

L'actualité chimique

Mensuel - Mai 2011 - N° 352

Marie Skłodowska-Curie

Prix Nobel de chimie 1911

Et aussi :
Comment enseigner la chimie du nucléaire ?



Société Chimique de France





Internships Engineers

THE CORPORATE RESEARCH CENTER OF LHOIST, one of the leaders in the production of lime and dolomite for the industry, based in Nivelles (Belgium), is made up of approximately 35 people, structured primarily by industrial application, each type of application, typically representative of an industry served by the group. R&D Engineers work in close interaction with their equivalent in Product Development. The Corporate Research Center includes a Laboratory / Technical Assistance team and a Documentation, Patents & Licensing team, both providing support across all applications / industries. In addition, the Nivelles center interacts closely with smaller research units, one based in Germany, the others in the US and Brazil.

Over the last few years a series of improvement initiatives have been defined and implemented in order to evolve towards a more modern, innovative and entrepreneurial R&D organization.

We are looking at offering internship opportunities to scientific students especially coming from abroad so as to enhance multicultural exchanges.

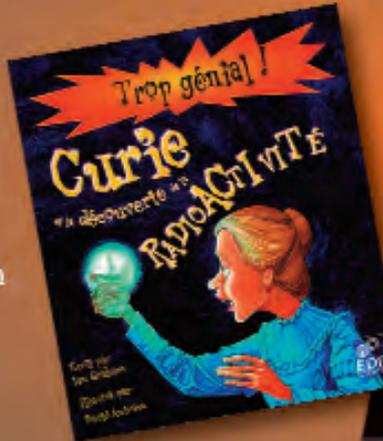
**Interested? All cvs should be addressed to marie-france.weichselbaum@lhoist.com
You will find more information on the group on www.lhoist.com**



2011 : Centenaire du prix nobel de chimie de Marie Curie

La découverte de la radioactivité par Marie Curie présentée en image aux enfants.

Les comptes-rendus de cours élémentaires de physique donnés par Marie Curie à l'attention d'enfants de 10 ans.



Curie et la découverte de la radioactivité - I. Graham
ISBN : 978-2-7598-0389-7
32 pages - 11,00 €



Leçons de Marie Curie
M. Curie et I. Chavannes
ISBN : 2-86883-635-6
128 pages - 12,90 €

Retrouvez et commandez ces ouvrages sur
www.edition-sciences.com

RÉDACTION

Rédacteur en chef : Paul Rigny

Rédactrice en chef adjointe :

Séverine Bléneau-Serdel

Secrétaire de rédaction : Roselyne Messal

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

Secrétariat : Martine Maman

Webmestre : Jérémie Meyer de Ville

<http://www.etage-13.com>

Comité des rubriques :

Recherche et développement : Paul Rigny, Industrie : Gilbert Schorsch, Enseignement et formation : Michel Boyer et Katia Fajerwerg,

TP : Xavier Bataille et Nicolas Cheymol, 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, À propos de : Bernard Sillion, En bref : Séverine Bléneau-Serdel, Roselyne Messal, Actualités de la SCF et Agenda : Roselyne Messal, Livres et médias : Yves Dubosc

Comité de rédaction :

P. Arpino, H. Belhadj-Tahar, J. Belloni, E. Bordes-Richard, J. Buendia, N. Capron-Joubert, C. Cartier dit Moulin, C. Cordella, J.-C. Daniel, R.-E. Eastes, E. Florentin, J. Fournier, F. Lafuma, J.-F. Lambert, V. Lucas, M.-T. Ménager, N. Moreau, A. Ouaili, J.-M. Paris, P. Pichat, A. Picot, M. Poite, M. Quarton, F. Rocquet, E. Soulié, H. Toulhoat, M. Verdaguer, P. Vermeulin, D. von Ew

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 <http://www.lactualitechimique.org>

Directeur de la publication : Olivier Homolle, président de la Société Chimique de France

Imprimerie : SPEI, BP 26, 54425 Pulnoy

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

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

ISSN 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, <http://www.edif.fr>

Index des annonceurs : p. 1

© SCF 2011 - Tous droits réservés

Dépôt légal : mai 2011

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

TARIFS 2011 - L'ACTUALITÉ CHIMIQUE (11 numéros par an)

Abonnement papier + électronique

Particuliers : France 95 € - Étranger 100 €

Institutions : France 195 € - Étranger 205 €

Lycées : France 110 € - Étranger 130 €

Abonnement électronique seul (France/Étranger)

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

Membres de la SCF (hors membres associés) : abonnement inclus dans la cotisation

Abonnement : SCF, Nadine Colliot 250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris

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

adhesion@societechimiquedefrance.fr

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



Le dossier

I à XVI

La célébration du centenaire du prix Nobel de chimie de Marie Curie

par R. Guillaumont et J.-P. Vairon, coordinateurs du dossier

Allocution prononcée par G. Férey

Allocution prononcée par J.-L. Missika et J. Prost

Marie Skłodowska-Curie, le polonium, le radium et la radiochimie,

par R. Guillaumont

Les applications médicales des découvertes de Marie Skłodowska-Curie,

par M. Krawczyk

Éditorial

2

La recherche européenne : les laboratoires ont-ils raison de s'en méfier ?, par P. Rigny

2

Chroniques

3

Polémiques

Les soucis du nucléaire au secours du solaire ?, par J.-C. Bernier

3

Enseignement et formation

5

JIREC 2010 : Chimie du nucléaire, énergie et développement durable (coord. : K. Fajerwerg)

Chimie du nucléaire, énergie et développement durable. Retour sur les JIREC 2010, par S. Condom

5

La chimie dans le cycle du combustible nucléaire : de la mine à la gestion des déchets radioactifs, par L. Martin-Deidier et S. Gin

11

La médecine nucléaire, par L. Sibille, E. Nalda, L. Collombier,

P.-O. Kotzki et V. Boudousq

16

L'importance de la radioactivité en géosciences, par J.-M. Montel

22

Conception d'une application de simulation de sources radioactives,

par V. Riffault, N. Locoge, E. Leblanc et M. Vermeulen

27

Quel langage adopter pour enseigner la chimie ?, par F. Rouquérol

30

et M. Vignerot

Développer la créativité des étudiants de licence au travers de la chimie

analytique, par V. Dugas, C. Demesmay et J. Randon

35

Un point sur

39

La microencapsulation : une technologie de choix pour la formulation d'actifs, par B. Hamounic et F. Pinot

39

En bref

41

Livres et médias

43

Agenda

46

Actualités de la SCF

47

2011 : Année internationale de la chimie

48



Photo couverture :

© Comité National de la Chimie - Musée Curie - FG Events.

Index des annonceurs

CNRS Formation Entreprises	p. 21	Graine de Chimiste	p. 37
EDIF	p. 26	Lhoist	2° de couv.
EDP Sciences	2° de couv., p. 10	RNChimie	p. 29
EuCheMS	p. 45, encart		



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>



La recherche européenne : les laboratoires ont-ils raison de s'en méfier ?

Voilà vingt-cinq ans qu'est apparue cette mission de l'Union européenne qui nous concerne tant : l'animation européenne de la recherche – de la recherche fondamentale à l'innovation. Pour les laboratoires, il s'agit d'abord d'un guichet supplémentaire qui peut venir abonder leurs ressources, ensuite d'une occasion de collaborations internationales nouvelles – rien d'irremplaçable, dirait-on. Et pourtant, dans les documents politiques de l'Union européenne, cette mission a les plus hauts objectifs : faire travailler les Européens ensemble pour créer l'Europe à tous les niveaux.

La politique de la recherche, révisée par la Commission élue en 2009, est présentée dans plusieurs rapports et a fait l'objet d'un colloque « FutuRIS* » en mars dernier⁽¹⁾. Cela a permis d'en saisir le bilan et le plus visible, c'est probablement l'énorme perte en ligne qui s'est établie entre les ambitions politiques – résumées par celle de créer l'Espace européen de la recherche (EER)⁽²⁾ – et la réalité du terrain qui trouve des laboratoires perplexes devant des dossiers de plus en plus tatillons. L'EER est une belle construction, incontestablement, compliquée parce que la diversité des acteurs est extrême (les pays, les organismes, les industriels, etc.), mais qui pousse vers l'objectif de créer l'Europe plus profondément. Mais la réalité des appels d'offres, c'est le Kafka administratif, incompréhensible, incompris, empli de toujours plus de réglementations, générateur de malentendus, de querelles, voire de contentieux, des délais irréalistes, des paiements qui n'arrivent pas : une vraie galère.

Le meilleur signe de ce hiatus entre les intentions et la réalité se trouve dans l'un des rapports-bilans établis par la Commission elle-même pour préparer le prochain programme cadre (FP 8) qui doit commencer en 2013. Intitulé « Simplifier la mise en œuvre des programmes cadres »⁽³⁾, ce rapport cite comme une condition de succès de ces programmes « la clarté des objectifs, la légèreté et la rapidité des procédures administratives », propose une série de mesures qu'il qualifie d'impératives. Et ceci après vingt-cinq années de sept programmes cadres. Quel aveu !

Les mesures identifiées sont souvent de nature financière, car en matière de finances – on connaît bien cela en France – on contrôle, la confiance n'existe pas. Les réponses aux appels d'offres comportent des « analyses prévisionnelles de tâches » (tant pour construire l'appareil, tant pour l'exploiter, tant pour présenter les résultats), des « fiches de temps » (tant d'heures pour telle tâche), des « fiches de natures de dépenses » (tant en salaire, tant en vacation, tant en équipement – grand, petit) ; tout cela est sensé permettre d'évaluer les coûts. Mais cela ne suffit pas car il faut prévoir le contrôle, alors « fiche-jalons » (quel résultat intermédiaire à quelle date ?), comme si on allait s'entendre sur les mots, sur les contenus, et bien sûr « rapport final » ; tout cela, qui obscurcit les vraies démarches scientifiques et nourrit le contentieux, pour débloquer les crédits. La proposition est faite (mais est-ce la première fois ?) de remplacer cette complexité par un contrat avec évaluations forfaitaires et échancier de paiement préalablement convenu. Quel optimisme peut-on avoir sur la compréhension entre ces deux mondes, la recherche et la finance, aux règles différentes : suivre l'inspiration d'un côté, enserrer les tâches de l'autre ?

D'autres mesures proposées pour décoincer le système sont à caractère juridique et le consensus n'est pas plus simple à atteindre. En matière de propriété industrielle ou intellectuelle, des efforts sont faits depuis plus de dix ans sans guère de succès pour élaborer et faire adopter des textes par tous les pays de l'Union. Fin 2010, un texte créant le « brevet communautaire » a enfin été mis au point par tous, mais au Parlement, Italie et Espagne n'ont pas suivi (pour raisons linguistiques).

Au colloque FutuRIS du 4 mars, il est apparu que les laboratoires français étaient moins actifs que les autres pour répondre aux appels d'offres européens. Pourquoi, mais pourquoi ? La réponse n'a pas tardé : le décourageant parcours des appels d'offres européens n'est que trop familier aux Français : depuis quelques années, eux aussi connaissent les multi-guichets administratifs et tatillons ; ils font qu'ils passent presque le tiers de leur temps à des tâches administratives qui n'ont rien à envier à celles que nous avons citées plus haut. Ça leur suffit !

Paul Rigny
Rédacteur en chef

* Plate-forme prospective du système français de recherche et d'innovation, animée par l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) (www.anrt.asso.fr/fr/futuris/accueil.jsp).

(1) Colloque « L'Union de l'innovation et l'Espace européen de la recherche : l'émergence des acteurs stratégiques ? », 4 mars 2011.

(2) *FutuRIS 2010. La recherche et l'innovation en France*, Odile Jacob, 2010.

(3) *Simplifying the implementation of the research framework programmes*, European Commission, COM(2010) 187, 2010 (http://ec.europa.eu/research/fp7/pdf/communication_on_simplification_2010_en.pdf).

Les soucis du nucléaire au secours du solaire ?

L'accident nucléaire au Japon suivi en « live » à la télévision a eu une répercussion médiatique mondiale et ne cesse d'impressionner par le dévouement sinon le sacrifice des techniciens japonais pour en limiter l'impact et de susciter une réflexion profonde sur les prises de risques de nos sociétés avancées. En France, dans un pays qui tire 80 % de son électricité par voie nucléaire, même si de tels tremblements de terre sont hautement improbables et si les réacteurs à eau pressurisée et non à eau bouillante paraissent plus sûrs, l'opinion tend maintenant une oreille plus bienveillante aux opposants traditionnels du nucléaire.

Il est donc probable qu'en France et en Europe, peut-être plus durablement qu'après Tchernobyl, Fukushima remette en cause le choix du nucléaire. Sans doute, les investissements prévus en Europe, au Moyen Orient, aux États-Unis et en Chine pour cette filière seront repensés, sinon retardés. Pour la France, existe-t-il un plan B pour l'avenir ? Ce serait par exemple une rediversification de la production électrique étalée sur plusieurs décennies. Car en effet, toute évolution ou virage technologique reste lent et « sortir du nucléaire » sur le moment ne peut se faire qu'en réactivant les centrales thermiques, comme le font nos voisins d'outre-Rhin en brûlant le charbon allemand et ses volutes de métaux lourds ou le gaz russe, le tout au prix d'un « kolossal » dégagement de CO₂ !

C'est alors que les décideurs se tournent vers les technologues et les scientifiques pour remplir les cases vides du plan B. Bien sûr avec les énergies renouvelables : l'éolien qui doit encore convaincre les paysagistes, la biomasse qui doit encore trouver sa viabilité économique, et surtout le solaire, photovoltaïque et thermique. Comme le rappelle souvent un excellent chimiste membre de la SCF, la consommation française est de l'ordre de 600 tWh par an ; cela représente l'énergie fournie par le Soleil sur un carré de 25 x 25 km (Paris et sa banlieue). Avec un rendement moyen de 10 %, la surface nécessaire de cellules solaires représenterait 5 000 km², soit à peu près le sixième de toutes les toitures françaises ! Ce scénario pourrait, si les prix du watt installé baissaient suffisamment et si la technologie progressait encore, être partiellement envisageable vers 2020.

La physique des semi-conducteurs a permis en effet depuis trente ans de monter les rendements des cellules silicium de 6 à 20 % ; parallèlement, les couches minces de silicium amorphe et les montages à double jonction affichent des records à 12 et 40 % respectivement. La chimie a elle aussi bien contribué à trouver des solutions alternatives au silicium avec les couches minces de cuivre-indium-sélénium (CIS) ou cuivre-gallium-indium-sélénium (CGIS), qui atteignent maintenant des rendements de 16 à 18 %. Les

cellules organiques avec colorants et maintenant tout organiques dérivées de polythiophènes peuvent prétendre à des rendements de 8 à 12 % pour les premières et 6 à 8 % pour les secondes. Les couches minces CIS ou CGIS déposées sur supports plats (verre ou polymère) peuvent être intégrées au bâti ; c'est la solution retenue par Saint-Gobain Solar à travers sa filiale Avancis qui produit sur deux sites des tuiles et systèmes économiquement rentables comparés au silicium. Pour le tout organique où le couchage sur surface est aussi un avantage, seule une société, Konarka-Polaroid, s'est lancée sur des prototypes aux États-Unis.

En France, l'accélération du photovoltaïque depuis 2007 a été spectaculaire : avec 80 mégawatts (MW) installés en 2008 et 1 160 MW en 2010, le marché a basculé. Sachant que près de 3 000 MW étaient en attente, l'objectif du Grenelle de l'environnement de 5 400 MW (1 % de la consommation électrique) pouvait être atteint dès 2012. Le gouvernement freinait cette frénésie début 2011, suite au rapport Charpin qui montrait que le prix de rachat imposé à EDF de 58 cents pour le kWh solaire pour un prix moyen de l'ordre de 10 cents/kWh entraînait trop d'effets d'aubaines pour les investisseurs et que la compensation de la différence par la contribution au service public de l'électricité (CSPE) prenait des allures abyssales et pesait plus que de raison sur la facture du consommateur moyen non solarisé. Ce coup de frein en pleine montée en puissance était aussi dû à l'envahissement du marché des panneaux solaires par les fabricants chinois qui, moins chers que les Européens et surtout les Français, avaient pris près de 50 % du marché. Le moratoire qui a suivi dès février 2011 est très mal vécu par une industrie naissante qui ne peut supporter des à-coups réglementaires variables qui font reculer les investisseurs devant une stratégie incertaine. La décision récente qui annulait l'autorisation pour EDF ENR d'installer un parc de plus de 100 MW sur 200 ha en Eure-et-Loir en est l'illustration.

Se pose donc la question de l'avenir du solaire en France. Est-ce que ces dernières mesures ou coups d'arrêt seront maintenus dans un contexte où le nucléaire est devenu un point sensible ?



Système de production électrique EuroDish en action à Odeillo (Font-Romeu).
© Emmanuel Guillot (PROMES/CNRS).

Certes, le kilowatt solaire a des inconvénients :

- son prix, qui a encore un facteur de 2 à 5 à franchir suivant les zones d'ensoleillement et les systèmes choisis ;
- les surfaces occupées des fermes solaires ; celle de Fabruges dans l'Hérault avoisine 4 ha pour 1,3 MW : c'est la même surface qu'une tranche nucléaire pour une puissance mille fois moindre !
- la discontinuité de puissance, puisqu'on a rarement vu le Soleil briller la nuit, et qui impose soit le stockage chimique de l'électricité, soit des sources relais en cas de raccordement au réseau.

Mais des progrès à la fois sur le stockage et les logiciels de charges des boucles de distribution du courant peuvent accommoder un réseau à des sources discontinues. Par ailleurs, les procédés à concentration de rayonnement, où le CNRS à Odeillo a été pionnier il y a plus de 50 ans, redeviennent d'actualité, avec des champs de lignes cylindro-paraboliques chauffant des faisceaux de tubes où circule une huile à 350 °C jusqu'à un échangeur eau-vapeur puis turbine, se bâtissant en Californie et en Espagne. Les « dish stirling » délivrant de l'électricité de façon autonome avec un moteur Stirling chauffé par un miroir parabolique sont aussi une alternative au photovoltaïque.

Il reste à trouver des surfaces ensoleillées et des terrains pas trop chers ; les investisseurs recherchent des déserts, un projet allemand vise le Sahara... À quand le Larzac ?

Jean-Claude Bernier,
le 13 avril 2011



Jean-Claude Bernier est vice-président de la SCF.

« Made in Europe for the World »
Oui, mais avec vos contributions !

Analytical and Bioanalytical Chemistry
Springer
The Language of Science

L'Actualité Chimique
Société Chimique de France

Les journaux de ChemPubSoc[†]
† ChemPubSoc regroupe 11 sociétés de chimie européennes, dont la SCF

- WILEY-VCH
- ChemPubSoc Europe
- Chemistry, a European Journal
- European Journal of Organic Chemistry
- European Journal of Inorganic Chemistry
- ChemBioChem
- ChemCatChem
- ChemMedChem
- ChemPhysChem
- ChemSusChem

Pour montrer la vitalité de la chimie française,
toutes ces revues attendent vos communications.

Chimie du nucléaire, énergie et développement durable

Retour sur les JIREC 2010

Sylvie Condom



Voilà vingt-sept ans que les Journées de l'innovation et de la recherche dans l'enseignement de la chimie (JIREC) se déroulent dans diverses villes de France. En 2010, elles étaient de retour dans le sud de la France, tout près de Montpellier, où elles s'étaient déjà arrêtées en 1989 et 1992 [1]. Cette manifestation a été organisée par l'École Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier (ENSCM), le lycée Joffre de Montpellier, l'Université de Montpellier 2 (UM2), l'Institut de Chimie Séparative de Marcoule (ICSM), le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), et avec le soutien de la division Enseignement-Formation de la Société Chimique de France (DEF/SCF). Nous avons choisi un lieu de rencontre au cœur du littoral méditerranéen, La Grande Motte, situé entre Montpellier et Marcoule.

Le thème approfondi en 2010 était « **Chimie du nucléaire, énergie et développement durable** » [2]. Les liens particuliers que l'ENSCM entretient avec le CEA et l'INSTN (Institut National des Sciences et Techniques du Nucléaire) de Marcoule ont conduit naturellement à faire évoluer et diversifier la formation proposée aux élèves et aux étudiants vers la chimie du nucléaire.

Ces journées sont un moment de discussions, d'échanges d'idées, d'approfondissement de nos connaissances, grâce aux conférences, aux communications orales et écrites, aux ateliers et aux autres occasions de partage.

Par sa passion pour la ville de Montpellier et ses connaissances scientifiques, Valdo Pellegrin (ENSCM) a su nous captiver, au soir d'un mercredi pourtant chargé, par sa conférence intitulée « Le bicentenaire de la Faculté des Sciences de Montpellier : une activité de recherche dans une ville de province ». La visite du Visiatome, avec un parcours animé et vivant dans cet espace situé à l'entrée du CEA de Marcoule et à côté de l'ICSM, a permis de compléter nos connaissances sur la radioactivité et les déchets nucléaires... [3].



La Rédaction tient à remercier **Katia Fajerwerg**, maître de conférences au Laboratoire de Chimie de Coordination de l'Université Paul Sabatier de Toulouse*, qui assure la coordination des dossiers MIEC-JIREC publiés dans *L'Actualité Chimique* depuis les JIREC 2007, et qui est également chargée de la rubrique Enseignement et formation, activités très chronophages qu'elle poursuit consciencieusement et avec enthousiasme.

* Courriel : katia.fajerwerg@lcc-toulouse.fr

Chimie du nucléaire, énergie et développement durable

Le thème des JIREC 2010 fait suite au numéro spécial « Sciences chimiques et déchets radioactifs » de *L'Actualité Chimique* [a]. Ce sujet avait été aussi traité lors d'une conférence plénière des JIREC 2008 [b-c]. Deux dossiers de *L'Actualité Chimique* traitant du cycle du combustible nucléaire et de la gestion des déchets sont parus fin 2010 [d]. D'autres articles plus ou moins récents sur ce thème ont aussi été publiés dans le bulletin de l'Union des professeurs de physique et de chimie (*Le Bup*) [e] – voir notamment ceux de Micheline Izbicki en 2009 et d'Ivan Brissaud en 2000 sur les déchets radioactifs [f-g] –, ou dans *La Recherche* – Philippe Jamet en 2006 [h] et Aline Richard qui, plus récemment, relate les événements ayant frappé le Japon en mars dernier [i-j]. D'autre part, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) a de nombreuses missions dans ce domaine : collecte des déchets radioactifs, recherche de solutions pour leur traitement, exploitation des centres, information du public... [k].

- [a] « Sciences chimiques et déchets radioactifs », P. Rigny, P. Vermeulin (coord.), *L'Act. Chim.*, **2005**, 285-286.
 [b] www.univ-valenciennes.fr/congres/JIREC2008.
 [c] Follet-Houttemane C., Valorisation et cycle de vie de la matière minérale : retour sur les JIREC 2008, *L'Act. Chim.*, **2009**, 335, p. 15.
 [d] Rigny P., Le cycle du combustible nucléaire : de la mine d'uranium jusqu'au recyclage et aux déchets, *L'Act. Chim.*, **2010**, 345, p. 1 ; Rigny P., Bonin B., Gras J.-M., Les déchets nucléaires et leur gestion, *L'Act. Chim.*, **2010**, 346, p. 1.
 [e] www.udppc.asso.fr/bupdoc/consultation/sommaires-an.php
 [f] Izbicki M., Collecte des déchets radioactifs, *Le Bup*, **2009**, 103(910), p. 95.
 [g] Brissaud I., Déchets radioactifs et déchets nucléaires. Qu'en faire ? Entreposage ? Stockage ? Transmutation ?, *Le Bup*, **2000**, 94(828), p. 1795.
 [h] Jamet P., La sûreté nucléaire devra être mondiale, *La Recherche*, **2006**, 396(4), p. 62.
 [i] Richard A., Fukushima compromet l'avenir du nucléaire civil, *La Recherche*, **2011**, 451, p. 7.
 [j] *La Recherche*, **2011**, 452, à paraître.
 [k] www.andra.fr

Les articles qui suivent cette présentation des JIREC 2010 se rapportent aux conférences et aux communications courtes. Le programme de ces journées est détaillé dans l'*encadré 1* page suivante. Les résumés et diverses présentations sont consultables en ligne [2].

Les ateliers

Les ateliers constituent le lieu de véritables échanges, discussions et débats sur des sujets directement en rapport avec le thème des JIREC ou sur des points précis de l'enseignement. Nous avons proposé trois thèmes sur la chimie du nucléaire et trois autres sur des problématiques de l'enseignement.

Encadré 1

Programme des JIREC 2010

Huit conférences plénières

« Une approche du bilan énergétique mondial à 2050 », par Jacques Bousquet.

« La médecine nucléaire »*, par Louis Sibille.

« Une production d'électricité 100 % renouvelable est-elle possible ? », par Bernard Multon.

« La radioactivité : un outil majeur en géosciences »*, par Jean-Marc Montel.

« Le cycle du combustible nucléaire »*, par Loïck Martin-Deidier.

« Les matrices de confinement de matériaux radioactifs »*, par Stéphane Gin.

« Le droit nucléaire : règles juridiques et savoir scientifique », par Pierre Bringuier.

« Les semi-conducteurs organiques et l'énergie solaire », par Georges Hadziioannou.



La salle et le public lors d'une conférence.

Huit communications orales

« Le diagramme de Semenov : de l'emballage thermique vers une économie durable », par Serge Walter, Stéphanie Freitag, Ahmed Hadj Mebarek, Zelimir Gabelica.

« Mise en place du Plan Vert à l'ENSCM », par Ghislain David, Aline Banzet, Marianne Charels, Gabriel Foyer, Imanol de Cherisey.

« Conception d'une application de simulation de sources radioactives »*, par Véronique Riffault, Nadine Locoge, Étienne Leblanc, Mathieu Vermeulen.

« La chimie moléculaire des actinides : un domaine de recherche et d'enseignement »**, par Christophe Den Auwer et Philippe Moisy.

« Les implicites dans les exposés de chimie à l'université et leur impact sur la compréhension des étudiants. Comment une

catégorisation des implicites permettrait-elle d'améliorer la qualité de la communication pédagogique ? », par Nathalie Warzée***, Mireille Houart, François Reniers, Johan Wouters, Philippe Snauwaert, Marc Romainville.

« Un bon enseignant de chimie doit-il se forger son propre langage ? »*, par Françoise Rouquérol.

« Développer la créativité et l'innovation auprès d'un public de licence »*, par Jérôme Randon.

« Les Masters professionnels de Valence dans le nucléaire », par François Brut (voir encadré 2 page 9).

Sept communications écrites

« Approche méthodologique de la mise en évidence de l'origine des éléments traces par la distribution du césium stable et radioactif dans des sédiments du Var, Alpes-Maritimes », par Jamal Alabdullah, Hervé Michel, Vittorio Barci, Gilbert Féraud, Geneviève Barci-Funel.

« Utilisation possible de déchets nucléaires pour la séquestration du CO₂ dans un contexte de développement durable », par Pierre-Philippe Chappuis.

« La diffraction sur poudre, un outil pédagogique mais aussi un moyen d'investigation de nouveaux matériaux pour pile à combustible », par François Goutenoire.

« Création d'une licence professionnelle dans le domaine du nucléaire à Lyon », par Nathalie Millard-Pinard.

« Projet européen - Cooperation in educational in nuclear chemistry », par A. Chagnes, Willy Morscheidt, G. Cote, J. John.

« Introduction à la simulation numérique : étude de la pollution du Rhin », par Willy Morscheidt, Siméon Caviadas.

« AISTHER : Association Inter Sites des THEsards du Rhône », par L. Claparède, T. Demars, L. De Almeida, S. De Sio.

Cinq ateliers

« Plan licence : qu'avons-nous fait en chimie ? », animé par Jérôme Randon.

« Quelle formation donner aux élèves et aux étudiants en chimie du nucléaire ? », animé par Nathalie Millard-Pinard.

« Le nouvel étiquetage des produits chimiques », animé par Jean Paul Leroux.

« Mise en œuvre des rayonnements ionisants en enseignement ; réglementation », animé par Michel Rebetz et Hervé Lamotte et « Prise en compte des risques du nucléaire dans la société et dans le milieu technologique », animé par Luc Girard.

« Évaluer des compétences ou des connaissances ? », animé par Michel Vigneron.

* Articles publiés dans ce numéro, **article paru en 2009 (voir [8]), *** à paraître ultérieurement.

• Quelle formation donner aux élèves et aux étudiants en chimie nucléaire/chimie du nucléaire ?

Animatrice : Nathalie Millard-Pinard (Université de Lyon 1), secrétaire de séance : Philippe Marc (ENSCM)

Il est important de bien distinguer la *chimie nucléaire*, qui compte de nombreuses applications (marquage isotopique...), et la *chimie du nucléaire*, qui regroupe l'ensemble des procédés chimiques utilisés par l'industrie nucléaire.

Parmi les connaissances indispensables en chimie nucléaire comme en chimie du nucléaire, on peut lister les notions de radioactivité au sens large (différents rayonnements, décroissance radioactive, filiation...), les notions de radioprotection et les présentations des grandes applications (médicales, chimiques...). Aujourd'hui, nous

constatons qu'une partie de ces notions n'est plus enseignée (ou de moins en moins) dans les lycées. C'est donc dans l'enseignement supérieur qu'elles devront être apportées aux étudiants. Ainsi pour la licence, il serait souhaitable que les points suivants soient abordés : cycle du combustible nucléaire, mesures utilisant certains éléments du nucléaire (spectroscopie gamma...), radioprotection et radioactivité naturelle. Un volume horaire de 25 heures semblerait permettre de satisfaire ces objectifs. Pour le master, une spécialisation des enseignements est à prévoir. Un premier objectif serait de répertorier l'ensemble des formations couvrant ce domaine en France et d'évaluer leur capacité à satisfaire les besoins de l'industrie ou de la R & D du nucléaire.

• **Mise en œuvre des rayonnements ionisants en enseignement : réglementation**

Animateurs : Michel Rebetez (Université de Franche-Comté) et Hervé Lamotte (Autorité de Sûreté Nucléaire, Division de Marseille)

Prise en compte des risques du nucléaire dans la société et dans le milieu technologique

Animateur : Luc Girard (ENSCM/ICSM)

Secrétaire de séance : Philippe Marc (ENSCM)

1) *Le domaine de l'enseignement*

Il a été évoqué dans cette première partie les problèmes rencontrés lors de l'utilisation de sources radioactives dans le milieu pédagogique. Deux cas sont à distinguer en fonction du type de rayonnement dont il est question : rayons X ou rayonnements α , β et γ . Dans ces deux cas, la difficulté que semble rencontrer l'ensemble des participants à l'atelier est liée à la lourdeur des règles de sécurité. Cette réglementation menace à long terme l'existence de travaux pratiques.

En ce qui concerne les rayons X, il semble évident que la réglementation est inutilement pesante, notamment pour les appareils de diffraction de rayons X : les sources de rayonnement ne sont pas permanentes et l'utilisateur en est bien protégé grâce à la conception de l'appareillage. La réglementation devrait d'ailleurs évoluer dans ce sens, les appareils de diffraction ou de diffusion de rayons X pouvant alors être installés à la seule condition de posséder une autorisation de mise sur le marché.

Concernant les autres sources de rayonnement, l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) reconnaît que l'aspect contraignant de la réglementation résulte d'une démarche volontaire. En effet, l'installation et l'utilisation de ces sources ne doivent pas pouvoir être faites trop « facilement ». En revanche, cela entraîne des besoins de formations coûteuses, notamment pour les encadrants de TP, et des frais d'entretien importants. Cette démarche peut parfois conduire à des absurdités puisqu'un échantillon d'uranium naturel n'est pas soumis à cette réglementation si l'intérêt repose sur ses propriétés autres que radioactives (cristallographique, chimiques,

physico-chimiques...). Une solution qui semble avoir fait consensus, est celle d'une mallette pédagogique, sorte de « kit TP ». Elle circulerait au sein des établissements d'enseignement, comme celle distribuée à l'occasion du centenaire de la radioactivité [4]. Cette mallette pourrait être gérée par l'INSTN, ce qui permettrait à la fois de mieux suivre le devenir de ces sources et de limiter le coût de leur gestion.

2) *La société civile*

Les participants s'accordent à noter une certaine augmentation de la confiance de la population dans le nucléaire ces dernières années – cette confiance est sans doute à réexaminer au vu des événements intervenus le 11 mars dernier au Japon. En juin 2010, cette confiance semble tout particulièrement sensible au plus près des sites nucléaires : les populations sont mieux informées, la fréquentation de personnels travaillant dans ce domaine permettant peut-être de diminuer la défiance à l'égard des discours officiels. Les différentes institutions en lien avec l'industrie ou la recherche dans ce domaine font de gros efforts d'ouverture en organisant des expositions pédagogiques provisoires ou permanentes (Visiatome dans le Gard), mais également des visites de centres de recherche par les élèves des établissements des régions concernées lors d'événements comme la Fête de la science.

La mauvaise image que conserve le nucléaire auprès d'une partie de la population française provient le plus souvent de ressentis associés au milieu du nucléaire : secrets, mensonges... Cela est lié au contexte historique des débuts du nucléaire, mais également au fait que très peu de personnalités « neutres » véhiculent l'information : celles qui le font sont très souvent en lien avec cette industrie et leur démarche informative est alors perçue comme partielle. En outre, le vocabulaire employé sur certains sujets, comme la gestion des déchets, les rend très peu clairs aux non-initiés.

Notons enfin l'existence de deux associations permettant la réflexion et le dialogue sur les choix énergétiques et l'utilisation de l'énergie nucléaire pour répondre aux besoins de notre société : la Société Française d'Énergie Nucléaire (SFEN) [5] et Sauvons Le Climat (SLC) [6].



Les participants aux JIREC 2010 à l'ICSM de Marcoule.



Patrick Chaquin, président de la division, remet le prix de la division Enseignement-Formation 2010 à François Brut.

• Évaluer des compétences ou des connaissances ?

Animateur : Michel Vigneron (Rectorat de Versailles), secrétaires de séance : Françoise Langrand (Université de Lille 1), Françoise Rouquérol (Université de Provence), Stéphane Grévoul (Lycée P. Constant de Clermont-Ferrand).
État des lieux

Depuis 2006 et l'apparition du socle de connaissances et compétences au collège, la notion de compétence se développe au lycée ainsi que dans les universités. L'objet de l'atelier est de voir comment des évaluations, pour l'instant fortement axées sur les connaissances, peuvent évoluer en tenant compte de cette situation.

Les connaissances, les compétences... et les enseignants : une compétence étant définie comme une capacité de l'élève (ou étudiant) à mobiliser des connaissances, procédures ou attitudes afin de résoudre une situation inédite, il apparaît rapidement dans le débat que des connaissances initiales sont indispensables à la mise en œuvre de compétences. Ensuite, l'utilisation des compétences acquises par l'élève ouvre la perspective de nouvelles connaissances. L'apprentissage est décrit alors comme un va-et-vient permanent entre la connaissance et la compétence.

Le rôle de l'enseignant pour guider l'élève dans ces allers-retours est souligné, mais également le rôle de plusieurs enseignants simultanément pour faire le lien entre des connaissances et/ou compétences interdisciplinaires.

Conséquences sur l'évaluation

L'évaluation, en lien étroit avec les objectifs de formation, doit donc forcément tenir compte de ces deux aspects de la formation. Il est impossible de se limiter à l'évaluation des connaissances ou, inversement, d'évaluer uniquement des compétences.

Les exercices oraux (exposés, travaux pratiques) sont alors indiqués comme des situations bien adaptées durant lesquelles les compétences en matière de communication sont essentielles.

Alors que la maîtrise des connaissances est révélée par la rigueur, les compétences sont mises en avant par la créativité. Il est souligné ici que les appréciations sont aujourd'hui très souvent rédigées en termes de rigueur et rarement en termes de créativité.

Pourquoi évaluer ?

En répondant à cette question, le débat met en avant que l'évaluation permet de vérifier :

- l'employabilité des diplômés : il est alors rappelé que

l'Union des Industries Chimiques (UIC) décrit les métiers de la chimie en termes d'activités et compétences ;
- la capacité des diplômés à prendre part aux activités de recherche pour lesquelles la créativité est un atout indéniable. En effet, le rôle des universités est aussi de développer les connaissances par la recherche.

Le prix DEF/SCF 2010

Le prix 2010 de la division Enseignement-Formation de la SCF a été attribué à **François Brut** (Université Joseph Fourier, Grenoble), pour sa très intense activité en enseignement, jalonnée d'initiatives et de diverses responsabilités, comme celle du master en « Ingénierie, traçabilité, développement durable ».

Suite à la remise de son prix, François Brut a présenté les masters du nucléaire à Valence, dont il a été responsable pendant plusieurs années. Vous trouverez dans sa présentation (voir encadré 2) et dans celle de Nicolas Dacheux (UM2/ICSM) [7], responsable du master « Chimie séparative, matériaux et procédés », les différentes formations proposées aux étudiants dans le domaine du nucléaire.



Le passage de l'emblème des JIREC à Gilles Doisneau.

Encadré 2

Les masters professionnels de Valence dans le nucléaire

François Brut

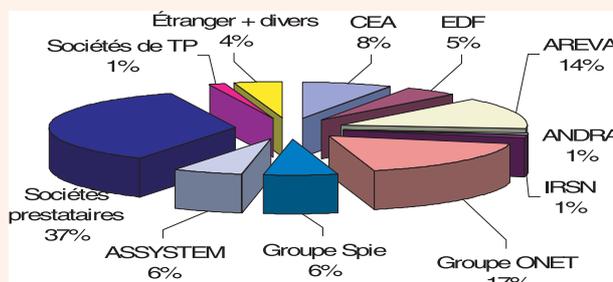
Dès 1998, l'absence de formations spécifiques conduit à proposer la création de filières professionnelles dans le domaine du nucléaire. Pour l'Université Joseph Fourier, il s'avérait nécessaire de construire des formations qui devaient remplir plusieurs conditions :

- des bases scientifiques et technologiques solides,
- une liaison étroite avec les besoins industriels,
- une équipe pédagogique ouverte et dynamique,
- aboutir rapidement à une bonne insertion professionnelle des diplômés.

Il ne s'agissait pas de créer une formation destinée à produire uniquement plus de diplômés. L'étude préalable que nous avons menée a très vite fait ressortir que le traitement des déchets radioactifs était au centre des préoccupations industrielles. Nous avons soumis l'idée de la création d'un master en « Gestion scientifique et technologique des Déchets Radioactifs » (GeDÉRa) à Alain L'Homme, alors directeur de la division Gestion Déchets du CEA. Il a tout de suite soutenu le projet et nous a aidés à le construire en réunissant autour de lui un petit groupe chargé d'élaborer la maquette pédagogique et comprenant des représentants du CEA, d'EDF, d'AREVA, de l'ANDRA et de l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire). Le Master GeDÉRa a ouvert en 2001-2002. Dès qu'EDF a changé sa politique de démantèlement en créant le Centre d'Ingénierie de la Déconstruction et de l'Environnement (CIDEN) en 2001, nous avons réagi et procédé de la même façon en créant un master en « Assainissement Démantèlement des Installations Nucléaires » (ADIN) qui a ouvert en 2003-2004. Enfin, un master en « Sûreté Nucléaire » (SN) ouvert en 2007-2008 complète les formations du nucléaire au sein du Master « Ingénierie Traçabilité Développement Durable » (ITDD) de l'Université Joseph Fourier sur son site de Valence (Drôme). L'équipe pédagogique en charge de ces trois masters est formée d'universitaires de physique et de chimie nucléaires qu'il est difficile de trouver dans les Universités suite à une politique malthusienne de suppression de postes dans ces disciplines intervenue dans les années 90. Il a donc fallu trouver dans l'industrie des experts susceptibles de

transmettre leurs connaissances. Plus de cent intervenants industriels (CEA-INSTN, EDF, AREVA, IRSN, ASN, GDF Suez, ONET technologies, etc.) et quelques universitaires composent l'équipe pédagogique. Du fait de leurs responsabilités, chacun d'entre eux n'intervient que pour quelques heures seulement. La coordination d'ensemble est donc cruciale et entre les mains du responsable de spécialité.

L'insertion professionnelle des diplômés au niveau ingénieur a été de plus en plus rapide au fil des années. En 2007 par exemple, sur les trente-trois diplômés par le jury le vendredi, trente commençaient un CDI dans l'industrie le lundi suivant. La durée de l'insertion des 143 diplômés de 2001 à 2007 est inférieure à un mois et demi en moyenne. Ils sont embauchés par des sociétés de service (voir figure).



Masters GeDÉRa et ADN : 1^{er} emploi (143 diplômés).

Les trois masters GeDÉRa, ADIN et SN sont passés en alternance en 2009-2010 : cinquante étudiants inscrits dont vingt-neuf contrats professionnels, quinze apprentis et cinq en formation continue. Une première année de master a ouvert en 2007-2008. Les quarante-et-un étudiants de M1 inscrits en 2009-2010 peuvent continuer dans l'une des trois spécialités GeDÉRa, ADIN ou SN, mais aussi dans la spécialité Radioprotection à Grenoble*.

*<http://lpsc.in2p3.fr/MasterITDD>.

Ces journées ont rassemblé cent-vingt participants venant de nombreuses villes de France, d'Algérie, d'Allemagne, de Belgique et de Suisse.

La continuité des JIREC a été assurée par la passation de la maquette du « Phare du bout du monde », emblème des

24-27 mai 2011

27^e JIREC-14^e MIEC

Orsay

Journées de l'innovation et de la Recherche pour l'Enseignement de la Chimie (JIREC) et Journées Multimédia et Informatique pour l'Enseignement de la Chimie (MIEC).

Thèmes : « La chimie et le vivant » et « Logiciels et ressources libres pour l'enseignement de la chimie ».

• www.miec-jirec-2011.u-psud.fr

JIREC, à Gilles Doisneau, organisateur des **JIREC-MIEC 2011** sur le thème « La chimie et le vivant ».

Remerciements

L'auteur remercie les membres du comité d'organisation et du comité scientifique pour leur contribution au bon déroulement des JIREC 2010, en particulier : André Ayral, Johanna Bismuth, Christian Bonnet, Danielle Cachau-Herreillat, Patrick Chaquin, Nicolas Dacheux, Katia Fajerweg, Claudine Follet, Luc Girard, Marie-Hélène Hengé, Christine Joly-Duhamel, Laurent Jousset, Joël Moreau, Michel Rebetz et Florence Rouessac. Elle remercie également les intervenants pour l'apport de leurs connaissances et leurs compétences, les différents collaborateurs qui ont contribué à la parution des articles, et à tous les partenaires pour leur soutien financier et leur présence sur les stands lors de ces journées.



Arrivée à la manade Boch, soirée détente...

Références

- [1] Montfort B., Rebetez M., Les JIREC : 25 fenêtres sur la recherche et l'innovation dans l'enseignement ou l'éducation en chimie, *L'Act. Chim.*, **2010**, 341, p. 19.
- [2] <http://event.enscm.fr/jirec2010>
- [3] www-visiatome.cea.fr
- [4] Centenaire de la radioactivité. Prêt gracieux de la valise Becquerel-Curie, *Le Bup*, **1998**, 92(800), p. 166.
- [5] www.sfen.org
- [6] www.sauvonsleclimat.org
- [7] <http://event.enscm.fr/jirec2010/Com%20Dacheux.pdf>
- [8] Den Auwer C., Moisy P., Simoni E., Chimie de coordination des actinides : vers les frontières du tableau périodique, *L'Act. Chim.*, **2009**, 330, p. 34.



Sylvie Condom

Maître de conférences à l'École Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier et à l'Institut Européen des Membranes de Montpellier*, elle était la principale organisatrice des JIREC 2010.

* École Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier, 8 rue de l'École Normale, F-34296 Montpellier Cedex 5.
Courriel : sylvie.condom@enscm.fr

Collection L'Actualité Chimique-Livres

À paraître prochainement :
La chimie et l'habitat



Août 2009
978-2-7598-0426-9
208 pages - 24 €



Janvier 2010
978-2-7598-0488-7
182 pages - 19 €



Juin 2010
978-2-7598-0527-3
228 pages - 24 €



Octobre 2010
978-2-7598-0562-4
244 pages - 24 €



Janvier 2011
978-2-7598-0596-9
264 pages - 24 €

OFFRE SPÉCIALE : Frais de port offerts + 5 % de réduction

Titre (s)	Prix - 5 %	Quantité	Total
La chimie et le sport	22,80 €	X	= €
La chimie et l'alimentation	22,80 €	X	= €
La chimie et l'art	22,80 €	X	= €
La chimie et la santé	18,05 €	X	= €
La chimie et la mer	22,80 €	X	= €
TOTAL GENERAL			= €

BON DE COMMANDE

à renvoyer à :

EDP Sciences
17, avenue du Hoggar - BP 112
91944 Les Ulis Cedex A
www.edition-sciences.com



Nom / Prénom :
Adresse :
Tél. :
Code Postal : Ville : Pays :

Paiement au choix : par chèque à l'ordre d'EDP Sciences (à joindre à la commande)
 par carte bancaire : Visa Eurocard American Express

N° de carte :
Date d'expiration : / CCV (3 derniers chiffres au dos de la carte) :

Date : / /
Signature :

AC JAN 11

La chimie dans le cycle du combustible nucléaire

De la mine à la gestion des déchets radioactifs

Loïck Martin-Deidier et Stéphane Gin

Résumé L'énergie nucléaire est une des solutions incontournables pour répondre aux objectifs antagonistes d'augmentation des besoins énergétiques mondiaux d'une part et de diminution des émissions de gaz à effet de serre de l'autre. Pour que cette énergie devienne à terme une ressource durable, les technologies du cycle du combustible, avec l'uranium comme matière initiale, évoluent. Les matières à forte valeur ajoutée sont de mieux en mieux recyclées, les réacteurs deviennent plus performants, les déchets voient leur quantité diminuer et trouvent progressivement des filières de gestion adaptées à leur toxicité. Cet article, synthèse de deux présentations aux JIREC 2010, dresse un panorama de la situation française actuelle et ébauche les pistes d'avenir. Il montre en outre que la chimie est au cœur de la plupart des opérations du cycle du combustible, offrant au vu des perspectives de développement de cette filière, un très large champ d'actions pour la recherche et l'innovation.

Mots-clés Énergie nucléaire, cycle du combustible, déchets radioactifs, JIREC 2010.

Abstract **The chemistry of the nuclear fuel cycle: from mine to waste management**

There is no getting away from nuclear energy as one of the solutions to achieve the conflicting goals of satisfying the world's rising energy requirements while reducing greenhouse gas emissions. Fuel cycle technologies with uranium for initial material are evolving to transform nuclear energy into a sustainable resource. Materials with high added value are increasingly recycled, reactors are becoming more efficient, radioactive wastes volumes are decreasing and suitable disposition routes are progressively being developed to manage them depending on their toxicity. This article provides an overview of the current situation in France and a glimpse of future trends. It highlights the central role of chemistry in most fuel cycle operations, opening a broad spectrum of possibilities for research and innovation to accompany the prospects for development of this sector.

Keywords Nuclear energy, fuel cycle, radioactive waste, JIREC 2010.

L'augmentation attendue de la population mondiale (six milliards aujourd'hui, environ dix milliards en 2050), le fort développement économique de certains pays (en particulier en Asie) et une prise de conscience au niveau international de la problématique du réchauffement climatique conduisent pour les décennies à venir à une forte croissance de la production énergétique mondiale basée sur des moyens de production d'énergie minimisant les émissions de gaz à effet de serre (GES). Parmi ceux-ci, l'énergie nucléaire, seul système de production massive à très faible émission de CO₂ (*figure 1*) s'avère incontournable comme en témoigne le nombre croissant de pays souhaitant s'équiper de centrales (55 réacteurs en construction et plus de 350 en projet dans le monde).

Cette renaissance du nucléaire doit toutefois s'appuyer sur un cycle du combustible robuste incluant l'extraction de l'uranium à la mine, son enrichissement, la fabrication du combustible et son traitement après passage en réacteur pour récupérer les matières valorisables et

optimiser la gestion des déchets (*figure 2*). En France, avec 58 réacteurs en fonctionnement produisant près de 80 % des besoins nationaux en électricité, le cycle du combustible a été dès le début au cœur de la stratégie nucléaire, intégrant traitement des combustibles usés et recyclage des matières [1]. Il bénéficie aujourd'hui d'une grande maturité, avec des procédés chimiques performants et des installations robustes, et constitue une référence au niveau international.

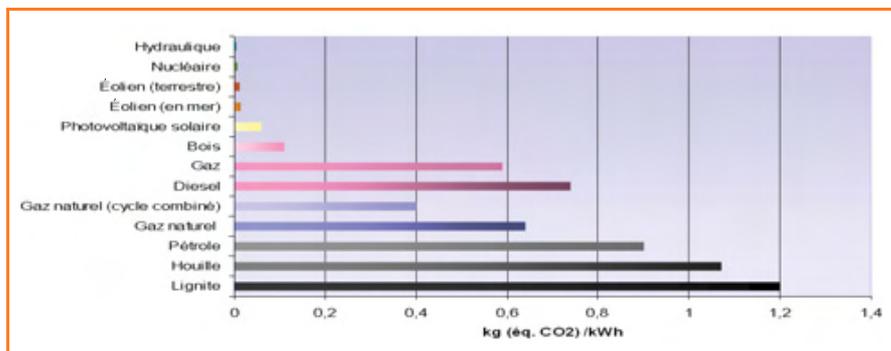


Figure 1 - Comparaison des émissions de gaz à effet de serre suivant le mode de production électrique. Source : Agence internationale de l'énergie.

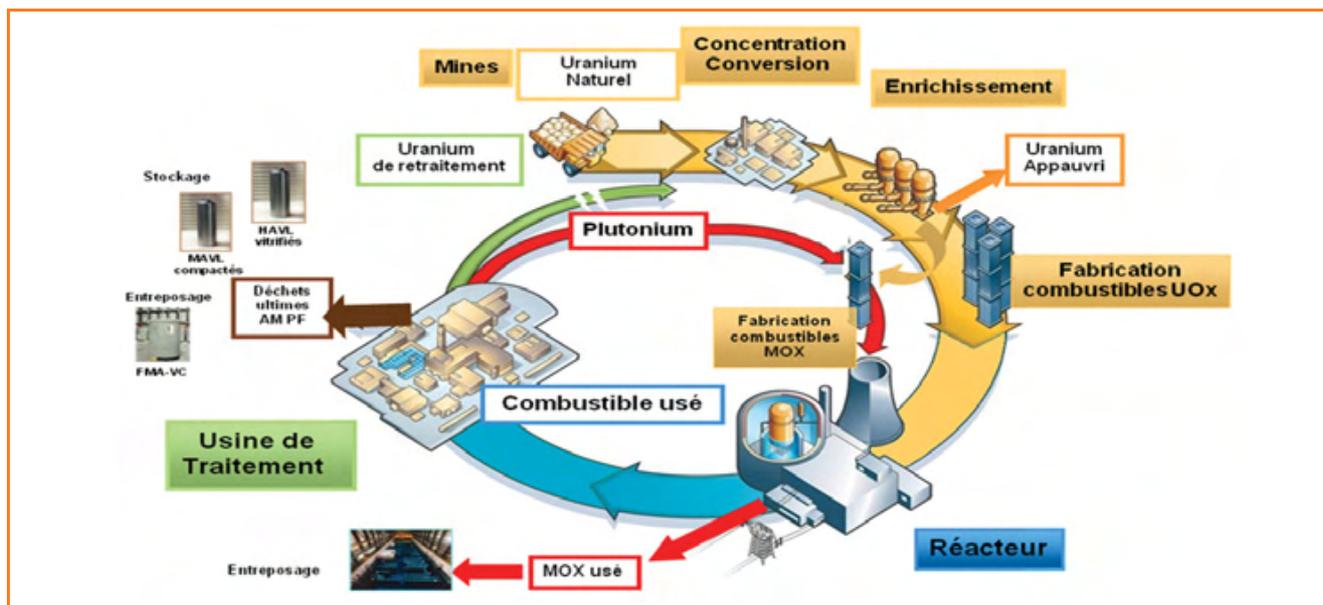


Figure 2 - Schéma simplifié du cycle du combustible français. © CEA.

L'amont du cycle

Le minerai d'uranium est la matière première des réacteurs nucléaires. Malheureusement, l'uranium naturel ne contient que 0,7 % de l'isotope 235 qui est la matière fissile nécessaire à la combustion nucléaire. Dans les centrales en service en France et en grande majorité dans le monde, il est nécessaire d'augmenter cette proportion ; ceci implique plusieurs étapes physico-chimiques pour enrichir isotopiquement l'uranium avant de pouvoir fabriquer les pastilles d'oxyde qui constituent les éléments combustibles des centrales. C'est ce que l'on appelle l'amont du cycle. Il comporte les étapes suivantes réalisées pour leur plus grande part dans les installations du groupe AREVA :

- *L'extraction de l'uranium* : les gisements sont principalement situés au nord du continent américain, sur le continent africain (Niger), en Australie et au Kazakhstan. Sur site, le minerai d'uranium subit les premières étapes de purification par extraction liquide-liquide après solubilisation en milieu sulfurique. La forte croissance des besoins en uranium nécessite de développer de nouveaux procédés pour traiter des minerais à basse teneur ou pour ouvrir de nouvelles voies de production inutilisées jusqu'ici (à partir du traitement des phosphates par exemple).

- *La conversion* dans l'usine de Malvesi dans l'Aude : après mise en solution en milieu nitrique, les oxydes miniers subissent des étapes de purification par extraction-désorption liquide-liquide, de précipitation et de fluoration pour passer sous la forme d' UF_6 .

- *L'enrichissement* dans les usines GBI (diffusion gazeuse) et bientôt GBII (ultracentrifugation) à Pierrelatte dans la Drôme : cette étape permet d'augmenter la teneur en uranium 235, que l'on amène autour de 4 %. L' UF_6 enrichi subit alors une étape de défluoration afin de produire l'oxyde qui sera utilisé pour fabriquer le combustible nucléaire.

Pour toutes les étapes de l'amont du cycle, des études sont en cours afin de réduire l'impact environnemental des procédés qui seront mis en œuvre dans les futures installations. À titre d'exemple, on peut citer :

- la réduction des effluents liquides et celle de la consommation en eau par l'utilisation de nouvelles molécules extractantes ;

- la minimisation des déchets solides par traitement thermique des effluents nitrates ;
- le recyclage des réactifs, en particulier le fluor et les acides nitrique et fluorhydrique ;
- la réduction du nombre d'opérations et de traitements à la mine et à la conversion.

L'aval du cycle

Après quatre à cinq ans passés en réacteur, le combustible nucléaire dit « usé » s'est modifié. Il est alors constitué d'uranium (95 % en masse), de plutonium (1 %), d'actinides mineurs (0,1 %) et de produits issus de la fission de l'uranium (4 %). Les modes de gestion de ces combustibles usés varient suivant les pays. Certains comme la Suède, le Canada et les États-Unis ont choisi un stockage direct de ces matériaux ; d'autres comme la France, l'Angleterre ou le Japon ont fait le choix du recyclage.

Cette stratégie de traitement du combustible usé permet de recycler les matières valorisables que sont l'uranium, le plutonium et potentiellement les autres actinides dits mineurs, de réduire volume et radiotoxicité des déchets ultimes, et de les confiner de manière durable comme cela est expliqué plus loin.

Le procédé PUREX mis en œuvre au sein des usines AREVA de La Hague dans la Manche permet de récupérer les actinides majeurs (U, Pu), avec des rendements très élevés, en tirant parti des propriétés remarquables de sélectivité et de stabilité d'une molécule organique, le phosphate de tri-n-butyle (TBP), et de les purifier de manière à permettre leur réutilisation pour la fabrication de combustible MOX (combustible oxyde mixte d'uranium et de plutonium) dans l'usine MELOX de Marcoule (Gard).

Après les opérations de cisailage, le procédé PUREX consiste en une mise en solution du combustible en milieu nitrique, suivie d'une séparation et d'une purification de l'uranium et du plutonium par des techniques d'extraction liquide-liquide utilisant comme extractant le TBP dilué dans un solvant organique, le TPH (tétrapropylène hydrogéné).

Ces opérations principales sont associées à des opérations permettant de recycler l'acide nitrique et le solvant

(TBP et TPH), de traiter les effluents gazeux, liquides et les déchets solides.

Cette technologie de traitement des combustibles usés, efficace, sûre, économiquement compétitive et désormais parfaitement maîtrisée industriellement par la France, a été exportée pour l'usine japonaise de Rokkasho-Mura, en cours de démarrage. Les développements menés sur les procédés visent à les adapter en permanence à l'évolution des combustibles des centrales nucléaires et, comme pour les opérations de l'amont, à réduire les quantités de déchets produits et l'impact environnemental des rejets.

La gestion des déchets

Les déchets produits par le cycle du combustible contiennent pour certains d'entre eux des radionucléides en quantités suffisamment importantes pour générer un risque radiologique. La stratégie mise en œuvre pour protéger l'homme et son environnement des rayonnements ionisants émis par la désintégration de ces radionucléides repose sur leur concentration, leur confinement dans des matrices durables et l'isolement de ces matériaux de la biosphère [2]. Les matrices de conditionnement constituent à ce titre la première barrière de protection entre le déchet et l'homme.

Par rapport aux déchets chimiques classiques, ceux considérés comme radioactifs ont une toxicité qui diminue dans le temps du fait de la décroissance radioactive. Le temps est donc une variable primordiale à prendre en compte. De plus, 96 % des radionucléides, toutes origines confondues, sont constitués par les produits de fission et actinides mineurs issus du traitement des combustibles usés. Ces derniers sont très spécifiques puisqu'ils occupent un très faible volume mais concentrent la quasi-totalité de la radioactivité artificielle produite en France. Le *tableau 1* récapitule les principales catégories de déchets et les solutions mises en œuvre ou envisagées pour les gérer.

	Vie courte Période < 30 ans pour les principaux éléments	Vie longue Période > 30 ans
Très faible activité (TFA) < 100 Bq/g	230 000 m ³ 20 % du volume	
Faible activité (FA) 10 ⁵ Bq/g	800 000 m ³ 0,1 % radioactivité 70 % du volume	47 000 m ³ 0,01 % radioactivité 4,5 % du volume
Moyenne activité (MA) 10 ⁶ Bq/g	$\alpha < 3\,700$ Bq/g	42 000 m ³ ≈ 4 % radioactivité 5 % du volume
Haute activité (HA) 10 ⁹ Bq/g	2 300 m ³ ≈ 96 % radioactivité 0,2 % du volume	

Tableau 1 - Les déchets radioactifs conditionnés présents en France au 31 décembre 2007 et le mode de gestion appliqué ou envisagé. Source : Inventaire Andra 2009.

Les déchets de moyenne et haute activité à vie longue, générés par les opérations de l'aval du cycle du combustible, sont conditionnés dans trois types de matrices : le verre, le béton et le bitume. Selon la loi du 28 juin 2006 sur la gestion durable des matières et déchets radioactifs, ces produits devraient être stockés à terme en formation géologique profonde.

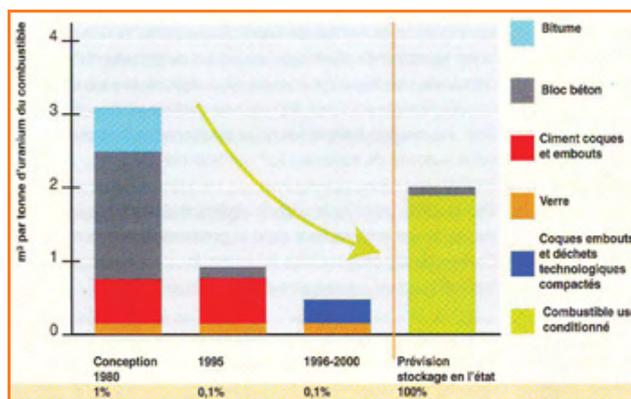


Figure 3 - Historique des volumes de déchets à période longue générés par les usines de La Hague. Source : AREVA.

Depuis la mise en service à la fin des années 1980 des unités de traitement des combustibles usés à La Hague, un effort important a été réalisé pour réduire le volume et l'activité des déchets produits et limiter les rejets d'effluents en mer et dans l'atmosphère (figure 3). Ainsi le volume des déchets solides à vie longue a été divisé par six, grâce notamment au compactage des gaines entourant les pastilles de combustibles.

Ces derniers, après compactage, sont placés dans des colis standard en acier inoxydable. Les produits de fission et actinides mineurs, qui constituent les seuls déchets de haute activité à vie longue, sont vitrifiés, c'est-à-dire fondus à 1 100 °C en présence d'adjuvants comme SiO₂, B₂O₃, Al₂O₃, ZrO₂..., de manière à obtenir un matériau vitreux, dense et homogène, incorporant de 12 à 18 % en masse de déchets. Les déchets d'exploitation de l'usine de La Hague sont le plus fréquemment cimentés. Ce procédé concerne à la fois des déchets solides, que l'on enrobe par le liant hydraulique, et des déchets liquides, qui dans ce cas, permettent de préparer l'eau de gâchage du ciment. Enfin le bitumage, opération consistant à enrober un déchet, principalement des sels issus d'opérations de traitement chimique d'effluents liquides, a été largement utilisé en France. Même si ses propriétés sont intéressantes, il est vraisemblable qu'à l'avenir cette matrice d'enrobage ne soit plus utilisée afin de minimiser les sources de matière organique dans les sites de stockage.

Les déchets radioactifs bruts sont en général conditionnés sur le site même où ils sont produits. Les centrales nucléaires, les sites de recherche et l'usine de traitement des combustibles de La Hague disposent d'installations pour la production et l'entreposage⁽¹⁾ des déchets conditionnés. Deux installations de vitrification sont actuellement en fonctionnement en France : une à Marcoule dans le Gard qui sera mise à l'arrêt en 2011 (environ 3 000 colis de 350 kg produits depuis 1978) et l'autre à La Hague (plus de 14 000 colis de 400 kg produits depuis 1992).

Le stockage géologique profond, temporairement réversible, est considéré à ce jour en France comme dans de nombreux autres pays comme la solution de référence pour la gestion définitive des déchets de haute et de moyenne activité à vie longue. Ce résultat est le fruit d'une trentaine d'années de recherches conduites en France (dans les laboratoires des grands organismes comme le CEA, l'Andra, le CNRS, ainsi que les universités) et dans les grands

pays nucléarisés, mais aussi dans les laboratoires souterrains destinés à étudier *in situ* les propriétés des milieux géologiques d'intérêt (sites de Bure en France, Mol en Belgique, Mont Terri en Suisse, Aspö en Suède...). La France étudie plus particulièrement une couche d'argile du Callovo-Oxfordien (130 Ma) située au nord-est du Bassin parisien (site de Meuse/Haute-Marne), épaisse d'environ 130 mètres et profonde d'environ 500 mètres. Sa très faible perméabilité, l'absence de faille et sa grande homogénéité confèrent au milieu les propriétés requises pour permettre de démontrer la sûreté du stockage à court, moyen et long termes.

En stockage, les matrices de conditionnement seront soumises à des sollicitations de natures différentes, liées d'une part à la présence des radionucléides (effets thermiques, auto-irradiation, radiolyse), et dépendant d'autre part des conditions d'environnement (lixiviation, contraintes mécaniques). Considérant le fait que les verres contiennent la majeure partie de l'inventaire radiotoxique du futur stockage profond, examinons plus en détails ce que l'on sait du comportement à long terme de ces matériaux (voir aussi [3]).

Le verre étant un matériau dense et homogène, les radionucléides ne pourront en sortir que si la matrice s'altère ou perd ses propriétés de confinement. L'examen des phénomènes susceptibles d'altérer les propriétés du verre conduit naturellement à s'interroger sur les effets structuraux et les effets thermiques dus à l'irradiation. Ces questions ont fait l'objet d'intenses recherches depuis le début des années 1990. Il est aujourd'hui clairement établi, notamment par le biais d'études de vieillissement accéléré et de modélisations moléculaires, que même à travers les millénaires, le verre préservera ses capacités de confinement vis-à-vis des radionucléides. Les effets classiques des irradiations (ionisations, ruptures de liaisons dues aux noyaux de recul) sont dans leur grande majorité annihilés par les effets thermiques locaux qui permettent de reconstruire la structure vitreuse quasiment à l'identique. Des travaux se poursuivent pour valider l'option consistant à incorporer plus d'émetteurs alpha dans les verres pour intégrer l'évolution du spectre des déchets liée à l'augmentation progressive des taux de combustion des combustibles. La chaleur dégagée par les désintégrations engendre des températures n'excédant pas 400 °C au cœur du bloc de verre dans les premiers mois qui suivent son élaboration, cette dernière diminuant aux alentours de 150 °C au moment où les colis pourraient être stockés en formation géologique, soit cinquante à soixante ans après leur production. Dans ces conditions thermiques et compte tenu de sa composition chimique, le verre ne pourra pas cristalliser massivement et les quelques pourcents massiques de cristaux qui pourraient se former mettraient des millions d'années à se développer du fait des limitations cinétiques [4].

Les conclusions de ces travaux sont donc assez solides en ce qui concerne le comportement intrinsèque du verre. Mais qu'en est-il de son comportement en stockage ? L'eau, présente dans la porosité des roches, devrait se comporter à la fois comme un agent corrosif vis-à-vis des différentes barrières interposées entre les radionucléides et la géosphère et comme le vecteur de migration des radionucléides les plus solubles. En présence d'eau, le verre se transforme en produits d'altération, essentiellement composés d'amorphes et de minéraux argileux. La vitesse de cette transformation dépend de nombreux facteurs chimiques et hydrauliques. Elle est de l'ordre d'un micromètre par jour à 90 °C au début de la réaction, puis diminue aux alentours de quelques nanomètres par an dès qu'une couche suffisamment dense et protectrice se forme à sa surface. Cette couche, dite de

passivation, résulte de réaction d'hydrolyse et de condensation impliquant principalement le silicium [5]. L'enjeu des recherches conduites ces dernières années sur ce thème a porté sur la description des mécanismes à l'origine de ce phénomène. Un modèle, appelé GRAAL, a été développé sur cette base phénoménologique. Il permet aujourd'hui d'expliquer de nombreux effets liés aux conditions chimiques ou hydrodynamiques appliquées au verre. En outre, il a été validé sur la très longue durée à partir d'un système archéologique. L'étude a porté sur l'altération en milieu marin de blocs de verres datant du II^e siècle après J.-C. [6]. Ces blocs ont été caractérisés pour quantifier leur état d'altération. Un verre de même composition a été synthétisé et ses mécanismes d'altération ont été étudiés pour préciser le niveau d'analogie avec les verres nucléaires. Il a ainsi été montré que les mécanismes fondamentaux des deux types de verres étaient de même nature et que seuls les paramètres (constante cinétique, constante de solubilité de la couche passivante) dépendaient de la composition du verre. Le modèle GRAAL a donc été paramétré pour ce verre archéologique et appliqué aux conditions marines. Il en ressort un accord quantitatif entre la simulation et les observations (*figure 4*). Ce travail établit un lien solide entre les travaux de laboratoire et le comportement des matériaux sur le long terme en milieu naturel.

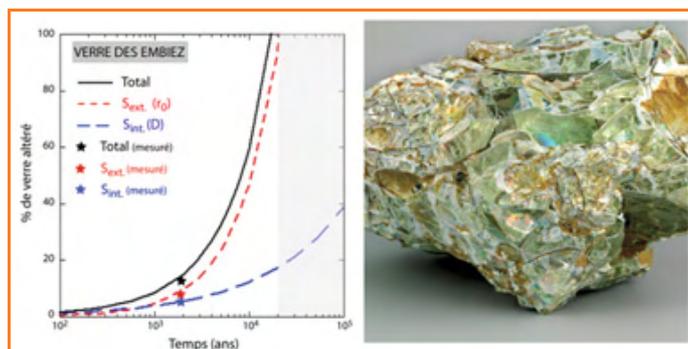


Figure 4 - Simulation (à gauche) du comportement à long terme d'un bloc de verre archéologique des Embiez (à droite), altéré 1 800 ans en milieu marin.

Les étoiles correspondent aux données de caractérisation des blocs et les courbes aux prévisions de GRAAL (d'après [6]).

Le modèle sera utilisé pour prévoir la durabilité des verres dans le stockage géologique en vue de la démonstration sûreté que conduira l'Andra en 2012-2013. Sur la base des connaissances disponibles à ce jour, et en considérant des hypothèses raisonnablement conservatives, on peut estimer que la durée de vie des verres nucléaires en stockage géologique – c'est-à-dire le temps nécessaire pour qu'un colis de 400 g se transforme en produits d'altération et libère la fraction de radionucléides solubles qu'il contient – se situe aux alentours du million d'années.

Les matrices de conditionnement s'inscrivent comme les procédés industriels dans une démarche de progrès continu. La connaissance sur le comportement des matériaux déjà élaborés progresse et permet d'affiner l'évaluation de leur comportement à long terme. Ces connaissances sont aussi utilisées pour préparer les matériaux du futur dans la logique de progrès présentée plus haut.

Quels enjeux pour demain ?

Considérer que l'énergie nucléaire constituera une part très significative de la production énergétique mondiale de

demain, surtout avec l'épuisement progressif des ressources fossiles, impose d'inscrire le nucléaire dans une perspective de développement durable. Cela implique le développement d'une nouvelle génération de réacteurs (réacteurs de quatrième génération) capables de préserver les ressources. Des réflexions à l'échelle internationale initiées en 2000 au travers du forum international Génération IV (GIF) regroupant les treize pays nucléaires majeurs et l'Europe ont permis de définir les principaux critères auxquels devront répondre ces systèmes de quatrième génération (réacteurs et leur cycle du combustible associé) : durables, compétitifs, sûrs, fiables et résistants vis-à-vis de la prolifération.

Parmi les six systèmes sélectionnés dans le cadre de ce forum, quatre concepts sont des réacteurs à neutrons rapides (RNR), c'est-à-dire des réacteurs où les neutrons de fission ne sont pas ralentis, comme par exemple dans les réacteurs à eau sous pression constituant le parc nucléaire français. Ceci confère aux réacteurs à neutrons rapides des propriétés physiques permettant :

- De consommer le plutonium produit par le parc par un recyclage total des matières énergétiques contenues dans les combustibles usés des réacteurs à eau légère (REL) ou des RNR. Les réacteurs à neutrons rapides permettent de brûler tous les isotopes du plutonium, alors que dans les réacteurs à eau, le recyclage du plutonium est limité à un cycle (à cause de la dégradation de l'isotopie après irradiation).

- De préserver la ressource en uranium en utilisant la totalité de la capacité énergétique de l'uranium grâce à la capacité des neutrons rapides à transformer l'uranium 238 fertile en plutonium 239 fissile, optimisant ainsi l'utilisation de l'uranium naturel mais autorisant aussi l'utilisation de l'uranium appauvri issu des opérations d'enrichissement et de l'uranium de retraitement. Ainsi les stocks français d'uranium appauvri et d'uranium de retraitement, qui s'élèvent actuellement à 250 000 tonnes, permettraient d'assurer la production nucléaire nationale au niveau actuel pendant 5 000 ans, concourant donc à sa pérennité et à l'indépendance énergétique de la France.

- De réduire l'inventaire des déchets de très haute activité et à vie longue par transmutation des actinides mineurs, c'est-à-dire de les transformer par fission en radionucléides de période courte, permettant ainsi une diminution de la radiotoxicité à long terme des déchets ultimes. Ceux-ci seraient alors constitués essentiellement de produits de fission permettant de revenir au niveau de la radiotoxicité de l'uranium au bout de 300 ans et non d'environ 10 000 ans comme pour les colis de déchets vitrifiés actuellement produits qui contiennent les produits de fission et les actinides mineurs (figure 5).

Le retrait des actinides mineurs permet également d'optimiser le stockage en réduisant d'un facteur 2 à 5 (suivant la durée d'entreposage) sa superficie par diminution de la charge thermique qui permet ainsi de rapprocher les galeries de colis de déchets.

La loi du 28 juin 2006 demande d'évaluer pour 2012 les perspectives industrielles des filières de réacteurs présentant un potentiel de transmutation en vue de la mise en exploitation d'un prototype à l'horizon 2020. Parmi les différents systèmes à neutrons rapides retenus dans le forum Génération IV, la France a décidé de focaliser ses efforts sur :

- Les réacteurs rapides refroidis au sodium comme concept de référence, car le plus mature technologiquement, avec un prototype industriel dénommé ASTRID (« advanced sodium technological reactor for industrial demonstration »). Ce réacteur de puissance 600 MWe aura une mission de

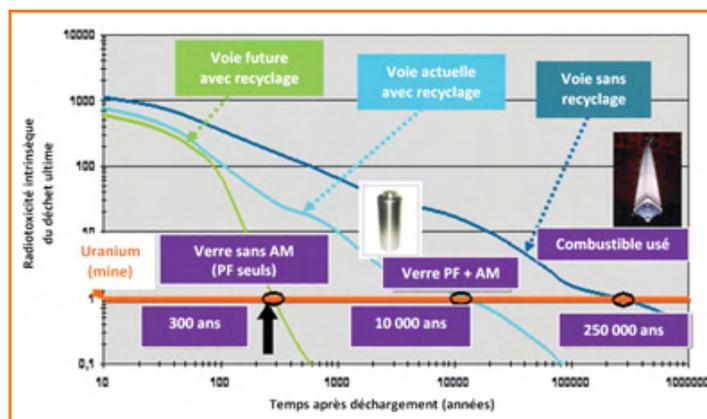


Figure 5 - Évolution de la radiotoxicité des déchets comparée à celle du minerai d'uranium utilisé pour fabriquer les combustibles (d'après [7]).

prototype industriel extrapolable, c'est-à-dire précédant la construction d'unités industrielles attendues aux alentours de 2040.

- Les réacteurs rapides refroidis au gaz comme solution alternative, séduisante mais très innovante et nécessitant d'importantes recherches, avec la mise en place d'une collaboration avec la Slovaquie, la République tchèque et la Hongrie afin de mener les développements sur cette filière et de préparer la construction dans l'un de ces trois pays d'un réacteur expérimental de l'ordre de 100 MWth dénommé ALLEGRO.

Notes et références

NDLR À ce sujet, voir aussi les deux dossiers publiés récemment : Rigny P., Bonin B., Gras J.-M., Les déchets nucléaires et leur gestion, *L'Act. Chim.*, **2010**, 346, p. 1 ; Rigny P., Le cycle du combustible nucléaire : de la mine d'uranium jusqu'au recyclage et aux déchets, *L'Act. Chim.*, **2010**, 345, p. 1.

- [1] L'entreposage est considéré comme temporaire, contrairement au stockage. Les déchets dont il est question seront stockés en formation géologique profonde lorsqu'un site sera opérationnel (ouverture prévue en 2025 selon la loi du 28 juin 2006).
- [2] *Le traitement-recyclage du combustible nucléaire usé*, Monographie DEN/CEA, Éditions Le Moniteur, **2008**.
- [3] *Le conditionnement des déchets nucléaires*, Monographie DEN/CEA, Éditions Le Moniteur, **2008**.
- [4] Gin S., Ribet I., Comportement à long terme des verres de type R7T7 : bilan des connaissances à l'échéance de la loi Bataille, *L'Act. Chim.*, **2005**, 285-286, p. 72.
- [5] Orhac X., *Étude de la stabilité thermique du verre nucléaire. Modélisation de son évolution à long terme*, Thèse de doctorat de l'Université Montpellier 2, **1999**.
- [6] Caillietau C., Angeli F., Devreux F., Gin S., Jestin J., Jollivet P., Spalla O., Insight into silicate glass aqueous alteration mechanisms, *Nature Materials*, **2008**, 7, p. 978.
- [7] Verney-Carron A., Gin S., Libourel G., Archeological analogs and the future of nuclear waste glass, *Journal of Nuclear Materials*, **2010**, 406, p. 365.
- [7] Les déchets radioactifs à haute activité et à vie longue/recherches et résultats - Axe 1 de la loi du 30 décembre 1991 : Séparation et transmutation des radionucléides à vie longue, *Rapport final émis par le CEA dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991*, **2005**.



L. Martin-Deidier

Loïck Martin-Deidier est directeur adjoint de l'Énergie nucléaire au CEA Saclay*.

Stéphane Gin (auteur correspondant)

est responsable du Laboratoire d'étude du comportement à long terme des matrices de conditionnement au CEA Marcoule**.



S. Gin

* CEA Saclay, DEN/Dir, F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex. Courriel : loick.martin-deidier@cea.fr

** CEA Marcoule, DTCD/SECM, BP 17171, F-30207 Bagnols-sur-Cèze Cedex. Courriel : stephane.gin@cea.fr

La médecine nucléaire

Louis Sibille, Enrique Nalda, Laurent Collombier, Pierre-Olivier Kotzki et Vincent Boudousq

Résumé La médecine nucléaire est une spécialité médicale exploitant les propriétés de la radioactivité. Des marqueurs radioactifs associés à différents vecteurs sont utilisés comme traceur (ou radiopharmaceutique) dans un but diagnostique et/ou thérapeutique. Depuis sa naissance il y a plus d'un demi-siècle, la médecine nucléaire est devenue incontournable dans la prise en charge de nombreux patients, notamment en oncologie. Après quelques définitions, cet article aborde les principaux domaines de la médecine nucléaire – imagerie fonctionnelle, traitement par radiothérapie interne, détection per-opératoire, technique de dosage par radio-immunologie – ainsi que le devenir de cette discipline.

Mots-clés Médecine nucléaire, scintigraphie, TEP, radiopharmaceutique, JIREC 2010.

Abstract **Nuclear medicine**
Nuclear medicine is a medical specialty using the properties of radioactivity. Radioactive markers associated with vectors are used as a tracer or radiopharmaceutical for diagnostic purposes and/or therapy. Since its birth more than half a century ago, it has become essential in the care of many patients, particularly in oncology. After some definitions, this paper presents the main nuclear techniques – imaging for diagnostic, radiopharmaceuticals as therapeutic agents, intra-operative detection, technique of radioimmunoassay – and the future of this field.

Keywords Nuclear medicine, scintigraphy, PET, radiopharmaceutical, JIREC 2010, teaching.

L' utilisation militaire de la radioactivité a laissé une image négative du nucléaire. Son utilisation civile est elle aussi vivement contestée depuis l'accident de Tchernobyl en 1986 et les événements récents qui ont touchés le Japon et la centrale nucléaire de Fukushima. Aujourd'hui, la gestion des déchets à long terme fait débat. Tous ces points négatifs sont largement médiatisés et occultent une application majeure du nucléaire qu'est l'utilisation médicale de la radioactivité. La médecine nucléaire est une spécialité exploitant les propriétés de la radioactivité [1-3]. Pour cela, elle utilise des radioéléments en sources non scellées*. Des marqueurs radioactifs associés à différents types de vecteurs sont utilisés comme traceur (ou radiopharmaceutique) dans un but diagnostique et/ou thérapeutique. La très grande sensibilité de détection de la radioactivité permet d'utiliser des activités très faibles lors des procédures diagnostiques. Profitant des innovations en biologie, en physique et en chimie, la médecine nucléaire a connu une évolution rapide depuis sa naissance il y a plus d'un demi-siècle. Elle est devenue incontournable dans la prise en charge de nombreux patients, notamment en oncologie. Après quelques définitions, nous aborderons successivement les domaines de la médecine nucléaire que sont l'imagerie fonctionnelle, le traitement par radiothérapie interne vectorisée, la détection per-opératoire et enfin très succinctement la technique de dosage par radio-immunologie. Pour conclure, nous aborderons l'état actuel et le futur de cette discipline.

Quelques définitions

Radiopharmaceutique ou radiotraceur

Un radiopharmaceutique est un médicament composé d'un marqueur radioactif lié à un vecteur [4]. Sa demi-vie effective dans l'organisme résulte de son élimination

biologique (demi-vie biologique) et de sa décroissance radioactive (demi-vie physique). Un traceur est par définition quelque chose que l'on peut suivre à la trace, ici grâce à la radioactivité. C'est aussi quelque chose que l'on utilise à l'état de trace, c'est-à-dire en très faible quantité. En médecine nucléaire, la quantité pondérale du principe actif contenu dans un radiopharmaceutique est généralement de l'ordre du picogramme ; il n'a donc aucun effet pharmacologique.

Vecteur

La nature du vecteur utilisé est très variable : il peut s'agir d'une cellule, d'une hormone, d'un anticorps, d'un peptide, d'ADN, d'un acide aminé, d'une molécule de taille quelconque qui peut être le marqueur lui-même. C'est le vecteur qui confère au radiopharmaceutique ses caractéristiques biologiques, qui permettront d'explorer spécifiquement tels ou tels fonction, métabolisme, répartition d'un type de récepteur... Il sera choisi selon le but de l'examen.

Marqueur

Les radioéléments utilisés en diagnostic sont de deux natures :

- Ceux utilisés en scintigraphie* par émission monophotonique (imagerie), en radio-immunologie (dosage) ou lors de détection per-opératoire de lésion sont majoritairement des émetteurs γ tels ^{99m}Tc , ^{123}I , ^{67}Ga , ^{201}Tl ... En raison de ses caractéristiques physiques favorables en imagerie, de sa disponibilité (générateur de $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$) et de son coût relativement faible, le ^{99m}Tc est le marqueur le plus utilisé en médecine nucléaire. Ceux utilisés en scintigraphie par émission biphotonique (imagerie) ou tomographie* par émission de positon (TEP)* sont des émetteurs β^{+} tels ^{18}F , ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O ...

Glossaire

Les termes suivis d'un astérisque* dans le texte sont définis ci-dessous.

Annihilation (réaction d') : réaction entre un électron (particule chargée négativement) et un positon (antiparticule chargée positivement) au cours de laquelle ces deux particules disparaissent pour donner deux photons γ de 511 keV émis à 180° l'un de l'autre.

Imagerie par résonance magnétique (IRM) : modalité d'imagerie s'appuyant sur la résonance magnétique nucléaire.

Rayonnement β^- : électron chargé négativement.

Rayonnement β^+ ou positon : antiparticule de l'électron (chargée positivement).

Rayonnement γ : rayonnement d'origine nucléaire (ou provenant de phénomènes subatomiques comme la réaction d'annihilation). Les rayonnements γ sont généralement plus énergétiques que les rayonnements X.

Rayonnement X : rayonnement d'origine extra-nucléaire (réarrangement du cortège électronique). Les rayonnements X sont généralement moins énergétiques que les rayonnements γ .

Scintigraphie : modalité d'imagerie basée sur l'enregistrement de rayonnements γ à l'aide d'un détecteur à scintillation.

Sievert (Sv) : unité de dose reflétant les effets biologiques des rayonnements ionisants sur l'organisme.

Source non scellée : source dont la présentation et les conditions normales d'utilisation ne permettent pas de prévenir toute dispersion de substance radioactive ; elle est donc irradiante et potentiellement contaminante.

Tomodensitométrie (TDM) ou scanner X : modalité d'imagerie s'appuyant sur l'atténuation des rayons X par les tissus, en fonction de leur densité.

Tomographie : technique d'imagerie 3D permettant de reconstruire un volume à partir d'images 2D acquises sous différents angles. Ce volume est généralement visualisé sous différents plans de coupe.

Tomographie par émission monophotonique (TEMP) : acquisition tomographique en scintigraphie basée sur la détection de photons γ .

Tomographie par émission de positon (TEP) ou tomographie par émission biphotonique : acquisition tomographique en scintigraphie basée sur la détection en coïncidence (simultanée et à 180°) de deux photons γ de 511 keV émis lors d'une réaction d'annihilation entre un positon et un électron.

La demi-vie du ^{18}F est de 110 min, assez longue pour permettre son acheminement du lieu de production (cyclotron) au centre de médecine nucléaire et assez courte pour limiter dans le temps l'irradiation reçue par le patient. C'est le seul marqueur émetteur de positon utilisé en pratique clinique actuellement.

• Ceux utilisés en thérapie sont généralement des émetteurs β^* tels ^{131}I , ^{153}Sm , ^{90}Y ... Ce rayonnement présente une toxicité radiobiologique élevée car il délivre la totalité de son énergie sur un faible rayon (libre parcours moyen de l'ordre du mm) entraînant une destruction cellulaire localisée. La demi-vie relativement longue (pour une application médicale) de ces radioéléments – huit jours pour l'iode 131 – permet d'obtenir un débit de dose faible limitant les effets secondaires. Les activités utilisées en thérapie sont supérieures à celles utilisées en diagnostic d'un facteur 10 à 100.

Radioprotection et irradiation

En accord avec le principe de justification, une décision médicale est toujours fondée sur un rapport bénéfice/risque favorable pour le patient et estimé au cas par cas. C'est

pourquoi il n'existe pas de limitation légale chiffrée de la dose de rayonnement délivrée au patient. Le patient doit toutefois être informé des risques avant tout examen ou traitement. Le principe d'optimisation (ou ALARA, « as low as reasonably achievable ») consiste à utiliser des activités adaptées à chaque patient, aussi faibles que possible, permettant d'obtenir des examens de qualité suffisante pour porter un diagnostic ou effectuer un traitement efficace. Elles incluent une traçabilité des radiopharmaceutiques et des contrôles de qualité (puretés radiochimique et radionucléidique). À titre indicatif, une radiographie pulmonaire délivre moins de 0,2 mSv*, alors qu'un scanner abdominal est à l'origine d'une irradiation de 10 à 15 mSv et une scintigraphie osseuse de 5 mSv.

Les grands principes de la radioprotection sont la justification, l'optimisation (principe ALARA) et la limitation de dose. Nous avons vu que ce dernier point ne s'applique pas au patient ; il est par contre présent pour le personnel médical (et plus généralement le personnel soumis à des rayonnements ionisants) et la population générale. Pour le personnel médical, la limite de dose reçue lors du travail et rapportée au corps entier est de 20 mSv/an. La protection du personnel contre les rayonnements ionisants est sous la responsabilité du chef de service, qui dispose de trois interlocuteurs privilégiés : la personne compétente en radioprotection, le radiophysicien et le médecin de prévention de l'établissement. Les bases de ce travail reposent sur la surveillance dosimétrique des travailleurs, la conception des locaux, la définition des zones surveillées et contrôlées, le respect du règlement intérieur, la gestion des déchets nucléaires, le contrôle qualité des appareils et la formation du personnel à la radioprotection [5].

Le bilan des expositions externes effectué par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) en 2008 sur 3 346 personnes travaillant dans un service de médecine nucléaire a montré que seules trois personnes avaient reçu une dose corps entier de 6 à 15 mSv et aucune une dose de 15 à 20 mSv (la limite légale étant de 20 mSv) [6]. Concernant la population générale, la limite de dose est de 1 mSv/an, en excluant les irradiations médicale et naturelle. Il faut garder en mémoire que l'irradiation moyenne annuelle par habitant en France est de 3,6 mSv/an dont 66 % sont d'origine naturelle (principalement liée au radon), 33 % d'origine médicale et moins de 1 % liée à l'industrie du nucléaire.

Imagerie fonctionnelle et métabolique

La médecine nucléaire est complémentaire de la radiologie (*tableau I*). Cette discipline médicale voisine emploie d'autres techniques d'imagerie irradiante (radiologie standard, tomodensitométrie ou TDM*) et non irradiante

Médecine nucléaire	Radiologie
Imagerie fonctionnelle ou métabolique	Imagerie morphologique ou anatomique
Scintigraphie	Tomodensitométrie (TDM)
Rayons γ	Rayons X*
Paramètre biologique via paramètre physique (radioactivité)	Paramètre physique (densité)

Tableau I - Différences entre les imageries en médecine nucléaire et en radiologie.

(IRM*, échographie). Le choix de tel ou tel examen dépend de la pathologie à explorer, du patient et bien sûr de la disponibilité des machines. Prenons pour exemple la scintigraphie osseuse qui permet d'apprécier le métabolisme de l'os sur l'ensemble du squelette et de détecter très précocement, avant toute modification morphologique, de nombreux processus pathologiques (fracture, infection, cancer, inflammation...). La radiologie standard et la TDM étudient quant à elles les densités des différents tissus, et peuvent mettre en évidence des hypo- ou des hyperdensités osseuses (figure 1).

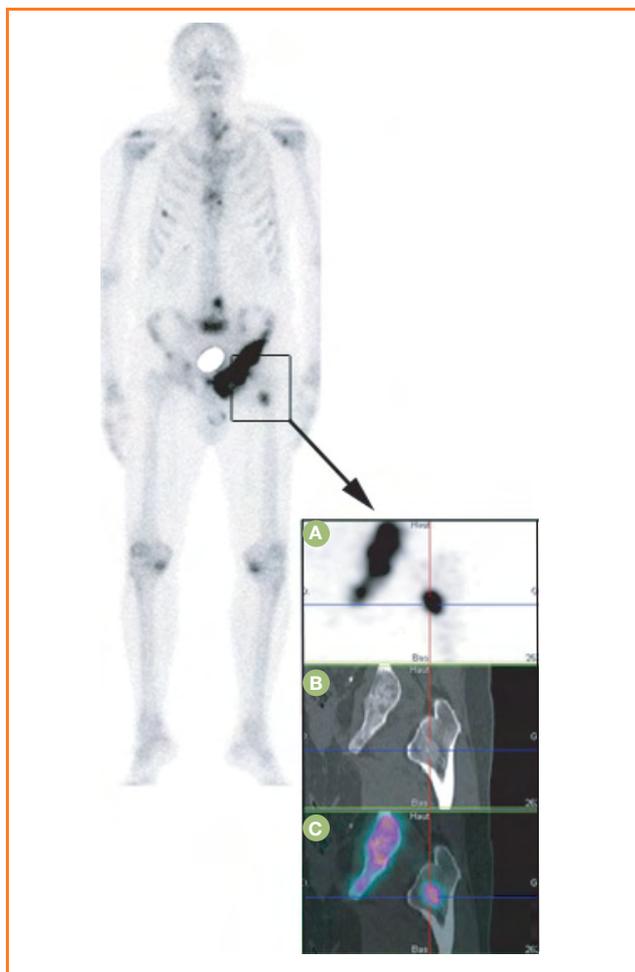


Figure 1 - Scintigraphie osseuse retrouvant plusieurs métastases osseuses (cancer de la prostate). Image planaire du corps entier avec images en coupes centrées sur une métastase du fémur gauche : scintigraphie (A), tomographie (B) et fusion (C).

La première étape d'une scintigraphie est d'administrer le radiotracer au patient. Cette administration s'effectue le plus souvent par injection, mais peut aussi se faire par ingestion ou inhalation. Dans le cas d'une scintigraphie osseuse, elle se fait par injection intraveineuse. Ce traceur va se distribuer dans l'organisme selon la spécificité du vecteur utilisé. Après un temps d'attente variable, de quelques secondes à quelques heures, le patient est positionné sur la table d'acquisition de la γ -caméra ou du TEP, le plus souvent dans une position allongée. Les rayonnements γ^* émis sont détectés, triés et comptabilisés. L'information ainsi obtenue est retranscrite sous forme d'images, qui font l'objet d'une interprétation par un médecin nucléaire, conduisant à un diagnostic.

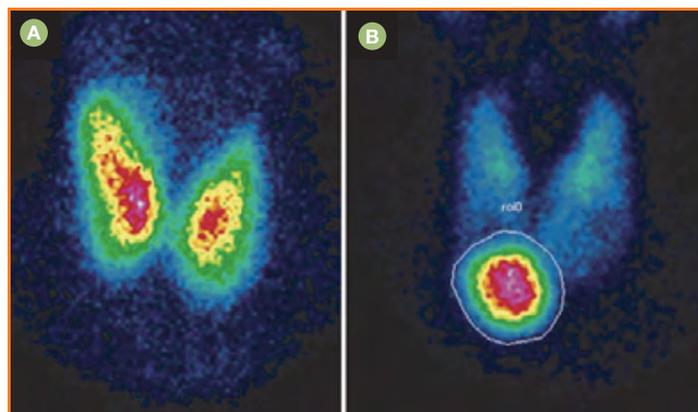


Figure 2 - Scintigraphie thyroïdienne : image normale (A) ; nodule chaud responsable d'une hyperthyroïdie (B).

Le premier organe exploré par les isotopes radioactifs fut la thyroïde [7] (figure 2). De nos jours, les domaines d'application de la médecine nucléaire sont très nombreux et peuvent être classés par organe (cœur, os, thyroïde, cerveau...), par fonction (vascularisation, ventilation, innervation, transit digestif...) ou par pathologie (inflammation, infection...). Les patients recourant à un examen de médecine nucléaire sont de tout âge : du nourrisson en cas d'hypothyroïdie aux personnes âgées en cas de démence. Il n'existe pas d'allergies aux produits employés en médecine nucléaire et les seules contre-indications, qui restent relatives, sont la grossesse et l'allaitement.

On distingue deux types de γ -caméra suivant qu'un ou deux photons sont détectés suite à la désintégration du marqueur [2-3]. Les γ -caméras dites « classiques » sont les plus anciennes et les plus nombreuses ; fonctionnant toujours selon le principe décrit par Anger en 1952, elles permettent la réalisation d'images planaire (2D) ou tomographique* (3D). Dans ce dernier cas, on parle de tomographie par émission monophotonique (TEMP)*. Depuis les années 2000, l'équipement des centres de médecine nucléaire a évolué avec l'apparition des caméras TEP (tomographie par émission de positons*). Le principe de détection de la TEP est plus complexe que celui des γ -caméras classiques. Le positon émis par la désintégration du marqueur ne peut être détecté directement ; il interagit très rapidement avec un électron du milieu lors d'une réaction d'annihilation*. Cette réaction conduit à l'émission de deux photons de même énergie (511 keV) selon des directions opposées, qui sont captés simultanément et en coïncidence grâce aux détecteurs répartis en couronne.

L'ensemble des caméras vendues actuellement sont équipées de systèmes hybrides associant γ -caméra et TDM (TEMP/TDM ou TEP/TDM) (figures 3 et 4). En comparaison à des examens tomographique et scintigraphique effectués de façon séparée, l'utilisation de systèmes hybrides améliore la précision diagnostique et influe sur la prise en charge des patients. Les informations obtenues en TDM permettent d'augmenter la qualité des images scintigraphiques d'une part, et de localiser et de caractériser de façon plus précise les lésions d'autre part [8-9].

Radiothérapie interne vectorisée

Le versant thérapeutique de la médecine nucléaire est moins développé mais tout aussi efficace que le versant diagnostique. Il s'apparente en termes de spécialité



Figure 3 - Caméra hybride TEP/TDM (Philips®).

médicale non plus à la radiologie mais à la radiothérapie (tableau II). L'utilisation des émetteurs β^- en association avec des vecteurs choisis permet de cibler spécifiquement les tissus ou cellules à détruire [10-11]. La radiothérapie interne vectorisée est un traitement complémentaire de la radiothérapie externe, de la chimiothérapie et de la chirurgie dans la lutte contre le cancer.

Médecine nucléaire	Radiothérapie
Interne (sources non scellées)	Externe Interne (sources scellées)
Irradiation très sélective	Irradiation moins sélective
Rayons β^-	Rayons β^- , X, α
Débit de dose faible	Débit de dose élevé

Tableau II - Différences entre les traitements en médecine nucléaire et en radiothérapie.

Le principe de radiopharmaceutique est le même que pour les applications diagnostiques, la différence résidant dans le choix du marqueur. Certains marqueurs, comme l'iode 131 utilisé dans le traitement des cancers thyroïdiens, présentent une émission mixte β^- et γ permettant de réaliser des images diagnostiques (recherche de métastases) en plus de leur effet thérapeutique.

En cas de cancer, la radiothérapie interne vectorisée peut être utilisée dans deux buts. L'effet curatif est recherché dans le traitement des cancers thyroïdiens ou des lymphomes, alors que dans le traitement des métastases osseuses, l'effet recherché est palliatif ; il s'agit alors d'un traitement symptomatique.

Son utilisation ne se limite pas à l'oncologie ; la radiothérapie interne est aussi employée dans le traitement de pathologies bénignes comme l'hyperthyroïdie ou certaines atteintes inflammatoires des articulations.

Détection per-opératoire

Une étroite collaboration entre chirurgiens et médecins nucléaires a donné naissance à des techniques de détection per-opératoire utilisant les isotopes radioactifs [12]. La plus connue est la détection du ganglion sentinelle servant dans le traitement chirurgical des cancers du sein.

Le principe, toujours basé sur le couple vecteur-marqueur, est simple. Le radiotracer est injecté au niveau du sein malade de la patiente le jour ou la veille de l'intervention chirurgicale. Juste avant l'intervention, une image est réalisée pour vérifier la bonne migration du radiotracer jusqu'au ganglion sentinelle (premier ganglion de la chaîne de drainage lymphatique du sein). Lors de l'intervention, le ganglion sentinelle sera repéré à l'aide d'une sonde de détection (figure 5), puis prélevé et analysé. Selon le résultat de cette analyse, le chirurgien pratiquera (si le ganglion est envahi par le cancer) ou non un curage

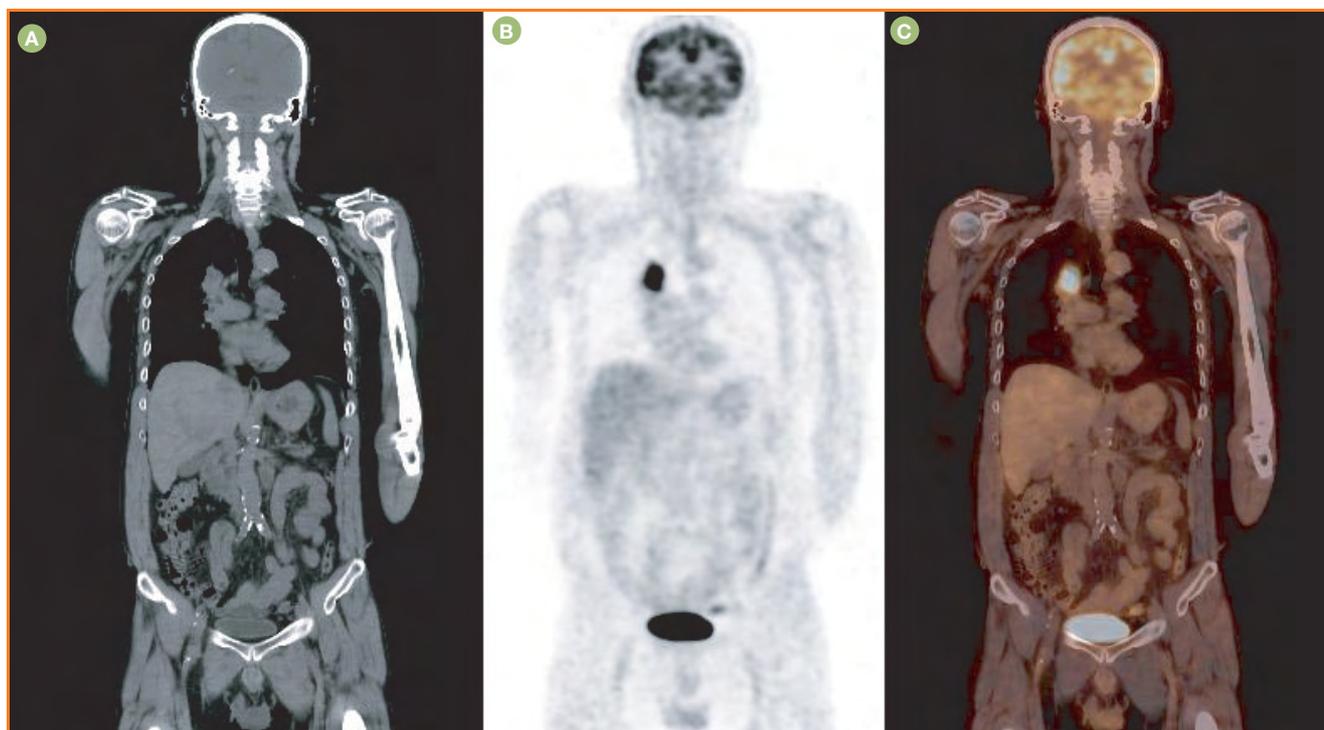


Figure 4 - TEP/TDM au ^{18}F -FDG montrant un cancer du poumon droit. Images en coupes frontales : tomodensitométrie (A), scintigraphie (B) et fusion (C).



Figure 5 - Sonde de détection per-opérateur (Clerad®).

ganglionnaire axillaire complet (ablation de tous les ganglions). Cette technique a pour but d'éviter des curages ganglionnaires inutiles qui peuvent entraîner des complications à long terme.

Radio-immuno-analyse

Un domaine de la médecine nucléaire plus proche de la biologie est la radio-immuno-analyse (RIA). Cette technique bénéficie de la sensibilité de détection de la radioactivité et de la spécificité de la réaction immunologique antigène-anticorps. Elle permet le dosage d'hormones (thyroïde, hypophyse...), de peptides et de vitamines, ainsi que de certains marqueurs tumoraux (thyroglobuline, PSA : antigène prostatique spécifique...). Son utilisation a diminué au profit des dosages par techniques enzymatique, fluorescente et chimioluminescente. Ne représentant plus que 10 à 20 % de l'activité de biologie clinique, elle ne sera pas développée ici.

Situation actuelle et perspectives

En 2009, la France métropolitaine comptait 337 γ -caméras classiques et 77 TEP installées pour environ 550 médecins nucléaires. La quasi-totalité des γ -caméras vendues à l'heure actuelle sont hybrides (TEMP/TDM ou TEP/TDM). L'imagerie hybride, qui permet une fusion des informations fonctionnelles et anatomiques, continue à se développer : amélioration des logiciels, de la qualité des unités TDM et apparition de caméras de recherche associant TEP et IRM [13]. D'autres développements sont attendus comme la généralisation des nouveaux détecteurs à semi-conducteur (CZT pour CdZnTe), qui sont plus sensibles et améliorent les résolutions spatiales et en énergie [14].

L'avenir de la médecine nucléaire dépend de l'amélioration et du développement des caméras, mais aussi et surtout de la découverte et de la production à grande échelle de nouveaux radiopharmaceutiques. Il n'existe pas de limite théorique, l'enjeu étant de trouver un vecteur d'intérêt biologique synthétisable, dont la distribution et l'accumulation dans l'organisme ne seront pas ou peu changées par son marquage. Nous pouvons espérer que ces futurs traceurs

permettront de relever les défis de la médecine moderne que sont la prévention, le diagnostic et les traitements précoces des pathologies neurodégénératives (maladie d'Alzheimer), cardiovasculaires (infarctus du myocarde, accidents vasculaires cérébraux) ou endocriniennes (diabète). Toutefois, la mise au point d'un nouveau traceur est longue : de cinq à dix ans. Le développement de ces traceurs est encadré, mais aussi parfois ralenti par la rigidité de la double législation portant sur l'utilisation des isotopes radioactifs et des médicaments.

Une autre préoccupation est le problème médico-économique de ces recherches : elles sont financées dans la majorité par les industries qui n'ont que vingt ans de monopole, recherche comprise, pour rentabiliser des investissements de 200 à 900 millions d'euros [2].

Conclusion

La médecine nucléaire est une discipline encore mal connue qui apporte pourtant une contribution indiscutable dans la prise en charge des patients atteints de maladies cancérologiques, ostéo-articulaires, cardiologiques ou neurologiques. Elle possède deux facettes : l'une diagnostique (imagerie, dosage biologique) et l'autre thérapeutique (radiothérapie interne vectorisée, détection per-opérateur). Cette jeune spécialité médicale possède un vrai dynamisme basé sur l'évolution des caméras et la recherche de nouveaux traceurs.

Chaque année, quarante millions de personnes dans le monde bénéficient d'un examen de médecine nucléaire. Mais depuis 2008, cette spécialité est menacée par des crises répétées d'approvisionnement en générateur de ^{99}Mo servant à produire le $^{99\text{m}}\text{Tc}$, isotope le plus utilisé en médecine nucléaire [15]. 95 % de la production mondiale de ces générateurs sont assurés par seulement cinq centrales nucléaires, les plus importantes étant situées au Canada, en Europe et en Afrique du Sud. Les arrêts de fonctionnement pour maintenance sont de plus en plus fréquents et longs en raison d'un vieillissement de ces structures, âgées de 43 à 53 ans, qui ne devraient plus être opérationnelles d'ici quinze ans. Des interventions harmonisées de la part des gouvernements et des acteurs industriels sont nécessaires pour pérenniser la production et l'approvisionnement de ces générateurs afin de ne pas pénaliser un grand nombre de patients.

Références

- [1] Nalda E., Sibille L., Comte F., www.mednuc.net.
- [2] Zimmermann R., *La médecine nucléaire – La radioactivité au service du diagnostic et de la thérapie*, EDP Sciences, 2006.
- [3] Bourguet P., Courbon F., Le Guludec D., Giamarile F., Kraeber-Bodéré F., Payoux P. *et coll.*, Dossier : La radioactivité au service de la médecine. La médecine nucléaire, une spécialité méconnue, *Techniques Hospitalières*, 2009, 718, p. 18.
- [4] Quelven I., Monteil J., Tafani J.-A.M., Les médicaments radiopharmaceutiques, *Actualités Pharmaceutiques Hospitalières*, 2005, 1(1), p. 45.
- [5] Castagnet X., Mantzarides M., Laroche P., Foehrenbach H., Radioprotection du personnel dans un service de médecine nucléaire, *Arch. Mal. Prof. Env.*, 2007, 68(5), p. 555.
- [6] La radioprotection des travailleurs. Bilan 2008 de la surveillance des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants en France, *Rapport DRPH/DIR/2009-16*, IRSN, 2009, www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/radioprotection/IRSN_bilan_annuel_travailleurs_2008.pdf.
- [7] Dubois P., Historique de l'imagerie en médecine nucléaire, *IRBM*, 2009, 30(2), p. 40.
- [8] Delbeke D., Schöder H., Martin W.H., Wahl R.L., Hybrid imaging (SPECT/CT and PET/CT): improving therapeutic decisions, *Semin. Nucl. Med.*, 2009, 39(5), p. 308.
- [9] Mariani G., Bruselli L., Kuwert T., Kim E.E., Flotats A., Israel O., Dondi M., Watanabe N., A review on the clinical uses of SPECT/CT, *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*, 2010, 37(10), p. 1959.

- [10] Vuillez J.-P., Traitements à visée palliative ou curative : la radiothérapie vectorisée des tumeurs endocrines, *Médecine Nucléaire*, **2007**, 31(9), p. 506.
- [11] Vuillez J.-P., Radioimmunothérapie : quelques réflexions sur le rationnel et les mécanismes d'action, *Médecine Nucléaire*, **2009**, 33(8), p. 465.
- [12] Brenot-Rossi I., La pratique de la technique du ganglion sentinelle dans diverses indications : sein, col utérin, prostate, vulve et verge. Méthodologie pratique, *Médecine Nucléaire*, **2008**, 32(8), p. 418.
- [13] Antoch G., Bockisch A., Combined PET/MRI: a new dimension in whole-body oncology imaging?, *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*, **2009**, 36(Suppl. 1), p. 113.
- [14] Slomka P.J., Patton J.A., Berman D.S., Germano G., Advances in technical aspects of myocardial perfusion SPECT imaging, *J. Nucl. Cardiol.*, **2009**, 16(2), p. 255.
- [15] OECD/NEA High-level Group on Security of Supply of Medical Radioisotopes, *The Supply of Medical Radioisotopes Series* (www.oecd-nea.org/med-radio/med-radio-series.html).



L. Sibille



L. Collombier



E. Nalda



P.-O. Kotzki



V. Boudousq

Louis Sibille (*auteur correspondant*) et **Laurent Collombier** sont praticiens hospitaliers, **Enrique Nalda** est assistant hospitalo-universitaire, **Pierre-Olivier Kotzki** est professeur des universités et praticien hospitalier, et **Vincent Boudousq** est maître de conférence des universités et praticien hospitalier, au CHU de Nîmes*.

* CHU de Nîmes, Service de médecine nucléaire et de biophysique, Place du Pr. Robert Debré, F-30029 Nîmes Cedex 9.
Courriel : louis.sibille@chu-nimes.fr



CNRS Formation Entreprises

Le CNRS | Annuaire | Mots-Clefs CNRS | Autres sites

du 22 au 23 septembre 2011
à VANDŒUVRE lès Nancy (54)

Méthodologie de recherche d'information scientifique et technique sur Internet

Stage à la carte
Nous consulter
à GIF-SUR-YVETTE (91)

RMN des macromolécules biologiques

du 26 au 30 septembre 2011
à TOULOUSE (31)

Formation avancée en RMN pour la chimie et la biochimie

du 26 au 30 septembre 2011
à TOULOUSE (31)

Techniques chromatographiques HPLC

du 3 au 7 octobre 2011
à VILLEURBANNE (69)

Analyse quantitative de gaz par spectrométrie de masse

du 6 au 7 octobre 2011
à GIF SUR YVETTE (91)

Le risque chimique : connaissance et prévention niveau I

Stage à la carte
Nous consulter
à SOLAIZE (69)

**Initiation à la pratique d'analyses thermiques : analyse calorimétrique différentielle (DSC),
analyse thermogravimétrique (ATG)**

Centre de ressources en formation

Un problème de formation particulier ?

N'hésitez pas à nous consulter :

- par mail à ressources@cf.cnrs-gif.fr

- par téléphone au 01.69.82.44.96

Catalogue, programmes et inscriptions : CNRS Formation Entreprises Avenue de la Terrasse Bât. 31 91198 Gif-sur-Yvette Cedex
Tél. : 01 69 82 44 55 - Fax : 01 69 82 44 89 <http://cnrsformation.cnrs-gif.fr>

L'importance de la radioactivité en géosciences

Jean-Marc Montel

Résumé

La radioactivité est à la fois un acteur important du fonctionnement de la Terre et un outil de première importance pour les géologues. Source principale de la chaleur profonde de la planète, elle est donc responsable de sa dynamique interne, actuelle et passée. La radioactivité liée à l'uranium et au thorium est capable d'endommager la structure cristalline des minéraux qui les contiennent, jusqu'à les rendre amorphes. La cartographie de la radioactivité émise par l'uranium, le thorium et le potassium peut être utilisée comme un outil de prospection et un guide d'exploration géologique. La radioactivité est l'outil principal de datation des événements géologiques à toutes les échelles de temps et d'espace, et indirectement un outil de traçage des transferts dans les systèmes géologiques.

Mots-clés

Radioactivité, géosciences, géochronologie, JIREC 2010.

Abstract

The importance of radioactivity in geosciences

Radioactivity is both an important element of internal earth dynamics and a powerful tool for geologists. It is the main source of deep heat of the planet, and then responsible for its internal past and present dynamics. Radioactivity from uranium and thorium can damage crystal structure of minerals which contains those elements, up to an amorphous state. Mapping of uranium, thorium and potassium from their radioactivity is a tool for prospection and geological exploration. Radioactivity is the main method of dating geological events at all space and time scales. It is an indirect tool for tracing the transfers in geological systems.

Keywords

Radioactivity, geosciences, geochronology, JIREC 2010, teaching.

La radioactivité est un acteur majeur des systèmes géologiques par sa contribution au bilan thermique de la Terre et par ses effets sur les structures minérales. C'est également l'un des outils les plus utiles aux géologues, qui utilisent les propriétés des systèmes radioactifs pour déchiffrer le fonctionnement à toutes les échelles des géosystèmes, en particulier pour mesurer le temps. Une large part de cet article sera consacrée à cette application de la radioactivité, nommée *géochronologie*.

Dans la nature, les systèmes radioactifs sont nombreux et suivent essentiellement des radioactivités α ou β^- . Les systèmes radioactifs utiles pour les géologues sont en nombre plus restreint. Une première famille est constituée de noyaux présents au moment de la formation du système solaire et dont la période (demi-vie) est suffisamment longue pour qu'ils existent encore actuellement. Dans cette famille, quatre isotopes dominent : les actinides ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th et leurs descendants, ainsi que ^{40}K . Il faut rappeler que l'uranium et le thorium sont à l'origine de chaînes de désintégrations complexes qui se terminent sur des isotopes stables du plomb, et qui incluent des noyaux dont les propriétés chimiques et radioactives sont variées. D'autres systèmes, plus rares, revêtent une grande importance en géosciences, comme les couples ^{87}Rb - ^{87}Sr , ^{147}Sm - ^{143}Nd , ou ^{187}Re - ^{187}Os . La seconde famille est constituée des noyaux radioactifs dits « cosmogéniques », créés en permanence par les rayons cosmiques, comme le ^{14}C . La troisième famille est celle des noyaux créés par l'homme et dispersés de façon plus ou moins volontaire. Il s'agit des noyaux issus des explosions nucléaires atmosphériques, de ceux libérés par l'accident de Tchernobyl, et des déchets nucléaires civils et militaires relâchés de façon contrôlée. Dans cette famille, on peut

également ranger les produits des explosions nucléaires souterraines civiles et militaires qui, de fait, sont maintenant inclus dans la géosphère, les futurs déchets radioactifs des stockages géologiques profonds, et les produits des réacteurs nucléaires naturels d'Oklo. Enfin, les géologues (ce terme sera utilisé ici comme recouvrant l'ensemble des scientifiques des géosciences, sans entrer dans le détail des différentes disciplines : géochimie, géophysique, minéralogie, etc.) ont également appris à utiliser les radioactivités éteintes, c'est-à-dire celles dont tous les noyaux-pères ont disparu.

Une forme extrême de radioactivité est la fission nucléaire. ^{238}U est l'objet de fissions spontanées, très rares mais suffisamment énergétiques (200 MeV) pour laisser des traces dans les minéraux, traces qui peuvent être utilisées en géochronologie.

Dans cet article, les notions fondamentales de la radioactivité (lois de désintégration, période, nature des différentes radioactivités, notion de noyau-père et de noyaux-fils) sont considérées comme maîtrisées. En revanche, les concepts géologiques seront expliqués de la façon la plus simple possible, sans vocabulaire spécifique.

Avant la radioactivité

Curieusement, en géologie, l'histoire de la radioactivité commence avant sa découverte. La pechblende, le principal minerai d'uranium, est connu depuis au moins la fin du Moyen Âge par les mineurs de l'Erzgebirge, en particulier dans les mines d'argent de Joachimsthal, actuellement en Tchéquie. C'est ainsi que Marie Curie pourra disposer de stocks importants de minerais pour ses travaux et que ses premières mesures porteront sur des minéraux [1]. Après la découverte

de l'uranium en 1789, les verriers allemands apprennent à l'utiliser comme colorant, bien avant la découverte de sa radioactivité en 1896. Trois ans avant, Brögger décrit des minéraux qui ont les caractéristiques morphologiques et géologiques de cristaux, mais les propriétés optiques de matériaux amorphes. Il propose pour les désigner le terme de « métamictite », toujours en usage [2]. Enfin, l'ignorance de la chaleur produite par la radioactivité de la Terre (mais également l'hypothèse d'une Terre entièrement solide) conduit Lord Kelvin à des estimations de l'âge de la Terre incompatibles avec les observations faites par les géologues d'une terre ancienne fonctionnant par des processus lents, ou celles des biologistes et paléontologues interprétant l'évolution des formes de vie suivant les thèses de Charles Darwin. On peut donc considérer que la géologie était « préparée » à l'arrivée de la radioactivité comme nouvel agent géologique.

Les effets physiques de la radioactivité sur les matériaux géologiques

La chaleur de la Terre

La radioactivité peut être considérée comme le carburant de la Terre en tant que machine thermique [3]. On estime actuellement que plus de la moitié de la chaleur interne de la Terre (25 TW) provient de la radioactivité de l'uranium, du thorium et du potassium, le reste étant dû à la chaleur résiduelle de la Terre primitive (13,3 TW), la cristallisation de la graine (2 TW) et la contraction de la planète (2,7 TW). La contribution de la radioactivité est nettement plus élevée sur les continents, riches en uranium, thorium et potassium, et l'épaississement de la croûte continentale liée à la tectonique des plaques entraîne la formation de zones chaudes, à l'origine de certains métamorphismes [4].

La radioactivité, outil de prospection

C'est la course aux armes nucléaires, après la Seconde Guerre mondiale, qui a promu le développement des outils de prospection par la radioactivité. Jusque-là, les minerais d'uranium étaient seulement recherchés comme colorants et source de radium, avec une production modeste. La course aux armes atomiques et le développement de l'industrie électronucléaire transforment la recherche de l'uranium en une activité de première importance. Les gisements d'uranium situés à la surface de la Terre sont relativement faciles à trouver par leur radioactivité, qui peut être détectée au moyen d'outils portatifs légers ou par des détecteurs plus sophistiqués en prospection aérienne et satellitaire. Ce sont les rayonnements γ , émis par certains noyaux des chaînes de désintégration de l'uranium, qui sont détectés.

La radioactivité, outil de cartographie

Dans le milieu naturel, la radioactivité est essentiellement le fait de trois éléments : l'uranium (^{235}U et ^{238}U et leurs descendants), le thorium (^{232}Th et ses descendants) et ^{40}K (0,0117 % molaire du potassium). Les outils modernes de télédétection permettent, par des mesures de radioactivité γ , de produire des cartes de répartition pour chacun de ces éléments, qui ont des comportements géochimiques légèrement différents. La combinaison des trois cartes donne une image des structures géologiques, image qui participe à la reconstruction de la géologie d'une zone géographique (voir par exemple [5]).

L'impact de la radioactivité sur les minéraux et les roches

Les particules émises lors des désintégrations sont suffisamment énergétiques pour perturber le réseau cristallin des minéraux. Ces effets peuvent donner lieu à de simples modifications des propriétés optiques, comme la couleur du quartz fumé, ou la présence de « halos pléochroïques » visibles en microscopie optique sur les lames minces de roches utilisées par les géologues, parfaitement corrélés aux particules α émises [6-7]. Cependant, la radioactivité α est responsable d'effets plus destructeurs, allant jusqu'à la perte complète de l'ordre à longue distance et la transformation de la matière cristallisée en matière amorphe (métamictite). La particule α (noyau d'hélium) est émise à grande vitesse, emportant l'essentiel de l'énergie cinétique du système. Elle dissipe initialement son énergie par ionisation, et c'est seulement lorsqu'elle a été suffisamment ralentie qu'elle interagit avec les noyaux et les expulse de leur site cristallin. Dans les minéraux, les particules α parcourent des distances allant jusqu'à quelques dizaines de microns et déplacent quelques centaines d'atomes [2, 8]. Les noyaux de reculs (noyau-fils de la désintégration), plus lents, perdent essentiellement leur énergie par interactions avec les autres noyaux. Ils déplacent quelques milliers d'atomes sur des distances de quelques dizaines de nanomètres. Ce sont eux qui pour l'essentiel détruisent le réseau cristallin du minéral. À l'échelle atomique, l'impact des particules se mesure en dpa (déplacements par atome) estimés par des modèles physiques numériques. La plupart des minéraux deviennent métamictes pour des valeurs de 0,1 à 0,3 dpa [2]. Les silicates (zircon et allanite par exemple) et titanates (zirconolite, brannerite) sont particulièrement sensibles aux dégâts d'irradiation. Au contraire, les phosphates montrent une aptitude naturelle à guérir leurs défauts et sont moins affectés par l'irradiation à l'état naturel [9-11]. Les oxydes ont des comportements contrastés ; certains (uraninite UO_2) sont peu affectés, alors que d'autres tels que la badelleyite (ZrO_2) sont au contraire très sensibles [12].

Outre la perte de la cristallinité, la radioactivité liée aux actinides a d'autres effets sur les minéraux porteurs ; l'hélium et les descendants stables des chaînes radioactives (^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb) s'y accumulent. Aux échelles macro- et microscopiques, les minéraux métamictes (zircon) ou non métamictes (uraninite) gonflent de façon significative jusqu'à provoquer la fracturation des minéraux qui les contiennent (figure p. 24). Les minéraux-hôtes des minéraux uranifères et thorifères sont également endommagés par les particules que ces derniers émettent, produisant, outre les effets optiques déjà mentionnés, des couronnes de matériaux métamictes [8].

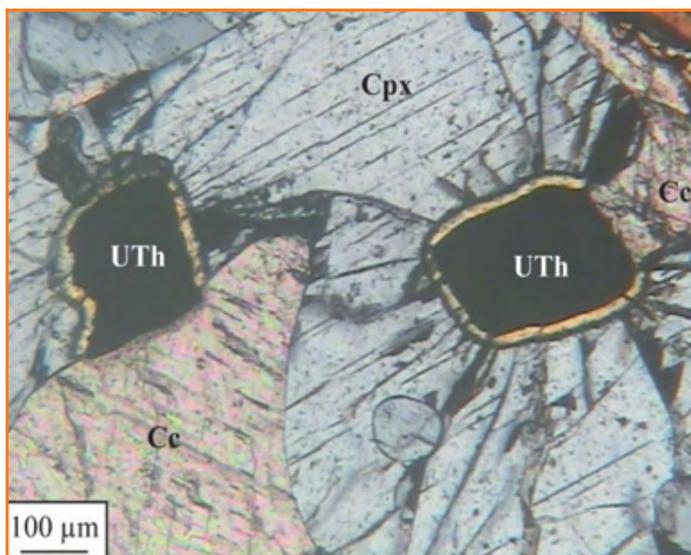
Les systèmes chronométriques

Les concepts de base

Dans un système géologique, la mesure actuelle du rapport d'abondance d'un noyau-père et d'un noyau-fils permet d'obtenir un temps en résolvant l'équation fondamentale de la radioactivité :

$$F_{\tau} = F_0 + P_{\tau} (e^{\lambda\tau} - 1)$$

où F_{τ} et P_{τ} sont respectivement les quantités de noyaux-fils et de noyaux-pères présents actuellement dans l'échantillon (ce qui est mesuré), F_0 la quantité de noyau-fils présent



Grains d'oxydes d'uranium et thorium (UTh) dans une roche, inclus dans des calcites (Cc) et des silicates de magnésium (Cpx). On remarque les fractures radiales et la zone détruite dans le silicate en bordure des oxydes d'uranium et thorium (d'après [8]).

initialement dans le système géologique, λ la constante de désintégration radioactive, et τ le temps écoulé depuis la dernière remise à zéro du système. Pour des raisons analytiques, les quantités de noyaux sont souvent rapportées à la quantité de noyau de l'un des isotopes stables de l'élément-fils. Plutôt que la constante de désintégration, on utilise pour caractériser la vitesse de désintégration la période (temps de demi-vie par analogie à la cinétique chimique), exprimée comme suit : $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$, homogène à un temps.

L'hypothèse de base de la géochronologie est que le système est resté totalement clos tout au long de l'histoire géologique, sans aucun gain ni perte de noyaux-fils ou de noyaux-père. La variation du rapport fils/père est alors uniquement due à la désintégration du père et à l'accumulation du fils. Dans la plupart des cas, le système géologique est défini à l'échelle d'un minéral, qui constitue un ensemble géométrique et physique bien caractérisé, ou d'une roche dans son ensemble. Un système chronométrique est ainsi constitué par le couple radioactif et par son porteur géologique. On parle de datation par la méthode potassium-argon (^{40}K - ^{40}Ar) sur biotite, uranium-plomb (^{235}U - ^{207}Pb et ^{238}U - ^{206}Pb) sur zircon, ou rubidium-strontium (^{87}Rb - ^{87}Sr) sur roche totale par exemple.

Outre d'éventuelles difficultés analytiques, qui sont maintenant largement maîtrisées, l'application pratique de la méthode se heurte à deux difficultés conceptuelles : (i) il faut connaître la quantité initiale d'élément-fils dans le système, et (ii) il faut définir la notion de remise à zéro du système, qui est étroitement liée à celle de la quantité initiale d'élément-fils. Le problème de l'estimation de la quantité initiale de noyaux-fils peut être résolu par plusieurs méthodes. Dans la situation la plus favorable, on peut considérer que l'élément-fils n'est pas présent initialement dans le système ; c'est le cas par exemple du couple chronométrique potassium-argon. L'élément-fils (^{40}Ar) est un gaz rare très peu abondant qui, sauf cas particulier, n'est pas incorporé dans les roches et les minéraux. Une deuxième possibilité est de travailler sur un système dans lequel l'élément-fils, sans être totalement absent, est initialement présent en très faible quantité par

rapport à la quantité produite par désintégration ; dans ce cas, la quantité de noyaux-fils peut être estimée par des modèles géochronologiques, sans que la qualité de l'âge obtenu ne soit affectée. Le système uranium-plomb sur zircon fonctionne ainsi car on sait que le plomb n'est pas compatible avec la structure cristallographique du zircon et n'y entre qu'en très faible proportion au moment de sa formation. Enfin, la troisième solution consiste à estimer la quantité d'élément-fils en analysant plusieurs échantillons de natures différentes. C'est cette méthode qui est utilisée pour les systèmes Sm-Nd ou Rb-Sr. Le lecteur intéressé est renvoyé aux ouvrages classiques de géochronologie pour des explications plus détaillées [13-14].

Le problème central de l'interprétation des données géochronologiques est celui du concept de remise à zéro d'un système. Le cas le plus simple est celui d'un système qui ne contient initialement pas d'élément-fils, comme le système potassium-argon sur micas. Le ^{40}K se désintègre soit en ^{40}Ca (88,5 %, radioactivité β^-), soit en ^{40}Ar (10,5 %, capture électronique) avec une période de 1 248 millions d'années. Le potassium est un constituant majeur des minéraux cardinaux des roches (micas, feldspaths, amphiboles par exemple). L'argon, qui est un gaz rare, ne peut être incorporé dans les structures cristallines, sauf cas très particulier. Examinons le cas d'un mica se formant dans une lave : à haute température, la diffusion atomique dans le cristal garantit une évacuation rapide de tout l'argon qui se forme par désintégration de ^{40}K . Au fur et à mesure du refroidissement de la lave, la diffusion est de plus en plus lente. En-deçà d'une certaine température, elle devient négligeable, et l'argon s'accumule dans le cristal au lieu de s'échapper : c'est la fermeture du système chronométrique. Dans le cas de la diffusion volumique pure, ce concept peut être formalisé de façon exacte [15]. Il dépend au premier ordre de la nature du couple père-fils, de la température et du minéral. Au second ordre, il dépend de la vitesse de refroidissement, de la taille du cristal et de sa forme. Par exemple, la température de fermeture du système K-Ar dans la biotite est de 300-350 °C. La mesure du rapport $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$ dans la biotite au sein de la lave permet donc en fait de mesurer le temps qui s'est écoulé depuis que la température est descendue en dessous de 300 à 350 °C. Si dans l'histoire géologique ultérieure cette lave subit un réchauffement significatif (métamorphisme), le processus de diffusion peut reprendre et expulser les atomes d'argon. Si le réchauffement est suffisamment long et intense, tout l'argon est expulsé, le chronomètre est remis à zéro, et la mémoire géochronologique du premier événement est perdue. L'accumulation d'argon ne recommence que lorsque la température est redescendue sous la température de fermeture.

À partir de cet exemple, on comprend que chaque système chronométrique qui, il faut insister, est constitué d'un couple radioactif et de son porteur géologique, peut apporter une information particulière. Les températures de fermeture estimées varient de quelques dizaines de °C à 800 °C, voire plus, ce qui permet de dater toutes sortes de phénomènes géologiques. Cependant, il faut également noter que la diffusion n'est pas le seul mécanisme de remise à zéro d'un chronomètre. Le plus radical est la destruction totale du minéral porteur, par fusion, dissolution ou réaction minéralogique.

Le système chronométrique le plus difficile à remettre à zéro est le système U-Pb dans le zircon. La combinaison de vitesses de diffusion très lentes du plomb dans le zircon

et d'une extrême résistance de ce minéral vis-à-vis de quasiment tous les agents géologiques a permis de mesurer des âges proches de celui de la Terre sur des fractions de cristaux en provenance d'Australie [16].

Pour garantir la fiabilité de son interprétation, la datation d'un événement requiert donc une analyse approfondie du problème géologique, une sélection d'échantillons pertinents et un choix judicieux du système chronométrique.

Les différentes échelles de temps et d'espace

Un géochronomètre n'est efficace que dans une gamme d'âge déterminée, qui dépend essentiellement de sa période. Les chronomètres géologiques classiques reposent sur les systèmes ^{235}U - ^{207}Pb , ^{238}U - ^{206}Pb , ^{87}Rb - ^{87}Sr et ^{40}K - ^{40}Ar . Le système ^{232}Th - ^{208}Pb est moins utilisé à cause des difficultés analytiques pour le thorium, très difficile à dissoudre et à maintenir en solution. Le système ^{147}Sm - ^{143}Nd est plutôt utilisé comme traceur isotopique (voir ci-après) ; d'autres (^{176}Lu - ^{176}Hf , ^{187}Re - ^{187}Os) sont disponibles pour des applications spécifiques. Le système U-Th/He est dérivé des systèmes U-Th-Pb et repose sur la mesure des particules α émises et accumulées dans un cristal. C'est un géochronomètre de très basse température de fermeture. Les systèmes à longue période ne sont pas efficaces pour les périodes récentes, et dans ce cas, on utilise des systèmes à plus courte période, reposant sur des isotopes cosmogéniques (^{36}Cl , ^{14}C , ^{10}Be par exemple), ou des isotopes issus des chaînes radioactives de U et Th (notamment ^{210}Pb , 22,6 ans ; ^{230}Th , 75 700 ans ; ^{226}Ra , 1 600 ans).

Les matériaux géologiques sont des solides, essentiellement cristallisés. Dans la plupart de ces matériaux, l'homogénéisation chimique est très lente, même à l'échelle des temps géologiques. Elle est quasiment impossible jusqu'à des températures de plusieurs centaines de degrés. La conséquence est que l'échelle pertinente d'investigation des compositions chimiques en géologie est soit celle de la roche totale (quelques centaines de grammes ou quelques kg d'échantillons), qui moyenne toutes les variations, soit l'échelle intra-cristalline, quelques μm^3 , au sein de cristaux de quelques centaines de microns ou quelques mm. La géochronologie n'échappe pas à ces contraintes. Longtemps limitée à des techniques reposant sur des analyses de roches totales, avec dilutions isotopiques, séparations chimiques, puis analyses de rapports isotopiques par spectrométrie de masse, la géochronologie utilise maintenant très largement des méthodes dites *in situ*, qui permettent de dater une zone de quelques μm^3 parfaitement localisée au sein d'un minéral. Ces méthodes utilisent des outils très sophistiqués comme les sondes ioniques à haute résolution ou des ICP-MS couplées à des lasers [17]. Ils permettent des analyses chronologiques des objets géologiques complexes, qui sont les plus intéressants, à une échelle pertinente. C'est par ce type de méthodes que les âges les plus anciens sur Terre ont été obtenus [16].

Les systèmes de traceurs isotopiques

Une conséquence de la désintégration à longue période de certains noyaux est la formation sur Terre de différents réservoirs géochimiques ayant des signatures isotopiques

différentes. Le cas le plus facile à comprendre est celui du système Rb-Sr. Lors de la plupart des phénomènes géologiques, le rubidium (donc le ^{87}Rb , qui est père du système) et le strontium (donc ^{87}Sr , son fils) ont un comportement géochimique légèrement différent. Lors de la fusion partielle d'une roche, qui fait coexister un liquide et un résidu solide tous deux silicatés, le rubidium est préférentiellement incorporé dans le liquide par rapport au strontium. De même, lors des équilibres entre roche et fluide aqueux, ce dernier est enrichi en Rb par rapport au Sr. Au cours de l'évolution de la Terre, certains réservoirs se sont ainsi enrichis en rubidium par rapport à d'autres (continent-manteau, croûte supérieure-croûte inférieure, etc.). Dans les réservoirs riches en rubidium, le ^{87}Sr s'est accumulé par désintégration de ^{87}Rb . Chaque réservoir a donc actuellement une abondance en ^{87}Sr différente, que l'on exprime par le rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. En première approximation, ce rapport n'est pas modifié par les phénomènes géologiques, et il ne change que par la désintégration radioactive de ^{87}Rb ou par mélange avec un strontium ayant une autre composition isotopique. Le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est donc un traceur extrêmement fiable des processus géologiques. Il permet par exemple de démontrer que certains granites se forment exclusivement par fusion partielle de la croûte continentale, que d'autres granites contiennent une part significative de matériaux d'origine plus profonde, ou que les basaltes des rides médio-océaniques sont produits par la fusion partielle du manteau supérieur. Les systèmes Sm-Nd, Lu-Hf et les isotopes du plomb sont utilisés de la même façon. Le lecteur intéressé est invité à se reporter à des ouvrages de géochimie pour des analyses plus détaillées [14, 18].

Les radioactivités éteintes

Il a été expliqué précédemment que les systèmes chronométriques à courte période sont bien adaptés aux datations des événements récents à échelle géologique, plus jeune qu'un million d'années, et que les systèmes à longue période sont utilisés pour les événements anciens. Pour dater des événements courts dans les temps anciens, on peut faire appel aux radioactivités éteintes. Au début du système solaire, il existait nettement plus de noyaux radioactifs que maintenant. Tous ceux qui n'ont pas une période très longue ont disparu depuis. Toutefois leurs descendants sont encore présents, et il est possible de retracer le comportement d'un système chronométrique disparu à partir des variations de rapports isotopiques des éléments-fils. Un très bon exemple de radioactivité éteinte est ^{26}Al qui se désintègre en ^{26}Mg avec une période radioactive de 740 000 ans. Le magnésium est constitué de trois isotopes ^{24}Mg (79 %), ^{25}Mg (10 %) et ^{26}Mg (11 %). Si au sein d'un échantillon ou d'une famille d'échantillons, on met en évidence une variation de ^{26}Mg (rapport $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$), corrélée à une variation du rapport Mg/Al (exprimé sous forme $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$), cela indique que l'évènement géologique à l'origine de l'échantillon ou de la famille d'échantillons a eu lieu à un moment où ^{26}Al était encore présent [19]. C'est par ces raisonnements que l'on est capable de reconstituer, avec une grande précision, l'histoire précoce du système solaire et de la Terre. Ces noyaux radioactifs à courte période ont joué un rôle très important dans la production de chaleur interne dans la Terre primitive et les autres objets solides du système solaire.

Conclusion

La radioactivité est un acteur majeur du système Terre parce qu'elle est la principale source de chaleur interne de la Terre et qu'elle est ainsi largement responsable de l'existence de la convection du manteau et de la tectonique des plaques. Elle est également en partie responsable de certains types de métamorphismes intracontinentaux. Elle affecte les roches et les minéraux jusqu'à leur faire perdre leur caractère cristallin. La radioactivité est également un outil précieux pour le géologue, pour l'exploration géologique et pour dater les événements. Enfin il ne faut pas oublier que, au moins une fois dans l'histoire de la Terre, à Oklo, au Gabon, la fission massive de ^{235}U s'est déroulée dans des réacteurs nucléaires naturels [20].

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement les organisateurs des JIREC 2010 pour leur invitation et en particulier Nicolas Dacheux. Merci également aux relecteurs pour leurs commentaires pertinents.

Références

- [1] Skłodowska Curie M., Rayons émis par les composés de l'uranium et du thorium, *C. R. Acad. Sci.*, **1898**, 126, p. 1101.
- [2] Ewing R.C., The metamict state: 1993-the centennial, *Nucl. Instr. Methods Phys. Res. B*, **1994**, 91(1-4), p. 22.
- [3] Korenaga J., Urey ratio and the structure and evolution of Earth's mantle, *Rev. Geophys.*, **2008**, 46, RG2007.
- [4] England P.C., Thompson A.B., Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism: I. Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust, *J. Petrol.*, **1984**, 25(4), p. 894.
- [5] <http://energy.cr.usgs.gov/radon/DDS-9.html>, www.ga.gov.au/image_cache/GA13928.pdf.
- [6] Nasdala L., Wenzel M., Andrut M., Wirth R., Blaum P., The nature of radiohaloes in biotite: experimental studies and modeling, *Amer. Mineral.*, **2001**, 86, p. 498.
- [7] Nasdala L., Wildner M., Wirth R., Groshopf N., Pal D.C., Möller A., Alpha particle haloes in chlorite and cordierite, *Mineral. Petrol.*, **2006**, 86(1-2), p. 1.
- [8] Seydoux-Guillaume A.-M., Montel J.-M., Wirth R., Moine B., Radiation damages in diopside and calcite crystals from uranothorianite inclusions, *Chem. Geol.*, **2009**, 261(3-4), p. 318.
- [9] Meldrum A., Boatner L.A., Weber W.J., Ewing R.C., Radiation damage in zircon and monazite, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **1998**, 62(14), p. 2509.
- [10] Meldrum A., Boatner L.A., Ewing R.C., A comparison of radiation effects in crystalline ABO_4 -type phosphates and silicates, *Mineral. Mag.*, **2000**, 64(2), p. 185.
- [11] Seydoux-Guillaume A.-M., Wirth R., Deutsch A., Schärer U., Microstructure of 24-1928 Ma concordant monazites: implications for geochronology and nuclear waste deposits, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **2004**, 68(11), p. 2517.
- [12] Trachenko K.O., Understanding resistance to amorphization by radiation damage, *J. Phys.: Condens Matter*, **2004**, 16(49), p. R1491.
- [13] Roth E., Poty B., *Méthodes de datation par les phénomènes nucléaires naturels, Applications*, Masson, **1985**.
- [14] Faure G., Mensing T., *Isotopes: Principles and Applications, 3rd Ed.*, Wiley & Sons, 2004.
- [15] Dodson M.H., Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **1973**, 40(3), p. 259.
- [16] Wilde S.A., Valley J.W., Peck W.H., Graham C.M., Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago, *Nature*, **2001**, 409(6817), p. 175.
- [17] Zircon, J.M. Hanchar, P.W.O. Hoskin (eds), *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **2003**, 53.
- [18] Albarède F., *La Géochimie*, Gordon & Breach, **2001**.
- [19] Villeneuve J., Chaussidon M., Libourel G., Homogeneous distribution of ^{26}Al in the solar system from the Mg isotopic composition of chondrules, *Science*, **2009**, 325(5943), p. 985.
- [20] Gauthier-Lafaye F., 2 billion year old natural analogs for nuclear waste disposal: the natural nuclear fission reactors in Gabon (Africa), *C. R. Physique*, **2002**, 3(7-8), p. 839.



Jean-Marc Montel

est directeur de l'École Nationale Supérieure de Géologie-INPL*.

* École Nationale Supérieure de Géologie-INPL, Rue du Doyen M. Roubault, F-54501 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex.
www.ensg.inpl-nancy.fr
 Courriel : jean-marc.montel@ensg.inpl-nancy.fr

e dif
 les éditions d'île de france

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

Conception d'une application de simulation de sources radioactives

Véronique Riffault, Nadine Locoge, Étienne Leblanc et Mathieu Vermeulen

Résumé Cet article présente une application de simulation de sources radioactives émettrices de rayonnement gamma développée pour les élèves de première année de l'École des Mines de Douai. Elle permet de générer des résultats bruts de comptage au format XML qui pourront être exploités statistiquement par l'élève en lien avec les concepts fondamentaux de la radioactivité (loi de décroissance, isotropie du rayonnement, atténuation par les matériaux). L'application est distribuée sous licence libre de diffusion, avec une feuille tableur permettant de guider l'analyse des résultats et le fascicule de TP correspondant.

Mots-clés Radioactivité, compteur Geiger-Müller, travaux pratiques, simulateur, JIREC 2010.

Abstract Development of an application simulating radioactive sources

This paper presents an application simulating radioactive gamma sources developed in the "École des Mines" of Douai (France). It generates raw counting data as an XML file which can then be statistically exploited to illustrate the various concepts of radioactivity (exponential decay law, isotropy of the radiation, attenuation of radiation in matter). The application, with a spreadsheet for data analysis and lab procedures, has been released under free license.

Keywords Radioactivity, Geiger-Müller counter, lab work, simulator, JIREC 2010.

Contexte et objectifs du projet

Les travaux pratiques concernant la radioactivité, initialement effectués en présentiel⁽¹⁾, imposent de nombreuses contraintes en termes de sécurité et d'autorisation. Néanmoins, les acquis de ce type de manipulation sont importants car ils permettent d'appréhender des notions théoriques dispensées en cours magistral et en travaux dirigés.

Des logiciels – généralement payants mais abordables – existent déjà dans ce domaine ; ils présentent cependant souvent l'inconvénient de fournir des résultats déjà exploités totalement ou partiellement, dans le but de faciliter le travail d'analyse des données pour les élèves. Cette démarche leur enlève par là même la possibilité de chercher par eux-mêmes et de s'approprier l'exploitation de résultats expérimentaux alors que l'implication de l'étudiant dans son propre apprentissage favorise l'acquisition des savoirs et des savoir-faire [1].

Les élèves de première année de l'École des Mines de Douai suivent actuellement 12 h de cours magistraux et participent à deux séances de 2 h de travaux dirigés sur le thème de la radioactivité, qui visent à leur faire appréhender les principaux concepts et à leur donner des notions en génie atomique et en radioprotection. Ils réalisent six séances de travaux pratiques de 4 h qui cherchent à mobiliser trois types de compétences définies par le référentiel de compétences de l'école : la maîtrise des savoirs fondamentaux ; le développement de capacités de réflexion, d'analyse et de synthèse ; l'analyse et l'interprétation de données expérimentales.

Dans ce contexte, une application permettant de simuler des montages expérimentaux de sources radioactives émettant des rayonnements gamma a été développée : elle permet de mesurer les évolutions temporelle et spatiale de la radioactivité et de déterminer l'influence des caractéristiques de différents matériaux dans l'atténuation du rayonnement, en générant des fichiers de données de comptage de noyaux radioactifs.

Description de l'application

L'application déployée en local utilise le moteur d'exécution Adobe® AIR™. Un accès protégé par mot de passe permet aux enseignants d'ajouter des éléments radioactifs avec leurs caractéristiques – masse atomique, période [2], type(s) et longueur(s) d'onde des radiations émises [3] –, et des matériaux atténuateurs avec leurs caractéristiques [4] – masse volumique et coefficients massiques d'atténuation en fonction de l'énergie du photon gamma.

À l'heure actuelle, la base de données est constituée par cinq éléments dont la période varie de entre 6 h à 53 ans et par quatre matériaux (Cu, Pb, Al et air sec). Elle est facilement configurable par la modification du fichier XML correspondant. Les calculs s'appuient sur les relations fondamentales de la radioactivité rappelées dans l'*encadré* ; ils intègrent également les incertitudes sur les périodes [2], sur le nombre d'Avogadro [5], sur le temps réel de mesure et la distance source-captteur.

L'écran est divisé en plusieurs parties : dans une colonne à droite, deux champs permettent à l'étudiant de choisir la

Concepts fondamentaux de la radioactivité

Loi de décroissance temporelle

Dans le cas d'un élément radioactif, le nombre de noyaux radioactifs au temps t , $N(t)$, suit une loi cinétique du premier ordre et peut s'écrire :

$$N(t) = N(0) \exp(-\lambda t)$$

avec λ , constante radioactive caractéristique de l'élément ; $\lambda = \ln 2 / T$, où T est la période (ou temps de demi-vie) de l'élément.

Isotropie du rayonnement

Pour un grand nombre de radiations émises, on peut considérer que le rayonnement est isotrope (identique dans toutes les directions de l'espace). L'intensité mesurée du rayonnement, proportionnelle au nombre de coups détectés par le capteur, N , varie dans ce cas linéairement en fonction de $1/d^2$, où d est la distance entre la source et le capteur.

Atténuation du rayonnement

Lors de la traversée d'un matériau par des photons (rayonnement gamma), seule une partie d'entre eux traversent sans interagir – les autres sont absorbés ou diffusés –, et on peut estimer le nombre de photons « restants », N_f , par rapport au nombre incident, N_i , par la relation :

$$N_f = N_i \exp(-\mu x)$$

où x est l'épaisseur de matériau traversée et μ le coefficient d'atténuation linéique, caractéristique du matériau pour une énergie de photon donnée ; $\mu = \ln 2 / x_{1/2}$ (avec $x_{1/2}$ la couche de demi-atténuation).

source radioactive (nom de l'élément et masse) et un cadre rappelle la configuration du capteur. Cette colonne reste inchangée tout au long du TP.

La fenêtre principale évolue sous forme d'onglets suite à la validation de chacune des étapes du TP par l'élève, qui peut revenir en arrière sur un onglet déjà traité. Elle permet de visualiser les différents montages expérimentaux, de choisir les paramètres, de lancer l'acquisition des mesures et de créer le fichier XML d'exportation des données pour traitement ultérieur sous Excel®. Les différents onglets portent des titres relativement peu évocateurs de manière à ne pas orienter *a priori* l'exploitation des données par l'étudiant (par exemple « Influence des matériaux » et non « Loi d'atténuation »). L'enseignant peut personnaliser un

cadre de texte (au format HTML) pour chaque onglet (voir figure).

Séquence et objectifs pédagogiques

La séquence pédagogique d'une durée totale de 4 h est structurée en quatre chapitres correspondant à quatre onglets dans l'application. Elle vise pour l'étudiant à (i) optimiser les paramètres de mesure, (ii) traiter statistiquement les données obtenues, (iii) établir les lois de décroissance temporelle et spatiale, et celle de l'atténuation du rayonnement par les matériaux.

Après un premier onglet introductif qui présente le principe de fonctionnement du compteur Geiger-Müller, le deuxième onglet permet à l'élève de simuler une acquisition de données en fixant un certain nombre de paramètres : durée de comptage, distance source-capteur et nombre de mesures. Il peut ainsi vérifier que les paramètres de mesure qu'il a choisis conduisent bien à une distribution gaussienne (*via* le tracé d'un histogramme de fréquence en fonction du nombre de coups par seconde qui lui est suggéré dans la feuille tableur et le fascicule) et apprécier la qualité des données obtenues au travers de l'évolution du coefficient de variation des séries de mesures en fonction de la durée de comptage (ce qui nécessite le calcul des moyennes et écarts-types des différentes séries de mesure).

Dans l'onglet 3 (intitulé « Évolution temporelle »), un calendrier simplifié permet de simuler des comptages réalisés jusqu'à plusieurs années par rapport à un temps initial correspondant à la date du TP ; l'élève peut ainsi tracer la courbe de décroissance d'un échantillon radioactif et en déduire sa période.

L'onglet 4 (« Évolution spatiale ») permet d'une part de mettre en évidence l'isotropie du rayonnement, et d'autre part d'établir la relation entre le nombre de particules émises et la distance source-détecteur, *via* le déplacement du compteur dans l'espace, tout en gardant ou non la distance source-capteur constante.

Enfin, l'interprétation de la courbe d'évolution des mesures en présence d'un matériau atténuateur (onglet 5 : « Influence des matériaux ») permet de déterminer la couche de demi-atténuation du matériau en intercalant entre la source et le détecteur un ou plusieurs matériaux avec sept épaisseurs prédéfinies entre 0,1 et 10 mm.

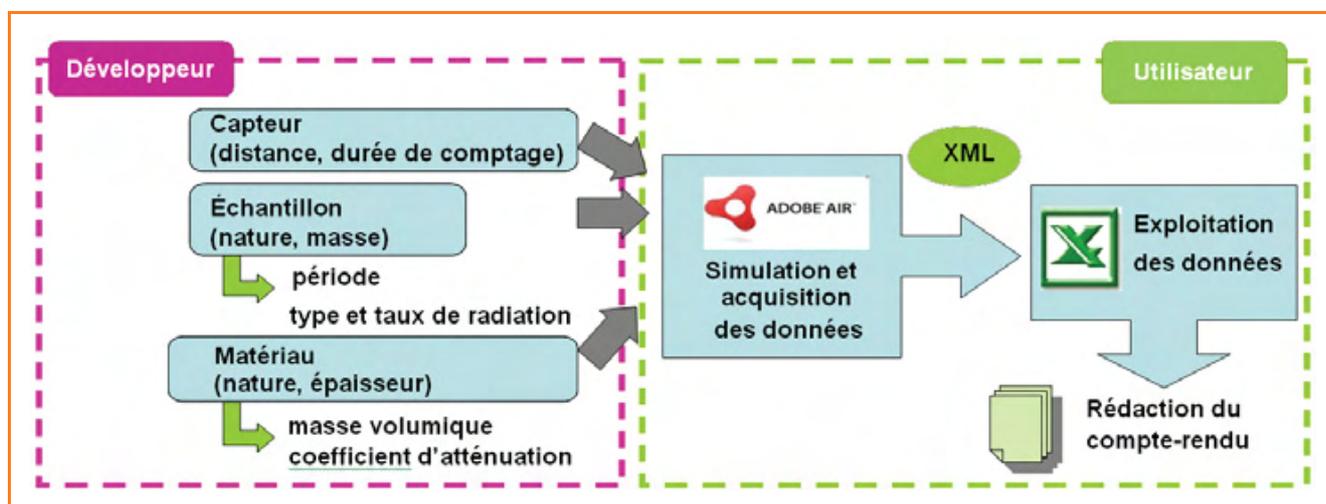


Schéma de principe d'utilisation de l'application.

L'ensemble des données sont exploitées dans un fichier Excel® comprenant différentes feuilles associées chacune à un onglet de l'application, ce qui permet d'homogénéiser la présentation des résultats et ainsi de faciliter le travail de correction et d'évaluation des encadrants.

Conclusion et perspectives

Une application de simulation de sources radioactives émettant des rayonnements gamma a été développée et permet d'appréhender les concepts fondamentaux *via* des données de comptage facilement exportables vers un tableur. L'exploitation des données reste donc très libre et ouverte pour l'étudiant.

L'application est distribuée sous licence libre de diffusion (Creative Commons BY-NC-SA) sur l'espace Campus de l'École⁽²⁾. Cet espace propose également le téléchargement du fascicule de TP et de la feuille tableur utilisée pour le traitement des données, ainsi qu'un forum d'échanges pour les utilisateurs.

Cette application est intégrée depuis deux ans à un module de travaux pratiques de chimie sous forme d'une séance monoposte réalisée par binôme. Une évolution envisagée à court terme consistera à proposer ce TP plutôt sous la forme d'un TD applicatif, chaque élève ayant l'application installée sur son ordinateur portable.

Par ailleurs, la simulation permet actuellement de proposer un vaste ensemble de sources radioactives émettrices de rayonnements gamma. Les évolutions de l'application portent notamment sur la prise en compte des particules bêta dans le comptage.

Remerciements

Le développement de l'application a été financé par la GEV (Grande École Virtuelle) du Groupement des Écoles des Mines.

Notes et références

- (1) *Présentiel* : moment où les personnes qui suivent une formation sont réunies dans un même lieu avec un formateur.

- (2) <http://campus-douai.gemtech.fr/course/view.php?id=778>
 [1] Dumon A., Quelle(s) méthode(s) pour l'enseignement expérimental de la chimie ?, *Revue Française de Pédagogie*, **1988**, 84, p. 29.
 [2] Bé M.M., Chisté V., Dulieu C., *Périodes radioactives – Table de valeurs recommandées*, CEA, Note technique DIMRI/LNHB/01-2003, **2003**, www.nucleide.org/DDEP_WG/Periodes_2003.pdf (consulté le 15/02/11).
 [3] Firestone R.B., Ekström L.P., *WWW Table of Radioactive Isotopes* (database), **1999**, <http://ie.lbl.gov/toi/radSearch.asp> (consulté le 15/02/11).
 [4] Hubbell J.H., Seltzer S.M., *Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV for elements Z = 1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest, v1.4*, **2004**, www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm (consulté le 15/02/11).
 [5] Mohr P.J., Taylor B.N., Newell D.B., *The 2006 CODATA internationally recommended values of the fundamental physical constants, v5.2*, NIST Physical Measurement Laboratory, **2007**, <http://physics.nist.gov/constants> (consulté le 15/02/11).



V. Riffault



N. Locoge



E. Leblanc

Véronique Riffault (auteur correspondant) est maître-assistante et **Nadine Locoge** est professeur au Département Chimie & Environnement de l'École des Mines de Douai*.

Étienne Leblanc est technicien informatique et **Mathieu Vermeulen** est ingénieur pédagogue multimédia à la Cellule Im@gine de l'École des Mines de Douai*.



M. Vermeulen

* École des Mines de Douai, 941 rue Charles Bourseul, F-59500 Douai.

Courriels : veronique.riffault@mines-douai.fr,
nadine.locoge@mines-douai.fr,
etienne.leblanc@mines-douai.fr,
mathieu.vermeulen@mines-douai.fr

Ressources nationales de chimie

www.educnet.education.fr/rnchimie



Illustration : Xavier Bataille

RNChimie (Ressources nationales de chimie) est un site destiné aux enseignants des lycées généraux et technologiques, des BTS et des CPGE. Vous y trouverez plus de 600 protocoles de travaux pratiques, des recommandations pédagogiques, des cours, des exercices, des présentations sous forme de diaporamas télé-chargeables, des fiches techniques de TP, des informations relatives à la sécurité mais aussi de l'histoire des sciences, des informations et des données sur les techniques spectroscopiques et chromatographiques dont des données expérimentales directement utilisables. Vous y trouverez également des cours, TD et applications sur les plans d'expérience (mathématiques), des cours et exercices de génie chimique, des exemples de TP basés sur la démarche d'investigation.

**RNChimie, c'est 600 pages web,
700 fichiers doc/zip, 930 documents pdf
et des dizaines de diaporamas à votre disposition !**

© Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche - Direction de la Technologie - SDTICE

Quel langage adopter pour enseigner la chimie ?

Françoise Rouquérol et Michel Vigneron

- Résumé** Nous connaissons tous des enseignants, de forte personnalité, qui ont forgé en partie leur propre vocabulaire. Il en est résulté différentes « écoles » et différents langages qui compliquent l'assimilation d'une discipline par un « apprenant ». L'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) a fait un travail considérable dans les différentes commissions spécialisées qui rassemblent des chimistes et des physiciens de tous pays. La troisième édition des recommandations concernant les grandeurs, les unités et les symboles utilisés en chimie physique a été publiée. C'est un véritable manuel pédagogique proposant un langage commun à tous les chimistes et les physiciens ; il n'est plus nécessaire d'innover dans ce domaine et il suffit simplement de suivre ces règles pour se faire comprendre de tous. Cela ne signifie pas qu'il faille abandonner ses propres conceptions mais invite à entrer dans une large concertation permettant d'assurer une homogénéité dans l'enseignement de notions plus ou moins complexes donné à différents niveaux. Des exemples de cette homogénéité retrouvée, pris dans l'enseignement aussi bien secondaire qu'universitaire, sont montrés dans cet article, tout particulièrement en thermodynamique chimique, un domaine qui a pu décourager ceux qui n'ont jamais eu la certitude d'avoir compris ce qu'ils avaient appris...
- Mots-clés** **Vocabulaire de chimie, didactique, Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC), chimie physique, JIREC 2010.**
- Abstract** **What language for chemistry?**
We all know teachers with a strong personality who coined their own vocabulary. This led to various "schools", even in a given country, which often made it difficult for a student to assimilate a field of knowledge. The International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) carried out an extensive work in the scope of specialized Commissions where chemists and physicists from all over the world could work together. The resulting 3rd edition of the IUPAC manual *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry* is a really pedagogical manual, proposing a common language to chemists and physicists from any country. Innovation is not any more requested in this field; applying the proposed rules is enough to be understood by anybody. This does not mean that we should abandon our own views; rather, we are invited to share them, with the objective of ensuring, at various levels, the consistent teaching of more or less complex notions. This paper provides a number of examples of such a "recovered consistency", in the scope of French Colleges and Universities, especially in the field of chemical thermodynamics, a field which probably discouraged many because, due to the past inconsistencies, they were never sure they had really understood what they had learnt...
- Keywords** **Chemical vocabulary, didactics, International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), physical chemistry, JIREC 2010, teaching.**

Nous constatons trop souvent, hélas, que la chimie est mal aimée, sans doute parce que le public est très marqué par la pollution et les dangers qu'il continue à associer à l'industrie chimique, sans être toujours au courant des améliorations permanentes dans ce domaine. Peut-on maintenant ajouter que la chimie n'est pas facile à enseigner ?

Pourtant, l'enseignement de la chimie (au collège et au lycée) a considérablement évolué. Au début des années 80, on est passé d'une chimie surtout descriptive, avec de nombreuses monographies, à une chimie plus conceptuelle, mais aussi plus en prise avec la vie quotidienne. La création des « Olympiades de la chimie » a suscité l'enthousiasme des élèves en leur proposant de montrer les progrès apportés par la chimie dans des domaines tels que l'alimentation, l'habitat ou la santé, et cela a aussi motivé les enseignants. L'expérimentation, fondée sur des produits de la vie courante, a été très appréciée par les élèves car ils pouvaient comprendre l'utilité de la chimie dans des

domaines qu'ils connaissaient. Simultanément, un effort de formation continue des enseignants du secondaire a permis, dans les années 90, de développer une nouvelle façon d'enseigner.

Par contre, l'image de la chimie, en tant qu'activité industrielle, s'est plutôt détériorée dans les dernières décennies alors que l'opinion se montrait de plus en plus sensible aux thèmes de la protection de l'environnement et du développement durable. On peut se réjouir de constater que les chimistes se tournent vers ces derniers sujets : en 2006, les Journées de l'innovation et de la recherche pour l'enseignement de la chimie (JIREC), organisées par la division Enseignement-Formation de la Société Chimique de France, avaient pris pour thème « chimie et développement durable », puis en 2007, « valorisation et cycle de vie de la matière minérale » ; en 2011, le thème en sera « la chimie et le vivant ».

Notons encore que le développement de la didactique a souligné l'importance du langage pour appréhender une

discipline scientifique. Il s'ensuit que des efforts remarquables de pédagogie ont été faits dans l'enseignement secondaire pour lequel des réformes, concernant entre autres l'utilisation d'un vocabulaire précis, ont été proposées. Cette clarification du langage a permis de donner à la discipline chimie, dans le secondaire, l'image d'une science à la fois rigoureuse dans le maniement des concepts et attrayante car jamais déconnectée de ses applications. Finalement, on cherche à « contextualiser » des notions rigoureusement définies. On peut regretter que ces efforts n'aient pas toujours été connus et poursuivis dans l'enseignement supérieur.

Dans le premier cycle universitaire, il est fréquent qu'un enseignant reprenne la base d'un certain nombre de notions déjà vues au lycée, mais avec un langage différent. On peut trouver, pour une discipline donnée, plusieurs livres donnant des informations contradictoires. Il n'est pas utile d'explicitier les raisons de cet état de fait. On peut simplement dire qu'il n'existe pas suffisamment de concertation entre les enseignants, ce qui conduit à la création de différentes « écoles » qui utilisent chacune leur propre langage.

L'apprentissage de la chimie dans l'enseignement secondaire

Quantité de matière et nombre de moles

Les problèmes de communication en chimie ont toujours existé. Pendant longtemps, la transformation de la matière était effectuée par des alchimistes qui gardaient jalousement leurs secrets de fabrication. Il a fallu presque un siècle pour que la chimie soit considérée comme une science à part entière, au même titre que la physique et les mathématiques, et pour que les chimistes obtiennent que la « quantité de matière » ait le statut d'une grandeur fondamentale, au même titre que la longueur ou le temps, dotée d'une unité propre : la mole (symbole : mol). Il convient donc de ne plus confondre la grandeur physique (la quantité de matière) et sa mesure (le nombre de moles). Cependant, par habitude, bien des enseignants parlent encore par exemple de la réduction du nombre de moles de réactif au lieu de parler de la réduction de la quantité de réactif disponible. Pourtant, ces mêmes enseignants parlent à juste titre de longueur ou de temps et non pas de nombre de mètres ou nombre de secondes.

Transformation et réaction

Un autre aspect délicat de la chimie est celui de la modélisation d'une transformation chimique par une réaction chimique dont l'équation traduit élégamment un contenu qui est loin d'être évident pour les élèves.

Dans une transformation chimique, des réactifs disparaissent et des produits apparaissent. Cette transformation est modélisée : on explique la transformation étudiée par « un réarrangement d'atomes au sein de nouvelles molécules » qu'on traduit en écrivant « une équation de réaction », qui précise le sens de la transformation et traduit la conservation de la matière.

Cette modélisation fondamentale n'a rien d'évident et pose des problèmes à plusieurs niveaux. Ainsi le charbon est-il assimilé à du carbone qu'on va symboliser par la lettre C ; l'air qui contient du diazote et du dioxygène n'intervient que par le dioxygène, écrit O₂. A-t-on pris le temps d'expliquer ce que signifiait O₂ ? Le chiffre qui accompagne le symbole O se met-il à droite ou à gauche ?...

On ne dit rien des phénomènes thermiques et lumineux éventuellement observés en limitant le modèle de l'équation de réaction au seul aspect (fondamental à ce niveau) de la conservation de la matière. C'est loin d'être évident pour les élèves, et la distinction essentielle entre transformation et réaction est faite, en principe, pour lever certains malentendus qui génèrent de l'incompréhension. Néanmoins, le mot « réaction » continue à être utilisé à la place du mot « transformation », ce qui induit des formulations dont l'ambiguïté n'apparaît plus aux experts (enseignants, chercheurs...) mais constitue un obstacle lourd pour les élèves qui, par définition, ne sont pas – encore – des experts.

Équilibrer et ajuster

Au lycée général et technologique, on évoque « l'ajustement des nombres stœchiométriques ». On peut s'attarder sur cette expression, qui devient souvent en langage expert « équilibrer une équation de réaction », quand ce n'est pas « équilibrer une réaction » par abus de langage. Le choix de langage fait par les rédacteurs des programmes de lycée évite l'utilisation du verbe « équilibrer » parce qu'on évoquera plus tard (en Terminale) la notion d'équilibre et parce que le verbe « équilibrer » induit des confusions.

D'une façon générale, ne faut-il pas insister sur ce qui est la base de l'enseignement, c'est-à-dire la communication ? Il paraît fondamental que l'enseignant s'exprime avec des mots qui seront compris par les élèves dans le sens utilisé. Il est alors important que tous les chimistes se mettent d'accord sur les termes à utiliser et le sens qu'il faut leur donner.

Recommandations de l'IUPAC

L'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) a publié, en anglais, la troisième édition de ses recommandations concernant les grandeurs, les unités et les symboles utilisés en chimie physique [1]. Les différentes commissions spécialisées, qui rassemblent des chimistes de tous pays, ont fait un travail remarquable de réflexion et de concertation. Cette concertation a nécessité un effort d'harmonisation aussi bien à travers les disciplines qu'entre les habitudes ou conventions propres aux différents pays. Il en est résulté un véritable manuel pédagogique proposant un langage commun à tous les chimistes et physiciens de tous les pays. Cette édition a déjà été traduite en japonais et la traduction française est en cours [2].

Nous voudrions par quelques exemples montrer comment ces recommandations de l'IUPAC sont une aide précieuse à la clarification de l'enseignement de la chimie.

Expression d'une grandeur physique

Il est rappelé qu'une grandeur physique, notée à l'aide de la lettre *Q* écrite en italique, doit toujours s'exprimer sous la forme du produit d'une valeur numérique, notée {*Q*}, par une unité, notée |*Q*|, soit $Q = \{Q\} |Q|$. Puisque, dans un graphique, l'ordonnée et l'abscisse sont proportionnelles à des nombres purs, c'est donc la valeur numérique {*Q*} qui doit être indiquée. Cependant, cette valeur n'a de sens que si l'unité par laquelle elle doit être multipliée est donnée. Cela est fait simplement et clairement en précisant sur chaque axe du graphique que la valeur numérique utilisée est égale au quotient de la grandeur physique par l'unité choisie.

On écrira donc systématiquement sur chaque axe $Q / |Q|$, c'est-à-dire $\{Q\}$. Cette écriture est un facteur de clarté. Ainsi l'expression $m = 3,65 \text{ g}$ peut-elle être écrite $\{m\} = m/g = 3,65$. Il est regrettable que cette proposition simple et d'application universelle ne soit pas encore suivie par beaucoup de chercheurs et d'éditeurs de revue. Ne trouve-t-on pas souvent $m(g) = 3,65$ sur les axes des graphiques ou dans les tableaux de chiffres par exemple ?

Quantité de matière = grandeur de base

La quantité de matière est d'une importance particulière pour les chimistes car elle est proportionnelle au nombre d'entités élémentaires de l'espèce chimique considérée. La chimie étant une science expérimentale, il a fallu disposer d'une unité (la mole) utilisable à l'échelle macroscopique des expériences. Il en est résulté un facteur de proportionnalité extrêmement petit, le même pour toutes les espèces, qui a pour inverse la constante d'Avogadro, autrefois appelée « nombre d'Avogadro ». En effet, il ne s'agit pas d'un nombre pur mais d'une grandeur qui est homogène, à l'inverse d'une quantité de matière, et qui s'exprime donc en mol^{-1} . La valeur de cette constante résulte d'une mesure se référant, par convention, à 12 g de carbone 12 et n'est connue qu'aux erreurs de mesure près.

Symboles proposés par l'IUPAC

L'IUPAC propose une liste de symboles pour toutes les grandeurs physiques en précisant les symboles les plus utilisés ; toutefois on en conserve plusieurs pour permettre, dans chaque sous-discipline, l'emploi d'un jeu de symboles dénués d'ambiguïté. Ainsi l'énergie libre, souvent représentée par le symbole A en thermodynamique, peut-elle être désignée par le symbole F en chimie des colloïdes et des surfaces où le symbole A est plutôt réservé à l'aire superficielle.

Pour chaque grandeur physique, l'équation de définition est précisée ainsi que l'unité dans laquelle la grandeur s'exprime. C'est un précieux outil pour aider l'élève à préciser dans chaque cas l'équation aux dimensions de la grandeur qu'il calcule.

Si on veut faciliter la compréhension entre scientifiques de tous les pays, il est bien sûr très souhaitable de se plier à ces prescriptions et d'abandonner des habitudes séculaires... Lorsque cela semble impossible, il faut alors se donner la peine d'indiquer, à chaque fois, la signification des symboles qui s'éloignent du consensus international.

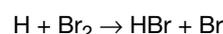
Le système international d'unités (SI)

Le SI est le système d'unités légal en France où il doit donc être, maintenant, le seul système utilisé. Parmi les unités recommandées, citons le nanomètre, dont le symbole est nm, qui est amené à remplacer progressivement l'ångström, aujourd'hui déconseillé. Ajoutons encore que le symbole recommandé pour désigner la minute est « min », non « mn » (et encore moins la minute d'angle ') que l'on retrouve trop souvent sur des affiches publicitaires ou même dans des lieux officiels publics comme les gares de la SNCF ! Peut-on ajouter que le symbole d'une unité ne prend pas de « s » au pluriel : 12 km, et non 12 kms comme on lit sur des affiches... ? On écrira 10 mol, 2 A, 5 V, mais pas contre 10 moles, 2 ampères ou 5 volts car dans ce cas, c'est le nom complet de l'unité qui est utilisé, sans majuscule.

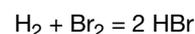
Approche macroscopique et approche microscopique

Une difficulté rencontrée dans l'enseignement de la chimie se trouve dans le fait qu'il est fréquent de ne pas faire une claire distinction entre l'approche macroscopique, résultant de l'observation de la réalité expérimentale, qui met en jeu un très grand nombre d'entités élémentaires, et l'approche microscopique, qui ne tient compte que d'un nombre très limité d'entités élémentaires et permet une explication théorique en imaginant ce qui peut se passer au niveau des atomes et des molécules. C'est pourquoi l'IUPAC propose de faire une claire distinction entre les deux approches.

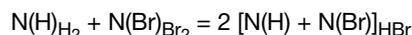
• **Au niveau microscopique**, un acte élémentaire impliquant un nombre d'entités inférieur ou égal à 3 s'écrit en utilisant une flèche :



Par contre, lorsqu'on suppose qu'une réaction est le résultat d'une succession d'actes élémentaires, il est proposé d'utiliser le signe égal pour indiquer que l'on donne le bilan d'une somme d'actes élémentaires :

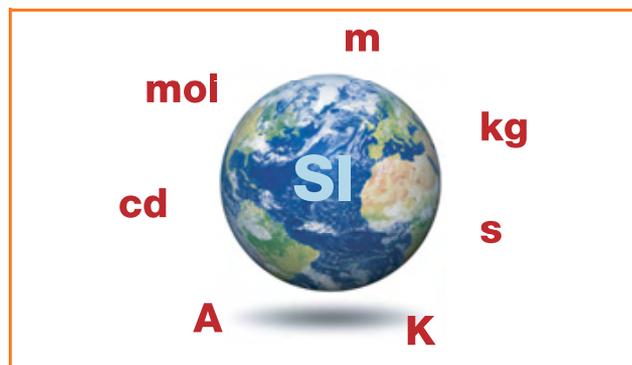


Cela signifie que les atomes d'hydrogène de la molécule de dihydrogène et les atomes de brome de la molécule de dibrome se retrouvent tous dans les molécules de bromure d'hydrogène formé : le nombre total d'atomes présents dans l'ensemble des réactifs est égal au nombre total d'atomes présents dans l'ensemble des produits formés :



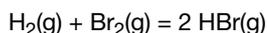
Les chimistes ont pris l'habitude de symboliser cette équation en écrivant simplement, comme nous l'avons fait ci-dessus, les symboles des réactifs et des produits, tout en conservant le signe égal. Cette équation mathématique ne peut être comprise que s'il est bien entendu que l'égalité concerne seulement des nombres d'atomes. On comprend que les mathématiciens critiquent vivement cette équation s'ils considèrent qu'elle signifie que deux composés chimiques s'additionnent pour donner des composés chimiques différents. C'est ce que penseront spontanément bien des élèves auxquels il est donc indispensable d'expliquer ce que signifie une équation de réaction.

• **Au niveau macroscopique**, on ne compte pas le nombre d'atomes ; on ne fait que mesurer les proportions de réactifs nécessaires pour fabriquer les produits. Il est proposé



Les sept unités de base du système international d'unités.

d'écrire encore l'équation de réaction symbolique avec le signe = pour indiquer la conservation de la matière ; de plus, on indique l'état physique dans lequel se trouve chaque constituant :



Les nombres qui figurent devant chaque symbole B sont appelés « nombres stœchiométriques », notés $\nu(\text{B})$, car ils indiquent les proportions suivant lesquelles les espèces chimiques réagissent pour donner les produits de réaction. Cette équation de réaction, appelée aussi « équation stœchiométrique », est écrite en faisant figurer les réactifs dans le membre de gauche de l'équation et les produits de réaction dans le membre de droite.

L'IUPAC propose d'utiliser aussi une flèche à la place du signe égal pour indiquer le sens dans lequel se produit la transformation, et la superposition de deux flèches opposées pour indiquer que la transformation peut se produire dans les deux sens. Enfin, si l'on souhaite mentionner que la transformation n'est pas complète et qu'il existe un équilibre entre les produits formés et les réactifs non transformés, on peut alors utiliser la superposition de deux demi-flèches.

Avancement de réaction et nombres stœchiométriques

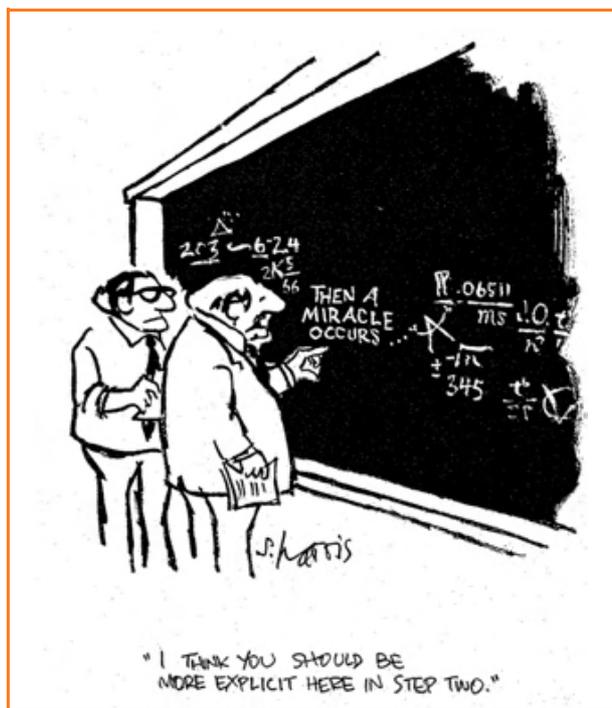
Lors de l'étude de la transformation chimique, il est proposé d'exprimer les quantités de tout réactif transformé ou produit formé au cours de la réaction en fonction d'une seule variable, l'« avancement de réaction », notée ξ , selon l'équation :

$$n(\text{B}) = n(\text{B}, 0) + \nu(\text{B}) \xi$$

où $n(\text{B}, 0)$ représente la quantité de l'espèce B présente dans le réacteur avant toute transformation et $n(\text{B})$, la quantité de l'espèce B présente dans le réacteur au cours de la transformation ; notons que l'avancement de la réaction, qui est homogène à une quantité de matière, s'exprime en mol. L'IUPAC propose de compter algébriquement les nombres stœchiométriques $\nu(\text{B})$ de chaque espèce B : positivement pour les produits formés et négativement pour les réactifs consommés. Ainsi, pour la formation du gaz ammoniac à partir de dihydrogène et de diazote, symbolisée par l'équation $\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 = 2 \text{NH}_3$, les nombres stœchiométriques sont : $\nu(\text{N}_2) = -1$, $\nu(\text{H}_2) = -3$ et $\nu(\text{NH}_3) = +2$. Cette notation algébrique tient compte du sens dans lequel est étudiée la transformation considérée. Dans le cas où l'on s'intéresse à la décomposition du gaz ammoniac ($2 \text{NH}_3 = \text{N}_2 + 3 \text{H}_2$), on aurait alors : $\nu(\text{NH}_3) = -2$, $\nu(\text{N}_2) = +1$ et $\nu(\text{H}_2) = +3$.

La valeur de l'avancement de réaction dépend des valeurs choisies pour les nombres stœchiométriques mais ne dépend pas de l'espèce choisie pour sa définition. Il ne doit pas être confondu avec le « degré d'avancement », ou « taux d'avancement », défini par le rapport de l'avancement à la valeur maximale atteinte, qui est donc une grandeur sans dimension, comprise entre 0 et 1. La confusion a pu être possible du fait que Théophile de Donder (1872-1957) a commencé par appeler « degré d'avancement » ce que l'on appelle aujourd'hui « avancement ».

La notation algébrique des nombres stœchiométriques, telle qu'elle est proposée par l'IUPAC, s'avère très commode dès lors que l'on est amené à considérer des réactions différentes, qui se produiraient simultanément dans le



© ScienceCartoonsPlus.com

réacteur, lorsqu'une même espèce est formée dans une étape et consommée dans une autre étape.

Systèmes thermodynamiques

Les recommandations de l'IUPAC sont particulièrement précieuses en thermodynamique, qui est une discipline difficile à comprendre et à enseigner. Nous voudrions donner ici quelques exemples pour en montrer l'intérêt.

L'IUPAC propose une manière simple de définir non seulement le système étudié (en nature et quantité), mais aussi son état physique avant transformation : les caractéristiques de cet état apparaissent comme des attributs du symbole du constituant considéré.

Ainsi on écrira : $n(\text{CO}_2, \text{g}, p^\circ = 100\,000 \text{ Pa}, T = 273,15 \text{ K})$. Dans cette expression, les conditions dans lesquelles se trouve le dioxyde de carbone sont précisées : état gazeux (g), valeurs de la température et de la pression (les grandeurs physiques n, p, T sont écrites en italique et les unités en lettres droites). Cette expression peut paraître lourde *a priori* mais elle évite toute hésitation au moment d'une application numérique.

En thermodynamique chimique, on examine les relations entre la matière et l'énergie. Ce constat rendrait facile l'abandon, pour cette discipline, du titre souvent mal compris (et peut-être rébarbatif) de « thermodynamique chimique » au profit d'un titre plus attractif tel que « rapports entre matière et énergie ».

Chaque espèce chimique possède une énergie qu'on ne connaît pas en valeur absolue mais dont on peut évaluer la variation entre deux états bien définis. C'est pourquoi on a l'habitude de définir un état de référence (appelé « état standard ») pour lequel on définira une origine des énergies.

L'état de référence (ou état standard) d'une espèce chimique, à la température T , est un état d'agrégation de cette espèce pure (choisi par convention internationale) sous une pression de référence également choisie par convention. On voit ici le rôle indispensable de l'IUPAC pour établir de telles conventions internationales. C'est ainsi que la pression de référence (notée p°) était jusqu'en 1982 de

« 1 atmosphère », c'est-à-dire de 101 325 Pa (c'est ce que les Français appellent « pression normale »), alors qu'elle est officiellement aujourd'hui de 100 000 Pa, c'est-à-dire de 1 bar. Étant donné l'ampleur des données publiées avant 1982 dans les tables de données thermodynamiques, le changement de pression de référence (ou standard), qui doit être très explicite, ne se fait que progressivement.

Expression du premier principe de la thermodynamique

Le calcul de la variation d'énergie, induite par des variations de température et de pression, est basé sur l'expression différentielle du principe de la conservation de l'énergie qu'il est recommandé d'écrire $dU = \delta Q + \delta W$ (pour un système fermé). L'utilisation de « d » et « δ » souligne la différence entre les grandeurs (ou fonctions) d'état telles que U et les grandeurs de transfert, correspondant à une énergie échangée, telles que le travail et la chaleur, W et Q , et dont la valeur dépend étroitement du chemin suivi par le système.

Pour calculer la variation d'énergie interne U , on compare habituellement l'état du système considéré à l'état du système pris sous la pression de référence mais à la même température.

En réalité, comme la majorité des transformations chimiques étudiées sont réalisées de façon isobare et monotherme, on s'intéresse plus particulièrement à la fonction enthalpie pour laquelle on fixe arbitrairement comme origine celle d'un corps simple pris dans un état choisi pour état de référence : cet état de référence (ou standard), noté à l'aide de l'exposant °, accolé à la fonction d'état considérée, est caractérisé, à la température envisagée (qu'il convient de préciser). C'est ainsi que l'on peut trouver des tables des valeurs d'enthalpie de référence pour chaque espèce chimique pure, calculée pour la température de 298,15 K.

Pour toute transformation, la chaleur échangée de façon isochore et monotherme correspond à une variation d'énergie, appelée « *énergie de transformation* », tandis que la chaleur échangée de façon isobare et monotherme correspond à une variation d'enthalpie, appelée « *enthalpie de transformation* ». Ainsi pour toute réaction chimique, représentée par son équation de réaction : $0 = \sum_B \nu(B) B$ (où B désigne une espèce chimique participant à la réaction et $\nu(B)$ le nombre stœchiométrique correspondant qu'il convient de préciser), l'enthalpie de référence de réaction, notée $\Delta_r H^\circ$, peut être calculée à partir de la relation :

$$\Delta_r H^\circ = \sum_B \nu(B) H^\circ_{m(B)}$$

Dans cette équation, $H^\circ_{m(B)}$ représente l'enthalpie d'une mole de l'espèce B , prise dans son état de référence à la température considérée.

Une dernière précision est toutefois nécessaire pour permettre une application numérique. En effet, la valeur de l'enthalpie de référence de réaction calculée dépend de la quantité de matière transformée, c'est-à-dire de la valeur de l'avancement de réaction qui doit donc être précisée : l'IUPAC suit ici la coutume assez générale de prendre la valeur de l'enthalpie molaire de référence de réaction correspondant à un avancement d'une mole.

Particularités françaises

Avant de terminer ces réflexions sur l'intérêt des recommandations de l'IUPAC pour un bon enseignement de la chimie, il serait honnête de dire qu'un accord international

n'est pas toujours possible. C'est ainsi qu'il existe quelques particularités françaises qui insistent sur la nécessité d'utiliser des expressions définies aussi clairement que possible et ne sont cependant pas (encore ?) adoptées internationalement. On distingue :

- un élément chimique, caractérisé par son numéro atomique, du corps simple constitué uniquement d'atomes d'un seul élément ;
- l'atome d'oxygène, appelé « oxygène », de la molécule correspondante qui est appelée « dioxygène » ;
- nous préférons parler de masse volumique plutôt que de densité pour éviter toute hésitation entre densité absolue et densité relative.

Nous avons d'autres particularités qui ne sont justifiées que par notre passé scientifique et par l'habitude : c'est ainsi que nous parlons toujours d'énergie libre (ou d'enthalpie libre), alors que les pays anglo-saxons parlent des énergies d'Helmholtz ou de Gibbs.

En conclusion

Nous souhaitons insister sur l'intérêt pédagogique et scientifique de disposer d'un langage de référence reconnu internationalement qui permet tout naturellement d'assurer la continuité entre l'enseignement secondaire et l'enseignement supérieur. On peut aussi y voir l'intérêt d'un langage commun entre la chimie et la physique. Il nous semble que si nous réussissons à modifier nos habitudes pour adopter ce langage commun, aux différents niveaux d'apprentissage ou dans les différents enseignements utilisant les notions de chimie et de physique, nous ne pourrions qu'améliorer et faciliter l'enseignement des sciences physiques et chimiques. Cela nous paraît très important pour la chimie dont les applications sont omniprésentes dans le monde moderne et que les jeunes générations gagneraient à mieux comprendre. Pour être attractive, la chimie doit pouvoir être en partie accessible à des non-spécialistes ou à des spécialistes d'autres branches, et pour cela, un langage unifié et clair, tel que le propose l'IUPAC, est indispensable.

Note et référence

- [1] *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry*, 3rd Ed., IUPAC, 2007.
- [2] Commission chargée de la traduction française : R. Marquardt (président de la Commission des symboles et de terminologie des grandeurs et des unités physicochimiques de l'IUPAC), M. Mottet (traductologue), F. Rouquérol (présidente sortante de la division Enseignement-Formation de la Société Chimique de France), J. Toullec (président de la Commission de terminologie et de néologie de chimie et des matériaux du Ministère des Finances et de l'Industrie).



F. Rouquérol

Françoise Rouquérol
est professeur émérite à l'Université de Provence*.
Michel Vigneron
est inspecteur dans l'Académie de Versailles**.



M. Vigneron

* Université de Provence, Laboratoire Chimie Provence, Site MADIREL, Centre Saint-Jérôme, F-13397 Marseille Cedex 20.
Courriel : francoise.rouquerol@univ-provence.fr

** Rectorat de l'Académie de Versailles, 3 boulevard de Lesseps, F-78017 Versailles Cedex.
Courriel : michel.vigneron@ac-versailles.fr

Développer la créativité des étudiants de licence au travers de la chimie analytique

Vincent Dugas, Claire Demesmay et Jérôme Randon

Résumé

Dans le cadre des formations de licence de chimie, biochimie et sciences physiques, les compétences relatives aux sciences analytiques représentent un socle de base sur lequel est bâtie la démarche scientifique. Ainsi, outre la connaissance propre des techniques analytiques, tout étudiant en sciences expérimentales doit posséder les compétences permettant de mettre en œuvre ces techniques de façon raisonnée pour obtenir une mesure adaptée aux exigences formulées. C'est ainsi qu'a été proposée une unité d'enseignement permettant aux étudiants de licence de développer des compétences méthodologiques associées à la mesure, au travers d'une approche expérimentale ouverte basée sur plusieurs situations-problèmes. Cette approche a aussi permis de modifier l'image d'une chimie perçue comme utilisatrice de recettes de préparation qu'il faut appliquer, en remobilisant les étudiants autour de l'élaboration de leur propre stratégie expérimentale. En réaffirmant le caractère expérimental de cette discipline, et en montrant qu'elle est un espace de créativité et d'innovation, il est possible de conforter les compétences méthodologiques des étudiants, permettant de favoriser leur réussite en licence.

Mots-clés

Situation-problème, expériences, créativité, chimie analytique, JIREC 2010.

Abstract

Improving student's creativity at bachelor level with analytical chemistry

Analytical science is one of the most important tools used in order to build a scientific approach. Beside the knowledge of analytical techniques, any student at bachelor level must possess technical skills in order to design and process an operating procedure leading to a quantitative measurement in agreement with the initial requirements. A new module in the curriculum of scientific students (chemistry, biochemistry and physics) has been introduced in order to develop the methodological skills related to measurement using an opened experimental approach related to problem-based learning. This teaching method has also modified the image of chemistry often related to cooking procedure, with students taking the responsibility of their own scientific procedure. Using such experimental approach, leaving a large space to creativity and innovation, the scientific skills of the students have been enhanced.

Keywords

Problem-based learning, experiment, creativity, analytical chemistry, JIREC 2010.

Dans le cadre des formations de licence de chimie, biochimie et sciences physiques, les compétences relatives aux sciences analytiques représentent un socle de base sur lequel est bâtie la démarche scientifique. La qualité d'un résultat expérimental est en effet une conséquence directe des mesures effectuées pour atteindre ce résultat. Ainsi, outre la connaissance des techniques analytiques, tout étudiant en sciences expérimentales doit posséder les compétences permettant de mettre en œuvre ces techniques de façon raisonnée pour obtenir une mesure adaptée aux exigences formulées. Dans ce contexte, les connaissances des bases scientifiques propres à chaque technique doivent être accompagnées d'un ensemble de compétences méthodologiques, permettant de choisir les techniques à mobiliser et de mettre en œuvre la démarche expérimentale associée. Jusqu'à présent, dans les formations dispensées au niveau licence, nous ne proposons que très peu d'activités permettant aux étudiants d'être en face de ces situations où ils doivent choisir, construire et exécuter par eux-mêmes un protocole expérimental associé à la mesure de grandeurs physico-chimiques.

Mise en place de l'unité d'enseignement

Nous avons donc proposé d'introduire une formation méthodologique orientée vers la stratégie analytique au niveau L3, s'appuyant sur des situations-problèmes [1-2] dans le cadre d'une démarche d'investigation [3]. Outre les aspects pédagogiques, plusieurs contraintes ont été formulées pour réaliser cette formation. Elle doit ainsi se dérouler sous forme expérimentale et intégrer une démarche basée sur une pédagogie de projet, être ouverte aussi bien à des étudiants de licence de chimie que de biochimie ou de sciences physiques, et enfin permettre de valider des crédits d'enseignement.

Pour répondre à cette problématique au sein d'un établissement tel que l'Université Claude Bernard Lyon 1 qui accueille 400 étudiants en 3^e année de formation dans ces domaines scientifiques, une unité d'enseignement (UE) conduisant à la validation de trois crédits d'enseignement a été proposée dans le cadre du plan Licence sur la période janvier-février (inter-semestres), sous la forme d'une semaine bloquée, au sein d'une plate-forme pédagogique

regroupant des salles de travaux pratiques et une salle de travail. La thématique retenue est orientée vers l'investigation analytique telle que l'on peut la voir présentée dans la littérature récente [4]. Suite à l'accord du Conseil des études et de la vie universitaire, qui a intégré cette UE dans le catalogue de formation des étudiants de licence en novembre 2009, une communication vers les étudiants a été réalisée au mois de décembre sur le déroulement d'une UE intitulée « Les experts à Lyon 1 » et proposant de traiter plusieurs affaires :

- Pollution par des composés organiques,
- Le coupable est allergique au parfum,
- Accréditation auprès de la cour de justice,
- Les yeux « bleus » de l'assassin.

Les problématiques abordées portent sur :

- la détermination de la composition chimique d'une solution pharmaceutique (activité préliminaire),
- l'identification et le dosage de polluants organiques dans l'eau,
- l'identification de molécules allergènes dans les parfums,
- la participation à une campagne d'essais inter-laboratoires en vue d'une accréditation,
- le dosage du bleu de méthylène dans un collyre.

Pour la première année de réalisation et afin de valider la démarche avec un nombre restreint d'étudiants, un groupe de vingt étudiants a été constitué sur la base du volontariat, groupe accompagné par deux enseignants lors du mois de février 2010.

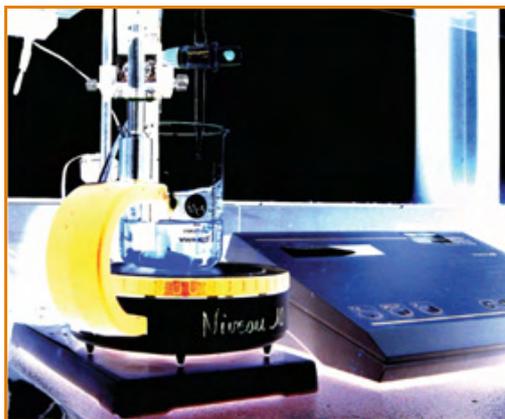
Exemple de déroulement d'une journée

À titre d'illustration de la variété des activités proposées au cours de la semaine, nous présenterons le déroulement de la première journée consacrée au dosage des ions permanganate dans l'eau de Dakin. Après un passage en salle de TP pour voir les appareillages disponibles et présenter les objectifs de la formation, les étudiants sont réunis en salle de cours. Une information succincte sur le Dakin, limitée au paragraphe présenté dans l'encadré ci-dessous, leur est distribuée en leur précisant que l'on cherche à déterminer la teneur en permanganate dans une solution commerciale qui leur a été distribuée dans son flacon d'origine.

Texte proposé aux étudiants en vue de la détermination de la teneur en ions permanganate dans l'eau de Dakin.

Antiseptique mis au point en 1912 par Alexis Carrel, chirurgien français, et Henry Drysdale Dakin, chimiste britannique. L'eau de Dakin est composée d'hypochlorite de sodium à 1,5 degré chlorométrique, et d'autres espèces chimiques dont $0,238 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ d'ions hydrogencarbonate HCO_3^- . Ce mélange contient des ions permanganate pour le colorer et le stabiliser vis-à-vis de la lumière, lui donnant sa coloration rosée.

Une phase d'une heure et demie a alors été consacrée à l'élaboration d'un protocole expérimental par petits groupes de deux étudiants, sur la base de leurs seules connaissances. Les propositions formulées par les différents groupes se sont essentiellement orientées sur un dosage colorimétrique (sept groupes), tandis que d'autres propositions ont convergé vers



© X. Bataille

un dosage par oxydoréduction : deux groupes avec les ions Fe^{2+} et un groupe avec les ions iodure. Les propositions devant être tout d'abord confrontées à la réalité expérimentale, elles n'ont pas été validées au préalable par les enseignants à ce stade, même si des problèmes pouvaient être pressentis dans l'approche par oxydoréduction.

Une phase de trois heures et demie en salle TP a permis de mettre en évidence de nombreux obstacles propres à chaque

groupe d'étudiants, pour lesquels des solutions auraient à être apportées : pesée de faible quantité de solide, modalité de dilution (en tube à essai ou dans des éprouvettes), acidification des solutions... Toutes les expériences souhaitées par les étudiants peuvent alors être réalisées, et sont réalisées !

La dernière phase de la journée (2 h) a alors été consacrée à l'élaboration d'un poster (0,8 m x 1,0 m) présentant la méthode, les résultats et les conclusions des expériences de chaque groupe. Lors de la présentation de leur poster, les étudiants ont pu aborder aussi bien les points qualifiés par eux-mêmes de positif ou de négatif, les obstacles rencontrés... L'analyse par le groupe-classe de l'ensemble des résultats des différents groupes permet de faire émerger les limites des différentes approches, les notions de précision, d'exactitude, de dispersion des résultats, de spécificité des méthodes et d'interférences.

La deuxième journée, organisée de la même façon autour de l'analyse de contrefaçon de Granions® de citrate de lithium, a permis de consolider les notions abordées au travers de l'utilisation d'autres techniques analytiques : dosage conductimétrique (deux groupes), dosage et identification des alcalins par spectroscopie d'absorption atomique (deux groupes), dosage d'halogénures par la méthode de Mohr (deux groupes), dosage d'halogénures par les ions argent, suivi potentiométrique (deux groupes), dosage pHmétrique des ions citrate (un groupe). Un ou plusieurs groupes ont été désignés comme responsables du suivi d'une méthode d'analyse, mais tous les étudiants ont ensuite été confrontés à toutes les méthodes analytiques retenues au travers d'une rotation. Un passage de témoin a ainsi été réalisé à chaque rotation (transmission, discussion des résultats et des nouvelles expériences à effectuer).

Nombreuses ont été les expériences qui « ne marchaient pas », et chaque fois, des hypothèses ont dû être formulées par les étudiants, et de nouvelles expériences réalisées pour valider ou invalider ces hypothèses.

À l'issue de cette journée, chaque groupe responsable du suivi d'une méthode a eu en charge à la fois la collecte des résultats, de leur mise en forme (poster) et la présentation globale au reste du groupe, afin que chacun puisse suivre l'évolution des résultats (technique par technique) et que les différentes stratégies mises en place par les étudiants puissent être rediscutées.

Bilan de la semaine

Outre l'aspect lié à l'apport de compétences, nous avons pu constater chez les étudiants une demande forte de travail

de groupe, permettant un partage de connaissances au travers de la ré-explicitation des points difficiles par les étudiants entre eux, et une réelle collaboration en raison des parcours de formation variés des étudiants (biochimie, chimie et physique-chimie).

Dans ces séances, le temps de préparation des protocoles s'est avéré assez important mais finalement indispensable. La mise en œuvre opérationnelle immédiatement après cette phase d'anticipation a permis de réinterroger les connaissances alors confrontées à la réalité expérimentale. Les phases de synthèse *via* les posters et les présentations ont fait aussi ressentir toute la difficulté de la transmission de l'information scientifique vers des auditeurs, ce dernier point ayant d'autre part été abordé lors de séances nécessitant un passage de relais vers un autre groupe.

La scénarisation des situations a été fortement appréciée et demandée par les étudiants, et une proposition de leur part a été faite pour définir eux-mêmes des scénarios originaux.

Toutes les expériences imaginées par les étudiants ont pu être réalisées. Même, et surtout si elles n'aboutissaient pas aux résultats escomptés, elles ont été l'occasion de formulation d'hypothèses, de réalisation de nouvelles manipulations, pour aboutir à d'autres conclusions, elles-mêmes sources de nouvelles hypothèses. Les étudiants étaient ainsi pleinement acteurs de leur formation, et tous ont validé le module évalué à travers le poster, la gestion de projet et un QCM final.

Face à ce bilan positif, il est toutefois important de noter que cette unité d'enseignement a été réalisée dans un environnement privilégié : la plate-forme technique du master « Analyse et contrôle », la proximité d'une salle de travail dédiée pendant une semaine permettant une unité de lieu, une période bloquée d'une semaine, deux enseignants prêts à être confrontés eux aussi à des situations originales, et des étudiants volontaires et motivés.

Conclusion

Cette approche a permis de modifier l'image d'une chimie perçue par les étudiants comme utilisatrice de recettes de préparation qu'il faut appliquer, en remobilisant les étudiants autour de l'élaboration de leur propre stratégie expérimentale. En réaffirmant le caractère expérimental de cette discipline, et en montrant qu'elle est un espace de créativité et d'innovation, il est possible d'attirer de nouveaux étudiants vers ce secteur et de conforter leurs compétences méthodologiques, permettant de favoriser leur réussite en licence puis en master.

Références

- [1] Robardet G., Enseigner les sciences physiques à partir de situations-problèmes, *Le Bup*, **1990**, 720, p. 17.
- [2] Meirieu P., *Apprendre... oui, mais comment ?*, ESF, **1987**.
- [3] Bataille X., Beauvineau E., Cheymol N., Mas V., Vigneron M., La démarche d'investigation pour motiver les étudiants : exemple d'un TP sur la spectroscopie infrarouge, *L'Act. Chim.*, **2009**, 334, p. 41.
- [4] Numéro spécial « La chimie mène l'enquête », *L'Act. Chim.*, **2010**, 342-343.



V. Dugas



C. Demesmay



J. Randon

Vincent Dugas est maître de conférences, Claire Demesmay et Jérôme Randon (auteur correspondant) sont professeurs à l'Université Claude Bernard Lyon 1*.

* Laboratoire de Sciences Analytiques, Université Claude Bernard Lyon 1, Bât. Curien, 43 bd du 11 Novembre 1918, F-69622 Villeurbanne Cedex. Courriels : vincent.dugas@univ-lyon1.fr, demesmay@univ-lyon1.fr, randon@univ-lyon1.fr



En quête de petit chimiste...

Un crime, un vol de produits et de matériel scientifiques ont été commis dans le laboratoire du Professeur Erlen. L'Inspecteur Patrouille est chargé de l'enquête, mais la chimie n'est pas son fort. Il demande de l'aide...

L'association Graine de Chimiste propose un divertissement scientifique intitulé « En quête de chimiste » pour les plus de 10 ans. L'animateur, en général étudiant en filière scientifique, expose le scénario puis confie la mission à un groupe d'une douzaine de participants. Il s'agit de retrouver le coupable et le lieu précis du crime à partir des éléments recueillis sur le terrain par l'Inspecteur Patrouille. Par binôme ou trinôme, les jeunes enfilent blouse, lunettes de protection, gants et mettent en place leur propre démarche expérimentale. Un recueil de données scientifiques leur permet de progresser dans l'enquête. Au besoin, l'animateur met à leur disposition ses compétences. L'émulation est grande et la fierté s'affiche sur les visages de chacun quand, après environ une heure d'animation, les participants remettent leur rapport à l'Inspecteur. Qui eut cru que Mademoiselle Distillée puisse être coupable ? A moins que ce ne soit Mr Manganèse...

• Association Graine de Chimiste, Université Pierre et Marie Curie, Boîte 67

4 place Jussieu, F-75252 Paris Cedex 05 – Tél./Fax : 01 44 27 30 71

grainedechimiste@upmc.fr – www.societechimiquedefrance.fr/fr/education/graine-de-chimiste

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 ré-écriture 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 du travail éditorial ; 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 :

- Les noms, prénoms et fonctions (professeur, directeur de recherche...) de tous les auteurs ainsi que leurs coordonnées respectives (adresse postale, téléphone et courriel) – préciser l'auteur correspondant. Joindre une photographie type identité de chaque auteur (fichier jpg, 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.



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 (première page).
- [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 ? »), consulté le...
- [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⁾).



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

II – Envoi du manuscrit

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 sa publication.

La microencapsulation

Une technologie de choix pour la formulation d'actifs

La microencapsulation regroupe l'ensemble des technologies permettant de préparer des microparticules individualisées dont la taille varie de 1 μm à 1 mm, généralement sphériques ou ovoïdales, et constituées d'un matériau polymère qui enrobe jusqu'à 90 % d'une matière active : parfum, arôme, pigment ou colorant... La microencapsulation est omniprésente dans tous les domaines de la formulation : cosmétique, détergence, pharmacie, agroalimentaire, textile, peinture, électronique, imprimerie... [1].

Il existe deux types de microparticules qui diffèrent par leur microstructure (figure 1) [2] : la *microcapsule*, particule sphérique de type cœur-membrane – le cœur est constitué de la substance active et la membrane de l'agent encapsulant qui forme l'enveloppe solide ; et la *microsphère*, constituée d'un réseau polymère dans lequel la substance active est dispersée à l'état moléculaire ou particulaire (structure dite de type matriciel).

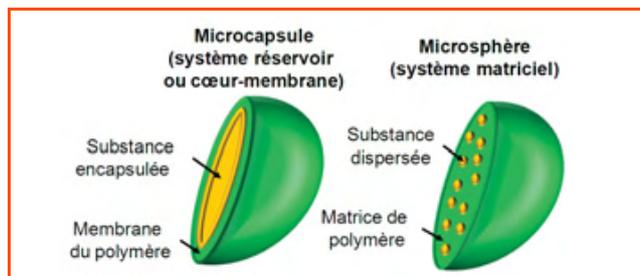


Figure 1 - Représentation schématique d'une microcapsule et d'une microsphère.

Intérêts de la microencapsulation

La microencapsulation confère à l'actif encapsulé des propriétés qu'il ne possède pas lorsqu'il est libre et facilite son utilisation (figure 2). Le premier avantage réside dans la protection et/ou l'augmentation de la stabilité d'actifs sensibles à des agressions du milieu extérieur (oxydation, pH, humidité). Un deuxième apport consiste en la libération contrôlée de l'actif. On trouve ainsi [2] :

- *Les systèmes à libération provoquée* : le contenu de la capsule est libéré après rupture de la paroi sous l'effet d'une contrainte physique, chimique ou biologique. Par exemple,



Figure 2 - Intérêts de la microencapsulation.

dans certains chewing-gums, des microcapsules libèrent un arôme en se brisant lors de la mastication. Certains plats cuisinés contiennent des arômes microencapsulés préservés lors du chauffage. Et certains déodorants renferment des microcapsules de parfum sensibles à l'humidité qui se délissent au fur et à mesure de la sudation après avoir été adsorbées sur les pores de la peau.

- *Les systèmes à libération contrôlée et prolongée* : la libération du principe actif peut être contrôlée soit par diffusion passive à travers la paroi, soit par dégradation ou dissolution enzymatique ou chimique lente de la couche polymère qui devient poreuse et permet la diffusion à travers la paroi. Cela permet notamment de délivrer un médicament progressivement, évitant ainsi une prise quotidienne.

- *Les systèmes piégés dits microréacteurs* : les microparticules se présentent sous la forme d'un noyau d'adsorbant à l'intérieur duquel leur contenu (enzymes ou catalyseurs) est piégé. Ce noyau est enrobé par une membrane polymère semi-perméable permettant le transfert du substrat du milieu extérieur vers le cœur du microréacteur et vice versa pour le produit. Ces microréacteurs sont particulièrement utilisés dans les bioprocédés impliquant des transformations enzymatiques.

Enfin, la microencapsulation est également utilisée pour des applications sur diverses surfaces. Le papier-copie sans carbone, ou NCR (« non carbon required ») – mis au point en 1953 par Lowell Schleicher et Barry Green pour NCR Corporation [3] –, est la première application de la microencapsulation et constitue une alternative au papier carbone traditionnel. La pression du stylo sur le papier permet de casser la microcapsule et de libérer l'encre tout en évitant les taches. On trouve des microcapsules de parfum dans des poudres détergentes qui se retrouvent emprisonnées dans les fibres du textile lors du lavage en machine. Les contraintes induites par la manipulation du linge sec brisent les capsules et libèrent le parfum. Cette technologie est aussi utilisée pour la microencapsulation de pigments thermochromes [4] qui changent de couleur sous contrainte thermique. Ce changement peut être irréversible (rupture de la chaîne du froid) ou réversible (température optimale de consommation d'un produit). La microencapsulation de parfums est également présente dans les technologies du « scratch and sniff » (microcapsules appliquées sur un support quelconque qui éclatent en grattant avec l'ongle) ou de « fragrance burst » (microcapsules incorporées entre deux feuilles de papier collées qui libèrent le parfum après séparation).

Les procédés

Différents procédés permettent de préparer des microcapsules ou microsphères pouvant emprisonner une matière active (figure 3) [1-2]. Ils sont choisis en fonction de critères tels que le coût de production, la nature de l'actif et les propriétés recherchées pour la microparticule. Lors de l'encapsulation, il est impossible de piéger la totalité de l'actif ; une quantité de matière active reste donc libre dans la solution de

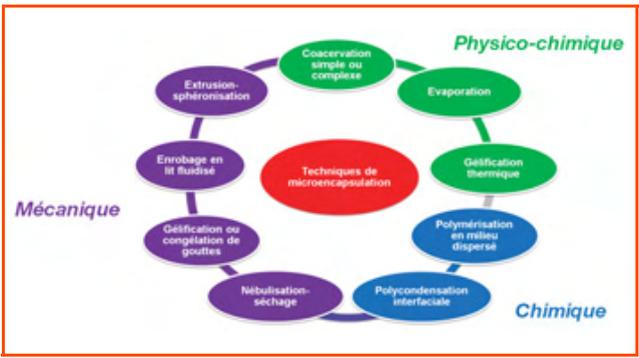


Figure 3 - Les trois grands types de procédés industriels de microencapsulation.

microcapsules. Les procédés peuvent être choisis en fonction de l'efficacité, du taux et du rendement d'encapsulation [5].

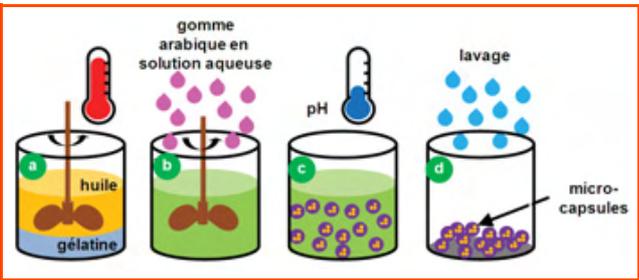


Figure 4 - Procédé de coacervation complexe de la gélatine et de la gomme arabique (neutralisation des charges entre les deux polymères) : a) dispersion de la gélatine dans l'huile, b) préparation de l'émulsion eau/huile, c) ajustement du pH et de la température, et d) isolation et lavage des microcapsules.

Formulation et propriétés physico-chimiques

Les matériaux d'encapsulation peuvent être des lipides, des cires minérales (glycérides, cires d'abeille, de carnauba ou de candelilla...) ou des polymères d'origine naturelle (gélatine, alginate de sodium, amidon...), hémisynthétique (dérivés de la cellulose...) ou synthétique (copolymères (méth)acryliques, polyoléfines, copolymères (acrylo)vinyliques, polycaprolactone...). Ils sont choisis selon l'application et ne doivent en aucun cas interagir avec l'actif. Porosité, épaisseur, diamètre, cristallinité et résistance mécanique des microparticules sont directement liés aux propriétés de la membrane. Plus le taux de cristallinité d'un polymère est élevé, plus la membrane qui en découle est imperméable. En revanche, la réticulation même faible d'un polymère initialement cristallin a globalement tendance à augmenter la perméabilité car elle empêche la formation de phases cristallines. L'épaisseur et la porosité de la membrane sont des caractéristiques déterminantes, de même que le caractère réticulé ou cristallin du polymère. Une membrane peu épaisse ou très poreuse est perméable. Pour une même épaisseur de membrane, les petites capsules seront moins poreuses que les grosses. Par ailleurs, les polymères de faible masse molaire augmentent la perméabilité et la porosité alors que ceux de forte masse molaire donnent une membrane plus épaisse et

moins perméable. Les groupements fonctionnels du polymère servent alors de barrières aux endroits où la membrane est plus fine. La résistance mécanique permet d'éviter la libération inopinée de l'actif et augmente avec l'épaisseur de la membrane. Elle peut également être améliorée par l'emploi d'un agent réticulant [2]. Il est aussi possible d'influer sur le profil de libération de la matière active en fonction de l'effet souhaité. Pour cela, l'utilisation de microsphères pourra être préférée aux microcapsules, ou encore des effets de type « explosion », « retardateur » ou « stationnaire » pourront être recherchés [1-2, 6-7].

La libération de l'actif microencapsulé dépend des conditions extérieures, des caractéristiques intrinsèques de la membrane polymère et de l'actif (voir tableau).

Caractéristiques externes	Caractéristiques intrinsèques de la membrane polymère	Caractéristiques intrinsèques de la phase interne
<ul style="list-style-type: none"> • Température • Humidité • Milieu extérieur (pH, enzyme) 	<ul style="list-style-type: none"> • Taille et épaisseur • Porosité • Structure chimique • Cristallinité • Propriétés mécaniques 	<ul style="list-style-type: none"> • Pression de vapeur • $T_{éb}$, T_f • Paramètres de solubilité

Les différents facteurs influençant la libération de la matière active [1].

Cette technologie est aujourd'hui souvent remise en cause par son coût relativement élevé, mais surtout car elle utilise de grandes quantités de solvants associés à certains procédés et d'agents réticulants plus ou moins toxiques. Dans un souci de développement durable, les recherches s'orientent désormais vers l'utilisation de solvants aqueux ou de fluides supercritiques et de polymères naturels.

Pour finir, quelques exemples parmi tant d'autres qui utilisent cette technologie : le carré Hermès « les flacons » est le premier tissu commercialisé contenant des microcapsules (plus d'un million) avec le parfum Calèche. L'adoucissant Cajoline® Caresse fleurie est à base de microparticules de type mélanine-formaldéhyde libérant le parfum par action mécanique. Le déodorant Rexona® ActivReserve® est composé de microcapsules à base de gélatine qui libèrent les parfums suite à des réactions entre la membrane et la sueur...

Pour en savoir plus

- [1] Richard J., Benoît J.-P., *Microencapsulation*, Techniques de l'Ingénieur, Traité génie des procédés, J 2 210, **2000**.
- [2] Giraud S., *Microencapsulation d'un diisocyanate et d'un phosphate d'ammonium - Application : élaboration d'un système polyuréthane monocomposant à propriété retardatrice de flamme pour l'enduction textile*, Thèse, Université Lille 1, **2002**, p. 233.
- [3] White M.A., The chemistry behind carbonless copy paper, *J. Chem. Ed.*, **1998**, 75, p. 1119.
- [4] Euracli, société française spécialiste de la microencapsulation (www.euracli.fr/en/innovation.php).
- [5] Sansukcharearnpon A., Wanichwecharungruang S., Leepipatpaiboon N., Kerdcharoen T., Arayachukeat S., High loading fragrance encapsulation based on a polymer-blend: Preparation and release behavior, *Int. J. Pharm.*, **2010**, 391, p. 267.
- [6] Vandamme T., Poncelet D., Subra-Paternault P., *Microencapsulation : des sciences aux technologies*, Lavoisier Tec & Doc, **2007**.
- [7] Madene A., Jacquot M., Scher J., Desobry S., Flavour encapsulation and controlled release, *Int. J. Food Sci. Technol.*, **2006**, 41, p. 1.

Cette fiche a été préparée par **Bastien Hamounic** et **Florent Pinot**, étudiants en Master M2 Chimie et ingénierie de la formulation de Lille, encadrés par Jean-Marie Aubry, Loïc Leclercq et Véronique Rataj (auteur correspondant, veronique.rataj@univ-lille1.fr), Université Lille 1, bât. C6, F-59655 Villeneuve d'Ascq Cedex. Les fiches « Un point sur » sont coordonnées par un comité éditorial mené par Jean-Pierre Foulon, Véronique Nardello-Rataj et Michel Qarton (contact : bleneau@lactualitechimique.org).



Industrie

Fusion dans la chimie : Solvay rachète Rhodia

Un acteur majeur de la chimie, leader mondial sur ses métiers, est sur le point de naître avec 12 Md€ de chiffre d'affaires et un bénéfice opérationnel (REBITDA) de 1,9 Md€. En effet, Solvay et Rhodia ont créé la surprise le lundi 4 avril dernier en annonçant avoir signé un accord en vue du lancement par Solvay d'une offre amicale visant 100 % du capital de Rhodia.

Cette offre en numéraire à 31,60 € par action valorise la capitalisation boursière de Rhodia à 3,4 Md€. L'opération offre aux actionnaires de Rhodia une plus-value de 50 % par rapport au cours de clôture du vendredi précédent l'annonce. La croissance géographique sera alimentée par une présence importante dans les marchés émergents, qui génèrent d'ores et déjà 40 % du chiffre d'affaires du nouveau groupe. La forte complémentarité des activités industrielles de Rhodia et Solvay devrait doter le nouvel ensemble d'une présence équilibrée dans ses différents segments de marché : spécialités chimiques destinées aux produits de grande consommation, construction, automobile, énergie, eau, environnement, électronique...

Selon le communiqué de presse, aucune restructuration majeure n'est attendue dans le cadre de ce rapprochement. Par ailleurs, Jean-Pierre Clamadieu, PDG de Rhodia, deviendra membre du Comité exécutif de Solvay dès la clôture de l'offre et il est pressenti pour succéder à Christian Jourquin, chief executive officer de Solvay.

• Source : communiqué de presse Solvay/Rhodia, 4 avril 2011.

À lire aussi : l'entretien accordé par Christian Jourquin et Jean-Pierre Clamadieu aux *Échos* (www.lesechos.fr/investisseurs/actualites-boursieres/0201278542190-christian-jourquin-solvay-et-jean-pierre-clamadieu-rhodia-il-n-aura-aucune-restructuration-majeure-.htm).

Rhodia cède ses activités salicyliques et paracétamol

Rhodia a annoncé en avril dernier le projet de cession de ses activités salicyliques et paracétamol au groupe européen Novacap*. Utilisés comme principes actifs dans l'industrie pharmaceutique (aspirine, paracétamol) ou comme intermédiaires de synthèse (acide salicylique, méthyle salicylate), les salicylés restaient la dernière activité de chimie pharmaceutique du groupe, ses principaux sites de production étant répartis en France, Thaïlande, Chine et Brésil (environ 390 employés). Le projet de cession devrait être conclu dans les prochains mois.

• Source : Rhodia, 14 avril 2011.

* Novacap, dont le siège social est basé à Lyon,

regroupe Novacarb (chimie minérale : carbonate, bicarbonate et sulfate de sodium), Novapex (chimie organique : phénol, solvants oxygénés et produits dérivés) et Novacid (acide chlorhydrique, chlorure de calcium et chlorure ferrique). Le groupe emploie près de 470 personnes.

Rebond en chimie chez Total ?

En présentant les résultats 2010 du groupe en février dernier, Christophe de Margerie, PDG de Total, affichait sa satisfaction en annonçant « *une année de croissance retrouvée* » avec un résultat net ajusté de 10,3 Md€, en hausse de 32 %. Une performance portée par la croissance de l'amont (+ 28 %) et le fort rebond de la chimie, en hausse de 200 % : « *un résultat plus qu'exceptionnel !* » a-t-il déclaré.

En ce qui concerne l'aval-chimie, 2010 a été marqué par de nouvelles stratégies et l'adaptation aux marchés qui ont entraîné des changements majeurs dans le raffinage en Europe (fermeture de la raffinerie de Dunkerque, réduction de capacité et modernisation de celle de Normandie, vente en cours de celle de Lindsey...), dans la pétrochimie (démarrage du vapocraqueur de Ras Laffan au Qatar, accord de partenariat sur le projet d'une usine de transformation de charbon en oléfines en Chine) et dans la chimie de spécialités (cession de Mapa Spontex et d'une partie de l'activité résines).

Malgré un taux de renouvellement des réserves (durée de vie supérieure à 12 ans) et une production en hausse de 4,3 % (croissance du GNL), le groupe s'est focalisé sur la recherche et la rentabilité dans les énergies nouvelles, à travers des partenariats innovants : dans le solaire, avec AEPolysilicon aux États-Unis (technologie de rupture pour la production de silicium granulaire, unité de production démarrée en 2010 ; participation du groupe : 25,4 %), et le projet Shams, la plus grande centrale solaire au monde en construction à Abou Dabi, dont le démarrage est prévu pour l'été 2012 (capacité : 100 MW ; participation Total : 20 %) ; ainsi que dans la biomasse, avec Amyris au Brésil (participation : 22 %) pour développer et produire des carburants et produits chimiques – la production de carburant aviation et lubrifiants est attendue en 2016. Environ 300 M€ sont consacrés pour les énergies nouvelles en R & D.

De bonnes perspectives sont attendues pour 2011-2012. Du côté du raffinage, la réduction des surcapacités entraînera probablement des fermetures (pas de vente de raffinerie en France, l'engagement étant pris pour cinq ans). La compétitivité de la pétrochimie sera renforcée en tirant bénéfice de la croissance au Moyen-Orient, en Afrique et en Asie et de l'innovation dans la chimie de spécialités. En complément du projet de captage et stockage de CO₂ à Lacq, les projets de développement sont axés sur une chimie

La chimie aujourd'hui

Cycle de conférences dans le cadre de l'Université de tous les savoirs

Neuf conférences à écouter du 21 au 28 mai (à 18 h 30, dans l'amphithéâtre Binet du Centre des Saints-Pères, 75006 Paris). Elles seront enregistrées et consultables sur www.utls.fr.

• www.canal-u.tv/canalu/producteurs/universite_de_tous_les_savoirs

innovante tournée vers le développement durable, en particulier par l'utilisation de matières premières alternatives au naphtha : l'acide polylactique (PLA) – le succès de l'usine pilote Futerro laisse envisager une croissance de ces biopolymères de 15 %/an d'ici 2020 – ; le procédé « methanol-to-olefin » (MTO) réalisé sur un pilote semi-industriel en Belgique, ou « coal-to-olefin » pour lequel un accord de partenariat vient d'être signé en mars avec China Power Investment Corp. (CPI) en Chine, utilisant la technologie MTO.

La « chimie verte » et le label Total Ecosolutions sont en bonne place avec de nouvelles technologies pour accroître l'utilisation de matières premières renouvelables, l'incorporation de matériau recyclé dans la formulation de nouveaux polymères et des solutions éco-performantes proposées aux clients. Cependant, le « bio » entraînant un surcoût, tous les projets devront trouver un équilibre opérationnel.

Le groupe a annoncé un budget d'investissements de 20 Md\$, dont près de 80 % pour l'amont – soit 20 % pour l'aval et la chimie (construction de la raffinerie de Jubail en Arabie Saoudite, projets de modernisation du raffinage et de la pétrochimie en Normandie).

Roselyne Messal

• Source : conférence et dossier de presse, 11 février 2011.

Gestion du risque industriel : quelques lignes directrices de l'UIC

La santé, la sécurité des salariés et la diminution des impacts environnementaux ont toujours préoccupé les entreprises. Au fil des ans, elles ont mis l'accent sur la sécurité et la santé des salariés car ils sont les premiers concernés. Puis l'analyse des impacts environnementaux est devenue une priorité et des actions ont été conduites pour diminuer les impacts environnementaux et sanitaires. Enfin, l'analyse du cycle de vie des substances devient une règle pour assurer le devenir des activités et l'exhaustivité des analyses.

La gestion de la sécurité est un défi au quotidien et les actions des industriels s'inscrivent dans la recherche de la réduction du risque à la source, de l'amélioration de la sécurité des personnes et de la diminution de l'impact environnemental. Mais c'est un défi permanent et les derniers accidents nous rappellent que rien

n'est gagné dans ce domaine. Les industriels sont engagés dans une démarche de progrès qui s'appuie sur :

- des systèmes de management internes de la sécurité et de l'environnement (engagement de la direction, procédures, formations, analyses des incidents et actions correctives...);
- le partage des bonnes pratiques : de nombreux guides professionnels existent (mémoire collective) ainsi que des analyses sur les incidents et accidents;
- des investissements pour assurer la pérennité des installations et améliorer leur fiabilité;
- le développement de la prise en compte des facteurs humains et organisationnels tant au niveau de l'analyse des risques qu'en retour d'expériences.

La question de « la société face aux risques industriels » peut être abordée sous différents prismes, mais deux thèmes sont essentiels : le *management des risques* et le *dialogue avec les riverains*.

Le processus global de management des risques comporte quatre phases principales : l'évaluation des risques, la réduction à la source, la mise en place de mesures de maîtrise et le contrôle de l'efficacité des barrières humaines, organisationnelles et techniques mises en place.

Quelle que soit la qualité du niveau technique développé, un dialogue avec les riverains doit s'instaurer. Il n'y a pas de règle universelle pour qualifier un dialogue, mais il est clair, simple et sincère.

L'Union des Industries Chimiques (UIC) joue un rôle important en éditant régulièrement des guides techniques sur la sécurité industrielle permettant de conserver la mémoire collective sur un sujet donné. Parmi eux, le guide *ATEX* sur la mise en œuvre de la réglementation relative aux atmosphères explosives diffusé en 2006, le *Référentiel de bonnes pratiques de maîtrise des risques dans les installations de chimie fine* paru en 2007, un document d'aide à l'élaboration du plan de prévention en 2009, un référentiel d'audit pour la sélection des réparateurs de soupape de sûreté en 2009... L'UIC publie aussi régulièrement, dans la lettre du département technique, les enseignements retenus d'un incident ou accident à l'ensemble de ses adhérents, et organise des journées de formation sur un thème donné (plan de modernisation...). L'UIC contribue ainsi à l'amélioration continue de la profession dans la gestion des risques industriels.

• Contact : Philippe Prudhon, directeur des Affaires Techniques de l'UIC (www.uic.fr).

Prix Agrobiobase 2011

Le pôle Industries et Agro-ressources (IAR), avec le concours du Ministère de l'Agriculture, lance un prix national pour récompenser une entreprise ayant valorisé le végétal. Trois critères seront pris en compte : le caractère innovant du

bioproduit, son pourcentage d'origine végétal et son impact environnemental et socio-économique. Deux trophées seront décernés dans les catégories « Agromatériaux » et « Biomolécules ». Le prix (15 000 € pour soutenir l'innovation et une adhésion gratuite au pôle IAR) sera remis le 5 septembre lors du colloque international « Plant based chemistry for 2020 » à la Maison de la Chimie (Paris).

• Dossier de candidature à adresser avant le 15 juin 2011.

www.agrobiobase.com/Prix-de-l-Agrobiobase-2011

11^e prix Chéreau-Lavet de l'ingénieur inventeur

Appel à candidatures

Ce prix s'adresse à tout ingénieur ou inventeur français qui, seul ou à la tête d'une équipe de chercheurs, a mis au point une innovation reconnue comme une rupture technologique et commerciale, et en a assuré la mise en œuvre industrielle, contribuant ainsi au service de l'homme.

• Clôture des dépôts de candidatures : 21 juin 2011.

www.mariuslavet.org

Enseignement et formation

Olympiades nationales de la chimie 2011



Les trois lauréats (de gauche à droite) : Maxime Meijers (3^e), Marie Muhr (1^{ère}) et Zacharie Brodard (2^e). © UIC - Franck Guyomard.

Ambiance festive le 8 avril dernier à la Maison de la Chimie pour la cérémonie de remise des prix des 27^e Olympiades nationales de la chimie (ONC), qui avaient pour thème « **Chimie et eau** »*. Après deux jours intenses d'épreuves, les 57 candidats – 13 élèves de première pour l'épreuve de communication et 44 élèves de terminale pour l'épreuve scientifique, dont le benjamin n'avait que 15 ans ! – et leurs professeurs attendaient les résultats avec impatience... C'est le lauréat 2010, Guillaume Fraux, actuellement en classe préparatoire au lycée Sainte-Geneviève à Versailles, qui a ouvert la cérémonie. Le 25 janvier dernier, sous la Coupole de l'Académie des sciences, il a reçu une médaille des mains de Valérie Pécresse.

Les ONC sont organisées chaque année par de nombreux partenaires tels que l'Union des Industries Chimiques qui les soutient depuis leur création, l'Union des professeurs de physique et de chimie, le CNRS, la Société Chimique de France, la Fondation de la Maison de la Chimie, et

de grandes industries – dont Arkema, BASF, ExxonMobil, Rhodia et Roquette qui se sont engagées à accompagner les cinq premiers lauréats tout au long de leur cursus scolaire. Les finalistes et les équipes enseignantes sont repartis avec de nombreux cadeaux, dont des abonnements à *L'Actualité Chimique*, le livre *Chimie et sport* (Collection L'Actualité Chimique-Livres, EDP Sciences, offert par l'UNAFIC) et jusqu'à 1 500 €.

Sélectionnés parmi 1 915 concurrents répartis dans 106 centres de toute la France et des lycées français à l'étranger (Mayotte, Liban, Sénégal, Madagascar, Colombie, Viêt Nam...), les 44 lauréats des épreuves régionales se sont retrouvés à Paris pour la finale scientifique (entretien collectif, questionnaire et manipulation), ainsi que les 13 lauréats des sept projets d'action de communication. Tous ont bénéficié de l'engagement bénévole actif de leurs professeurs et des techniciens de laboratoire.

Alors que 2011, Année internationale de la chimie, est déclarée également année de la femme scientifique en l'honneur du centenaire du prix Nobel de chimie de Marie Curie, le premier prix est revenu à une jeune fille prénommée... Marie ! **Marie Muhr** (TS, ensemble scolaire Notre Dame/Saint-Sigisbert, Nancy) est une étudiante particulièrement brillante, comme l'a souligné son professeur qui n'en est pas à sa première réussite aux ONC.

Le second prix a été attribué à **Zacharie Brodard** (TS, lycée Louis le Grand, Paris) et le troisième à **Maxime Meijers** (TS, lycée Pierre de Fermat, Toulouse).

Le prix de la communication est revenu au groupe du lycée Beausseur de la Seyne-sur-Mer pour leur projet intitulé « Sédiments en Seyne » sur le problème de l'ensablement de la rade de Toulon.

Dans son allocution, Olivier Homolle, président de l'UIC et des ONC, a rappelé que les Olympiades sont « *une passerelle entre le monde de l'enseignement et celui de l'industrie* », et a adressé aux jeunes lauréats ce message d'encouragement : « *Ayez la foi dans la science et dans le progrès [...] C'est vous qui allez façonner l'avenir !* ». « *Après Sarah Gayot en 2009, une deuxième jeune femme inscrit son nom au tableau d'honneur des Olympiades. Alors que nous célébrons le centenaire du prix Nobel de chimie de Marie Curie, ce palmarès est riche de promesses sur la contribution des femmes à la science* » a-t-il aussi déclaré conjointement à Gérard Férey, Médaille d'or du CNRS 2010. Notons que les jeunes femmes représentaient 45 % des finalistes.

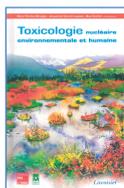
Les deux premiers ont rendez-vous sous la Coupole de l'Académie des sciences en octobre prochain pour y recevoir une médaille récompensant tous leurs efforts.

S. Bléneau-Serdel et R. Messal

• www.olympiades-chimie.fr

* Le thème des ONC est défini pour deux années et sera donc repris l'année prochaine.

Livres



Toxicologie nucléaire, environnementale et humaine

M.-T. Ménager, J. Garnier-Laplace, M. Goyffon (coord.)
748 p., 185 €
Éditions Tec & Doc, Lavoisier, 2009

La toxicologie est devenue en quelques années une discipline clé. La volonté de contrôler l'impact sur la santé et l'environnement des substances produites par l'industrie mobilisent toxicologues et écotoxicologues pour établir des diagnostics et construire des systèmes de normes. L'ampleur de cet ouvrage et le nombre de parutions dans la même famille, notamment chez cet éditeur, témoignent d'un effort constant pour structurer ces disciplines et assurer la formation de chercheurs, ingénieurs et techniciens, pour répondre aux besoins de l'industrie et des organismes de contrôle.

L'écologie et l'écotoxicologie nucléaires ne constituent certainement pas des disciplines nouvelles, mais intègrent au premier chef les aspects spécifiques

des interactions entre les radiations et la matière vivante dont les effets se manifestent pour des concentrations très faibles de radionucléides, bien plus faibles généralement que celles rencontrées avec des molécules stables.

Dans cet ouvrage, il s'agit moins de défendre et d'illustrer une discipline, même centrale, que de construire un champ interdisciplinaire mobilisant les connaissances, les méthodes de plusieurs disciplines allant de la géologie, la physique, la chimie à la biologie et à la médecine. Le comité rédactionnel, onze scientifiques essentiellement de l'IRSN et du CEA, et une centaine d'auteurs d'articles (IRSN, CEA, CNRS ou universitaires) sont des chercheurs et ingénieurs couvrant ces compétences variées, habitués au travail pluridisciplinaire. Il s'agit bien de construire un outil pour la formation et de fournir un appui pour traiter les problèmes auxquels sont confrontés les acteurs de terrain.

Cinq parties vont du plus général au particulier. La première traite du comportement des espèces dans la biosphère : spéciation, biodisponibilité et transferts ; on y trouvera notamment les concepts de base pour une évaluation dosimétrique pertinente des expositions aux radionucléides. La deuxième est consacrée aux mécanismes d'interactions aux niveaux moléculaire et cellulaire ; signalons un chapitre sur la nature des dommages à l'ADN

et les mécanismes de réparation. La troisième passe aux effets sur les grandes fonctions des organismes vivants et les conséquences sur la santé humaine et les écosystèmes ; les conséquences sanitaires chez l'homme et la synthèse des études épidémiologiques faites sur les radionucléides importants (plutonium, uranium, iode, tritium) sont particulièrement d'actualité. La quatrième est une synthèse par élément chimique pris parmi les plus importants dans la pratique : uranium, plutonium, césium, iode, cadmium, sélénium, cobalt, tritium, carbone 14. La cinquième, qui traite des champs d'application, est certainement la plus attirante pour les non-spécialistes ; on y trouve des chapitres sur la méthode d'évaluation du risque écologique et sanitaire, sur la biosphère et les déchets radioactifs, les biodétecteurs environnementaux, la bioremédiation des sols pollués et la recherche de nouvelles thérapeutiques en cas de contaminations.

Cet ouvrage doit se trouver dans toutes les bibliothèques des écoles d'ingénieurs et des universités qui veulent instituer une formation en toxicologie et écotoxicologie nucléaires et utilement dans les laboratoires de chimie qui s'intègrent, en permanence ou occasionnellement, dans ce vaste champ pluridisciplinaire.

Pierre Vermeulin



Sécurité des produits chimiques au laboratoire

150 fiches pratiques (3^e édition)
M.-H. Aubert, S. Bernier, A. Brendel, B. Diers (coord.), A.-M. Freyria, M. Karli, S. Munch, E. Vaganay
352 p., 38 €
CNRS-Dunod, 2011

Voilà un outil essentiel pour la prévention du risque chimique, réalisé par des personnels CNRS et Inserm sous la coordination de Brigitte Diers (chargée de mission « Hygiène et sécurité » et « Information scientifique et technique » au CNRS), qui s'adresse à tous les utilisateurs de produits chimiques en petites quantités, et particulièrement aux personnels des laboratoires de recherche, ainsi qu'aux enseignants, étudiants, médecins de prévention...

L'ouvrage se compose de fiches techniques de deux pages sur 150 produits couramment utilisés. La première page donne des informations pratiques, claires, synthétiques et vérifiées sur les dangers de ces produits, les conditions de stockage, de manipulation et d'élimination, et la seconde décrit la conduite à tenir en cas d'urgence.

Les grands changements instaurés par le règlement européen CLP (« Classification, Labelling and Packaging ») – nouvel étiquetage, nouveaux pictogrammes, nouvelles classifications – rendaient nécessaire une mise à jour des deux précédentes éditions (2001 et 2004), qui avaient reçu un franc succès : plus de 13 000 exemplaires vendus.

TOLUÈNE, Toluène
Méthylbenzène C₇H₈

N° CAS : 108-88-3
Liquide incolore mobile d'odeur aromatique agréable (produit pur)

	H225	Liquide et vapeurs très inflammables.
	H361d	Susceptible de nuire au fœtus.
	H304	Peut être mortel en cas d'ingestion et de pénétration dans les voies respiratoires.
	H373	Risque présumé d'effets graves pour les organes à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée.
	H315	Provoque une irritation cutanée.
	H336	Peut provoquer somnolence ou vertiges.

Informations toxicologiques
Toxicité aiguë : irritant pour la peau et les muqueuses (oculaires, digestives, respiratoires), dépressif du système nerveux central. En cas d'inhalation : dans un premier temps, fatigue, céphalées, vertiges. A très forte exposition : hallucination, excitation puis coma. En cas d'ingestion : nausées, vomissements, puis syndrome chémo, et coma.
Toxicité à long terme : dermatites irritatives. Psycho-syndrôme organique ultérieurement possible (fatigue, troubles du sommeil, troubles de la mémoire). **Toxicité pour la reproduction** : Repr. 2. Maladies professionnelles : tableaux 4 bis et 84 du régime général, 19 bis et 48 du régime agricole.

Incompatibilités
Réagit vivement avec les agents oxydants et acides forts. Éviter certains caoutchoucs et matières plastiques tels que le caoutchouc naturel, butyle, nitrile, polychloroprène, polyéthylène...

Stockage
Dans des locaux frais, secs, bien ventilés, à l'abri des rayons solaires, de toute source d'ignition et de chaleur, et à l'écart des produits incompatibles.

Manipulation
Éviter l'exposition pour les femmes enceintes ou qui allaitent. Suivre les consignes de manipulation des produits CMR. Porter une blouse, des lunettes de sécurité, des gants en alcool de polyvinyle (latex décontaminé). Travailler sous arborescence.

Élimination
Ne pas rejeter à l'évier. Conserver les déchets dans des récipients spéciaux pour ensuite les faire traiter par une société spécialisée.

Que faire en cas de... ?

Intoxication
Dans tous les cas, appeler immédiatement un médecin ou un secouriste (passer au SAMU ou au centre antipoison), même en l'absence de signes immédiats, en lui indiquant avec précision le produit ou le mélange manipulé.

Inhalation Soustraire très rapidement la victime à l'atmosphère toxique, en agitant ou avec la protection respiratoire adéquate.

Contact avec la peau Laver abondamment à l'eau pendant 15 minutes en retirant précautionneusement le plus tôt possible les vêtements souillés.

Contact avec les yeux Rincer immédiatement à l'eau pendant 15 minutes en écartant les paupières.
 Consulter un ophtalmologue.

Ingestion Ne pas faire vomir, ni boire.
 Appeler le 15 pour transfert immédiat de la victime en milieu hospitalier.

Feu
Alertez les secours, utiliser les moyens d'extinction appropriés et si nécessaire évacuez. Facilement inflammable. Mélanges air/vapeurs explosibles (à partir de 6 °C).
Moyen d'extinction approprié : extincteur à CO₂ ou à poudre.
Produits de combustion ou de décomposition : fumées abondantes toxiques (oxydes de carbone).

Dispersion accidentelle (fuite ou déversement)

Protection de l'environnement Ne pas rejeter à l'évier.

Épandage liquide Supprimer toute source d'inflammation.
 Aérer le local.
 Absorber le produit avec une matière inerte absorbante (papier absorbant spécial, vermiculite, sable sec).
 Ne recueillir le produit dans un récipient convenablement étiqueté.
Toujours intervenir avec les protections individuelles adéquates signalées dans la partie Manipulation.

Nettoyage/ Décontamination Laver abondamment à l'eau toute la zone contaminée tout en essayant de récupérer les eaux de lavage pour élimination ultérieure.



Travaux pratiques de chimie tout prêts

Classes préparatoires PC/BCPST-Véto, IUT/BTS/Licence

T. Barilero, A. Deleuze, M. Émond et H. Monin-Soyer

208 p., 15 €

Éditions ENS Rue d'Ulm, 2009

Il est des livres de TP de chimie très agréables à lire : c'est le cas de cet ouvrage. Compact, complet, il y est décrit un grand nombre de manipulations toutes très détaillées, illustrées de schémas simples et clairs, et enrichies d'un nombre important de questions auxquelles les réponses apportées sont toujours judicieuses et bien rédigées. Pour une première édition, on y trouve peu de coquilles, ce qui est à souligner.

Mais quel est l'objectif de ce livre ? Être un livre de laboratoire ? Regardons-le en détail. S'il s'agit d'un livre de manipulations, le lecteur doit pouvoir trouver un dosage, une synthèse ou un montage répondant à ce dont il a besoin. Ce n'est pas le cas, le classement est thématique (le zinc, la chimie thérapeutique, la vanilline, le pamplemousse, etc.). On peut néanmoins déplorer l'absence de sommaire détaillé par type de manipulation ou d'un index des techniques en fin d'ouvrage. Cette absence rend obligatoire la lecture complète de l'ouvrage pour y dénicher la manipulation intéressante, telle celle qui illustre la couverture, le « centilaboratoire ». De plus, nombre de manipulations décrites nécessitent un savoir-faire pour pouvoir les mettre en place. On ne trouve que trop rarement des indications à caractère expérimental.

Notons que rien n'est dit sur les appareils utilisés. Le livre fournit des résultats mais perd toute la dimension expérimentale qu'il est sensé valoriser. Devons-nous conclure qu'il s'agit d'un autre livre ? D'une certaine façon, oui. Il s'agit d'un hybride que l'on peut qualifier de livre d'exercices à caractère expérimental. Vu sous cet angle, ce livre est tout à fait réussi.

Passons maintenant aux critiques. Quelques petites remarques peuvent être faites. Par exemple, pourquoi encore donner quatre pK_A pour l'EDTA alors que cette molécule en compte six ? Cette censure très courante pose problème aux étudiants curieux. Pourquoi ne pas donner les structures des molécules d'orangé de xylénol, de l'EDTA ? L'absence de ces structures prive les étudiants d'une information importante : l'aspect structural de ces réactions (qui n'est pas le seul privilège de la chimie organique). Notons aussi que les spectres infrarouges sont dans l'ensemble inexploitable. On retrouve aussi des ambiguïtés dans le vocabulaire : l'utilisation d'ammoniaque plutôt que solution aqueuse d'ammoniac, ou d'hydronium à la place d'oxonium. On pourrait ainsi lister ces détails qui n'enlèvent rien au charme de ce livre.

Un autre aspect peut être un peu plus gênant. On parle de chimie expérimentale, mais à aucun moment il n'est fait mention de chiffres significatifs. Rien n'est donné sur la précision des techniques. L'absence de critique des résultats obtenus donne l'impression de lapins sortant du chapeau du magicien, que tous ces calculs ne sont que mathématiques. Lorsqu'un intervalle de précision est donné, il semble curieux, tel de dire que le point de fusion de l'acide benzoïque est compris entre 121 et 125 °C...

Ouvrons maintenant le débat. Si ce livre avait été un ouvrage de laboratoire, sous quelle forme aurait-on pu le présenter ? Peut-être sous une approche plus ouverte, moins directive.

Par exemple, on trouve p. 178 dans un protocole qu'il faut filtrer sur Célite®. Bien, les étudiants le feront. Mais plutôt que de demander à le faire, pourquoi ne pas inciter les étudiants à se poser la question du pourquoi ?

On a donc à faire à un livre fournissant des données à caractère expérimental. Quel usage peut-on en faire ? Le lire, tout simplement.

Xavier Bataille



La matière et l'énergie Construire ses connaissances en sciences par l'expérimentation (Fascicule 3)

F. Padilla, G. Soum, V. Frède, C. Butto

104 p., 18 €

Cépaduès, 2009

La collection « Construire ses connaissances en sciences par l'expérimentation » s'adresse aux professeurs des écoles pour enseigner la physique et la technologie au cycle 3 (CE2, CM1 et CM2), en accord avec les nouveaux programmes parus au *Bulletin Officiel* du 19 juin 2008. Elle comporte des expériences détaillées et des analyses qui, avec la participation active des élèves, permettent de dégager les connaissances à acquérir. Elle se compose de trois fascicules : « Le ciel et la Terre », « Les objets techniques » et « La matière et l'énergie ».

Seul ce troisième fascicule m'a paru exploitable en classe de CE2. Il présente l'enseignement de la matière et de l'énergie à l'école primaire en six séquences (précédées d'un chapitre de généralités) : les « États et changements d'état de l'eau », les « Mélanges et solutions », le « Maintien de la qualité de l'eau pour ses utilisations », « L'air et ses pollutions », « Les déchets » et « L'énergie », en accordant une bonne place à l'éducation au développement durable.

Les expériences proposées sont clairement expliquées et réalisables facilement en classe, avec du matériel simple. Les documents présentent une bonne lisibilité et certaines parties peuvent être photocopiées sans les réponses. Un CD-Rom regroupant toutes les images afin de pouvoir les visionner et les exploiter en classe serait un atout supplémentaire.

Cécile Bellec (enseignante en CE2)

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° 933 (avril 2011)

- Éditorial : Position de l'UdPPC sur le projet de programme de physique-chimie de la classe terminale en série S, par le Bureau national.
- Les divins arômes, par O. Fraisse et R. Bauduin.
- Les nouvelles mentions de danger du règlement CLP, par A. Mathis.
- Une séance de travaux pratiques pour comprendre le recyclage du papier au collège, par C. Valmalle, F. Laibe, J. Massin et V. Cavoret.
- AIC 2011 - La classification périodique : un dossier par semaine, par M. Izbicki.

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



© Czech Tourism.com



4th EuCheMS Chemistry Congress

August 26–30, 2012, PRAGUE, Czech Republic

With great pleasure and pride, we would like to officially invite you to attend the 4th EuCheMS Congress, taking place on 26–30 August 2012 in Prague, Czech Republic. The biannual congress will offer you a possibility to learn from experts in the field of chemistry, share experiences with companies, scientists, academics and debate about challenging topics.

Registering for The Congress means:

- attending almost 2000 scientific and professional practice paper presentations
- learning from international leading key note speakers
- joining an event, where both scientific and real business experts are brought together
- enjoying our social networking events
- explore the exhibition of companies and entrepreneurs from the field

Don't miss this opportunity! It's NOW time for Prague! Go to www.euchems-prague2012.cz for more information, to register and to submit your papers.

**Kind regards,
We are looking forward to seeing you
in Prague**

Congress Organisers

IMPORTANT DATES

Registration opening	May 2011
Online abstract submission opening	To be announced
Early registration deadline	May 5, 2012
Abstract submission deadline	May 5, 2012
Exhibition space booking deadline	May 31, 2012

NÜRNBERG 2010 RESULTS:

Total number of registrants	2'465
Countries represented	63
Oral lectures	532
Posters	1401

4th EuCheMS WILL BE HONOURED TO WELCOME A NUMBER OF RENOWNED SPEAKERS:

NOBELISTS

Ciechanover Aaron, Tumor and Vascular Biology Research Center, Haifa, Israel

Grubbs Robert H., California Institute of Technology, Pasadena, USA

Lehn J. M., Université Louis Pasteur, Strasbourg, and Collège de France, Paris, France

Tsien Roger Y., Howard Hughes Medical Institute La Jolla, USA

Wüthrich Kurt, The Scripps Research Institute, La Jolla, USA

Yonath Ada, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel

VIPs

Andrew Evans, University of Liverpool, Liverpool, UK

Bach Thorsten, Technische Universität München, Garching, DE

Bonacic-Koutecky Vlasta, Humboldt Universität zu Berlin, DE

Fürstner Alois, Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Mülheim/Ruhr, DE

Hudlický Tomáš, Brock University, St. Catharines, Canada

Knochel Paul, Ludwig-Maximilians-Universität, München DE

Lipshutz Bruce H., University of California, Santa Barbara, USA

Paterson Ian, University of Cambridge, Cambridge, UK

Reetz Manfred T., Max - Planck - Institut für Kohlenforschung, Mülheim/Ruhr, DE

Siegel Jay S., Organisch-chemisches Institut, Universität Zürich, CH

Snyder Scott A., Columbia University, New York, USA

Tureček František, University of Seattle, USA

Yamamoto Hisashi, The University of Chicago, USA

... and many more
to be confirmed and announced.

CONGRESS VENUE

Prague Congress Centre is one of the dominant points of the City of Prague. It is located on one of Prague's hills, which provides visitors with a beautiful view of the world famous Prague panorama where the silhouette of Prague Castle, together with a myriad of towers belonging to churches, cathedrals, palaces and ancient buildings from the historical centre, rise over the Vltava River and extensive parks.



MAIN CONGRESS TOPICS:

- Analytical chemistry Electrochemistry
- Education and History, Professional chemists
- Food Chemistry
- Environment, Energy and Green Chemistry
- Inorganic Chemistry
- Life Sciences
- Nanochemistry, Nanotechnology
- Organic Chemistry, Polymers
- Physical, Theoretical and Computational Chemistry
- Solid State Chemistry



8-10 juin 2011

GFSV 2011

17^e Journée du Groupe Français de Spectroscopie Vibratoire

Limoges

Thème : Matériaux, de la caractérisation à la modélisation.

• www.unilim.fr/spcts/-GFSV-.html

14-17 juin 2011

IMTEC

International micro technologies conferences and expo

Lyon

• www.imtec-expo.com

19-24 juin 2011

JFECO XVI

16^e Journées franco-espagnoles de chimie organique

Burgos (Espagne)

• www3.ubu.es/16jhisfrao

21-24 juin 2011

CHMC 2011

Renouveler le patrimoine de la chimie au XXI^e siècle

Paris

• www.chmc2011.fr

27-30 juin 2011

ICCDU XI

11th International conference on carbon dioxide utilization

Dijon

• www.ffc-asso.fr/ICCDU

28 juin-2 juillet 2011

France-Japan coordination chemistry symposium

Rennes

• www.france-japan-coordchem2011.univ-rennes1.fr

3-7 juillet 2011

EuCOMC XIX

EuCheMS international conference on organometallic chemistry

Toulouse

• www.eucomc2011.org

10-14 juillet 2011

75th Prague meeting on macromolecules

Prague (Rép. Tchèque)

Thème : « Conducting polymers: formation, structure, properties and applications ».

• www.imc.cas.cz/sympo/75pmm

10-15 juillet 2011

ESOC 2011

European symposium on organic chemistry

Hersonissos (Crète)

• www.esoc2011.com

10-15 juillet 2011

ISOM XIX

International symposium on olefin metathesis and related chemistry

Rennes

• <http://isom19.univ-rennes1.fr>

11-14 juillet 2011

Synthesis in organic chemistry

22nd International symposium

Cambridge (Royaume-Uni)

• www.rsc.org/ConferencesAndEvents/conference/alldetails.cfm?evid=105329

24-29 juillet 2011

ISNA 14

14th International symposium on novel aromatic compounds

Eugene (OR, États-Unis)

• www.isna14.org

25-27 juillet 2011

Analytical research forum 2011

Manchester (Royaume-Uni)

• www.rsc.org/ConferencesAndEvents/RSCConferences/ARF11/index.asp

30 juillet-5 août 2011

ICHC 2011

23rd International congress on heterocyclic chemistry

Glasgow (Royaume-Uni)

• www.ichc2011.com

7-12 août 2011

ICBIC 15

International conference on bioinorganic chemistry

Vancouver (Canada)

• <http://icbic15.ubccconferences.com/index.php/conference-program>

7-12 août 2011

ICP 2011

25th International conference on photochemistry

Pékin (Chine)

• www.conferencenet.org/conference/ICP2011.htm

14-19 août 2011

Goldschmidt 2011 conference

Prague (Rép. Tchèque)

Thème : « Bridging the gap between atomistic pore and continuum scale models ».

• www.goldschmidt2011.org

21-25 août 2011

ASMC11

4th International symposium on advances in synthetic and medicinal chemistry

Saint-Petersbourg (Russie)

• www.ldorganisation.com/produits.php?langue=english&cle_menus=1238915414&cle_data=1238740770

28 août-1^{er} septembre 2011

ICRR 2011

14th International congress of radiation research

Varsovie (Pologne)

• www.icrr2011.org

28 août-2 septembre 2011

GECO 52

Groupe d'étude de chimie organique

Aber Wrac'h (Brest)

• www.univ-brest.fr/geco52

29-31 août 2011

BIOPOL 2011

3rd International conference on bio-degradable and biobased polymers

Strasbourg

• <http://biopol.unistra.fr>

2-5 septembre 2011

ISACS 6

Challenges in organic materials and supramolecular chemistry

Beijing (Chine)

• <http://rsc.org/ConferencesAndEvents/ISACS/OrganicMaterialsAndSupramolecularChemistry/Home.asp>

4-8 septembre 2011

5th EuCheMS conference on nitrogen ligands

Grenade (Espagne)

• www.ugr.es/~nligands

12-15 septembre 2011

Euromat 2011

Materials science and its applications

Montpellier

• <http://euromat2011.fems.eu>

18-23 septembre 2011

3rd INCC

International nuclear chemistry congress

Palerme (Italie)

• <http://3rdincc.mi.infn.it>

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



Nomination d'une chargée de mission

Lors de sa réunion du 4 avril dernier, le Conseil d'administration a confirmé la proposition du Bureau de confier au professeur **Élisabeth Bordes-Richard** une double mission : d'une part de développer les relations entre l'échelon national (Conseil d'administration et Bureau) et les entités opérationnelles de la SCF (divisions scientifiques, sections régionales, groupes thématiques et clubs de jeunes sociétaires), et d'autre part de faciliter les relations entre ces dernières.

Cette nomination résulte d'une des recommandations principales exprimée lors du séminaire SCF de novembre dernier qui portait sur la nécessité d'une plus forte interactivité de toutes les entités de la SCF, entre elles, et avec les entités décisionnelles (Conseil d'administration et Bureau de la SCF).

Prochain séminaire SCF

Le second séminaire SCF se tiendra les **18 et 19 octobre 2011** en région parisienne. Y sont conviés comme l'an dernier les membres élus du Conseil d'administration, les présidents de divisions scientifiques et de sections régionales, et des représentants des groupes thématiques et des clubs de jeunes sociétaires.

De plus amples informations seront communiquées avant la tenue du prochain Conseil prévu le 5 juillet, réunion qui suivra l'Assemblée générale ordinaire de la SCF. Tout membre de la SCF peut contacter la ou les entités opérationnelles qui lui sont proches, ou le secrétariat général, pour leur faire part de ses remarques ou exprimer ses souhaits.

Financement de l'Année internationale de la chimie

À la demande du Comité Ambition Chimie, la SCF est chargée de ventiler auprès des porteurs de projets retenus la subvention accordée par le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (MESR). Rappelons que les projets soumis et labellisés par le Comité d'évaluation *ad hoc* ont été réexaminés dans cette perspective d'un financement MESR. Fin avril, 47 projets soutenus financièrement par le MESR s'ajoutent ainsi aux 29 projets déjà financés par la subvention de la Fondation de la Maison de la Chimie.

Le Bureau de la SCF

Prix des divisions 2011

Catalyse



• Claude Descorme

De 1993 à 1996, Claude Descorme a préparé sa thèse au Laboratoire d'application de la chimie à l'environnement (LACE, Université de Lyon), sous la direction de Michel Primet et Patrick Gélin. Ses travaux, en collaboration avec Gaz de France, portaient sur l'élimination des oxydes d'azote par le méthane.

Lauréat de la bourse Lavoisier du Ministère des Affaires étrangères, il part rejoindre l'équipe du professeur Gabor Somorjai à l'Université de Berkeley pour un stage post-doctoral. Sous l'angle de la science des surfaces, il travaille alors à une meilleure compréhension du mécanisme de la combustion catalytique des alcanes pour la production d'énergie.

Recruté au CNRS en octobre 1998, il rejoint le Laboratoire de catalyse en chimie organique (LACCO, Université de Poitiers) pour travailler avec Daniel Duprez sur les phénomènes de mobilité de surface en catalyse et leurs implications en termes d'activité et de sélectivité. Il développe également à partir de 2000 un nouvel axe sur la

production et la purification de l'hydrogène. En 2003, l'ensemble de ces travaux lui vaut la Médaille de bronze du CNRS.

Après avoir bénéficié d'une mise à disposition d'une année auprès du groupe Total au Centre de recherche Rhône-Alpes d'Atofina à Pierre Bénite pour travailler sur l'oxyfluoruration directe pour la production propre d'hydrofluorocarbones, il rejoint l'Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon (IRCELYON) en janvier 2005. Chargé de recherche, il y travaille depuis avec Michèle Besson sur le traitement de l'eau par oxydation en voie humide catalytique. Il est plus particulièrement en charge de la recherche de matériaux innovants, notamment à base d'oxydes de terres rares.

Le prix lui sera remis lors des journées GECat-GFZ 2011.

• 23-26 mai, à Arêches (www.gecat.fr).

Jean Tirouflet n'est plus

C'est avec une grande tristesse que nous avons appris le décès de Jean Tirouflet, membre correspondant de l'Académie des sciences et professeur émérite de l'Université de Bourgogne, qui fut l'un des promoteurs dans les années 70 de la chimie organométallique en France. Il avait organisé notamment les écoles d'été de Solignac en 1975 et 1977. Certains se remémoreront également deux fameuses conférences qu'il avait organisées à Dijon en 1979 et 1982 et qui ont beaucoup fait pour la visibilité internationale de la chimie organométallique française. Jean Tirouflet avait reçu en 1975 le prix Le Bel de la SCF.

Le Bureau de la SCF, au nom de tous, présente à sa famille, ses amis, ses anciens élèves et collègues de l'Université de Bourgogne, ses plus sincères condoléances.

L'Actualité Chimique lui rendra hommage dans le prochain numéro.

Prochaines manifestations

10 septembre 2011

Colloque

« Recherche-Enseignement 2011 »

ESPCI, Paris

Lors de cette journée destinée plus particulièrement aux professeurs de chimie des collèges, lycées, classes préparatoires et IUT*, sept conférenciers feront le point sur un domaine de la chimie :

- **Audrey Auffrant** (École Polytechnique, Palaiseau), Médaille de bronze du CNRS 2010 : *Recherches sur la conception d'édifices organométalliques possédant des propriétés réactionnelles ciblées*.

- **Bruno Chaudret** (LCC CNRS, Toulouse), prix Pierre Süe de la SCF 2010 : *Chimie organométallique et nanochimie*.

- **Frédéric Dardel** (Université René Descartes, Paris), prix Pierre Desnuelle de l'Académie des sciences 2010 : *L'introduction en France de nouvelles techniques d'analyse par RMN de la structure de macromolécules biologiques*.

- **Sylvie Derenne** (Université Pierre et Marie Curie, Paris), Médaille d'argent du CNRS 2009 et prix Grammaticakis-Neuman de l'Académie des sciences 2009 : *Géochimie et cosmochimie organique*.

- **Gérard Férey** (Université de Versailles Saint-Quentin), Médaille d'or du CNRS 2010 : *Les solides poreux hybrides*.

- **Ludwik Leibler** (ESPCI, Paris), prix Pierre Süe de la SCF 2009 et prix de l'IFP de l'Académie des sciences 2009 : *Chimie des polymères et caoutchouc auto-cicatrisant*.

- **Karinne Miquieu** (Université de Pau et des Pays de l'Adour), Médaille de bronze du CNRS 2010 : *Études physico-chimiques de la réactivité des composés à liaisons inhabituelles et de complexes organométalliques à modes de coordination inusuels*.

* Voir *L'Act. Chim.*, 2011, 350, p. 58.

• www.societechimiquedefrance.fr/fr/colloque-de-la-recherche-a-l-enseignement.html

9 novembre 2011

Journée du club Histoire de la chimie

Paris

Appel à communications

Journée commune avec la Société d'histoire de la pharmacie sur le thème :

« La pharmacie dans les ouvrages de chimie (XVII-XX^e siècles) ».

• **Date limite de réception des résumés :**

15 juillet 2011.

danielle.fauque@u-psud.fr

Concours jeunes AIC 2011

Quelques dates à retenir :

- Inscrivez-vous de préférence **avant le 15 mai**.
- Déposez vos documents **avant le 10 juin**.

Le jury se réunira le 23 juin.

Deux représentants de chaque équipe lauréate seront invités à la remise des prix par la SCF lors d'une cérémonie qui aura lieu le 6 juillet.

• www.concours-jeunes-aic2011.fr

Concours du plus beau timbre chimique

Ce concours international s'adresse aux jeunes étudiants qui devront montrer le rôle de la chimie dans notre culture et notre vie quotidienne. Les timbres lauréats seront publiés sur le site de l'IUPAC et exposés lors de la cérémonie de clôture de l'AIC à Bruxelles en décembre.

Alors vite à vos crayons, la compétition prend **fin le 15 juin** !

• www.chemistry2011.org/participate/activities/show?id=110

Et aussi...

Un timbre à l'effigie de Marie Curie



Dans le cadre de l'AIC, La Poste a célébré le centième anniversaire de l'attribution du prix Nobel de chimie à Marie Curie en émettant un timbre de 0,87 € à son effigie

(ce qui correspond à un affranchissement pour une lettre internationale jusqu'à 20 g à destination du monde entier). Il est en vente dans les bureaux de poste et dans la boutique web du timbre.

• <http://timbres.laposte.fr>

La classification périodique, un dossier par semaine

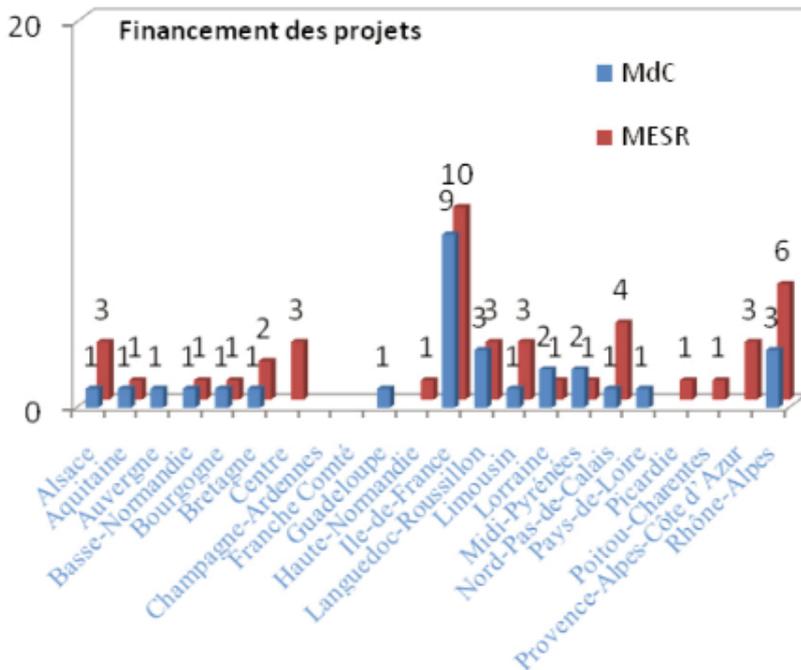
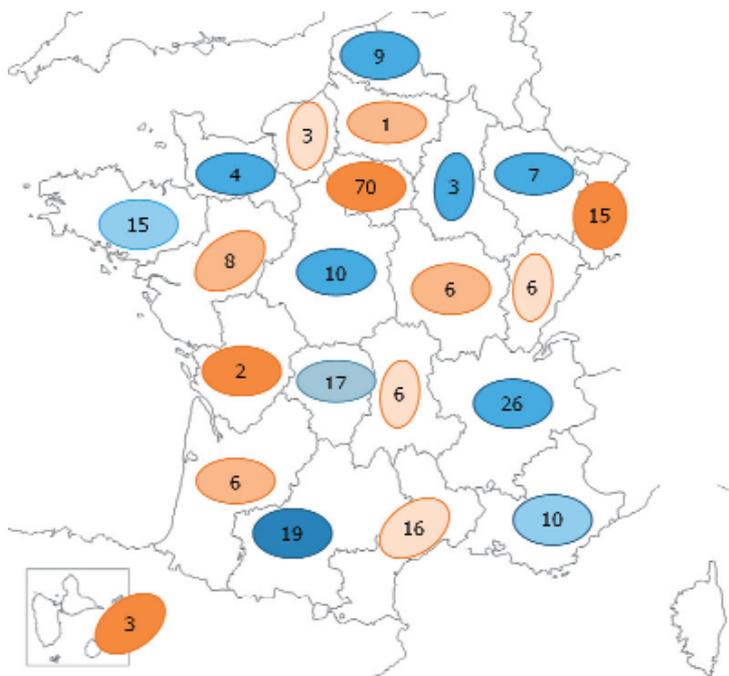
À l'occasion de l'AIC, l'Union des professeurs de physique et de chimie (UdPPC) vous donne rendez-vous sur son site chaque semaine avec un dossier illustrant un aspect de la classification périodique : un élément, une famille d'éléments, les différentes classifications, etc. Vous y trouverez aussi un mot croisé hebdomadaire « pour chimistes et physiciens ». « *Élément qui fait parfois dans la dentelle* » en deux lettres... ?

De nombreux projets partout en France !

L'Année internationale de la chimie donne lieu à une grande mobilisation sur tout le territoire. Fin mars, 262 projets se déclinent chacun en deux, trois, voire quatre actions labellisées et sont mis en place dans toutes les régions (voir *carte*). Certains de ces projets ont été soutenus financièrement via le Comité Ambition Chimie,

soit par des fonds de la Maison de la Chimie (MdC), soit grâce à une subvention accordée par le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (MESR) (voir *figure*).

Venez vite les découvrir sur www.chimie2011.fr !



Et bien sûr, n'oublions pas le fameux produit du jour de la Société Chimique de France, où le caramel du 1^{er} avril a fait sensation...

• *Dossiers et mots croisés déjà parus en téléchargement libre sur :*

www.udppc.asso.fr/national/index.php/component/content/article/41/184-projet-udppc-autour-de-la-classification-periodique

Le produit du jour :

www.societechimiquedefrance.fr/spip.php?page=produit_du_jour

le dossier

La célébration du centenaire du prix Nobel de chimie de Marie Curie
Robert Guillaumont et Jean-Pierre Vairon (coordinateurs)



**l'actualité
chimique**

publié avec le n° 352 de L'Actualité Chimique, mai 2011

La célébration du centenaire du prix Nobel de chimie de Marie Curie

Robert Guillaumont et Jean-Pierre Vairon, coordinateurs du dossier

Cette célébration, organisée par le Comité National de la Chimie (CNC), se place dans le cadre de l'Année internationale de la chimie (AIC)⁽¹⁾ et des manifestations françaises de cette année particulière⁽²⁾. En raison des liens historiques qui lient la Pologne et la France autour de Marie Curie, les Académies des sciences et les sociétés chimiques de Pologne et de France se sont associées pour célébrer conjointement cet événement dans les deux pays. Le lancement des manifestations de cette célébration a eu lieu le 29 janvier dernier à la Sorbonne lors d'une cérémonie placée sous le haut patronage du Président de la République française, Nicolas Sarkozy, et du Président de la République de Pologne, Bronislaw Komorowski. Une cérémonie de clôture aura lieu au Château Royal de Varsovie fin novembre. Entre temps, de nombreuses manifestations vont se poursuivre tant en France qu'en Pologne⁽³⁾.

La célébration du 29 janvier s'est déroulée dans le Grand Amphithéâtre de la Sorbonne. La matinée a été consacrée à la cérémonie officielle en présence des hautes autorités gouvernementales, diplomatiques et scientifiques des deux pays, et de personnalités étrangères de haut niveau tant diplomatiques que scientifiques. L'après-midi a été consacré à une manifestation grand public, avec des interventions de scientifiques et humanistes de renom pour évoquer trois aspects de l'œuvre et la personnalité de Marie Skłodowska-Curie : la femme scientifique, la femme d'exception et le précurseur de la science contemporaine.

L'ensemble des interventions sera accessible sur le site d'Universcience⁽⁴⁾. Ce dossier de *L'Actualité Chimique* reprend les interventions officielles prononcées par Gérard Férey – au nom de la Société Chimique de France et de la communauté des chimistes français –, et de Jean-Louis Missika, adjoint au maire de Paris, chargé de l'innovation, de la recherche et des universités, et Jacques Prost, directeur de l'ESPCI ParisTech – dont nous tenions à souligner le rôle essentiel dans la carrière de Marie Curie –, ainsi que les deux conférences qui ont été données durant la matinée.

Cette cérémonie s'inscrit dans la longue suite de célébrations qui ont eu lieu pour témoigner de l'importance capitale des découvertes de Marie Curie pour la progression des connaissances en science et de l'influence de cette femme d'exception dans le milieu scientifique et social français, mais aussi européen, dominé au tournant du XIX^e siècle par des idées pour le moins peu progressistes. À cette époque, rares étaient les femmes qui accédaient à la science, et aucune ne s'y était illustrée. Le prix Nobel de chimie décerné à Marie Curie en 1911 a démontré avec éclat qu'elle était enfin reconnue pour sa valeur personnelle.

En 1911, Marie Curie était célèbre et au sommet d'une brillante carrière. Elle était déjà prix Nobel de physique, membre de six Académies des sciences étrangères et de nombreuses sociétés scientifiques et avait reçu de nombreux prix. Les applications du radium étaient largement connues du public. Elle venait d'être invitée au premier congrès Solvay qui réunissait les plus grands savants sur le thème de « la théorie des rayonnements et des quantas ». Marie Curie a été nommée pour le prix Nobel de chimie de 1911 pour ses travaux sur le polonium et le radium, mais ce



Frédéric Mitterrand, ministre de la Culture et de la Communication (à droite) accueille l'épouse du Président de la République polonaise, Mme Anna Komorowska. © UPMC/Pierre Kitmacher.

qui avait surtout marqué les membres des commissions Nobel était la préparation du radium à l'état métallique qu'elle venait de réussir en 1910 en distillant un amalgame pour obtenir 80 mg de métal. C'était la preuve irréfutable de l'existence d'un élément et Marie Curie l'avait bien compris. L'« Entreprise » dans laquelle elle s'était lancée en 1897 n'avait pas d'autre but. C'est au prix d'immenses efforts et en engageant sa vie qu'elle est parvenue à la conduire à son terme. Le 7 novembre 1911, l'Académie des sciences suédoise votait et rendait publique sa décision : le prix Nobel de chimie est attribué à Marie Curie pour « service rendu au développement de la chimie par les découvertes des éléments radium et polonium, par l'isolement du radium et l'étude de la nature et des composés de ce remarquable élément »⁽⁵⁾.

La mémoire collective a retenu de Pierre et Marie Curie qu'ils avaient découvert le radium et que Marie l'avait isolé au prix d'un travail titanesque. Le radium est rapidement devenu un élément aux vertus médicales avérées dans le traitement de certains cancers et supposées dans d'autres emplois cosmétiques ou paramédicaux. Les scientifiques considèrent que leurs travaux ont initié un flux de grandes découvertes qui a généré la science moderne, une science qui, depuis cette fameuse aube du XX^e siècle, s'est vouée à la compréhension du monde de l'infiniment petit. Les chimistes considèrent que les découvertes de Marie Curie ont initié la compréhension profonde de la réaction chimique en permettant de suivre individuellement les éléments marqués par un indicateur radioactif et qu'elles ont permis, en ouvrant une nouvelle voie à la chimie – la radiochimie –, l'étude de la matière radioactive mise en œuvre dans l'exploitation de l'énergie nucléaire.

(1) www.chemistry2011.org

(2) www.chimie2011.fr

(3) <http://msc100.eu>

(4) www.universcience.fr

(5) Marie Skłodowska-Curie – a special issue commemorating the 100th anniversary of her Nobel Prize in Chemistry, *Chemistry International*, janv.-fév. 2011, 33(1).

Photo de couverture : © Comité National de la Chimie/Musée Curie/FG Events.

Allocution prononcée par Gérard Férey

Membre de l'Académie des sciences, vice-président de la Société Chimique de France et Médaille d'or du CNRS



Collections du Musée Marie Skłodowska-Curie à Varsovie.

« Madame Skłodowska-Curie,

Je dois vous dire que le scientifique que je suis a honte de ses anciens. Laissez le Français que je suis ne pas comprendre la manière dont vous avez été bafouée, traînée ignominieusement dans la boue. Laissez l'académicien que je suis dire combien je regrette que ma confrérie – de l'époque ! – n'ait eu ni l'honnêteté, ni l'élégance de vous accueillir en son sein, simplement parce que vous étiez une femme, pourtant la première à avoir été professeur à la Sorbonne seulement quinze ans après être arrivée à Paris, pourtant – déjà à cette époque – la seule au monde à avoir jamais reçu deux prix Nobel. En l'occurrence, Alfred de Vigny avait raison de dire :

*« Hélas ai-je pensé, malgré ce grand nom d'hommes,
Que j'ai honte de nous, débiles que nous sommes ! »*

Laissez par contre le scientifique que je crois être vous dire l'infinie admiration que notre génération vous porte. Vous étiez un génie, vous êtes devenue un mythe, vous « la petite étudiante bien sage » qu'adorait votre mari Pierre.

Nous qui vous connaissons, Marie Curie, votre exemple nous a tout appris :

- en tant que chercheurs, en tant que chimistes, la curiosité, l'opiniâtreté, l'inflexibilité de la rigueur expérimentale et même la pluridisciplinarité 80 ans avant qu'elle ne devienne à la mode (évidemment, avec un Nobel et de physique et de chimie...).

- plus encore, même si c'est un aspect méconnu, savoir développer des relations industrielles internationales, rien

que par votre aura, que ce soit avec Carnegie ou Owens, aux États-Unis, avec Louis Renault (les « petites Curie »), et vous n'êtes pas étrangère, je crois, à la création de la Compagnie générale de radiologie...

Vous les impressionniez tous, depuis vos élèves – je cite M^{me} Gleditsch : « Il n'y avait pas un seul de ses étudiants qui ne fût pas frappé par l'étendue de son savoir, par la clarté lumineuse de sa pensée qui saisissait toujours l'essentiel d'un problème, si compliqué qu'il fût » – jusqu'à deux Présidents des États-Unis qui vous réservèrent un accueil d'homme – pardon ! de femme – d'État...

J'aime cet hommage qu'Albert Einstein vous a rendu :
« Madame Curie est, de tous les êtres célèbres,
le seul que la gloire n'a pas corrompu. »

Votre rigueur intellectuelle et votre humanisme vous donnaient une foi de charbonnier dans la recherche fondamentale, dont vous considérez les résultats comme un don à l'humanité. C'est la raison pour laquelle vous et Pierre avez toujours refusé de breveter les matériaux radioactifs.

Tard, très tard, la France vous a rendu hommage. Vous reposez désormais avec Pierre au Panthéon. Vous y êtes la seule scientifique. Madame Berthelot ne l'était pas. Cette fois, on devrait dire :

« À la grande Dame, sa seconde Patrie reconnaissante » !

Alors je crois, Mesdames et Messieurs les Ministres, Messieurs les Ambassadeurs, Monsieur le Recteur, Mesdames et Messieurs les Présidents, mes chers Collègues, que vous serez d'accord avec moi pour dire :

« Marie, je vous salue ! »

Gérard Férey

Grand Amphithéâtre de la Sorbonne, le 29 janvier 2011



Allocution prononcée par Jean-Louis Missika et Jacques Prost

Adjoint au maire de Paris, chargé de l'innovation, de la recherche et des universités, et directeur de l'ESPCI ParisTech, respectivement

« Marie Curie est la femme scientifique la plus connue au monde.

Cette affirmation est-elle fondée ? La plus connue ? Vraiment ? On commence alors à essayer de trouver d'autres noms de « femmes scientifiques connues »... Soyons francs : c'est d'abord le trou noir. Et puis, en cherchant bien, quelques noms émergent : Sophie Germain, Emmy Noether, Rosalind Franklin ? Diane Fossey ? Qui d'autre... Non, décidément, personne n'arrive au niveau de notoriété de Marie Curie qui reçut son second prix Nobel en 1911, il y a cent ans. La réalité de Marie Curie aujourd'hui est véritablement celle d'un rayonnement international unique et extraordinaire.

Une anecdote tout à fait concrète illustre cette notoriété : son caveau, pas très loin d'ici, dans la crypte du Panthéon, est régulièrement orné de petits bouts de papier – tickets de métro, pages de carnet déchirées, etc. – laissés par les touristes, et sur lesquels ils écrivent leurs hommages. On y reconnaît des langues européennes qui nous sont familières, mais aussi d'autres qui le sont beaucoup moins : le coréen avec son écriture carrée, l'arabe délié, les kanji japonais ou chinois... La réalité de Marie Curie, aujourd'hui, est là : des ténèbres de la crypte du Panthéon, Marie rayonne sur la planète entière.

Comment cela a-t-il été possible ?

C'est une belle jeune femme qui arrive à 24 ans à Paris. Elle suit à la Sorbonne, ici même, les cours de Brillouin, Lippmann, Painlevé et Poincaré. Ses résultats sont brillants. Trois ans plus tard, elle rencontre Pierre Curie : ils tombent amoureux ! Il faut dire que Marie a du charme. On donne trop souvent une image austère de Marie, associée à une image austère de la science. C'est au contraire une image vivante et séduisante qui représente le mieux Marie et la science ! Major « d'agrég » en 1896, elle donne naissance à Irène en 1897 et simultanément commence sa thèse à l'ESPCI sous la direction de Pierre.

Les résultats sont spectaculaires : thèse et prix Nobel simultanément ! Les chimistes suédois, pris de court en 1903, se rattrapent en 1911 et donnent à Marie le second prix Nobel, que l'on célèbre aujourd'hui.

En 1903, le prix Nobel existe depuis seulement deux ans et en 1911, il en a seulement dix. C'est un jeune prix, en quête de prestige. Ce sont les grands scientifiques comme Marie et Pierre Curie qui lui ont apporté sa crédibilité et son éclat, non l'inverse !

Les travaux du couple Curie contribuent à asseoir à l'ESPCI une attitude peu courante en France. Pierre et Marie touchent aux fondements les plus profonds de la structure de la matière, mais simultanément ils brevettent leurs appareils, s'intéressent aux applications ainsi qu'aux problèmes de société. Nous avons beaucoup d'admiration

pour le souci que Marie a de mettre son immense talent au bénéfice de tous. Par exemple, elle contribue à mettre au point des unités radiographiques transportables pendant la Première Guerre mondiale, allant jusqu'à passer son permis de conduire pour aller au plus près du front ! Prenant à son compte la culture de l'ESPCI initiée par Charles Lauth et Paul Schützenberger, elle va chercher à valoriser son savoir et son savoir-faire en créant sa propre « start-up » : l'Institut du Radium à Paris, qui deviendra l'Institut Curie.

Que reste-il aujourd'hui à l'ESPCI de cet état d'esprit donné par ces aînés visionnaires ?

L'ESPCI a accueilli des femmes dans ses promotions d'ingénieur dès... 1917. Leur pourcentage est en général de l'ordre de 40 %, ce qui n'est pas parfait mais très supérieur à la moyenne mondiale. Marie Curie n'y est très certainement pas pour rien.

Marie Curie, c'est aussi le symbole de la science expérimentale, des résultats d'expérience exceptionnels qu'on obtient au laboratoire. Ce succès a inspiré et validé le choix pédagogique que l'ESPCI met en œuvre depuis plus de 125 ans : enseigner le savoir, mais aussi le savoir-faire. Mettre en évidence l'existence d'un nouvel élément chimique – découverte du radium et du polonium – et isoler le radium pur par des techniques électrochimiques ne s'apprend pas sur iTunes U mais au laboratoire. Résoudre un problème industriel, en R & D ou en production, nécessite de savoir ce qui marche et ce qui ne marche pas, à la paillasse, au labo, dans les usines. Les chercheurs et les ingénieurs de l'ESPCI suivent l'exemple de Marie Curie : ils mettent la main à la pâte, comme aurait dit Georges Charpak. On a besoin de ces étudiants, de ces ingénieurs et de ces chercheurs qui, comme Marie Curie, sont passionnés par la science et l'innovation concrète : l'ESPCI les forme.

Nous aimons aussi toujours recruter des talents originaux, ceux qui ne sont pas dans le moule, comme Pierre-Gilles de Gennes et Georges Charpak hier. Aujourd'hui, Janine Cossy, Jacques Lewiner, Mathias Fink ou Jérôme Bibette créent des start-up, tout en contribuant de manière profonde à la compréhension du monde qui nous entoure. Marie Curie était ce que l'on appelle de nos jours un « recrutement étranger », tout comme Georges Charpak hier et Ludwik Leibler aujourd'hui (professeur associé à l'ESPCI, directeur du laboratoire Matière molle et chimie et inventeur en 2008 du caoutchouc auto-cicatrisant, découverte qui a eu un retentissement international considérable). Comme Marie Curie, ils sont polonais d'origine : l'ESPCI a continué à attirer des scientifiques étrangers brillants ! Espérons que les années à venir nous donnent de nouvelles « Marie » ! »

Jean-Louis Missika et Jacques Prost

Grand Amphithéâtre de la Sorbonne, le 29 janvier 2011

Marie Skłodowska Curie, le polonium, le radium et la radiochimie

Robert Guillaumont

L'aura de Marie Curie, femme d'exception à plusieurs titres, s'est perpétuée sans faiblir depuis le début du XX^e siècle [1]. Au-delà de tout ce qui l'a élevée au rang de célébrité, les scientifiques retiennent surtout qu'elle est la première femme à avoir pleinement participé à la fondation de la science moderne, dans un contexte qui en a fait aussi la première femme symbole de l'égalité des sexes en science. On pourrait associer le qualificatif de « première femme » ou de « seule femme » à de nombreuses distinctions qu'a reçues Marie Curie, d'honneurs et d'hommages solennels rendus par la société aux illustres personnalités. Elle a été couronnée par deux prix Nobel : celui de physique en 1903, avec Pierre Curie et Henri Becquerel – elle avait 36 ans – et celui de chimie en 1911, respectivement pour son travail sur la radioactivité naturelle et les découvertes de deux éléments chimiques, le polonium (Po) et le radium (Ra), qui existaient sur Terre depuis les temps géologiques.

Mon témoignage portera aujourd'hui sur quelques aspects de l'apport incontestable de Marie Curie à la chimie. Cet apport a été considérable, comme il l'a d'ailleurs été en physique. Il faudrait beaucoup de temps pour en parcourir tous les aspects. Je limiterai mon propos en évoquant comment la méthodologie développée par Marie Curie en découvrant le polonium et le radium a contribué à des découvertes scientifiques majeures, lesquelles ont ponctué le développement de la science en général et ont particulièrement enrichi la chimie (figure 1). Je n'évoquerai pas les autres travaux de Marie et Pierre Curie qui ont conduit à l'industrie du radium et à la métrologie de la radioactivité, activités sans lesquelles il n'y aurait pas eu d'applications médicales.

Apport considérable ! En effet, Marie Curie a jeté les fondements d'une nouvelle direction de la chimie : la chimie de la matière radioactive, qu'elle soit visible ou invisible, c'est-à-dire la radiochimie [2]. Aujourd'hui, la radiochimie est une branche de la chimie qui a ses propres méthodes et ses

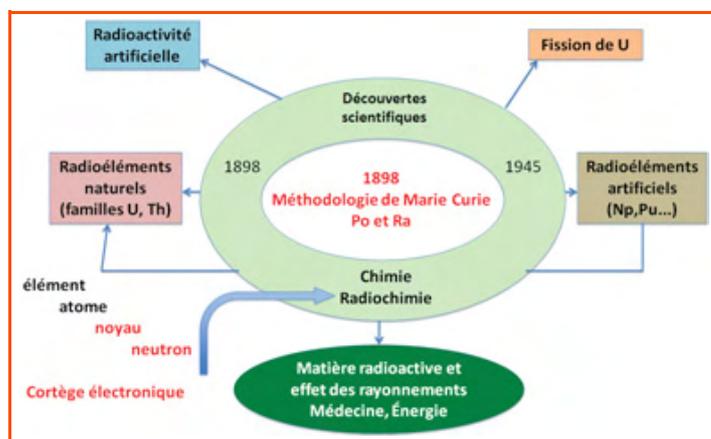


Figure 1 - Organisation des découvertes initiées par l'utilisation de la méthodologie de Marie Curie.

On notera que tous les isotopes des radioéléments artificiels ont pour descendants des isotopes des radioéléments naturels, de sorte qu'à terme tous les éléments transuraniens se transformeront en radioéléments naturels.

propres objectifs dans l'étude des propriétés chimiques de la matière radioactive, propriétés non dissociables des effets chimiques des rayonnements ionisants. La radiochimie sous-tend tous les domaines de la recherche utilisant la radioactivité et tous les domaines de l'« industrie du nucléaire » mettant en œuvre cette matière.

Découvertes majeures ! En effet, la méthodologie de Marie Curie allait permettre de découvrir tous les radioéléments naturels, de donner les preuves chimiques de la création d'une radioactivité artificielle et de la fission de l'uranium, et finalement de découvrir la famille des éléments actinides, radioéléments artificiels dont le plus connu est le plutonium. Ces quatre découvertes ont nécessité la préparation d'intenses sources de rayonnements de polonium ou de radium, ou de sources à base de Po ou de Ra. Les trois dernières découvertes en 1934, 1938 et 1941 ont bouleversé notre mode de vie par les innombrables applications qui en ont été faites. Il s'est agi essentiellement de l'utilisation des radionucléides pour explorer la matière inerte et vivante, du développement de la médecine nucléaire et de la libération de l'énergie nucléaire.

De l'apport des travaux de Pierre et Marie Curie en physique, je dirai simplement que les sources de polonium et de radium ont permis de découvrir l'existence du noyau des atomes (1911) et du neutron (1932). Ces découvertes ont été capitales pour l'essor de la physique au tournant du XIX^e siècle, puis pendant quelques décades, mais elles ont été aussi capitales pour l'unification de la chimie, car de la physique est née la compréhension de l'organisation du cortège électronique de l'atome autour du noyau, clé de la chimie moderne.

Au final, si l'on s'en tient au domaine de la science pure, les découvertes du polonium et du radium ont conduit à d'importantes transitions conceptuelles, voire des ruptures, en chimie et en physique.

Depuis les travaux de Marie Curie, les physiciens ont totalement maîtrisé les multiples aspects de la « radioactivité » et les radiochimistes ont maîtrisé le comportement de la « matière radioactive ». Tous les domaines de la science en bénéficient. Les règles de radioprotection et la réglementation sanitaire vis-à-vis des rayonnements ionisants en découlent.

La conférence Nobel de Marie Curie en 1911

Dans sa conférence Nobel, « Le radium et les nouveaux concepts en chimie », Marie Curie aborde différents points qui n'ont pas directement trait à la chimie qu'elle a développée pour isoler le polonium et le radium de la pechblende. Elle rappelle que la radioactivité de l'uranium (U) et du thorium (Th) est une propriété atomique et elle fait le point sur ce que l'on connaît en 1911 des phénomènes radioactifs, grâce en particulier à l'utilisation, dès 1899, du polonium et du radium.

Comme elle le note, le « *bond des connaissances a été prodigieux* », notamment de 1899 à 1903. Elle mentionne les

apports d'Ernest Rutherford (prix Nobel de chimie 1908) et de Frederik Soddy (qui sera prix Nobel de chimie en 1921) qui ont donné des clés pour déchiffrer les transformations spontanées radioactives émettant des rayons alpha ou bêta selon des lois de décroissance identifiées, mais elle souligne que l'origine des émissions des rayons reste inconnue. En 1903, on avait déjà montré que le radium donne une émanation, un gaz liquéfiable, et que les rayons alpha du Ra et du Po donnent de l'hélium : un élément qui en donne un autre était une révolution dans les idées sur la stabilité de la matière et l'atome n'était pas indivisible. Juste avant 1911, on avait aussi montré qu'il existait des « éléments radioactifs » ayant les mêmes propriétés chimiques que le Ra, mais ayant des « radioactivités différentes » : il fallait réviser la notion d'élément pur. On avait également mesuré le nombre d'atomes dans une quantité d'élément correspondant au poids atomique et l'énergie colossale dégagée sans arrêt par la radioactivité du Ra : l'énergétique des transformations radioactives défiait l'entendement, des millions de fois celle des transformations chimiques. En 1911, on avait enfin donné le nom de Curie (Ci) à l'« activité » d'un gramme de Ra pour l'émission de $3,4 \times 10^{10}$ particules alpha par seconde (aujourd'hui $3,7 \times 10^{10}$ becquerel (Bq)). Enfin, le Ra et son « émanation » le radon (Rn) étaient déjà utilisés depuis des années en médecine.

L'essentiel du discours Nobel de Marie Curie porte cependant sur les découvertes du polonium et du radium et elle termine son discours en mentionnant, probablement pour la première fois dans l'histoire de la chimie, que l'on peut détecter et travailler sur 10^{-10} g de Ra (un dixième de nanogramme) ou 10^{-10} mm³ de Rn (10^{-15} g de Rn, soit 1 femtogramme ou encore un millionième de nanogramme). Elle mentionne que l'on peut, ou que l'on pourra, faire mieux : cela s'est avéré exact.

Marie Curie prononce son discours dans un contexte scientifique qu'elle sait en pleine mutation. En 1911, elle était en relation étroite depuis dix ans non seulement avec les grands scientifiques, peu nombreux, qui travaillaient dans son sillage ou concurrentement sur la radioactivité, mais aussi avec tous les grands physiciens qui avaient entamé la révolution de leur discipline.

En 1911 et même avant cette date, les outils, la matière radioactive et les idées nécessaires pour aller plus loin dans l'étude et la compréhension du microscopique étaient réunis. Ernest Rutherford allait montrer l'existence du noyau des atomes ; Kasimir Fajans, Georg von Hevesy et Alexander Smith Russell allaient clarifier les relations entre les membres des familles radioactives ; Frederick Soddy allait énoncer le phénomène d'isotopie (1913) et Charles Thomas Rees Wilson allait montrer les trajectoires des rayons alpha et bêta (1912).

En 1911, Marie Curie était très célèbre et au sommet d'une brillante carrière, titulaire d'une chaire à la Sorbonne depuis trois ans, lauréate de onze prix prestigieux et membre correspondant ou membre étranger de six Académies des sciences.

Les expériences historiques des découvertes du polonium et du radium

Les expériences historiques de Pierre et Marie Curie de 1898 qui ont conduit à la découverte du Po et du Ra à partir de quelques centaines de grammes de minerai d'uranium, la célèbre pechblende de Joachimsthal, ont été analysées,

décrites et sont bien connues, ainsi que le traitement de tonnes de résidus de pechblende qui a permis à Marie Curie de voir la « lumière bleutée » de quelques milligrammes de Cl₂Ba (1899) [3].

On peut comprendre aujourd'hui la profondeur du travail de Marie Curie et les difficultés auxquelles elle s'est heurtée car on connaît parfaitement la radioactivité naturelle et les propriétés des radioéléments naturels, dont le Po et le Ra font partie. Pour cela, les aspects qu'il faut en retenir sont les très faibles quantités de Po et de Ra associées à l'uranium dans les minerais (figure 2). Ces quantités sont dans des proportions qui, rapportées à l'uranium, sont inférieures à plusieurs millions ou milliards de fois. La faible radioactivité que devait mesurer Marie Curie pour détecter le Po ou le Ra n'était pas un problème car elle disposait d'une installation d'une exceptionnelle performance pour mesurer les très faibles courants produits dans cette installation par les rayonnements. Par ailleurs, elle a rapidement dominé la préparation des « sources » qui était un point capital pour mesurer et comparer les radioactivités des échantillons de matière radioactive. Marie Curie pouvait quasiment détecter l'émission de quelques centaines de rayons alpha par seconde ou quelques milliers de rayons bêta, et donc facilement mesurer la radioactivité de l'uranium métallique de Moissan, qui était son étalon de radioactivité, de 1 picogramme de Po ou de 5 nanogrammes de Ra. Elle pouvait tout aussi bien mesurer facilement dans son installation de très fortes activités, jusqu'à 2 mg de Ra (2mCi) fraîchement isolé. Cette installation a été maintes fois décrite [4].

Les difficultés qu'a dû surmonter Marie Curie provenaient du comportement chimique du Po et du Ra qui peut être erratique lorsqu'ils sont en très faibles quantités, comme c'est le cas dans les minerais. En effet, le comportement d'un élément vis-à-vis d'un même réactif dépend de sa concentration en-deçà d'une limite excessivement faible, par exemple entre le picogramme et le nanogramme par litre selon le réactif. Il n'a pas de comportement propre ; il suit, vis-à-vis du réactif, le comportement d'un élément analogue. Cela est souvent le cas lorsqu'on ne peut détecter l'élément que par sa radioactivité.

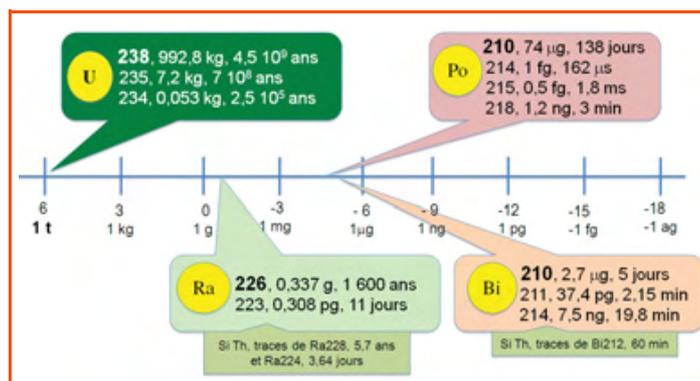


Figure 2 - Quantités de polonium, radium et bismuth radioactifs en équilibre avec une tonne d'uranium naturel et périodes des isotopes de ces éléments.

L'uranium et le thorium (absent de la pechblende) génèrent par désintégrations successives des familles d'éléments radioactifs (appelés radioéléments), eux-mêmes formés de radionucléides (isotopes radioactifs). Chaque radionucléide émet, en se désintégrant, un ou plusieurs rayons : alpha, bêta, souvent accompagnés de rayons gamma. Chaque ensemble de radionucléides a une activité, mesurée en becquerels (Bq), par le nombre de désintégrations par seconde qu'il subit. Dans les minerais d'uranium non altérés, l'activité de chacun des ensembles de radionucléides est la même que celle de l'uranium dont ils sont issus (1 g d'uranium naturel pur a une activité de 25 kBq).

Marie Curie a appliqué les protocoles de la chimie analytique de 1897 sur des lots d'environ 100 g de pechblende contenant 75 à 80 % d'uranium et quelques pourcents d'autres éléments comme le bismuth (Bi) et le baryum (Ba) [5]. Pour faire simple, on peut retenir qu'elle constate d'abord que les précipités de sulfure sont plus actifs que ce qui reste en solution : ils contenaient le Po. Elle constate rapidement ensuite que les précipités de carbonates de Ba obtenus à partir des solutions d'où elle a précipité le Po sont aussi plus actifs que ce qui reste en solution : ils contenaient le Ra. Marie Curie constate de plus que la remise en solution des précipités, suivie de nouvelles précipitations de sulfures (ou d'hydroxydes) ou bien de carbonates (ou de chlorures), correctement conduites, donne des précipités de plus en plus riches en élément radioactif recherché. C'est avec les précipités de Cl_2Ba que le phénomène est le plus spectaculaire.

En fait, Marie Curie s'est heurtée à des comportements des « radioactivités » précipitées ou restant en solution beaucoup plus compliqués que ne l'indique cette vue simplifiée utilisée dans un but pédagogique. Elle a conduit en parallèle plusieurs protocoles de mise en solution de la pechblende et précipitations fractionnées successives avant d'annoncer ses résultats, cités maintenant comme historiques.

On sait aujourd'hui que la quantité de Po contenue dans 100 g de pechblende (5 ng) ne pouvait pas précipiter sous forme de sulfure d'une solution de dissolution courante où sa concentration était de quelques 10^{-11} M. Elle ne peut que co-précipiter avec un élément aux propriétés voisines, le Bi, l'enrichissement en Po des précipités successifs dépendant des concentrations respectives des éléments et de la quantité de Bi précipité. Mais l'enrichissement est faible et il peut être erratique. Aussi Pierre et Marie Curie ont-ils recours à la distillation sous vide de la pechblende ou des précipités de sulfures pour obtenir rapidement des fractions très radioactives, méthode utilisée à l'époque pour analyser les minerais. Ils annoncent la découverte de Po (juillet 1898) après avoir obtenu une fraction de sulfure 400 fois plus radioactive que l'uranium métallique. Elle ne contenait au maximum que 50 ng de Po si on considère qu'ils ont traité un kilogramme de pechblende du lot de 5 kg prêté par Gustave Bémont.

On sait également aujourd'hui que la quantité de Ra contenue dans 100 g de pechblende (22 μg) ne pouvait pas précipiter d'une solution de dissolution sous forme de carbonates (10^{-7} M). Elle ne peut que co-précipiter avec le Ba, puis le Ra ne peut se concentrer que parcimonieusement dans des précipités de carbonates successifs. Ils annoncent la découverte du Ra (décembre 1898) après avoir obtenu une fraction de carbonates 900 fois plus radioactive que l'uranium métallique. Elle ne pouvait contenir plus de 1 mg de Ra identifiable par une raie spectrale à 3818,8 Å.

La méthodologie de Marie Curie

Marie et Pierre Curie venaient de découvrir deux nouveaux éléments en quelques mois, mais aussi un nouveau phénomène : l'entraînement d'un élément invisible (Po, Ra, microcomposant radioactif) par un autre élément visible (Bi, Ba, macrocomposant), et une propriété capitale : la proportion du microcomposant dans le précipité du macrocomposant est plus élevée que la proportion du microcomposant par rapport au macrocomposant dans la solution. Ce phénomène d'entraînement est appelé « co-précipitation ».

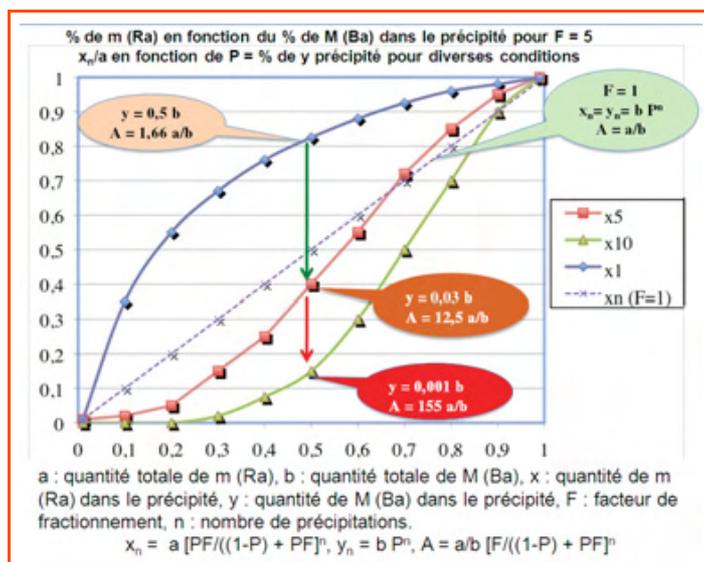


Figure 3 - Courbes expliquant comment on peut successivement isoler un élément (Ra) d'un mélange, puis le concentrer par co-précipitation (ou entraînement) en utilisant un autre élément (Ba).

Pour des conditions expérimentales données, F est constant. Dans le système $\text{Cl}_2\text{Ra}/\text{Cl}_2\text{Ba}$, F = 5 pour une précipitation de $\text{Ba}_{1-x}\text{Ra}_x\text{Cl}_2$ (par syncristallisation) par refroidissement d'une solution aqueuse de chlorure de 80 à 25 °C. La valeur de x_n est le % de Ra entraîné pour P % de Ba précipité. Si on part d'une solution renfermant b = 10 g de Ba et a = 200 μg de Ra, le premier précipité renfermant 50 % de Ba (5 g) contient $x_1 = 160$ μg de Ra ; le deuxième précipité de la solution de reprise du précipité 1 traitée comme la solution 1 contient 2,5 g de Ba et $x_2 = 130$ μg de Ra et ainsi de suite : $x_{10} = 30$ μg de Ra dans 0,01 g de Ba ($\text{Cl}_2\text{Ba}_{0,95}\text{Ra}_{0,05}$). Marie Curie a fractionné 50 kg de Cl_2Ba jusqu'à 10 g pour vérifier que le Ba ne contenait pas de Ra.

On peut aujourd'hui traduire quantitativement ce phénomène pour le cas de l'entraînement du Ra avec le Ba. La figure 3 donne le pourcentage de Ra co-précipité sous forme de $\text{Ra}_x\text{Ba}_{(1-x)}\text{Cl}_2$ en fonction du pourcentage de Ba précipité pour diverses conditions, par exemple en faisant une, cinq ou dix opérations successives : précipitation-mise en solution du précipité-précipitation. En précipitant tout le Ba (macrocomposant), on entraîne le maximum de Ra (microcomposant). Pour enrichir le précipité en Ra, il faut répéter judicieusement les entraînements par précipitations successives d'une fraction du Ba (précipitations fractionnées).

La figure 3 est très générale et peut s'appliquer à de nombreux systèmes. Elle comporte une singularité : sa diagonale. Cette ligne correspond au comportement de deux isotopes : l'entraînement d'un isotope radioactif à l'échelle de trace (microcomposant) par un autre isotope en quantité beaucoup plus importante (macrocomposant). Dans ce cas, il n'y a pas d'enrichissement possible quelle que soit la façon dont on procède, ce qui est d'ailleurs normal puisque les propriétés chimiques des isotopes sont par définition identiques.

Au début, l'utilisation de la co-précipitation est restée qualitative, puis la mise en œuvre de la méthodologie de Marie Curie a été rapidement affinée. Les lois de la co-précipitation ne seront réellement formulées qu'après 1925 et vraiment établies en 1935, ainsi que les conditions dans lesquelles on peut les appliquer. Il se trouve que pour le Ra, elles ne sont pas très restrictives [2].

Ces lois trouvent leur fondement dans le fait que dans un système biphasé (multiphasé), tout élément, même extrêmement dilué (invisible mais repérable par sa radioactivité), se partage entre les phases avec ses propres caractéristiques dans des conditions données [2]. Dans la sublimation sous

vide des sulfures, méthode de séparation des éléments pratiquée par Pierre Curie, il en est ainsi entre la paroi du tube de sublimation et la phase gazeuse. Le dépôt de chaque sulfure à un endroit du tube résulte d'une infinité de partages successifs caractéristiques des sulfures, chacun accentuant les légères différences de comportement des éléments et permettant finalement leur séparation rapide (SPo et S_3Bi_2) [6].

Ce nouveau comportement de la matière invisible a été utilisé par Marie Curie dès 1899 pour obtenir des sels de Ra et dès 1904 par les industriels pour répondre à la demande de Ra pour la médecine. La méthodologie de Marie Curie a permis à André Debierne, son proche collaborateur, de découvrir l'actinium (Ac) par entraînement avec du lanthane. Après des milliers de cristallisations, Marie Curie obtient en 1907 400 mg de Cl_2Ba quasi pur et donne un poids atomique de 226, 45 pour le Ra. Le couronnement de la quête du Ra est l'obtention d'environ 80 mg de Ra métallique en 1910 par distillation d'un amalgame de mercure préparé par électrolyse et la préparation d'un étalon international de Ra. Marie Curie est, avec André Debierne, l'une des rares personnes au monde à avoir vu du Ra métallique. La même année, ils obtiennent du Po en quantité pondérable : 100 μg contenus dans quelques mg de substance et révélés par un spectre d'étincelle. La concentration du Po a été en partie faite par précipitation fractionnée de composés de Bi.

Les principaux apports de la méthodologie de Marie Curie à la chimie après 1911

Autour de 1911 et après, la recherche en « science de la radioactivité » prend essentiellement deux directions. La première est l'approfondissement et la poursuite de l'étude des propriétés chimiques des radioéléments naturels et des effets des rayonnements sur la matière. Rien de spectaculaire pour un chimiste dans ces recherches, mais elles ont été indispensables pour préparer les sources de rayonnements et soutenir les applications des radioéléments, notamment dans le domaine médical. La seconde et nouvelle direction est l'utilisation des particules alpha comme projectile pour bombarder la matière. Ces particules ont en effet une énergie considérable vis-à-vis des énergies des réactions chimiques et seraient même susceptibles de modifier les noyaux ! Mais pour constater un effet, il faut des sources très intenses. Leur préparation nécessitait de connaître la chimie de la matière radioactive de l'époque. Le polonium et le radium vont jouer un rôle déterminant.

Dans toutes ces recherches sur les radioéléments naturels à l'état d'ultra-traces ou les éléments radioactifs produits par irradiation avec des taux de production extrêmement faibles, la méthode d'entraînement de Marie Curie a été utilisée pour les séparer, les concentrer, mais aussi pour identifier leurs particularités chimiques. Il fallait donc les entraîner spécifiquement avec un élément homologue comme le Ba pour le Ra. La table de Mendeleev de l'époque a été un guide pour choisir les entraîneurs. Les mesures restaient délicates, même avec les nouveaux détecteurs qui apparaissaient concurremment à l'installation du couple Curie.

Dans de nombreuses expériences, on a implicitement ou explicitement vérifié « la loi » de concentration de Marie Curie d'un microcomposant dans un macrocomposant, situés dans une même colonne du tableau de Mendeleev ou proches l'un de l'autre. On a aussi montré que l'on pouvait

établir les degrés d'oxydation d'un microcomposant par entraînement avec des précipités où le degré d'oxydation du macrocomposant était connu. La chimie de la matière invisible était ramenée à la chimie classique par l'utilisation de la méthodologie de Marie Curie.

La notion d'isotopie résulte directement de ces travaux de « radiochimie ». Vers 1910, on avait clairement associé trois « radioactivités différentes » à trois éléments radioactifs qui avaient des origines différentes. Le thoriumX (^{224}Ra) et le mésothorium I (^{228}Ra) dérivait du Th (^{232}Th) et l'actiniumX (^{223}Ra) dérivait de l'actinium. Ils avaient le même comportement vis-à-vis du Ba que le Ra (^{226}Ra) et on ne pouvait pas les séparer du Ra par fractionnement. Frederick Soddy les a rangés dans la même case du tableau de Mendeleev comme des « isotopes ». L'isotopie a été étendue à tous les éléments après 1919 avec l'utilisation du spectromètre de masse (figure 4).

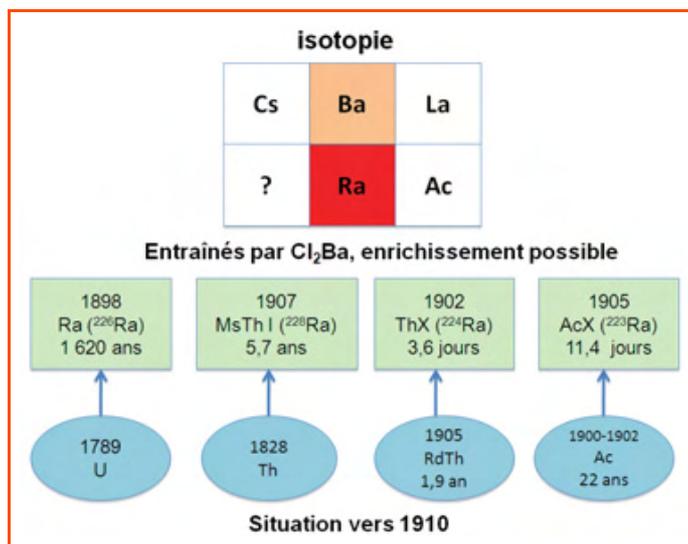


Figure 4 - Caractéristiques : périodes et origines des « éléments radioactifs » qui se comportaient comme le radium dans une co-précipitation avec le baryum.

Frederick Soddy a compris qu'il fallait les mettre dans la même case du tableau de Mendeleev (1910), puis il leur a donné le nom d'isotopes (1913). L'homologue inférieur de césium, le francium, sera découvert en 1939.

Les sources ne pouvaient contenir que des radioéléments naturels séparés (tableau 1). Chacune offrait des rayonnements d'énergies différentes et avait une utilité limitée par la plus longue des périodes des radionucléides qu'elle contenait ou par la tenue des dépôts de matière. Toutes les sources, sauf celles de Ra, devaient être périodiquement recyclées et rechargées en raison des courtes périodes des émetteurs, par exemple 140 jours pour ^{210}Po . Après 1932, on a fabriqué et utilisé des sources de neutrons mélanges d'émetteurs alpha (Ra, Rn, Po) et d'un élément léger, le Be (produisant quelques 10^7 n/s par Ci dans tout l'espace).

Les intenses sources de Po (100 mCi, 20 μg de Po) couplées à la méthode d'entraînement ont permis à Irène Curie et Frédéric Joliot (prix Nobel de chimie 1935) de donner en 1934 la première preuve chimique de l'existence de ^{30}P à l'état de phosphine à partir d'une solution où sa concentration était 10^{-16} M (250 000 atomes) et diminuait rapidement en quelques minutes. Il s'agissait ici d'un entraînement isotopique (figure 5).

La découverte d'Irène Curie et Frédéric Joliot a eu un énorme impact sur les chimistes. On a ainsi irradié

Sources	Émetteurs	Vie	Grandes découvertes		
Polonium (α)	^{210}Po , 5, 53 MeV	mois	40 à 100 mCi Radioactivité artificielle β^+	1934	Irène Curie et Frédéric Joliot
Dépôt actif du Ra Vie courte ($3\alpha, 2\beta, \gamma$)	dont : ^{222}Rn , α de 5,5 MeV ^{218}Po , α de 6,24 MeV ^{214}Po , α de 7,7 MeV	jours	1 mCi, première réaction nucléaire 50 mCi, noyau de l'atome 1 mCi, neutron	1909 1911 1932	Ernest Rutherford Hans Geiger, Ernest Marsden, Ernest Rutherford James Chadwick
Dépôt actif du Ra Vie longue ($1\alpha, 2\beta, \gamma$)	dont : ^{210}Bi , β de 1,2 MeV ^{210}Po	années			
Ra (α, β, γ)	^{226}Ra , α de 4,7 MeV et tous les émetteurs des dépôts actifs	années			
Dépôt actif du Th ($4\alpha, 2\beta, \gamma$)	dont : ^{208}Tl , γ de 2,65 MeV	heures			
Po ou Ra ou Rn + Be (n, α, β, γ)	Réaction α ($^{10}\text{Be}, n$) ^{13}C	selon l'émetteur α	1 Ci Rn, isotopes artificiels radioactifs	1934	Enrico Fermi
			1,2 Ci Ra, fission (environ 10^7 n/s par Ci)	1938	Otto Hahn et Fritz Strassmann
Accélérateur (d et n)	Réaction d ($^{10}\text{Be}, n$) ^{11}B	temps de faisceau	Premiers éléments transuraniens : $\text{Np}^{(a)}$ puis $\text{Pu}^{(b)}$	1940	^(a) Edwin McMillan, Philip Abelson, ^(b) Glen Seaborg, Arthur Wahl, Joseph Kennedy

Tableau I - Sources radioactives couramment utilisées à partir de 1900.

La préparation de bonnes sources non scellées de Po, émetteurs alpha, demandait de déposer sur un support métallique (Ni, Al) un composé sec et adhérent, de telle façon que l'émission de rayonnement soit la plus intense possible (pas d'auto-absorption ou valeur minimale de celle-ci) et la plus directionnelle possible, ce qui impliquait une surface minimum de dépôt. Pour cela, il fallait connaître la chimie et l'électrochimie du Po (concentration en solution, dépôt spontané, volatilisation). Mais il y a une limite aux dépôts d'oxydes de Po (0,5 à 0,7 $\mu\text{g}/\text{mm}^2$) en raison de l'autodestruction de la couche déposée par les rayons alpha qui fragmentent la matière. En effet, toute matière très radioactive est en perpétuel bouleversement sous les effets directs et indirects des rayonnements. Beaucoup de liaisons chimiques sont rompues. Les sources utilisées par Irène Curie et Frédéric Joliot pour bombarder une feuille d'aluminium par des particules alpha contenaient de 10 à 20 μg de Po (40 à 100 mCi). Le maximum de Po que l'on ait déposé en 1934 au Laboratoire Curie, qui disposait de plusieurs grammes de Ra, de solutions de ^{210}Pb , de ^{227}Ac et de ^{228}Th accumulés depuis 25 ans et génératrices de ^{210}Po , a été de 200 mCi (45 μg sur 1 cm^2). Mais pour ces activités, l'oxyde de Po déposé PoO, blanc, se délite et devient noir (PoO₂). Le Po a ensuite été utilisé en mélange avec le Be dans les sources de neutrons. Aujourd'hui, le Po est supplanté par d'autres radioéléments émetteurs alpha plus faciles à obtenir. Si on veut du Po, on le synthétise dans un réacteur nucléaire. Au plan de la radioprotection, 100 mg de Ra âgé de quelques mois délivrent à 1 m une dose efficace de 1 mSv/h. L'ingestion de 5×10^{-12} g (5 millionième de μg) de Po et 10^{-7} g (10 μg) de Ra, ou respirer de l'air contenant de 30 à 60 Bq/m³ (4 à 8×10^{-15} g/m³) de Rn conduisent à la dose efficace engagée de 1 mSv/an.

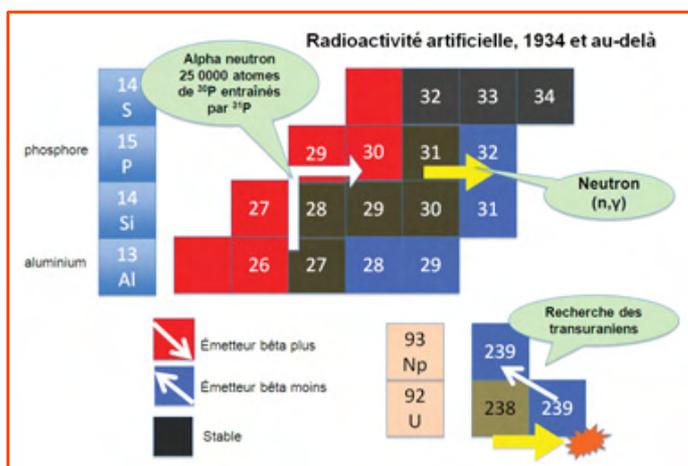


Figure 5 - Schéma illustrant la réaction nucléaire $^{27}\text{Al}(\alpha, n)^{30}\text{P}$ dans le plan Z (numéro atomique), A (nombre de masse) = Z + N (nombre de neutrons).

C'est en irradiant de l'aluminium (élément monoisotopique ^{27}Al) avec les rayons alpha d'une source de 100 mCi de Po (20 μg) qu'Irène Curie et Frédéric Joliot ont produit ^{30}P et un neutron. Le noyau de ^{30}P a un excès de neutrons par rapport à l'isotope de phosphore stable, ^{31}P (élément monoisotopique) ; il se désintègre en émettant un électron positif (radioactivité « bêta plus » inconnue dans la nature et donc artificielle). La production de ^{30}P était d'environ 10^{-6} à 10^{-7} atomes par particule alpha. L'irradiation de ^{31}P par des neutrons donne ^{32}P dont le noyau, déficient en neutron, se désintègre en émettant un électron (radioactivité bêta). L'irradiation de l'uranium par des neutrons conduit à sa fission et à la production d'éléments transuraniens.

systématiquement tous les éléments jusqu'à l'uranium, les plus légers par des particules alpha et tous par des neutrons. On pouvait créer une nouvelle matière radioactive et cela était exceptionnel.

On a rapidement reconnu que le neutron, qui entre facilement dans les noyaux, notamment à faible énergie, pouvait changer la nature d'un atome d'un élément, généralement en donnant un isotope radioactif qui donnait lui-même un atome de l'élément suivant dans la classification périodique (qui avait succédé au tableau de Mendeleev). Les nouvelles radioactivités étaient selon le cas entraînées par l'élément cible ou par celui qui suivait l'élément irradié ou bien par des homologues avec ou sans enrichissement. On a pu « marquer » tous les éléments par un isotope radioactif étendant le champ d'application des radioéléments naturels en l'ouvrant à l'étude de nombreuses réactions chimiques. C'est au début de cette période d'explosion de la radioactivité dans la chimie que Marie Curie décède.

Le plus célèbre couplage « irradiation-entraînement-enrichissement » est celui qui a conduit à la découverte de la fission en irradiant de l'uranium avec des neutrons pour aller au-delà du dernier et du plus lourd des éléments connus, c'est-à-dire pour produire des éléments transuraniens (tableau II).

Il était impossible aux meilleurs radiochimistes de l'époque de relier le comportement chimique des « nouvelles

FISSION 1939			
<p>Connu depuis Marie Curie</p> <p>300 µg ²²⁶Ra/kg U</p> <p>Précipités de Ra + Ba</p> <p>Enrichissables en Ra</p>	<p>U (purifié) + n = TU ?</p> <p>TU donne X(Ra ?)</p> <p>Y (?) z (?)...</p> <p>(activités de 25 min à qq jours)</p> <p>X(Ra ?) précipitable par le Ba</p> <p>Précipités non enrichissables en X(Ra ?)</p> <p>Question : effet de concentration en X(Ra) ??</p>	<p>Expérience test</p> <p>400 ng de ²²⁸Ra/kg Th</p> <p>Précipité de ²²⁸Ra + Ba</p> <p>Enrichissable en ²²⁸Ra</p> <p>Pas de problème de concentration</p>	<p>X(Ra ?) n'est pas du Ra mais du Ba</p> <p>La fission est découverte avec 3 millions d'atomes de Ba radioactif</p>

Tableau II - Schéma illustrant comment Otto Hahn a donné la preuve chimique de l'éclatement du noyau d'uranium irradié par des neutrons.

La radioactivité produite était très faible, de l'ordre de quelques centaines de désintégrations par minute (mesurée avec un compteur Geiger). Comme la radioactivité bêta des descendants de U (²³⁴Th et ^{234m}Pa) était quatre à cinq fois plus importante que celle des radioactivités induites, il fallait purifier l'uranium avant irradiation. Th et Pa étaient séparés de U par entraînement avec Fe(OH)₃ en milieu carbonate et on récupérait U sous forme de diuranate d'ammonium (U₂O₇(NH₄)₂) qui était irradié. Plusieurs isotopes de Ba étaient produits avec des périodes allant de quelques minutes à quelques jours (isotopes 139 à 143). On peut estimer que l'irradiation de 10 g de U pendant 12 h conduisait dans les conditions expérimentales de l'époque (flux de neutrons de 10⁴ n/cm² par seconde) à quelques millions d'atomes de baryum (3 x 10⁶ atomes de ¹⁴⁰Ba de 12 jours de période, soit 2 Bq). Pour gagner un facteur 100, il fallait irradier 100 g de U pendant plusieurs jours. Irène Joliot-Curie avait constaté la même année qu'une activité bêta produite dans l'uranium irradié était entraînée par le lanthane (La) et que le précipité pouvait être enrichi. Ce n'était donc pas, selon le dogme en vigueur, du La. En fait, c'était bien du La de fission, mais pollué par un autre produit de fission (yttrium Y, homologue de La) de même période ! C'est l'Y de fission qui s'enrichissait et non le La de fission !

radioactivités » produites au comportement de leurs supposés homologues comme le rhénium, l'osmium ou le platine ou d'éléments lourds comme le radium, qui auraient pu provenir, par décroissance, d'éléments transuraniens.

Une expérience cruciale a été réalisée en 1938 par Otto Hahn (prix Nobel de chimie 1944) et Fritz Strassmann : ils ont montré que l'entraînement d'une « activité supposée être du radium » avec le Ba n'était pas du Ra, mais bien du Ba radioactif. En effet, il était impossible d'enrichir le précipité de Cl₂Ba ou Br₂Ba en ce « supposé radium », ce qui pourtant était le dogme depuis Marie Curie. Était-ce dû au fait que le « supposé radium » était en quantité très inférieure à celle du Ra naturel dans l'uranium ? La réponse a été non. L'expérience qui a conduit à cette affirmation montrait que si on entraînait ²²⁸Ra (séparé de ²³²Th avec lequel il est en équilibre, 5,7 ans de période, mesuré par la croissance de ²²⁸Ac émetteur bêta, 6 h de période) en quantité impondérable (mille fois moins que dans les expériences historiques de Marie Curie) avec Cl₂Ba, le comportement de ²²⁸Ra était normal. On pouvait bien enrichir le précipité en Ra. Les lois chimiques de l'entraînement étaient bien indépendantes de la concentration. Il fallait donc admettre que l'activité entraînée par Br₂Ba était du Ba radioactif évidemment impossible à concentrer dans le Ba inactif puisqu'il était un isotope de Ba et par conséquent que le noyau d'U pouvait se casser. La fission de l'uranium venait d'être découverte, sur quelques millions d'atomes de Ba radioactifs !

Les sources de neutrons n'étaient pas suffisamment intenses pour produire assez d'atomes des premiers éléments transuraniens, le neptunium (Np) et le plutonium (Pu), pour entreprendre des expériences de chimie. À partir de 1932, les faisceaux de particules obtenus avec les accélérateurs ont largement surpassé n'importe quelle

source à base de Po ou de Rn. La quête des éléments transuraniens conduite aux États-Unis par Glen Seaborg (prix Nobel de chimie 1951) est une longue histoire où la méthode d'entraînement initiée par Marie Curie a été largement utilisée. Elle ne peut être abordée ici.

Bilan des apports de Marie Curie à la chimie

Les apports directs des travaux de Marie Curie à la chimie sont évidemment les découvertes majeures des deux radioéléments Po et Ra et une méthodologie féconde pour étudier la matière invisible radioactive. Les apports indirects sont ceux issus de l'école de pensée de l'Institut du Radium qu'elle a créée. Les apports plus indirects sont ceux des autres lignées de radiochimistes qui ont travaillé à l'étranger, d'abord en partant des travaux de Marie Curie et de ses collaborateurs, puis de façon autonome. Le bilan global des apports à la chimie initiés par Marie Curie est donc, au sens large, considérable (figure 6).

En premier vient l'extension de la table de Mendeleev et sa transformation en classification périodique des éléments que nous connaissons. En second vient l'élucidation des mécanismes de réactions chimiques et le développement parallèle de la chimie à l'échelle de traces et d'ultra-traces (chimie des indicateurs), qui reposent sur la simple capacité des radionucléides ou des radioéléments, naturels et artificiels, de signaler où ils se trouvent. Enfin vient l'élucidation du comportement de la matière très radioactive ou de la matière sous fort rayonnement ionisant, qui repose sur les capacités des émissions des radionucléides à modifier les liaisons chimiques (chimie des atomes chauds et chimie sous rayonnement).

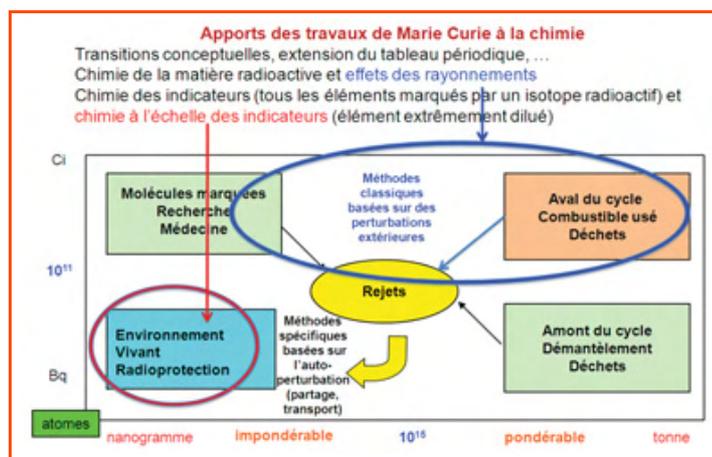


Figure 6 - Illustration des interactions entre des domaines de la radiochimie (chimie sous rayonnements, chimie à l'échelle des indicateurs) qui se sont développés après les travaux de Marie Curie et des activités mettant en œuvre la matière radioactive (recherche, utilisation médicales, industrie nucléaire).

On notera les extensions des échelles activités et des quantités de matière sur plusieurs ordres de grandeur.

La classification périodique

En 1895, la table de Mendeleev comportait 80 éléments. Aujourd'hui, la classification périodique en compte 118. Elle diffère d'une table de Mendeleev complète (limitée à U) par le classement des éléments transuraniens dans la « série des actinides » en regard de la « série des lanthanides ». Au-delà du dernier actinide, le lawrencium (Lr), les éléments transactinides sont des homologues supérieurs des éléments de la septième période qui suivent l'actinium (Ac). Les propriétés des actinides sont liées aux électrons 5f et celles des transactinides aux électrons 6d. Des expériences de radiochimie ont été conduites sur quelques atomes jusqu'à l'élément 106.

Chimie des indicateurs et chimie à l'échelle des indicateurs

L'utilisation des radionucléides pour marquer un élément, c'est-à-dire le rendre radioactif, a permis de découvrir les réactions d'échanges isotopiques, dans lesquelles apparemment rien ne se produit hormis les échanges des atomes d'un même élément. Cela a montré que les équilibres chimiques sont dynamiques. Les indicateurs ont aussi permis de suivre le cheminement des atomes dans les réactions chimiques et d'élucider de nombreux mécanismes réactionnels. Enfin, une orientation originale de la radiochimie s'est développée pour étudier le comportement de la matière dans son état d'extrême dilution, celui que Marie Curie avait initié. Les lois de comportement ont été établies, fondées sur la méthodologie du partage d'un élément dans les systèmes biphasés (ou multiphasés). Les situations que l'on peut analyser vont de la dispersion des radionucléides dans l'environnement à leur incorporation dans les organismes vivants.

Chimie de la matière très radioactive

C'est une forme particulière de la matière dont l'activité se rapproche de celle d'un gramme de radium, c'est-à-dire du Curie par gramme. C'est l'ordre de grandeur de l'activité des cibles de production des radionucléides utilisés en médecine et du combustible nucléaire usé. Elle est soumise à l'irradiation interne par des rayonnements alpha, bêta, gamma et de neutrons qui y dégagent de la chaleur et y développent des transformations chimiques de façon continue. L'exploitation de l'énergie nucléaire de fission a conduit dès 1945 et conduit encore actuellement – notamment dans les réacteurs électronucléaires – à des quantités importantes de matière radioactive (milliers de tonnes accumulées), sans commune mesure avec les quantités de radium qui ont été isolées durant la première moitié du XX^e siècle (de l'ordre du kilogramme). Les modifications chimiques des solutions et des composés sous l'effet des rayonnements ont été perçues et étudiées depuis 1901 dès que la matière isolée des minerais d'uranium est devenue très radioactive.

Conclusion

L'ère de la radioactivité et de la radiochimie a été ouverte de 1896 à 1898, notamment avec les découvertes du polonium et du radium. L'ère du nucléaire a été ouverte entre 1938 et 1940, initiée en 1934 par la découverte de la radioactivité artificielle. Les conséquences des découvertes successives ont lentement mais profondément marqué la

chimie. La structure de l'atome a été comprise comme un système organisé d'un noyau et d'électrons, et les propriétés des éléments et de leurs composés ont été examinées sur la base des structures électroniques des atomes, des molécules et des composés. Puis les chimistes ont utilisé les propriétés des radionucléides pour faire de la chimie dans tous ces domaines, ce qui les a conduits à considérer les réactions chimiques avec un nouveau regard. Quelques domaines sont plus spécialement marqués par l'utilisation ou la mise à profit des rayonnements. En retour, les connaissances en chimie ont permis d'étudier les éléments transuraniens comme tous les autres éléments et d'utiliser l'énergie de fission en préparant par exemple du plutonium pur et des combustibles nucléaires. Aujourd'hui, la « matière radioactive » dont les premiers lots ont été ceux de composés du radium est une matière particulière que l'on a à gérer dans plusieurs domaines et en particulier dans celui de l'énergie nucléaire.

Marie Curie est internationalement connue pour avoir découvert, avec son mari, le radium, pour l'avoir isolé et pour avoir rendu possible son utilisation à des fins médicales. Mais c'est aussi pour des raisons tenant à des positions déterminées dans les contextes scientifique et social du début du XIX^e siècle qu'elle est restée la figure emblématique de la femme scientifique. En fait, ses travaux ont eu un profond retentissement, allant bien au-delà de ce que la mémoire collective en a retenu. Elle a apporté à la science la première méthodologie pour « rendre visible l'invisible » et pour résoudre une des plus grandes énigmes du XX^e siècle : celle du comportement de l'uranium sous l'action des neutrons. Ses travaux ont impulsé dès 1900 de nouveaux axes de recherche mêlant chimie et physique ; la chimie en a été un grand bénéficiaire. C'est à ce titre que j'ai voulu lui rendre hommage.

Notes et références

- [1] De nombreux auteurs ont fait des exégèses complètes ou partielles de l'œuvre scientifique et de la vie de Marie Curie. De nombreuses commémorations d'événements marquants, liés à la radioactivité, ont réuni d'éminents scientifiques qui ont analysé les conséquences de ses travaux dans leurs disciplines. Chacun s'est exprimé selon sa sensibilité. Il existe de nombreuses publications scientifiques, des livres biographiques, des supports audiovisuels et d'innombrables coupures de presse sur Marie Curie. Voir à ce sujet le dernier livre en date qui donne une bibliographie complète : Hurwic J., *Marie Skłodowska-Curie et la radioactivité*, GAL, Varsovie, éd. française 2008 (domwydgal@wp.pl). Voir aussi le numéro special « Maria Skłodowska-Curie, a special issue commemorating the 100th anniversary of her Nobel Prize in Chemistry », *Chemistry International*, 2011, 33(1), et Mould R.F., The discovery of radium in 1898 by Maria Skłodowska-Curie (1867-1934) and Pierre Curie (1859-1906) with commentary on their life and times, *British Journal of Radiology*, 1998, 71, p. 1229.
- [2] Voir : Adloff J.-P., Guillaumont R., *Fundamentals of Radiochemistry*, CRC Press, 1993.
- [3] L'analyse des carnets de laboratoire de Pierre et Marie Curie, source initiale des données et des conditions expérimentales des découvertes de Po et de Ra, a été faite par Jean-Pierre Adloff et publiée dans trois articles : *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 1998, t. 1, série IIc, p. 217, 457 et 801. D'autres articles scientifiques sont réunis dans « One hundred years after the discovery of radioactivity », *Radiochimica Acta*, 1995, 70/71, p. 1.
- [4] La mesure de l'activité des radionucléides présents dans une source radioactive est toujours délicate. En effet, les rayons émis interagissent avec la matière, celle de la source et celle qu'ils rencontrent ensuite avant de déclencher un signal dans un détecteur approprié. Tous les rayons émis dans la source n'atteignent pas le détecteur qui donne seulement une indication de la radioactivité de la source. Marie Curie utilisait comme détecteur une chambre d'ionisation qui collecte les électrons produits par ionisation de l'air de la chambre par les rayons qui la traversent (à l'époque, on disait que les rayons uraniques électrisaient l'air ; l'électron sera caractérisé en 1898). La source de rayonnement était dans la chambre. Dans ces conditions, seuls les rayons qui sortent de la source produisent des électrons. La préparation de la source est donc un point capital pour mesurer et comparer les radioactivités de différentes sources. Son épaisseur joue un rôle considérable. Elle doit être adaptée

à la qualité du rayonnement (alpha, bêta ou gamma), sans quoi l'interprétation de la mesure reste douteuse. Marie Curie ne disposait, pour connaître cette qualité, que du pouvoir de pénétration des rayons dans des écrans de cuivre ou d'aluminium. Elle a maîtrisé les aspects méthodologiques de la mesure grâce à l'utilisation d'une source de référence. Elle rapportait ses mesures à de l'uranium métallique âgé de plus d'un an et préparé par Henri Moissan. Seul Moissan détenait depuis 1893 des lots d'uranium métal très pur. Il se trouve que l'uranium métallique est en fait un étalon de radioactivité (51 000 Bq/g) permettant des calibrations. Un cm^2 d'épaisseur supérieure à 1/10 de mm produit dans une chambre d'ionisation un courant constant de quelques 10^{-12} A dû essentiellement aux rayons alpha de ^{238}U et de ^{234}U (90-95 %) car la contribution des rayons bêta des descendants de ^{238}U est faible.

- [5] Le minerai de la mine de Joachimstal (entre 300 et 500 m sous terre) était de la pechblende amorphe contenant UO_2 (en fait $\text{U}^{4+}_{1-x-y-z}\text{U}^{6+}_x\text{M}^{3+}_y\text{M}^{2+}_z$) $\text{O}_{2+x-0,5y-z}$, M^{3+} = terres rares, M^{2+} = alcalino-terreux) mélangé à des schistes, du quartz (SiO_2), de la pyrite (FeS), de la dolomite (CO_3Mg) et du carbonate de calcium (CO_3Ca). La pechblende contient (exprimé en oxydes) 75 à 80 % de U, quelques % de Fe, Pb, Si, Ca et autres alcalino-terreux, environ 1 % de Bi, As, Na, S et environ 0,1 % de Zn, Mn, Mg, K.
- [6] Dans la sublimation sous vide des sulfures, méthode de séparation des éléments pratiquée par Pierre Curie, l'appareillage est simple : c'est un tube de verre dont l'extrémité où sont déposés les sulfures est chauffée et le long duquel s'établit ainsi un gradient de température. Le dépôt de chaque sulfure à un endroit du tube (en fait de la température du tube) correspond à une température de chauffe définie. Il résulte d'une infinité de partages successifs caractéristique du sulfure. On comprend que l'on

puisse séparer plusieurs sulfures si leurs caractéristiques de partage sont différentes. Chaque partage accentue les différences de comportement des éléments, même si elles sont faibles. Comme le transport a lieu en phase vapeur, la méthode est rapide. Ainsi lors des expériences historiques, Pierre Curie a par exemple concentré le Po d'un échantillon de 0,94 g de sulfure de Bi et de Pb (douze fois la radioactivité de l'uranium métallique) dans un dépôt quasi sans matière (dépôt noir) correspondant à une température de sublimation de 450 °C (S_3Bi_2 est sublimé à 250 °C et SPb l'est au-delà de 700 °C), mais une partie notable de Po se dépose aussi pour une température de chauffe de 650 °C, les autres dépôts étant très peu radioactifs. Dans cette expérience, plus de 70 % de la radioactivité initiale se retrouvent dans le dépôt noir.



Robert Guillaumont*

est professeur honoraire (Université Paris-Sud, Orsay) et membre de l'Académie des sciences.

Photo : © B. Eymann/Académie des sciences.

* Courriel : robert.guillaumont0663@orange.fr



Marie Curie lors du premier congrès Solvay qui réunissait les plus grands savants sur le thème de « la théorie des rayonnements et des quantas » en 1911. © Musée Curie.

Les applications médicales des découvertes de Marie Skłodowska-Curie

Marek Krawczyk

La conférence du professeur Marek Krawczyk comportait une première partie qui évoquait la vie de Marie Curie et son parcours scientifique jusqu'en 1903 et qui se terminait par : « [...] les découvertes de Marie Skłodowska-Curie et de Pierre Curie ont débouché sur des actions décisives dans le domaine de la médecine et ont contribué à la formation d'un domaine incontournable dans le traitement des tumeurs qui est celui de la radiothérapie oncologique, remplacée avec le temps par la médecine nucléaire. » Pour des raisons éditoriales, nous ne reprenons ici que la deuxième partie de sa conférence⁽¹⁾.

Jusqu'à la découverte des rayons X et du radium, la seule méthode utilisée pour traiter les tumeurs était la chirurgie qui, à l'époque, avait des possibilités très restreintes. Compte tenu du faible pouvoir pénétrant de ces rayons, le traitement des tumeurs se limitait aux lésions tumorales superficielles. Pierre Curie, voulant prouver les effets biologiques du rayonnement du radium sur son avant-bras, a montré que l'effet biologique de l'action des rayons X et des rayons du radium étaient identiques.

La découverte du radium, qui émet des rayons pénétrants, et l'efficacité de son emploi thérapeutique ont révolutionné le

traitement d'un grand nombre de tumeurs. De nombreux applicateurs ont servi à cet effet. On a commencé tout d'abord à traiter des tumeurs superficielles. L'irradiation provenait de « bombes au radium » à l'intérieur desquelles se trouvait une source de radium. Divers instruments chirurgicaux étaient utilisés dans le traitement des tumeurs : le tampon au radium servait à traiter les tumeurs du col et du corps de l'utérus ; la source de rayonnement était introduite

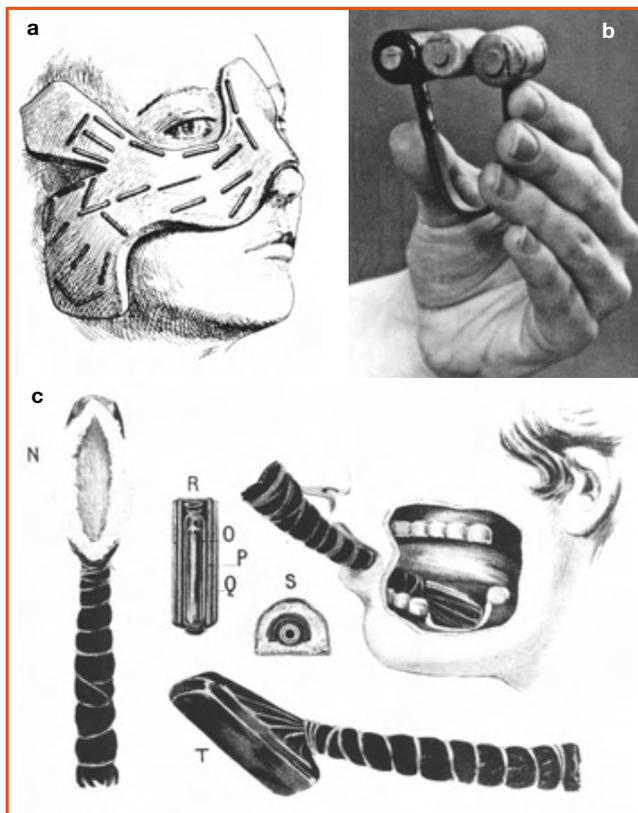
« La science est à la base de tout progrès qui simplifie la vie des hommes et atténue la souffrance. » Marie Curie [1].

dans la cavité de l'organe malade pour traiter le cancer du rectum. Chez les malades ayant un cancer de la prostate ou de la vessie, des aiguilles au radium étaient introduites dans la vessie par voie sus-pubienne ou dans la prostate par le rectum. Cette découverte a aussi révolutionné le traitement du cancer du sein car on a commencé à se servir d'aiguilles interstitielles au radium.

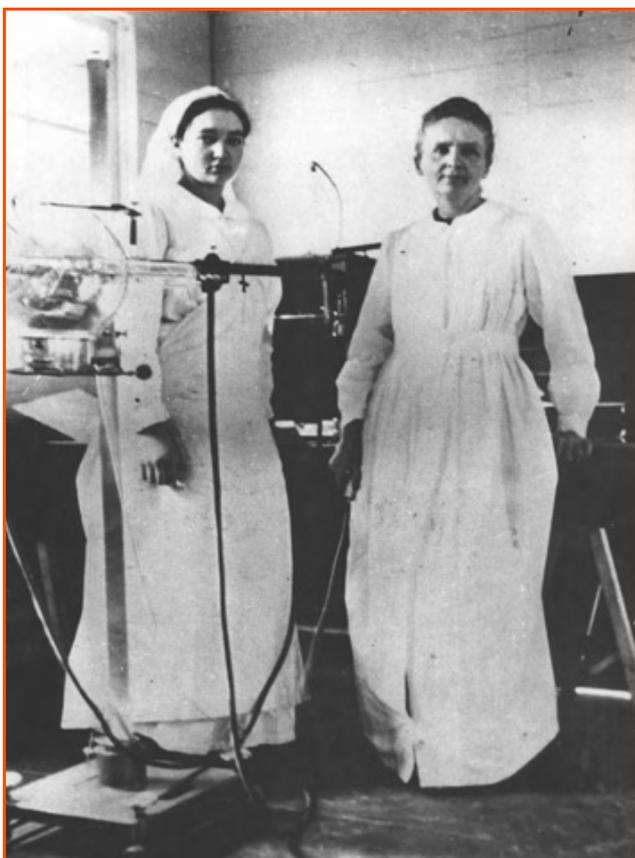
L'obtention du radium pour les besoins médicaux s'est avérée être un problème majeur au début du XX^e siècle. Le radium dont se servait Marie Curie provenait du minerai d'uranium extrait d'une mine tchèque se trouvant à Joachimsthal. C'était alors la seule source de minerai riche en radium. À la veille de la Première Guerre mondiale, d'autres gisements ont été découverts dans la province de Katanga au Congo belge. Ils ont constitué la principale source de radium jusqu'à ce que l'on en découvre d'autres au Colorado (États-Unis).

Les traitements pour extraire le radium ont tous été basés sur des procédés dont le principe a été mis au point par Marie Curie. Il n'y aurait donc pas eu et il n'y aurait pas aujourd'hui de traitement médical basé sur l'irradiation, ni de progrès de la médecine nucléaire, sans les découvertes novatrices de Marie et Pierre Curie.

Lors d'une conférence aux États-Unis au Vassar College le 16 mai 1921, Marie Curie déclarait : « Lorsque le radium a été découvert, personne ne savait qu'il serait utile dans les hôpitaux. Il s'agissait d'une étude purement scientifique. C'est un argument pour que les recherches scientifiques ne soient pas jugées du point de vue de l'utilité immédiate. La science devrait être évaluée par elle-même, à cause de sa beauté, sans oublier qu'il y a toujours une possibilité pour qu'une découverte scientifique, telle qu'était celle du radium, puisse devenir un bienfait pour l'humanité. » Et elle ajoutait



Aiguilles au radium (a), tampons au radium utilisés dans le traitement du cancer du col l'utérus (b), et applicateurs utilisés dans le traitement du cancer de la cavité buccale (c).



Marie et Irène durant la Première Guerre mondiale.

plus tard : « *L'humanité a sans doute besoin d'hommes qui travaillent essentiellement pour subvenir à leurs propres besoins sans qu'ils oublient ceux des autres. Mais elle a aussi besoin de rêveurs dont la recherche désintéressée de tout but est si intense qu'ils ne peuvent faire attention à leur propre profit matériel.* »

Nous ne pouvons pas oublier que cette remarquable scientifique a commencé à travailler dans des conditions particulièrement difficiles, non seulement matérielles mais aussi morales. En tant que femme, elle était discriminée, soit comme savante, soit comme Polonaise. « *Elle pourrait être une légende si ses réalisations et sa vie n'étaient pas réelles* » a écrit sa fille, Eve Curie.

Un siècle après l'extraction du radium de la pechblende, Richard F. Mould écrira aussi : « *Ni la radiothérapie ni la médecine nucléaire n'auraient pu voir le jour sans les travaux novateurs de Marie et de Pierre. Ces travaux ont été d'abord conduits collectivement jusqu'à la mort de Pierre en 1906 et poursuivis ensuite par Marie dans la solitude. Les circonstances extrêmement difficiles et fatales dans lesquelles elle a dû travailler au laboratoire de la rue Lhomond pour obtenir du radium et cela dans un contexte de discrimination d'une femme savante n'auraient jamais dû être rendues possibles* » [2].

Le génie de Marie Curie et l'influence de ses découvertes sur la médecine ne se sont pas limités à l'utilisation du radium. Elle a aussi joué un rôle remarquable dans l'organisation des services de radiologie sur les fronts de la Première Guerre mondiale. Ses actions ont été particulièrement visibles sur le front franco-belge, où elle a organisé le réseau des ambulances appelées les « petites Curie », dans lesquelles se trouvaient des appareils

transportables de radioscopie. Marie Curie ne s'est pas seulement engagée dans l'organisation, mais elle a aussi conduit des véhicules, et pour cela a passé une permis de conduire – c'était l'une des premières femmes à l'obtenir. En compagnie de sa fille Irène, elle formait le personnel pour bien utiliser ces appareils. Elle a donné des cours aux soldats américains en 1918. Selon les estimations, environ trois millions de soldats français ont été examinés grâce à ces appareils, qui ont permis de progresser dans les soins médicaux apportés aux blessés de guerre. Elle publiera ces avancées en 1921 dans l'ouvrage intitulé *La radiologie et la guerre*.

Sa troisième mission a été de créer les Instituts du Radium, souvent appelés « Instituts Curie ».

En 1911, lorsqu'elle reçoit son deuxième prix Nobel, elle persuade le gouvernement français de financer la construction de l'Institut du Radium (appelé aujourd'hui Institut Curie). Créé en 1914, on y a mené des travaux dans le domaine de la chimie, de la physique et de la médecine. C'est là que sa fille, Irène, et son gendre, Frédéric Joliot, ont travaillé. Ils recevront le prix Nobel de chimie en 1935 pour leur découverte de la radioactivité artificielle.

Après la Première Guerre mondiale, elle a aussi créé une Fondation lui permettant de bâtir des Instituts médicaux pour le traitement des maladies tumorales. Son rêve le plus cher était de créer un Institut du Radium en Pologne. La position de Marie Curie dans le monde de la science et dans l'opinion publique était alors telle qu'elle a pu convaincre les autorités polonaises de le créer à Varsovie. À ce moment là, les conditions pour le développement de la science de la radioactivité et le traitement des malades atteints de maladies tumorales étaient tout à fait satisfaisantes.

Le Comité fondateur de l'Institut du Radium à Varsovie mis en place en 1921 (dont la présidente d'honneur était Marie Curie) était composé, entre autres, de Franciszek Czubalski et de Ludwik Paszkiewicz, futurs professeurs de l'Académie de médecine à Varsovie. En 1925, Marie Curie se rendra en Pologne pour la cérémonie de la pose de la première pierre de l'Institut rue Wawelska, en présence du Président de la République de Pologne, Stanisław Wojciechowski. Lors de l'inauguration le 23 mai 1932, elle était accompagnée du Président Ignacy Mościcki et de Claudius Regaud, directeur de l'Institut Curie à Paris.

Bronisława Dłuska, la sœur de Marie, a joué un très grand rôle dans la création et l'administration de l'Institut du Radium de Varsovie. La photo ci-dessous montre Marie Curie



Maria Skłodowska-Curie plante un arbre commémoratif après l'inauguration de l'Institut du Radium à Varsovie (1932).

plantant un *Ginkgo biloba*, sur lequel une plaque commémorative a été inaugurée en 1948 par le directeur du Centre d'oncologie, Tadeusz Koszarowski. Elle offrira à l'Institut 1 g de radium pour son fonctionnement. Les 80 000 \$ qui faisaient partie du don à l'Institut ont été recueillis lors d'une quête publique auprès des femmes américaines d'origine polonaise. L'Institut a pu être créé grâce à l'aide financière de l'État, sans oublier une foule immense de donateurs qui voulaient participer à cet objectif hautement louable. Leurs noms figurent sur les plaques accrochées dans le hall.

Marie Curie s'est révélée très efficace dans la collecte de fonds pour le traitement des malades par le radium. En 1921, elle a été reçue par le Président des États-Unis, Warren Harding. À la suite de cette visite, elle est revenue à Paris avec 1 g de radium qu'elle a donné à l'Institut du Radium. Pendant sa deuxième visite aux États-Unis en 1929 et après avoir rencontré le Président Herbert Hoover à la Maison Blanche, elle a réussi à obtenir de l'argent afin d'acheter le radium pour l'Institut de Varsovie.

Les Instituts du Radium comme centres de traitement des malades ayant des tumeurs ont été créés dans les années 30, non seulement en Europe, mais aussi partout dans le monde, comme l'Institut Curie de l'Indochine, créé en 1923 à Hanoï. Cet Institut fonctionne depuis lors comme Institut national du cancer. Sa pérennité confirme la thèse selon laquelle la découverte du radium par Marie Curie a su conquérir le monde à une époque où personne ne songeait à l'existence de l'Internet.

Marie Curie est rapidement devenue une autorité dans le domaine de la radioactivité et ceci jusqu'à la fin de sa vie. Pendant plusieurs années, elle a mené des recherches sur l'équivalence entre le radium et son rayonnement. Ces travaux ont abouti à l'élaboration de l'unité de mesure appelée Curie et à la métrologie de la radioactivité. En l'honneur de Marie et Pierre Curie, le nouvel élément transurannique découvert en 1944 a pris le nom de curium. Elle est l'auteur du *Traité de radioactivité*, premier ouvrage résumant toute la problématique liée à la radioactivité.

On pourrait caractériser l'attitude de Marie Curie envers la vie par cette phrase écrite en 1929 dans une lettre à Missy Meloney, son amie américaine : « *Je pense beaucoup plus à ce qu'il faut faire qu'à ce qui a été fait.* »

Les conseils qu'elle donnait avaient très peu à voir avec son comportement. Ainsi en témoigne son activité en faveur de la protection des droits d'auteurs d'une découverte. Au sein de la Commission internationale de coopération intellectuelle (CICI) auprès de la Ligue des Nations, Marie Curie a travaillé sur et appuyé la résolution qui prévoyait d'octroyer des droits de propriété aux scientifiques et aux inventeurs pour leur permettre de tirer profit de leurs découvertes. Vingt ans auparavant, elle avait pourtant décidé avec son mari Pierre de ne pas breveter le procédé et la technologie de l'obtention du radium dont se servira l'industrie pendant de longues années, déclarant : « *Le*

radium ne devrait enrichir personne étant donné qu'il appartient à tout le monde » [1].

En 1922, les trente-cinq membres de l'Académie de médecine à Paris rompaient avec la tradition interdisant aux femmes d'intégrer leur société et recommandaient la candidature de Marie Curie pour sa découverte du radium et son apport dans le développement de la « curiethérapie ». Le 2 février 1922, elle était élue membre de l'Académie de médecine.

Marie Curie, honorée de la Légion d'honneur, distinguée par plusieurs titres de docteurs *Honoris causa* décernés par les universités polonaises et américaines, décèdera le 4 juillet 1934 dans un sanatorium de Sancellemoz en Haute-Savoie, probablement d'une leucémie causée par les doses excessives d'irradiation qu'elle a reçues lors de ses recherches.

En 1995, sa dépouille et celle de Pierre Curie ont été solennellement transférées au Panthéon de Paris, en présence de leur fille Eve Curie-Labouisse, du Président de la République française, François Mitterrand, et du Président de la République de Pologne, Lech Wałęsa. Elles reposent à présent parmi les plus grands hommes de science, de culture et de politique de France. Marie Curie est la première femme dans l'histoire à avoir eu ce privilège.

Albert Einstein, ami de Marie Curie a dit : « *Madame Curie est, parmi tous les grands de ce monde, la seule personne dont le renom n'a pas été altéré par la gloire.* »

C'était une femme savante universellement connue, une Polonaise illustre et éduquée, une femme qui a pu réaliser en France ses découvertes, car c'est en France qu'elle a trouvé les conditions propices à ses travaux.

Plusieurs Présidents lui ont présenté leurs hommages, de son vivant ou après sa mort, comme le font à leur tour, cent ans après son prix Nobel de chimie, le Président de la République française, Nicolas Sarkozy, et le Président de la République de Pologne, Bronisław Komorowski.

Pour honorer cette femme illustre, l'année 2011 est déclarée en Pologne « Année Marie Skłodowska-Curie ».

Notes et références

Les photographies historiques sont tirées de la référence [2], et de R.F. Mould, *Radium History Mosaic*, Maria Skłodowska-Curie Memorial Cancer Center and Institute of Oncology, Varsovie, 2007.

(1) La version complète, richement illustrée (50 photographies), est publiée par Rektor Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego, Varsovie, 2011 (ISBN 978-83-7637-192-4).

[1] Curie E., *Maria Curie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Varsovie, 1997.

[2] *Maria Skłodowska-Curie*, N° spécial du *Polish Oncological Journal Nowotwory*, E. Towpik, R.F. Mould (eds), Varsovie, 1998.

Correspondant de l'Académie polonaise des sciences, le professeur **Marek Krawczyk** est docteur d'État en sciences médicales, recteur de l'Université de Médecine de Varsovie, membre de l'Académie nationale de chirurgie et membre honoraire de l'Association française de chirurgie.

Connaissez-vous bien le site de l'AC ?
www.lactualitechimique.org
 Alors vite, à votre souris !



L'Actualité Chimique

SCF, 28 rue Saint-Dominique, F-75007 Paris

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

redaction@lactualitechimique.org

www.lactualitechimique.org

Abonnement 2011 (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	(pour les lycées et les institutions)
Particuliers	<input type="checkbox"/> 95 €	<input type="checkbox"/> 100 €	<input type="checkbox"/> 55 €	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 400 €
Lycées	<input type="checkbox"/> 110 €	<input type="checkbox"/> 130 €	<input type="checkbox"/> 70 €	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 400 €
Institutions	<input type="checkbox"/> 195 €	<input type="checkbox"/> 205 €	<input type="checkbox"/> 155 €	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 400 €

* 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 <http://www.lactualitechimique.org>

Les numéros spéciaux

Les numéros spéciaux sont disponibles en **version électronique** sur le site à un tarif préférentiel

- La chimie aujourd'hui dans les laboratoires, vol. I (janv.-fév. 2011) : 32 €
- La chimie mène l'enquête (juin-juillet-août 2010) : 32 €
- Chimie et développement durable. L'engagement des écoles de la Fédération Gay-Lussac (fév.-mars 2010) : 32 €
- Adolphe Pacault, un acteur majeur dans la renaissance de la chimie physique en France (décembre 2009) : 24 €
- Electrochimie & Art, Environnement, Santé, Nanosciences... (fév.-mars 2009) : 32 €
- Les cosmétiques. La science au service de la beauté (oct.-nov. 2008) : 15 €
- Chimie organique physique. Hommage à Jacques-Émile Dubois (juin-juil. 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 €
- Chimie moléculaire et nanosciences (oct.-nov. 2005) : 15 €
- Sciences chimiques et déchets radioactifs (avril-mai 2005) : 15 €
- Le chimiste et le profane (2004) : 15 €
- Chimie et environnement (2004) : 15 €
- La chimie dans les sciences médicales (2003) : 15 €
- Les isotopes stables (2003) : 15 €
- Quoi de neuf en chimie organique ? (2003) : 15 €
- La chimie des substances renouvelables (2002) : format papier épuisé
- La catalyse enzymatique (2002) : 15 €
- Quoi de neuf en catalyse ? (2002) : 15 €
- Les matériaux (2002) : 15 €
- L'hydrogène, carburant propre ? (2001) : 15 €
- Magnétisme moléculaire (2001) : 15 €
- La femtochimie (2001) : 15 €
- Nourrir les hommes, hier et demain (2000) : 15 €
- La chimie combinatoire (2000) : 15 €
- Chimie et vie quotidienne (1999) : 15 €



Achat à l'unité hors numéros spéciaux

11 € pour les numéros avant 2010 ; 20 € à partir de 2010
(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

- 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 <http://livres.edpsciences.org>



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@societechimiquefrance.fr - <http://www.lactualitechimique.org>

Si on parlait

CHIMIE!

2011, année internationale

parce que la chimie,
c'est l'affaire de tous.



Sous le Haut Patronage de
Monsieur Nicolas Sarkozy
Président de la République.

www.chimie2011.fr

Conception graphique et réalisation : CNRS, juin 2010 - © CNRS Photothèque - © Marsy, Maksim Shmeljov - Fotolia.com



Année internationale de la
CHIMIE
2011

Académie des Sciences | Association Curie et Joliot-Curie | Association européenne pour les sciences chimiques et moléculaires (EuCheMS) | Centre national de la recherche scientifique (INC-CNRS) | CEA | Fédération française pour les sciences de la Chimie (FFC) | Fédération Gay-Lussac | Fondation Maison de la Chimie | Musée Curie, Institut Curie | Organisation des Nations Unies pour l'éducation la science et la culture (UNESCO) | Société chimique de France (SCF) | Société française de métallurgie et de matériaux (SF2M) | Union des professeurs de physique et de chimie (UDPPC) | Union des Industries Chimiques (UIC) | Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC)