décrites dans leurs principes et quelques-uns de leurs avantages et inconvénients sont cités. La partie dédoublement par chromatographie industrielle (associée à la racémisation) n'est pas négligée. Cette approche est beaucoup moins citée dans la littérature générale, néanmoins c'est une option tout à fait compétitive dans de nombreux cas.

Le deuxième chapitre est dédié aux catalyseurs asymétriques ; une relativement bonne description de l'état de l'art y est faite, que ce soit pour les catalyseurs organométalliques ou pour les organocatalyseurs. Une très large part est accordée à l'organocatalyse, ce qui est très heureux compte tenu de l'ambition de traiter des « green approaches » de la catalyse asymétrique. Malheureusement, c'est le seul élément qui justifie le titre du livre. Il n'y a pas d'analyse critique en termes d'économie d'atome, de facteur E, d'analyse de cycle de vie ou de risques... L'auteur fournit un panorama de ce qui s'est fait de mieux dans le domaine de la catalyse asymétrique, mais sans éclairage par rapport à l'impact écologique de ceux-ci.

La première partie du troisième chapitre traite des solvants, mais la problématique des solvants (plus) respectueux de l'environnement (méthodes EHS et LCA) n'est pas traitée, ou seulement par des exemples catalogues qui répertorient les dernières avancées en catalyse asymétrique sans solvant ou en utilisant l'eau, les liquides ioniques, les solvants fluorés. Dans ce cas non plus il n'y a pas d'analyse critique et il y a un absent de marque au catalogue : le CO₂ supercritique. Pourtant, ce dernier possède sûrement un potentiel de croissance supérieur à

d'autres cités. Pour illustrer cette relative légèreté, le schéma 3.20 décrit une époxydation efficace et énantiosélective, mais dans le tétrachlorure de carbone ! Finalement, l'immobilisation de complexes organométalliques ou d'organocatalyseurs par greffage sur support ou intégration dans des matrices organiques ou inorganiques est décrite. Là aussi, les concepts les plus sophistiqués et « à la mode » sont privilégiés, sans comparaison avec d'autres approches tout aussi prometteuses comme les surfaces métalliques modifiées ou les catalyseurs liés par interaction non covalente. Surtout, le lecteur est incapable après la lecture de ce chapitre de faire un choix en fonction d'objectifs techniques, économiques et/ou écologiques.

Pour conclure, l'auteur nous offre un panorama brillant des dernières innovations académiques en catalyse asymétrique, bien écrit, même s'il est agaçant de voir de nombreux ligands et catalyseurs décrits dans des schémas sans aucune référence. Ce livre est cependant très loin de ce que l'on pouvait attendre d'un pareil titre et je pense que ceux qui s'intéressent à l'aspect environnemental des transformations asymétriques seront déçus. Même dans des revues ou des livres sur la catalyse asymétrique en général, on trouve des analyses plus poussées des problèmes écologiques de ce domaine.

Marc Lemaire



Comment la chimie a transformé le monde

Une histoire en 7 tableaux

S. Tomic

288 p., 18 €

Le Square, 2013

La chimie est une science très vaste (il n'y a pas une chimie, mais des chimies) et il est très difficile d'en raconter l'histoire, puisque tout dépend de l'aspect sur lequel on cherche à mettre l'accent. Si l'idée initiale de l'auteur est louable – un découpage en sept parties allant de l'alchimie à la perception qu'ont nos contemporains de cette science et de son industrie –, malheureusement, nous ne pouvons que déplorer que ce livre, au titre plein de promesses, nous laisse sur notre faim.

Il comporte en effet de nombreux écueils. D'abord le style. L'auteur a opté pour un style journalistique et dynamique. De nombreuses phrases à l'emporte-pièce, des mots mal choisis et des lieux communs viennent gêner la lecture. De plus, l'auteur est tombé dans le piège du catalogue : les découvertes et leurs découvreurs sont cités, listés, mais trop rarement mis en perspective. À la lecture, on constate une grande disparité entre le traitement et le niveau de détail utilisés pour décrire la chimie française (que doit bien connaître l'auteur), au détriment de la chimie et des chimistes étrangers (ce que l'on retrouve dans la bibliographie où tous les titres proposés sont francophones). Nous avons aussi à déplorer de nombreuses confusions et erreurs dans les concepts et notions de chimie exposés. Il y a pourtant dans ce livre de nombreuses informations intéressantes – comme les dates d'apparition ou d'invention des techniques expérimentales –, mais comme l'index ne liste que les noms de chimistes, elles sont difficiles à retrouver.

Xavier Bataille



Les Mille et une nuits de la science

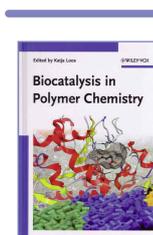
P. Boulanger

157 p., 15 €

Belin, 2014

Ce petit livre a pour auteur Philippe Boulanger, fondateur de la revue *Pour la Science* qu'il a dirigée pendant de nombreuses années. Présenté sous la forme de 26 mini-contes pastiches des mille et une nuits, il saura vous charmer si vous prenez plaisir à la logique et à la manipulation des chiffres et des raisonnements. Il donne la solution de problèmes mathématiques et d'énigmes rencontrés aussi bien dans la vie quotidienne (stratégies dans les jeux) que dans l'histoire de l'Univers (évolution des espèces, relativité du temps...). Sa lecture force à la réflexion tout en distrayant par sa forme ludique, agrémentée d'un humour parfois un peu potache. Une bonne lecture de vacances.

Yves Dubosc



Biocatalysis in polymer chemistry

K. Loos (ed.)

463 p., 144 €

Wiley-VCH, 2011

Ce volumineux ouvrage est consacré à la polymérisation enzymatique et aux réactions connexes comme la modification chimique et la dégradation biocatalysée. Dans le contexte « vert/durable » actuel de l'obtention des matériaux polymères, ce domaine est d'une brûlante actualité. Le remplacement de la voie chimique par la voie enzymatique est prometteuse, non seulement au sens de la « chimie douce » (milieu aqueux, température limitée, etc.) et de la potentielle biodégradabilité, mais aussi au sens des aspects toxicité des réactifs, élaboration de nouveaux monomères et polymères autrement inaccessibles, élimination des étapes de protection-déprotection fonctionnelle, production de matériaux à haute chémo-, régio- et stéréosélectivité. Le domaine poursuit un développement exponentiel, qui l'a fait passer de quelques publications au début des années 1990 à plus de 250 par an actuellement, soit une littérature scientifique cumulée de plus de 4 000 articles entraînant quelques 80 000 citations (web Sci). Mais la spécificité du couple enzyme-substrat fait qu'il a été difficile de proposer un classement rationnel et systématique de tous ces travaux, et les ouvrages publiés jusqu'à maintenant sont soit des compilations de conférences présentées aux nombreux colloques consacrés au domaine, soit dédiés spécifiquement à un type de polymérisation. L'éditrice du présent ouvrage, elle-même une spécialiste bien identifiée, a souhaité couvrir de façon exhaustive le thème global de la polymérisation biocatalysée en rassemblant non plus des études isolées, mais des mises au point qui s'articulent et sont classées par entrées multiples selon les classes d'enzymes utilisées, les types de polymérisation et enfin les classes de polymères obtenus. Une trentaine de contributeurs, incluant pour la plupart des spécialistes internationaux reconnus, sont intervenus dans cet ouvrage collectif

très complet et lui ont donné tout à la fois un caractère encyclopédique et une structuration qui en font un véritable traité. On notera que, même s'il est sous-tendu par l'objectif « chimie douce », cet ouvrage de seize chapitres couvre tous les aspects de la catalyse enzymatique associés à la synthèse et la modification des polymères, y compris en milieu solvant conventionnel.

Une rapide introduction présente les objectifs et rappelle les six classes conventionnelles d'enzymes dont on verra par la suite qu'au moins quatre interviennent dans les polymérisations biocatalysées. Elle est suivie d'une revue qui détaille l'obtention de monomères issus de la biomasse, revue qui pourrait sembler marginale puisque peu de ces monomères ont été polymérisés à ce jour, mais elle est complète, actualisée et donc potentiellement inspiratrice pour l'obtention enzymatique de nouveaux polymères « verts », biodégradables ou non.

L'ouvrage se structure ensuite autour des enzymes utilisées, des différents types de polymérisation, des différentes familles de (co)polymères obtenus, du contrôle de la structure et de la chiralité, de la modification et la dégradation enzymatiques, et enfin de la modélisation des processus.

Un problème majeur est la nécessaire optimisation des propriétés des enzymes (haute activité, modulation des propriétés catalytiques, stabilité thermique et chimique, extraction aisée, recyclage en continu), conditionnant évidemment le coût et le réalisme des opérations. Les plus récents développements sur l'immobilisation des enzymes par adsorption ou par intercalation dans des supports nanostructurés (argiles en feuillets, graphite, graphène, nanotubes, nanoparticules métalliques ou magnétiques, etc.) sont présentés avec de nombreux exemples de conjugués et d'applications. Cette immobilisation et ses avantages sont illustrés avec le cas de la polymérisation par ouverture de cycle de la caprolactone par la lipase B, enzyme maintenant largement commercialisée.

Une place importante est naturellement consacrée à la synthèse de polyesters dégradables (alternative aux actuels plastiques de commodité), qu'ils soient obtenus par polycondensation enzymatique (hydrolases) de précurseurs difonctionnels ou par ouverture de cycle des lactones. Il s'agit là des études historiquement engagées dans le domaine, toujours

activement développées et présentées ici de façon exhaustive. Elles ont été récemment étendues à la synthèse enzymatique de polyamides et polypeptides de haute masse molaire par condensation ester-amine. La polymérisation en chaîne radicalaire amorcée par voie enzymatique (peroxydase, laccase) de monomères vinyliques (styrène, acrylamide, méthacrylates) demeure pour l'instant anecdotique mais pourrait être prometteuse quand le problème de la faible activité des catalyseurs aura été résolu. Ces mêmes oxydoréductases permettent aussi le couplage oxydant de composés phénoliques synthétiques ou d'origine naturelle qui pourrait ouvrir la voie à une large gamme de nouveaux matériaux. On notera que ce type de couplage oxydant permet également l'obtention en milieu aqueux de polymères conducteurs (polyanilines, polythiophènes et même polypyrrroles) essentiellement par polymérisation assistée en matrice avec enzymes supportées. Ces polymères obtenus en conditions douces avec des catalyseurs non toxiques et biodégradables ont une remarquable homogénéité structurale et, sous forme de films ou de fibres, présentent des propriétés similaires à celles des produits obtenus par la chimie conventionnelle.

Des aspects plus spécifiques de la polymérisation biocatalysée comme l'élaboration d'architectures contrôlées (copolymères à blocs ou greffés), la modification enzymatique des polymères, l'usage de l'énantioselectivité des enzymes pour la préparation de polymères chiraux à partir de monomères racémiques, la modélisation moléculaire des processus biocatalytiques (exemples de la lipase pour les polymérisations de la caprolactone et du β -lactame) ou encore l'usage de solvants exotiques (CO_2sc , liquides ioniques) font l'objet de chapitres dédiés et remarquablement documentés.

Enfin, on retiendra – et ce n'est pas le moindre intérêt de l'ouvrage – plusieurs mises au point à caractère beaucoup plus biochimique. L'une concerne la biosynthèse bactérienne des polyhydroxyalcanoates (PHA) et de la cyanophycine. L'autre s'intéresse aux polysaccharides, d'une part à leur élaboration à partir de précurseurs monosaccharidiques par glycosylation enzymatique régio- et stéréocontrôlée (glycosyltransférase, glucosidase), et d'autre part à leur dégradation par ces mêmes enzymes illustrée

ici par des exemples importants comme ceux de la cyclodextrine, de l'acide hyaluronique, de la chitine, et autres matériaux polysaccharidiques usuels.

Par la richesse de son contenu, de ses données bibliographiques et par sa structuration, cet ouvrage, pour l'instant unique en son genre, s'adresse autant aux chercheurs impliqués qu'aux néophytes qui voudraient aborder le domaine de la polymérisation biocatalysée.

Jean-Pierre Vairon

A signaler



L'épopée du gaz de Lacq

A. Laurent

182 p., 39 € (+ port)

Éditions CAIRN*, 2013

Cet ouvrage, richement illustré, retrace soixante années d'aventure industrielle et humaine, de la découverte du gaz, de son exploitation, jusqu'au développement de la thiochimie.

* Disponible uniquement par correspondance : www.lepopeedugazdelacq.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.



N° 964 (mai 2014)

- Pour une culture scientifique ambitieuse, par V. Parbelle et le Bureau national.
- Pourquoi l'électron de l'atome d'hydrogène ne tombe-t-il pas sur le noyau ?, par B. Boullil.
- Interfaçage d'un potentiostat, par M. Deluzarche et V. Steinmetz.
- Triacides, par J. Rivas-Enterrios et C. Ambard.
- L'année de la cristallographie : Réseau, maille et structure cristalline, par R. Mahé.
- L'arpenteur du web : la cristallographie, par G. Bouyrie.

Sommaires complets, résumés des articles et modalités d'achat sur www.udppc.asso.fr

30 juin-1^{er} juillet 2014



Rencontres Colloïdes

Émulsions et mousses

Bordeaux

• rencontres-colloides@crpp-bordeaux.fr

1-4 juillet 2014

ISACS 13

Challenges in inorganic and materials chemistry

Dublin (Irlande)

• www.rsc.org/conferencesandevents/isacs/isacs13

2-4 juillet 2014



RICT 2014

50th International conference on medicinal chemistry

Rouen

• www.rict2014.org

6-9 juillet 2014

BOS 2014

8th International conference on organic chemistry

Vilnius (Lituanie)

• www.boschem.eu

6-10 juillet 2014



EUCHEM 2014 conference on molten salts and ionic liquids

Tallinn (Estonie)

• <http://euchem2014.ttu.ee>

6-10 juillet 2014

ISGS summer school 2014

Sol-gel chemistry and characterization

Paris

• <https://www.isgs.org/index.php/events-to-come/270-g-isgs-summer-school-2014-paris-france-6-10-july-2014>

6-11 juillet 2014

ISHC XIX

19th International symposium on homogeneous catalysis

Ottawa (Canada)

• www.ishc.ca

6-11 juillet 2014



SSC 2014

11th International conference on solid state chemistry

Trencianske Teplice (Slovaquie)

• www.ssc2014.sav.sk

8 juillet 2014



Perturbateurs endocriniens

Enjeux industriels, de santé et d'environnement

Romainville

• www.adebiotech.org/pert

13-16 juillet 2014

ECB 16

16th European congress on biotechnology

Edinburgh (Royaume-Uni)

• www.eiseverywhere.com/ehome/67980/Scientific%20programme

13-17 juillet 2014

BOSS XIV

14th Belgian organic synthesis symposium

Louvain-la-Neuve (Belgique)

• www.ldorganisation.com/v2/produits.php?langue=english&cle_menus=1238915713&cle_data=1360153384

13-18 juillet 2014



ICCE 2014

23rd International conference on chemistry education

Toronto (Canada)

• www.icce2014.org

13-18 juillet 2014



ICOMC 2014

XXVIth International conference on organometallic chemistry

Sapporo (Japon)

• www.ec-pro.co.jp/icomc2014

13-18 juillet 2014



XXVth IUPAC symposium

on photochemistry

Bordeaux

• www.photoiupac2014.fr

21-25 juillet 2014



ISSP-16

16th International symposium on solubility phenomena and related equilibrium processes

Karlsruhe (Allemagne)

• www.iupac.org/home/conferences/conferences-by-year/conferences-by-year-folder/2014.html

28-30 juillet 2014

Advancing the chemistry of the f-elements

Dalton discussion 14

Edinburgh (Royaume-Uni)

• www.rsc.org/conferencesandevents/rsconferences/dd14/index.asp

28-30 juillet 2014

Carbon in electrochemistry

Faraday discussion 172

Sheffield (Royaume-Uni)

• www.rsc.org/conferencesandevents/rsconferences/fd/fd172/index.asp

10-14 août 2014



IUPAC 2014

13th IUPAC international congress on pesticide chemistry

San Francisco (États-Unis)

• www.iupac2014.org

10-15 août 2014



ICPOC 22

22nd IUPAC international conference on physical organic chemistry

Ottawa (Canada)

• <http://events.science.uottawa.ca/icpoc22/welcome.html>

17-21 août 2014



ICGC-5

5th IUPAC international conference on green chemistry

Durban (Afrique du Sud)

• www.saci.co.za/greenchem2014

24-28 août 2014



ImeBoron XV

XVth International meeting on boron chemistry

Prague (Rép. Tchèque)

• www.imeboronxv.cz

24-29 août 2014

Electmol

7th International conference on molecular electronics

Strasbourg

• <http://electmol.u-strasbg.fr>

24-29 août 2014

IMSC 2014

20th International mass spectrometry conference

Genève (Suisse)

• www.imsc2014.ch

Vous trouverez de nombreuses autres manifestations sur le site de la SCF : www.societechimiquedefrance.fr, rubrique Manifestations.

24-29 août 2014

ISOCS-26

26th International symposium on the organic chemistry of sulfur

Istanbul (Turquie)

- www.isocs-26.org

31 août-4 septembre 2014

5th EuCHEMS chemistry congress

Istanbul (Turquie)

- www.euchems-istanbul2014.org

31 août-5 septembre 2014

World water week

Stockholm (Suède)

- www.worldwaterweek.org

1-3 septembre 2014

New advances in carbon nanomaterials

Faraday discussion 173

Londres (Royaume-Uni)

- www.rsc.org/conferencesandevents/rscconferences/fd/fd173/index.asp

2-6 septembre 2014

Bologna 2014

23rd International conference on high resolution molecular spectroscopy

Bologne (Italie)

- www.chem.uni-wuppertal.de/conference

6 septembre 2014

4^e Colloque « De la recherche à l'enseignement »

Paris

- www.societechimiquedefrance.fr/manifestation/4e-colloque-de-la-recherche-a-l-enseignement.html

7-10 septembre 2014

22nd Conference on isoprenoids

Prague (Rép. Tchèque)

- www.vscht.cz/lam/isoprenoids/Isoprenoids.htm

7-11 septembre 2014

EFMC-ISMIC 2014

23rd International symposium on medicinal chemistry

Lisbonne (Portugal)

- www.ldorganisation.com/v2/produits.php?langue=english&cle_menus=1238915495&cle_data=1238740790

8-10 septembre 2014

Organics, photonics and electronics

Faraday discussion 174

Strathclyde (Royaume-Uni)

- www.rsc.org/conferencesandevents/rscconferences/fd/fd174/index.asp

8-11 septembre 2014

6th International FEZA (Federation of European Zeolite Associations) conference

Leipzig (Allemagne)

Thème : Porous systems: from novel materials to sustainable solutions.

- <http://events.dechema.de/feza2014>

8-12 septembre 2014

Sol-Gel 2014

3rd International conference

Suzdal (Russie)

- <https://www.isgs.org/index.php/events-to-come/265-g-cis-sol-gel-2014-in-suzdal-russia-september-8-12-2014>

12 septembre 2014

EFMC-YMCS 2014

1st EFMC young medicinal chemist symposium

Lisbonne (Portugal)

- www.ldorganisation.com/v2/produits.php?langue=english&cle_menus=1238915836

14-17 septembre 2014

FJS 2014

24th French-Japanese symposium on medicinal and fine chemistry

Lyon

- <http://fjs2014.univ-lyon1.fr>

14-19 septembre 2014

IBS 2014

16th International conference on biotechnology

Fortaleza (Brésil)

- www.ibs2014.org

16-19 septembre 2014

8th ECNP international conference on nanostructured polymers and nanocomposites

Dresde (Allemagne)

- www.ecnp-eu.org/dresden.php

17-19 septembre 2014

SyCOCAL IX

Symposium de chimie organique en Centre-Auvergne-Limousin

Tours

- <http://sycocal9.sciences.univ-tours.fr/index.html>

21-25 septembre 2014

IASOC 2014

Ischia advanced school of organic chemistry

Ischia (Italie)

- www.iasoc.it/home

22-25 septembre 2014

Polysolvat-10

10th International conference on polymer-solvent complexes and intercalates

Salerno (Italie)

- www.polysolvat10.unisa.it

24-25 septembre 2014

Atmos'Fair 2014

International conference on air quality

Lyon

- www.atmosfair.fr

24-25 septembre 2014

Training course on polymer durability

Aubière

- www.cnep-ubp.com/training

25-26 septembre 2014

CO₂ Forum

Lyon

- <http://co2forum.cpe.fr>

5-8 octobre 2014

SPICA 2014

International symposium on preparative and industrial chromatography and allied techniques

Basel (Suisse)

- www.ldorganisation.com/v2/produits.php?langue=english&cle_menus=1238915759

15-17 octobre 2014

Nice 2014

2nd International conference on bioinspired and biobased chemistry and materials

Nice

- www.nice2014-conference.com

Cinquième séminaire SCF

La prochaine édition du forum annuel du Conseil d'administration et des responsables des entités opérationnelles se tiendra les 1^{er} et 2 décembre prochain. Ce cinquième séminaire devra consolider les actions entreprises depuis le début de cette année qui visent à accroître le nombre d'adhérents, parachever la structuration de la nouvelle division Chimie physique, poursuivre le dialogue entre les divisions scientifiques et les groupes thématiques accueillis à la SCF, et approfondir les relations avec d'autres sociétés savantes françaises, ainsi que l'EuCheMS et l'IUPAC.

Tout adhérent à la SCF peut transmettre ses doléances et propositions aux entités opérationnelles (divisions scientifiques, groupes thématiques, sections régionales et clubs de jeunes sociétaires associés) comme au Bureau national, si possible avant le 30 septembre.

Adhésion à l'IUPAC

L'adhésion individuelle à l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) vous permet de recevoir la revue bimestrielle *Chemistry International* et de bénéficier d'une remise sur tous les congrès labellisés IUPAC. De plus, sachiez-vous que si elle est associée à une adhésion à la SCF, elle ne revient qu'à 20 € ? Alors, adhérer, faire adhérer à la SCF, c'est également adhérer et faire adhérer à l'IUPAC !

• Pour cela, une seule adresse : www.societechimiquedefrance.fr/fr/adhesion-et-renouvellement.html

Le Bureau de la SCF

Prix des divisions 2014

Catalyse

Prix Jeune chercheur

• Karine De Oliveira Vigier



Karine De Oliveira Vigier est maître de conférences à l'Institut de chimie des milieux et matériaux de Poitiers (IC2MP, UMR CNRS 7285) au sein de l'équipe « Catalyse et milieu non conventionnels » dirigée par Christophe Coutanceau et François Jérôme.

Après sa maîtrise de chimie et un an en neurosciences à Budapest en Hongrie, elle effectue son doctorat à l'Université de Poitiers dans l'équipe « Catalyse et oxydes » du Laboratoire de catalyse en chimie organique (LACCO), avec pour sujet l'hydrogénation catalytique d'esters gras en alcools gras insaturés. En 2003, elle effectue un stage post-doctoral de vingt mois dans le département de Génie chimique de l'Université de Sherbrooke au Canada, durant lequel elle met au point un procédé innovant pour le reformage catalytique de l'éthanol conduisant à la réalisation d'un brevet. Elle est recrutée en 2004 comme maître de conférences au

sein de l'équipe « Fluorations et hydrotraitements » du LACCO où sa thématique de recherche est la fluoration catalytique de molécules chlorées. En 2008, elle effectue une reconversion thématique et rejoint l'équipe de l'IC2MP où elle travaille depuis sur la valorisation de la biomasse (lignocellulose, huiles végétales et dérivés), avec pour principal objectif le développement de milieux non conventionnels, la stratégie scientifique consistant à examiner comment le milieu réactionnel associé au catalyseur peut influencer la sélectivité de la réaction. Elle a à son actif 28 publications, 4 brevets et de nombreuses communications orales et posters.

En parallèle à ses activités de recherche, elle enseigne depuis 1998 en tant que vacataire, monitrice et maître de conférences en France et à l'étranger (Hongrie, Canada). Elle est aussi coresponsable du Master 1 Chimie analytique et qualité depuis 2007. Karine De Oliveira Vigier est par ailleurs très investie dans la vie du laboratoire, de la faculté des sciences, et dans la communication pour promouvoir les sciences au travers de salons étudiants et d'interventions dans les lycées. Elle est en particulier responsable d'Action PLUS, qui a pour but de renforcer la liaison entre université et secondaire, et qui accueille 1 350

lycéens par an à la faculté des sciences lors d'une journée découverte.

• Vincent Monteil



Chargé de recherche au CNRS, Vincent Monteil effectue ses travaux au sein du Laboratoire de chimie, catalyse, polymères et procédés (C2P2, UMR 5265, CNRS/UCBL/CPE Lyon) à Villeurbanne.

Ingénieur chimiste, il s'est tout d'abord spécialisé en catalyse avant d'aborder, lors de sa thèse, la catalyse de polymérisation qui est aujourd'hui au cœur de ses activités de recherche. Il a réalisé ses travaux de thèse à l'École Supérieure de Chimie Physique et Électronique de Lyon (sous la direction de R. Spitz et C. Boisson) sur le développement de catalyseurs à base de néodyme pour la copolymérisation du butadiène et de l'éthylène en collaboration avec la société Michelin. En 2003, il rejoint le groupe de Stefan Mecking à Freiburg puis Konstanz en Allemagne pour un séjour post-doctoral durant lequel il travaille sur des réactions de polymérisation catalytique dans l'eau. Il entre au CNRS en 2005 en qualité de chargé de recherche au Laboratoire de chimie et procédés de polymérisation (LCPP, aujourd'hui C2P2).

Prochain numéro : « La cristallographie »

Parution début septembre

Nous vous réservons une surprise de taille pour la rentrée : un **numéro thématique triple (juillet-septembre-octobre) sur la cristallographie** pour marquer notre participation à l'Année internationale consacrée à ce domaine.

De nombreuses animations scientifiques ont été présentées dans toute la France, et continueront à l'être jusqu'à début décembre*. Quant à *L'Actualité Chimique*, elle publiera près d'une trentaine d'articles de chimistes et de physiciens sur cette science aux multiples facettes omniprésente dans notre vie quotidienne. En décembre, la revue *Reflets de la Physique* publiera un numéro spécial complémentaire au nôtre. À très bientôt donc et bonnes vacances ! Mais d'ici là, n'hésitez pas à venir nous rendre visite sur le site pour suivre les actualités et à nous envoyer vos courriers, projets d'articles, photos...

La Rédaction

*Voir le programme sur www.aicr2014.fr



Son « terrain de jeu » est centré sur la catalyse de polymérisation et les polyoléfinés qui sont les polymères les plus produits industriellement (plus de cent millions de tonnes par an). Il travaille notamment sur les catalyses hétérogènes Ziegler-Natta et Phillips de polymérisation des oléfines, ainsi que sur des catalyses utilisées dans la synthèse d'élastomères

silicones. Il développe également des réactions de polymérisation hybrides mélangeant simultanément mécanismes catalytiques et radicalaires pour la synthèse de polyoléfinés polaires. Enfin, délaissant la catalyse mais pas les polyoléfinés, il s'intéresse également à la polymérisation radicalaire de l'éthylène dans des conditions douces, notamment en milieux aqueux.

Vincent Monteil compte près de cinquante publications, sept brevets, quinze conférences et séminaires invités et de nombreuses communications orales.

Il a reçu la Médaille de bronze du CNRS en 2011*.

*Voir Monteil V., La catalyse de polymérisation : repousser les limites, *L'Act. Chim.*, 2012, 369, p. 30.

6 septembre 2014

4^e Colloque « De la recherche à l'enseignement »

Paris

Au programme :

- *Contribution du chimiste médicinal dans l'identification d'un nouveau médicament : exemple du projet SARM*, par **Pierre Deprez** (groupe de Chimie médicinale, Société Galapagos), Prix industriel 2012 de la division Chimie organique de la SCF.
 - *Congélation de suspensions colloïdales : des phénomènes naturels aux procédés industriels*, par **Sylvain Deville** (Laboratoire de synthèse et fonctionnalisation des céramiques, CNRS/Saint-Gobain), Médaille de bronze du CNRS 2012.
 - *Les nanostructures de carbone, un matériau polyvalent pour les biocapteurs et les (bio)piles à combustible*, par **Michael Holzinger** (Département de Chimie moléculaire, Grenoble), Prix jeune chercheur 2013 de la division Chimie analytique de la SCF.
 - *Les foldamères : une expansion de l'espace chimique*, par **Ivan Huc** (Institut européen de chimie et biologie, Bordeaux 1), Médaille d'argent du CNRS 2012.
 - *Électrochimie et catalyse organométallique : une excellente synergie*, par **Anny Jutand** (Département de Chimie, ENS Paris), Grand Prix Achille-Joseph Le Bel de la SCF 2013.
 - *Apports de la RMN solide à l'étude de biomatériaux naturels et synthétiques*, par **Danielle Laurencin** (Institut Charles Gerhardt, Montpellier), Médaille de bronze du CNRS 2013.
- De 9 h 30 à 17 h 30, à l'École Nationale Supérieure de Chimie Paris (Chimie-ParisTech).
colloqueER@societechimiquedefrance.fr

Connaissez-vous le site de l'AC ?



l'actualitechimique.org

Alors, vite à votre souris !

Index des annonceurs

BASF	4 ^e de couv.
ChemistryViews	p. 62
CultureSciences-Chimie	p. 26
EDIF	p. 48
EDP Sciences	p. 38
FR-Chimie-Marseille	2 ^e de couv.
KNF	p. 14
UdPPC	p. 20

Régie publicitaire : 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 - <http://www.edif.fr>




Alerts & Events

Videos & Blogs

News & Articles

Join - register - benefit
with 300.000+ users on the platform!

Easy - fast - exciting
updated every day for you and your work!

Spot your favorite content:
ChemistryViews.org

ChemPubSoc Europe

WILEY-VCH

Les aimants permanents à base d'éléments de terres rares

Un avenir en vert

La découverte voici trente ans des aimants de type terres rares-fer-bore (R-Fe-B, où R est un élément de terres rares) a entraîné un développement des applications des systèmes à aimants à un niveau qui n'avait pas été anticipé [1-2] (l'adjectif « rare » date de la découverte des éléments R, au XVII^e siècle, mais le néodyme est plus abondant que le cobalt par exemple). L'insertion de ces aimants au sein des petits moteurs électriques commandant le mouvement de la tête de lecture des disques durs des ordinateurs a été importante pour la réduction en taille des micro-ordinateurs. Elle a constitué la première application grand public des aimants de haute performance.

Aujourd'hui, ces matériaux se révèlent indispensables au développement de moyens de transports moins polluants et à l'émergence des énergies vertes. Chaque voiture hybride ou électrique contient quelques kilogrammes d'aimant et une éolienne de 1 MW de 500 kg à 1 t. Le développement des aimants R-Fe-B à une nouvelle échelle requiert que certaines de leurs propriétés soient améliorées et leur coût réduit. Ce sont les objectifs de programmes de recherche qui ont démarré récemment à l'échelle internationale.

Dans un moteur, un fil parcouru par un courant électrique et placé dans un champ magnétique se trouve soumis à une force, la force de Laplace, donnée par la fameuse « règle des trois doigts ». Réciproquement, dans un générateur électrique, le courant est produit au sein d'un fil dont on force le déplacement dans un champ magnétique. L'introduction d'aimants R-Fe-B dans des machines électriques permet d'obtenir les champs magnétiques requis (de l'ordre de 1 tesla) de façon plus simple que dans les machines classiques et d'atteindre des densités d'énergie supérieures. Les voitures dont la traction est assurée par des moteurs à aimants sont plus légères et consomment donc moins d'énergie. De même, les éoliennes nécessitent des infrastructures plus légères et moins d'entretien, propriétés importantes notamment pour les équipements installés au large des côtes.

Dans tous les matériaux magnétiques, les moments sont couplés les uns aux autres par des interactions entre électrons, appelées d'échange, intrinsèquement liées à la physique quantique. Plus spécifiquement, les matériaux pour aimants sont ferromagnétiques, comme le fer, le cobalt, le nickel et nombreux de leurs alliages, ce qui veut dire que les interactions d'échange imposent un couplage parallèle des moments. En présence de ces seules interactions, le couplage se répéterait jusqu'à l'échelle macroscopique, donnant lieu à une situation dite d'aimantation (moment par unité de volume de matière) saturée. Les champs magnétiques de chaque moment individuel s'additionneraient pour générer un champ magnétique d'intensité maximale.

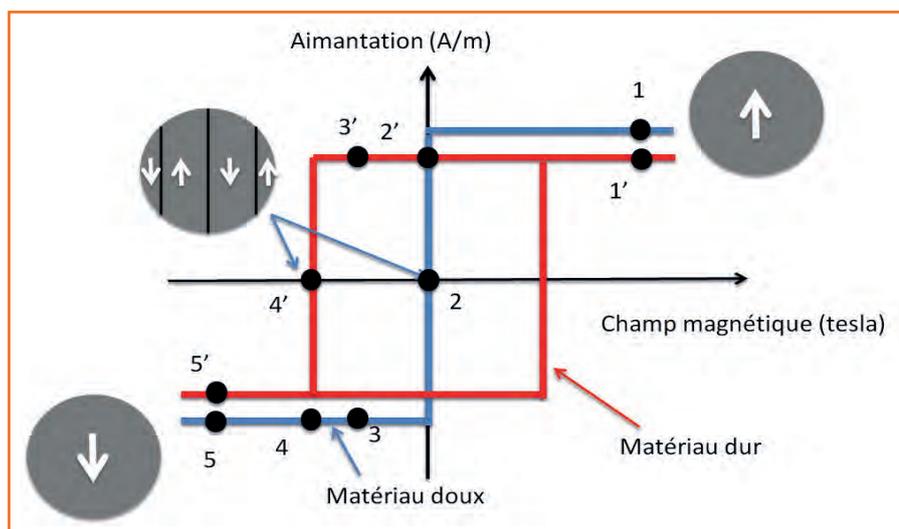
Mais d'autres interactions, dites dipolaires, sont présentes : celles qui font le couplage tête-bêche que nous constatons entre deux aimants placés côte à côte. Mille fois plus faibles

que les interactions d'échange, elles n'affectent pas le couplage ferromagnétique à l'échelle nanométrique, celle de la dimension des atomes. Cependant, les interactions d'échange sont à très courte portée (leur intensité décroît très vite avec l'augmentation de la distance entre atomes), alors que les interactions dipolaires sont à longue portée. La compétition entre interactions, d'intensités et portées très différentes, entraîne la formation de régions de taille micrométrique, les domaines de Weiss. Au sein d'un domaine, les moments parallèles satisfont les interactions d'échange. D'un domaine à l'autre, leurs directions alternent, minimisant l'énergie dipolaire pour un très faible coût en énergie d'échange. Ce faible effet a une forte conséquence : les champs magnétiques générés par chaque domaine s'annulent à l'échelle de l'ensemble du matériau ; les matériaux ferromagnétiques usuels (matériaux magnétiques doux), tels que le fer, nous apparaissent « non magnétiques » en l'absence d'un champ magnétique appliqué.

Dans les matériaux pour aimants (matériaux magnétiques durs), comme dans tous les ferromagnétiques, la configuration optimale des moments est faite de domaines, d'aimantations alternées. Mais imaginons un état d'aimantation saturée, obtenu par exemple en appliquant un champ magnétique initial. La résistance à la décomposition en domaines à partir d'un tel état, lorsque le champ est ramené à zéro, constitue la propriété spécifique des matériaux durs. Elle est dénommée coercitivité et est due au phénomène d'anisotropie magnétique : les moments atomiques possèdent une orientation (pas une direction) privilégiée au sein de la matière. Pour créer des domaines à partir de l'état saturé, il faut retourner certains des moments, et donc, de façon transitoire, les écarter de leur direction privilégiée, ce à quoi l'anisotropie s'oppose. Dans les matériaux durs, l'anisotropie est suffisamment forte pour que la décomposition en domaines à partir de l'état d'aimantation saturée ne se produise pas facilement. Les cycles d'hystérésis (variation de l'aimantation en fonction du champ) de matériaux magnétiques doux et durs sont comparés sur la *figure* (voir page suivante).

Les aimants R-Fe-B appartiennent à la famille des aimants à base d'éléments de terres rares. Ces éléments, dont la particularité est la très forte anisotropie magnétique, ne peuvent servir d'aimant à eux seuls. La température à laquelle l'ordre magnétique disparaît (une mesure de la force des interactions d'échange) est inférieure à la température ambiante (température de Curie dans les ferromagnétiques). Autour de chaque atome, les électrons sont fortement localisés, si bien que les électrons situés sur deux atomes différents interagissent peu.

Les alliages R-Fe ou R-Co associent deux propriétés fondamentales dans le présent contexte. La première est le ferromagnétisme à haute température, caractéristique du fer ou du cobalt : ici, les électrons magnétiques étant itinérants (ils voyagent d'un atome à l'autre), le couplage d'échange entre électrons devient un couplage entre moments magnétiques



Cycles d'hystérésis comparés d'un matériau magnétique doux (en bleu) et d'un matériau dur (en rouge). Dans un champ magnétique suffisamment intense (situations (1) (1') et (5) (5')), l'aimantation s'aligne selon la direction du champ quel que soit le matériau considéré. Dans un matériau dur, l'aimantation tend à résister au champ appliqué, propriété appelée coercivité : en (2), l'aimantation du matériau doux s'annule lorsque le champ lui-même s'annule, alors que celle du matériau dur est in affectée (2'), et en (3), l'aimantation du matériau doux est renversée, celle du matériau dur (3') demeurant antiparallèle au champ. L'aimantation du matériau dur ne se renverse qu'en (4'). Le champ appliqué correspond au champ coercitif

d'atomes voisins. La seconde est l'anisotropie magnétique, caractéristique des éléments R.

Dans les aimants R-Fe-B, le composé magnétique dur est de composition chimique $R_2Fe_{14}B$. L'élément R est principalement le néodyme (Nd). Les propriétés anisotropes diminuent rapidement au-dessus de l'ambiante. Or les températures dans les machines électriques modernes peuvent atteindre 180 °C. Du dysprosium (Dy), plus anisotrope que le néodyme, est utilisé pour préserver des propriétés d'aimants à cette température. Mais la substitution entraîne une diminution d'aimantation. L'utilisation de dysprosium soulève aussi des questions d'ordre stratégique. Les gisements contenant du dysprosium, élément dix fois plus rare que le néodyme, sont concentrés dans un très petit nombre de pays. Le but des recherches actuelles est de diminuer la quantité de dysprosium tout en préservant ou améliorant les propriétés d'aimants.

Nous avons ignoré jusqu'ici un aspect très important : un morceau massif d'un composé $R_2Fe_{14}B$ n'est pas un aimant,

bien qu'il ait les propriétés que nous avons décrites. Des défauts de taille nanométrique sont toujours présents, dans lesquels les propriétés anisotropes sont perdues. La formation (on dit nucléation) d'un seul domaine magnétique d'aimantation inversée annihile les propriétés d'aimants. Les aimants réels sont fabriqués par agglomération de grains de $R_2Fe_{14}B$ de diamètre de l'ordre de 1-5 μm , au sein d'une matrice non magnétique. Une telle microstructure granulaire limite l'effet négatif d'un défaut au seul grain auquel il appartient. Par ailleurs, on montre que l'état d'aimantation saturée devient de plus en plus stable lorsque la taille des grains magnétiques diminue. Divers procédés métallurgiques, tel le frittage de poudres, permettent d'obtenir la microstructure granulaire désirée.

La modélisation théorique des processus de renversement d'aimantation (processus qui décrivent ce qu'il se passe lorsque les moments quittent leur direction privilégiée) permet d'analyser le lien entre défauts et nucléation. Des matériaux modèles ont été préparés, en particulier sous forme de couches, de propriétés bien supérieures à celles des matériaux usuels [3]. Ces résultats guident aujourd'hui le développement de procédés industriels, visant à reproduire les nanostructures obtenues dans les matériaux modèles. Une retombée de ces recherches est la fabrication de micro-aimants à partir de matériaux en couches épaisses, avec des applications très originales en médecine et biologie [4] ou touchant à des aspects fondamentaux de la biologie [5].

Références

- [1] Gutfleisch O. *et al.*, Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient, *Adv. Mater.*, **2011**, 23, p. 821.
- [2] Coey J.M.D., Hard magnetic materials: A perspective, *IEEE Trans. Mag.*, **2011**, 47, p. 4671.
- [3] Woodcock T.G. *et al.*, Understanding the microstructure and coercivity of high performance NdFeB-based magnets, *Scripta Materialia*, **2012**, 67, p. 536.
- [4] Zanini L.F. *et al.*, Micromagnet structures for magnetic positioning and alignment, *J. Appl. Phys.*, **2012**, 111, 07B312.
- [5] T. Brunet *et al.*, Evolutionary conservation of early mesoderm specification by mechanotransduction in Bilateria, *Nature Comm.*, 2013, article 2821.

Cette fiche a été réalisée par **Dominique Givord**, chercheur émérite au CNRS (Institut Néel, Grenoble) et professeur à l'Université Fédérale de Rio de Janeiro (dominique.givord@neel.cnrs.fr), et **Nora Dempsey**, chercheuse au CNRS à l'Institut Néel (nora.dempsey@grenoble.cnrs.fr). Tous deux animent une équipe spécialisée dans l'étude des matériaux pour aimants. Ils participent à de nombreuses collaborations aux échelles européenne et internationale, avec des partenaires académiques et industriels.

Les fiches « Un point sur » sont coordonnées par un comité éditorial mené par Jean-Pierre Foulon et Michel Quarton (contact : bleneau@lactualitechimique.org).

Abonnement 2014 (numéros spéciaux inclus)

Cochez la case qui correspond à l'abonnement auquel vous voulez souscrire :

	Abonnement papier + électronique*		Abonnement électronique seul*	Abonnement multiple**
	France	Étranger	France / Étranger	France / Étranger
Particuliers	<input type="checkbox"/> 100 €	<input type="checkbox"/> 105 €	<input type="checkbox"/> 55 €	(pour les lycées et les institutions) <input type="checkbox"/> 400 € <input type="checkbox"/> 400 €
Lycées	<input type="checkbox"/> 110 €	<input type="checkbox"/> 130 €	<input type="checkbox"/> 70 €	
Institutions	<input type="checkbox"/> 200 €	<input type="checkbox"/> 210 €	<input type="checkbox"/> 155 €	

* Courriel obligatoire ** Adresse IP obligatoire (cet abonnement correspond à un abonnement papier + dix abonnements électroniques + l'accès aux archives de la revue)

Complétez votre collection

Les sommaires de tous les numéros peuvent être consultés sur notre site www.lactualitechimique.org

Numéros spéciaux également disponibles en **version électronique** sur le site à un tarif préférentiel

- Modéliser et simuler la chimie (fév.-mars 2014) : 32 €
- La chimie mène l'enquête, saison 2 (oct.-nov. 2013) : 32 €
- Biotechnologies et chimie : nouveaux développements (juin-juil.-août 2013) : 32 €
- CO₂, où en sommes-nous ? (fév.-mars 2013) : 32 €
- Toxicologie environnementale et humaine (oct.-nov. 2012) : 32 €
- Danses avec les spins. La résonance magnétique nucléaire en chimie (juin-juil.-août 2012) : 32 €
- Fibres et textiles chimiques : matériaux du XXI^e siècle (fév.-mars 2012) : 32 €
- Le rayonnement synchrotron, une lumière pour comprendre la chimie (oct.-nov. 2011) : 32 €
- Chimie et société : construire un dialogue (sept. 2011) : 24 €
- La chimie prépare notre avenir, vol. 2 (juin-juil.-août 2011) : 32 €
- La chimie prépare notre avenir, vol. 1 (janv.-fév. 2011) : 32 €
- La chimie mène l'enquête (juin-juil.-août 2010) : 15 €
- Chimie et développement durable. L'engagement des écoles de la Fédération Gay-Lussac (fév.-mars 2010) : 15 €
- Electrochimie & Art, Environnement, Santé, Nanosciences... (fév.-mars 2009) : 15 €
- Les cosmétiques. La science au service de la beauté (oct.-nov. 2008) : 15 €
- Chimie et patrimoine culturel, vol. II (avril 2008) : 15 €
- La photochimie pour transformer la matière (mars 2008) : 15 €
- Chimie et patrimoine culturel, vol. I (oct.-nov. 2007) : 15 €
- La photochimie pour mieux vivre (mai-juin 2007) : 15 €
- Fluor et produits fluorés à l'aube du XXI^e siècle (oct.-nov. 2006) : 15 €
- Les matériaux carbonés (mars-avril 2006) : 15 €

Liste complète des numéros thématiques sur www.lactualitechimique.org/tarifs.php#numero

Achat à l'unité hors numéros spéciaux

11 € pour les numéros avant 2012 ; 20 € à partir de 2012
(à partir de 2005, ces numéros sont également disponibles en version électronique sur le site)

Numéro(s) souhaité(s) :

Hors-séries "L'Actualité Chimique - Livres", co-édités et diffusés par EDP Sciences

- Chimie et transports (janvier 2014) : 24 €
- Chimie et enjeux énergétiques (sept. 2013) : 24 €
- La chimie et la nature (oct. 2012) : 24 €
- La chimie et l'habitat (oct. 2011) : 24 €
- La chimie et le sport (janv. 2011) : 24 €
- La chimie et l'alimentation (oct. 2010) : 24 €
- La chimie et l'art (juin 2010) : 24 €
- La chimie et la santé (janv. 2010) : 19 €
- La chimie et la mer (sept. 2009) : 24 €
- Radiation chemistry (mai 2008) : 59 €

À commander
chez votre libraire
ou directement sur
www.edition-sciences.com



Bon de commande

Nom Prénom

Adresse (pour les particuliers, préciser l'adresse personnelle)

Code Postal Ville Pays

Tél Fax Courriel

Adresse IP (pour l'abonnement multiple)

Montant total de la commande (frais de port inclus) :

Mode de règlement

- sur facturation (joindre obligatoirement le bon de commande)
- par chèque bancaire ou postal libellé à l'ordre de la SCF souhaite recevoir une facture acquittée
- par virement bancaire ou postal

France Société Générale Paris Seine Amont, 03081/00037265820/87 CCP Paris 30041 Compte 070786U020/90
Étranger IBAN FR7630003030810003726582087 Swift.Sogefrpp

par carte bancaire (Visa, Eurocard Mastercard) Validité /
Cryptogramme visuel (les trois derniers chiffres du numéro imprimé au dos)

L'Actualité Chimique

SCF, Service Abonnement, 250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris. Tél. : 01 40 46 71 66 - Fax : 01 40 46 71 61.
adhesion@societechimiquedefrance.fr - www.lactualitechimique.org



**Nous créons
de la chimie
pour expliquer
pourquoi les
enfants font
« Ouah ! ».**

Savez-vous quelle est la réaction la plus courante des enfants face à la chimie ? C'est « Ouah ! ». Un simple mot pour de grandes expériences scientifiques. Et nous l'avons entendu bien des fois, dans plus de 30 pays, au Kids'Lab BASF. Pendant une journée, les enfants y deviennent des chercheurs. Ils expérimentent de façon ludique et découvrent le pourquoi du comment des merveilles de notre monde. Tout cela parce que nous croyons qu'un jour ces enfants nous émerveilleront en retour.

Si la science peut être vue comme une source d'émerveillement, c'est parce que chez BASF, nous créons de la chimie et bien plus encore.

www.wecreatechemistry.com

 **BASF**

The Chemical Company