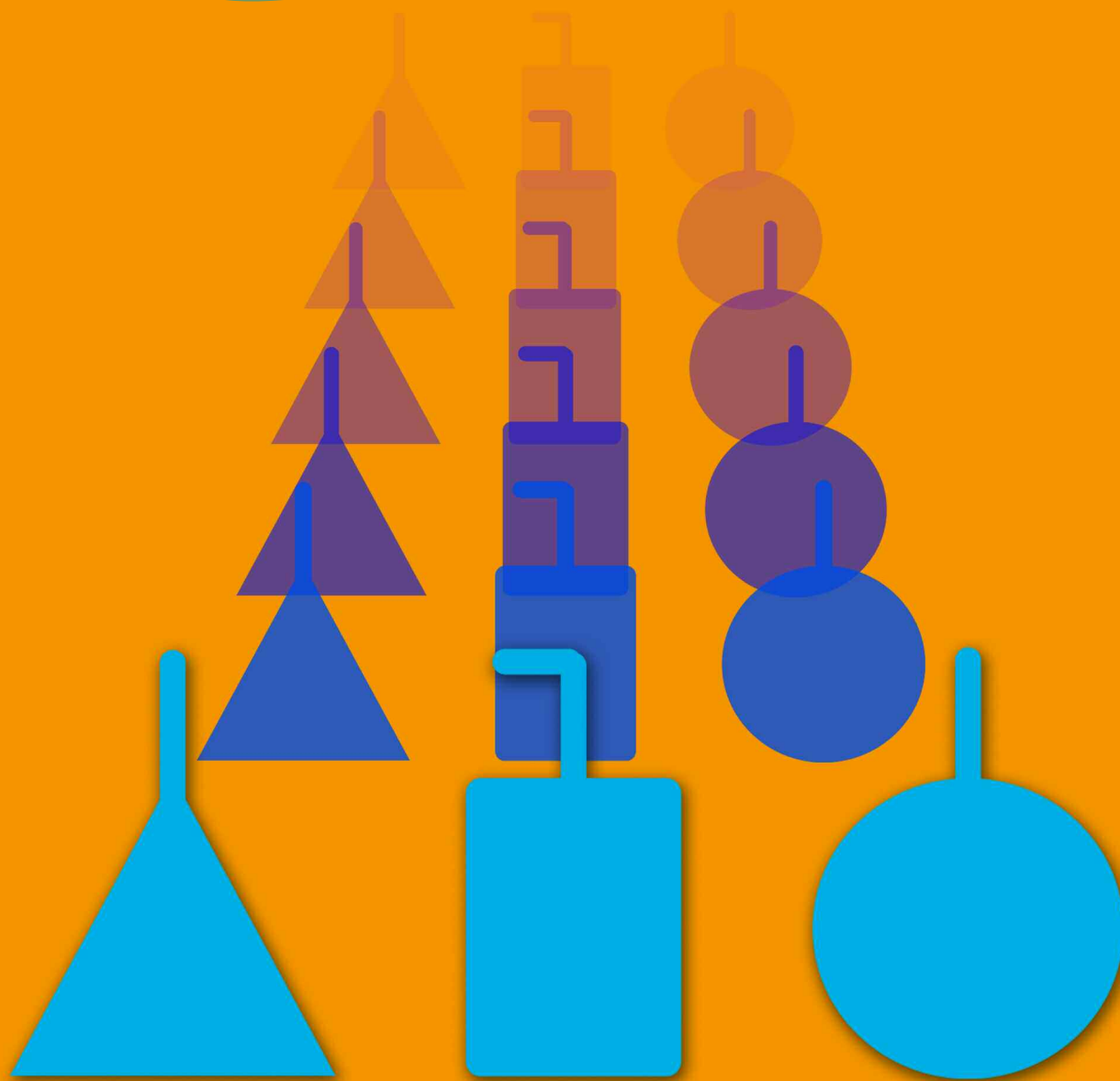


l'actualité chimique

Le journal de la Société Chimique de France
Février 2017 - N° 415



CHIMIE(S) ET VÉRITÉ(S)

UNE VISION INHABITUELLE DE LA CHIMIE ENSEIGNÉE



Société Chimique de France



Institut Galien Paris-Sud - UMR CNRS 8612

Directeur : Pr. Elias FATTAL



Le principal objectif de l'Institut Galien Paris-Sud (UMR CNRS 8612) est d'élaborer des systèmes innovants et originaux d'administration et de transport des médicaments (nanotechnologies pour la vectorisation et microtechnologies en tant que systèmes à libération contrôlée), d'agents de contraste ou encore de concevoir des nanotechnologies pour le diagnostic in vitro.

La stratégie de l'Unité est structurée autour de deux grands pôles : (i) un pôle de physico-chimistes représenté par quatre équipes dont une est axée sur la chimie analytique et (ii) un pôle de galénistes représenté par trois équipes.

Les équipes constitutives de ces pôles bénéficient du soutien technique de 6 services communs : (i) le service de culture cellulaire, (ii) le service de radioactivité, (iii) le service des prototypes, (iv) le service analytique, (v) le service d'interaction moléculaire, (vi) le service de rhéologie.

L'institut Galien Paris-Sud publie tous les ans entre 80 et 100 articles dans des revues internationales majeures et dépose 2 à 3 brevets. A partir de ses nombreux brevets, plusieurs entreprises ont été créées (Onxeo, Medsqual, Da Volterra, Alzohis, BioKawthar Technologies...).



Institut Galien Paris-Sud, UMR CNRS 8612
Faculté de Pharmacie
5 Rue Jean-Baptiste Clément
92290 Châtenay-Malabry
Tel : +33146835582
E-mail secrétariat : dominique.martin@u-psud.fr
Site web : <http://www.umar-cnrs8612.u-psud.fr>
Twitter : @umr8612

Physico-chimie des surfaces
Pr. Véronique ROSILIO

Physico-chimie des systèmes polyphasés
Dr. Sylviane LESIEUR

Physique pharmaceutique
Pr. Florence AGNELY

Protéines et nanotechnologies en sciences analytiques
Pr. Myriam TAVERNA

Ingénierie particulière et cellulaire à visée thérapeutique
Pr. Elias FATTAL

Amélioration du passage des barrières par les molécules biologiquement actives
Pr. Gilles PONCHEL

Nanomédicaments innovants pour le traitement des maladies graves
Pr. Patrick COUVREUR

Services communs
Culture cellulaire, radioactivité, prototypes, chimie analytique, interaction moléculaire, rhéologie

RÉDACTION

Rédactrice en chef par intérim :

Gilberte Chambaud

Rédactrice en chef adjointe :

Séverine Bléneau-Serdel

Secrétaire de rédaction : Roselyne Messal

Chef de rubrique, Collection « Chimie et » :

Minh-Thu Dinh-Audouin

Rédactrice en chef honoraire :

Rose Agnès Jacques

Conseiller de la Rédaction : Jean-Pierre Foulon

Secrétariat : Martine Maman

Webmestre : Pierre Miquel

Comité des rubriques :

Recherche et développement : Séverine Bléneau-Serdel, Enseignement et formation : Katia Fajerwerg, TP : Xavier Bataille, Industrie : Joël Barraud, Histoire de la chimie : Danielle Fauque, Un point sur : Jean-Pierre Foulon, Chimie des aliments et du goût : Hervé This, En bref : Séverine Bléneau-Serdel et Roselyne Messal, Actualités de la SCF et Agenda : Roselyne Messal, Livres et médias : Yves Dubosc

Comité de rédaction :

J. Belloni, E. Bordes-Richard, C. Cartier dit Moulin, G. Chatel, P. Colomban, C. de Novion, J. Fournier, N. Jaffrezic, F. Launay, J. Livage, V. Marvaud, M.-T. Ménager, C. Monneret, N. Moreau, J.-M. Paris, P. Pichat, A. Picot, H. Toulhoat, L. Valade, P. Walter, S. Younes

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

adhesion@societechimiquedefrance.fr

Tél. : 01 40 41 71 60/66

Rédaction : 28 rue Saint-Dominique, 75007 Paris

Tél. : 01 40 46 71 64 - www.lactualitechimique.org

redaction@lactualitechimique.org

Directrice de la publication : Gilberte Chambaud,

présidente de la Société Chimique de France

Imprimerie : N. Fortin & ses fils imprimeurs

94800 Villejuif

Maquette articles : Redouane Sahih

sahih.redouane@gmail.com

Maquette hors articles : Mag Design

mag.design@me.com - www.magdesign.fr

ISSN version papier 0151 9093

ISSN version électronique 2105 2409

PUBLICITÉ

FFE, 15 rue des Sablons, 75016 Paris

Tél. : 01 53 36 20 40 - www.ffe.fr

Index des annonceurs : p. 3

© SCF 2017 - Tous droits réservés

Dépôt légal : février 2017

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

TARIFS 2017 - L'ACTUALITÉ CHIMIQUE

(11 numéros par an)

Abonnement papier + électronique

Particuliers : France 105 € - Étranger 110 €

Institutions : France 205 € - Étranger 220 €

Lycées : France 120 € - Étranger 140 €

Abonnement électronique seul (France/Étranger)

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

Membres de la SCF : abonnement inclus

dans la cotisation ou à tarif préférentiel

Abonnement : SCF, Martine Maman

250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris

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

abonnement@lactualitechimique.org

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



Éditorial

Nos jeunes chimistes et les réformes des programmes du secondaire, par **G. Chambaud** 2

Clin d'œil étymologique

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

Chroniques

Chimie et beauté : la French touch !, par **J.-C. Bernier** 5

À propos de

Apprivoiser les virus pour en faire des alliés, par **C. Monneret** 7

JIREC 2016 : Chimie(s) et vérité(s)

9-43

(coord. : K. Fajerwerg, T. Hamaide et J. Randon)

« Chimie(s) et vérité(s) » : retour sur les JIREC 2016, par **K. Fajerwerg,**

J.-P. Foulon, T. Hamaide et J. Randon 9

Chimie(s) et vérité(s)

Chimies et vérités : initiation aux langages du réel, par **L. Roy** 15

Simulations (moléculaires) et vérité, par **J. Diharce, J. Golebiowski et S. Antonczak** 19

Analyse des contrefaçons dans les produits naturels et biosourcés,

par **H. Casabianca et P. Jame** 21

La question de la vérité posée à travers les écrits de Pasteur, par **F. Boule'h** 25

« EXPERTS à l'École », une opération menée par « Sciences à l'École », par **C. Mahé** 27

Prix de la division Enseignement-Formation 2016

Développement de l'enseignement de la chimie moléculaire des éléments

de transition : quelques pistes, par **D. Astruc**

Ateliers 31

• Outils numériques

La plateforme d'enseignement WIMS, par **D. Buskulic** 34

Utilisation de tablettes numériques pour un enseignement interactif de la chimie,

par **S. Condom et F. Serein-Spirau** 35

Des boîtiers de vote en classe : pourquoi, quand et comment ?, par

J.-F. Parmentier, C. Rabut, J. Huez, O. Dechy-Cabaret et M.-C. Betbeder 37

Régression linéaire, droite d'étalonnage et incertitude, par **E. Curis et J. Randon** 39

• Innovations pédagogiques

Les VIDEXOS, par **V. Villar, P. Bernard et S. Despax** 40

Les fictions cinématographiques : un outil pédagogique de premier choix,

par **F. Griffaton** 41

Évaluation des connaissances des lycéens en chimie-thermodynamique à l'entrée à

l'INSA : mise en place de questionnaires de rentrée inter-INSA, par **M. Fregonese,**

H. Métivier, C. Daiguebonne, P. Gall, I. Delaroche, J.-N. Foussard, S. Mathe,

C. Moulis, J.-P. Andrieu et N. Serres 42

• Ateliers expérimentaux

Chimie et illusion, par **E. Amadei et G. Canicave** 43

L'expérience, source et critère de toute(s) vérité(s) en chimie, par **M. Verdaguer** 43

Industrie

Bioproduction fermentaire de l'isobutène : enjeu industriel et défi scientifique,

par **P. Marlière et M. Allard** 44

Histoire de la chimie

Athanase Peltier (1785-1845) et la thermoélectricité, par **B. Boucher** 50

En bref

55

Livres et médias

58

Agenda

60

Actualités de la SCF

61

Hommage

62

Paul Hagenmuller (1921-2017) : le « vieux lion » est mort, par **J.-C. Bernier**

Un point sur

63

Les textiles tissent le futur, par **L. Schacher**

Couverture : d'après le projet de Camille Descombes (voir p. 11).

Conception graphique : Mag Design – www.magdesign.fr



Nos jeunes chimistes et les réformes des programmes du secondaire

On observe actuellement une augmentation des besoins en scientifiques de niveau bac + 5 et + 8 (ingénieurs et docteurs) car les sciences et les technologies sont de plus en plus sollicitées, qu'il s'agisse des défis environnementaux (climat, énergie, pollution, biodiversité), des biotechnologies, de la santé, de l'urbanisation, des transports ou de la mondialisation de l'économie. De quelles compétences notre pays aura-t-il besoin et quelle est la capacité de notre système de formation à répondre à cette demande ?

Avec la dernière réforme des programmes du secondaire, il y aurait apparemment une régression des niveaux d'apprentissage en sciences dans l'enseignement secondaire. Or, les sciences y sont bien présentes, même si il y a une diminution des horaires de sciences en filière S et une modification des contenus scientifiques enseignés et surtout de la philosophie de ces programmes. Selon un postulat que les mathématiques font peur aux élèves, il a été décidé de débarrasser l'enseignement des sciences de tout formalisme mathématique, et notamment l'enseignement de la physique-chimie de toute trace d'équation et de modélisation. Ceci n'a pas diminué l'attrait des filières scientifiques pour les lycéens. Le bac S a compté 163 000 lauréats en 2014, ce qui correspond à une grande partie de la classe d'âge. Parmi eux, environ 50 000 étudiants seront titulaires d'un niveau bac + 5 dans une discipline scientifique et se dirigeront vers des carrières dans la recherche (pour un tiers d'entre eux), dans l'industrie ou les services proches des activités scientifiques et technologiques.

Dès la rentrée universitaire 2013, il a été constaté que les étudiants qui avaient vécu cette réforme étaient toujours très intéressés par les sciences, qu'ils avaient une ouverture scientifique plus large, des capacités plus importantes qu'auparavant à l'oral, qu'ils faisaient preuve de davantage d'autonomie, de capacités à la recherche d'informations, toujours curieux, motivés, spontanés, accrocheurs et volontaires pour progresser. Ceci est valable autant pour les filles que pour les garçons. Le constat est plutôt encourageant, mais en contrepartie, on observe un recul en mathématiques avec des difficultés autour des calculs algébriques, de l'appréciation des ordres de grandeur, de la résolution de problèmes en plusieurs étapes, des lacunes dans des notions assez basiques, en physique, en chimie, en trigonométrie, en intégration, et des difficultés rédactionnelles et de mémorisation à long terme. De plus, on relève une diminution des compétences expérimentales par rapport aux titulaires du bac STI précédent. Il faudra sans doute s'attacher dans les années à venir à accroître la place de la démarche scientifique et de l'expérimentation dans l'enseignement, du primaire au supérieur.

Pour développer la démarche scientifique, la variable temps est essentielle : il faut faire et refaire, se tromper et

apprendre de ses erreurs et parvenir à connecter des connaissances issues de disciplines différentes. Il faut du temps pour que se mettent en place les mécanismes de raisonnement, de mise en équation des phénomènes physiques et chimiques, de questionnement des résultats obtenus par le calcul. Il faut apprendre à concilier le temps long de la recherche et de l'université avec les contraintes, parfois plus immédiates, de la société et des entreprises, qui expriment légitimement des demandes.

Quelle sera l'insertion professionnelle de ces étudiants qui arrivent dans l'enseignement supérieur ?

Avec des programmes plus généraux, maintenant construits pour ceux qui ne poursuivent pas nécessairement des études scientifiques de niveau bac + 5, il n'est pas scandaleux que seule une partie minime de ces jeunes arrive au niveau doctorat – on en compte moins de 10 %. La filière scientifique n'est pas seulement destinée à former des chercheurs en mathématiques, en physique, en chimie ou en biologie..., mais aussi à alimenter un vaste réseau de futurs professionnels qui vont avoir besoin de connaissances scientifiques dans de nombreux domaines. L'orientation progressive et le désir de sciences ne doivent pas être brimés, tout le monde y a droit car les sciences, et en particulier la chimie, ont besoin de toutes ces ressources humaines.

Il semble par ailleurs que la culture scientifique des étudiants reste superficielle à la sortie du lycée et à l'entrée à l'université. La question que nous devons nous poser est de savoir ce qu'il faut apprendre à nos étudiants. Comment les préparer pour les 40 ou 45 ans de leur future vie professionnelle ? La réussite à un concours à 20 ans ne suffit pas pour conduire une carrière professionnelle jusqu'à 70 ans. Mais soyons optimistes, en cinq ou huit ans, on parvient à amener ces étudiants à un bon niveau.

Le doctorat scientifique est la dernière étape dans la formation scientifique universitaire. Bien évidemment, la réforme de 2010 n'impacte pas les doctorants actuels ; mais il serait illusoire de croire que cette réforme va induire de grandes transformations. Une personne qui a effectué une thèse et acquis une connaissance extrêmement approfondie d'un sujet dispose indéniablement d'une capacité à évoluer dans la mesure où ses travaux lui ont apporté des méthodes et concepts susceptibles d'être transposés dans un autre domaine ou un autre métier.

Le doctorat scientifique français a été soumis à de nombreuses modifications en grande partie pour l'harmoniser avec les formations européennes. En 1998, avec la mise en place du processus de Bologne, avec le LMD (3-5-8), le doctorat est devenu une brique de la formation universitaire, avec des règles s'appuyant sur les connaissances, les compétences et la capacité d'innovation, très importantes

pour l'employabilité des docteurs. Le dernier arrêté sur les doctorats (paru en mai 2016) affirme le caractère spécifique de la thèse en tant que formation à la recherche et par la recherche, accompagnée d'une expérience professionnelle. Les doctorants ne sont en effet plus des étudiants, mais des chercheurs en CDD.

Les dernières statistiques disponibles indiquent qu'il existe actuellement en France 80 000 doctorants, dont pratiquement 50 % en sciences et techniques et en sciences du vivant. Ils sont accueillis dans 284 écoles doctorales, qui encadrent les formations doctorales et fournissent des compléments, des cours (notamment de langues) et des éléments de connaissance de l'entreprise. Près de 9 500 thèses sont soutenues chaque année en sciences et techniques (3 000 en chimie) par des étudiants issus des masters français et des écoles d'ingénieurs, avec une part importante d'étudiants étrangers.

La situation à cinq ans après la soutenance montre que 82 % des docteurs sont en CDI. Ils se retrouvent à 96 %

dans des emplois de cadres, pour les deux tiers d'entre eux, en poste dans des fonctions de recherche académique (universités, CNRS, CEA...) ou dans le privé, conformément à leur formation. Ils sont également présents dans la haute administration. Les chercheurs constituent 63 % des effectifs du domaine R & D du privé et 62 % des effectifs de la recherche publique. La formation par le doctorat s'avère donc être une formation de terrain qui favorise la capacité d'innovation et s'adapte à la demande de l'emploi. Comme dans les autres pays européens, il convient de reconnaître la valeur du doctorat dans les conventions collectives, comme l'État s'y est lui-même engagé dans la haute fonction publique.

Au sein de la Société Chimique de France, la division Enseignement-Formation prend part à la réflexion sur l'enseignement de la chimie tout au long du cursus scolaire. Elle organise notamment depuis 1984 des journées de rencontre où se retrouvent professeurs du second degré et du supérieur, chercheurs et industriels pour échanger autour d'un fil thématique conducteur : les JIREC, Journées pour l'innovation

et la recherche dans l'enseignement de la chimie. En 2016, lors des 32^e rencontres, le thème proposait une vision inhabituelle sur la véracité de la chimie enseignée : « Chimie(s) et vérité(s) ». Ce numéro de *L'Actualité Chimique*, mis à disposition librement en ligne afin qu'il puisse servir au plus grand nombre de nos collègues, en particulier de l'enseignement secondaire, est le reflet de ces journées. Merci à ses coordinateurs, Thierry Hamaide et Jérôme Randon, et particulièrement à Katia Fajerberg qui, depuis 2007, suit ces dossiers avec beaucoup de sérieux et d'enthousiasme.

Gilberte Chambaud

Rédactrice en chef par intérim,
Présidente de la SCF

Ce texte contient une partie des éléments issus des discussions recueillies lors d'une audition publique de l'OPECST réalisée le 6 octobre 2016, à laquelle la Société Chimique de France a participé : « Quelles perspectives pour la formation des scientifiques et des ingénieurs en France » (en ligne sur le site de l'Assemblée nationale : http://videos.assemblee-nationale.fr/video.4280820_57f5ed2b48545.opecst-audition-publique-queelles-perspectives-pour-la-formation-des-scientifiques-et-des-ingenie-6-octobre-2016).

17 mai 2017

Chimie et Jeux, Sciences et Jeux : apports dans l'enseignement

Villeurbanne

En 2017, la division Enseignement-Formation (DEF) de la Société Chimique de France (SCF) propose un nouveau format de rencontres intitulé « **Journée thématique de l'Enseignement** », plus compact, plus ciblé, localisé à Paris ou en province.

Après « HistoireS et PhilosophieS de la chimie : quels apports pour son enseignement ? » (rencontre qui s'est déroulée à Paris le 18 janvier dernier), la prochaine journée thématique se tiendra sur le Campus de la Doua (Université Claude Bernard Lyon 1) sur le thème de « Chimie et Jeux ». Cette journée, organisée par la DEF avec le partenariat du groupe physique-chimie de l'Inspection générale de l'Éducation nationale, vise à créer un dialogue entre les différents acteurs concernés par la chimie et son enseignement : enseignants du secondaire et du supérieur, chercheurs en chimie, didacticiens...

Les échanges permettront de nous interroger sur la place du jeu dans l'enseignement et les apprentissages. Quels sont les différentes catégories de jeux ? À quoi peut servir le jeu, à quel moment ? Quelle place dans le système de formation ? Quelles compétences peut-on développer par des approches de type jeux ? Comment créer et maintenir une dynamique à l'intérieur d'un jeu ? Quels outils pour transférer le mécanisme d'un jeu vers un autre jeu ? Quels peuvent être les usages du jeu pour la dynamique des grands groupes ?

Des conférences plénières permettront d'illustrer ces aspects, et une part importante de la journée (11 h-15 h) sera consacrée à la pratique du jeu ! Le mode est participatif, on vient avec son jeu pour jouer et apprendre.

Si vous souhaitez faire connaître, partager, diffuser vos expériences, si vous souhaitez venir présenter votre jeu et jouer, ou vos travaux sous forme d'articles, de posters, d'une communication lors de cette journée, prenez contact avec Arnaud Salvador ou Jérôme Randon*.

*arnaud.salvador@univ-lyon1.fr ; jerome.randon@univ-lyon1.fr

Index des annonceurs

CultureSciences-Chimie	p. 14	Institut Galien-Sud	2 ^e de couv.
EDP Sciences	4 ^e de couv.	LCBM	p. 24
ENS – Département de Chimie	p. 18	LCTS	p. 30
Fondation de la Maison de la Chimie	4 ^e de couv.	UdPPC	p. 36

Régie publicitaire : FFE, 15 rue des Sablons, 75016 Paris.
Tél. : 01 53 36 20 40 – www.ffe.fr



À propos du laiton

Cet alliage nous donne l'occasion d'évoquer aussi ses composants principaux, le cuivre et le zinc.

Même s'il a pu être produit incidemment en petites quantités dans l'Antiquité, le zinc n'a été identifié qu'à la fin du XVII^e siècle. On l'a nommé alors en allemand *zinch*, aujourd'hui *Zink*, peut-être de *Zinke*, « dent de fourche », à cause de la forme de certains cristaux de zinc à la sortie du four de métallurgie. Contrairement au zinc, le cuivre est bien connu, nommé et exploité, pur ou en alliage, depuis les temps les plus reculés.



Un sanglier en tôle de laiton du 1^{er} siècle av. J.-C. : réplique réassemblée au Keltenmuseum de Hallein (Salzbourg) de l'enseigne gauloise découverte en 1989 à Soulac-sur-Mer (Gironde).
Wikipédia Creative Commons, Licence CC-BY-SA-3.0, Wolfgang Sauber.

Le cuivre et le bronze à travers les âges

Le cuivre et l'étain font partie des sept métaux connus des Anciens, qui en tiraient un alliage de la première importance, le bronze, auquel ils donnaient cependant le même nom que celui du cuivre :

- en grec, *khalkos*, « cuivre, bronze », d'où en français l'élément *chalco-*, « cuivre » : ainsi en préhistoire, le *chalcolithique* est la période du début de l'industrie du cuivre, période intermédiaire entre le néolithique et l'âge du bronze ; d'où aussi la *chalcopyrite* (CuFeS₂) ;

- en latin classique *aes, aeris*, « cuivre, bronze », d'où viennent le nom poétique du bronze en français, *airain*, ainsi que le nom du cuivre, un peu surprenant, en italien *rame*, par l'intermédiaire d'un dérivé latin, *aeramen*, « cuivre, bronze ».

Puis en latin tardif, apparaît pour le cuivre le nom *cyprum*, dérivé de *Cyprus*, « Chypre », l'île de Vénus (elle-même surnommée *Cypris*). Ce nom, dû à l'abondance des mines de cuivre à Chypre, évolue en *cuprum*, d'où sont issus la plupart des noms du cuivre en Europe. Quant à *bronze*, c'est un nom emprunté à l'italien *bronz*, dont l'origine est incertaine : d'un nom persan ? Ou bien du nom de Brindisi, où, selon Pline l'Ancien, on produisait un bronze réputé ?

Les informations qui précèdent sont rassemblées dans le tableau ci-après, où les noms qui sont à l'origine d'une série d'autres sont écrits en gras :

grec	latin	italien	français	espagnol	anglais	allemand
inconnu	inconnu	<i>zinco</i>	<i>zinc</i>	<i>cinc</i>	<i>zinc</i>	← <i>Zink</i>
<i>khalkos</i>	<i>aes, aeris</i> → <i>cuprum</i>	<i>rame</i>	→ <i>cuivre</i>	<i>cobre</i>	<i>copper</i>	<i>Kupfer</i>
<i>khalkos</i>	<i>aes, aeris</i>	<i>bronz</i> →	<i>bronze</i>	<i>bronce</i>	<i>bronze</i>	<i>Bronze</i>
<i>Oreikhalkos</i> →	<i>orichalcum</i>	<i>ottone</i>	<i>laiton</i>	← <i>latón</i>	<i>brass</i>	<i>Messing</i>

Le laiton depuis l'Antiquité

Les Anciens pouvaient-ils produire du laiton, alors qu'ils ne connaissaient pas le zinc ? Oui car ils en connaissaient certains minerais, comme la calamine (silicate de zinc), dont ils tiraient, en combinaison avec le cuivre, un alliage entre cuivre et zinc. Cet alliage se nommait *oreikhalkos* en grec (« cuivre de montagne », sans doute à cause de mines situées en montagne), d'où *orichalcum* en latin, écrit aussi *aurichalcum*, sous l'influence de la couleur jaune d'or du laiton, parfois nommé *cuivre jaune*.

Certains dictionnaires usuels du français comportent encore le nom archaïque *orichalque*, supplanté de nos jours par *laiton*, qui est d'une tout autre origine.

Le nom *laiton*, attesté en français au XIII^e siècle, était *laton* en ancien français, lui-même relié à l'espagnol *laton* (aujourd'hui *latón*), attesté d'abord sous la forme *allaton* (en 852), avec un début en *al-* laissant penser à une origine arabe. D'après les dictionnaires étymologiques d'espagnol et de français, *laton* est en effet un emprunt à l'arabe *lātūn*, « laiton », lui-même relié au turc ancien *altun*, désignant l'or (aujourd'hui *altan*), ou le cuivre dans quelques rares dialectes. Toutefois, cette étymologie est controversée : l'espagnol *laton* pourrait avoir la même origine germanique que le français *latte*, le laiton étant fourni aux artisans sous forme de plaques allongées, des lattes. C'est ainsi que s'explique le nom du fer blanc (fer étamé) en espagnol, *lata*, et en italien, *latta*, travaillé également à partir de lattes.

Remarquons enfin que les noms du laiton en anglais, *brass*, et en allemand, *Messing*, sont complètement différents et d'origine obscure.

Épilogue

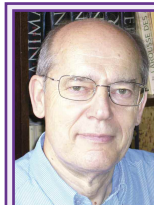
Revenons au minerai de zinc nommé *calamine*, déformation de son nom en latin, *cadmia*, emprunté au grec *kadmia*, dérivé de *Kadmos*, nom du légendaire fondateur de l'ancienne cité grecque de Thèbes, et cela parce que ce minerai, nommé aussi *pierre de Kadmos*, était extrait de mines voisines.

Or on a découvert un métal très proche du zinc (juste en dessous de lui dans la colonne 12 de la classification) dans cette calamine, d'où le nom de *cadmium* que le chimiste allemand Stromeyer lui a donné en 1817, à partir du latin *cadmia*, « calamine ».

On s'attendait à trouver les étymologies de *laiton*, *cuivre*, *zinc*, *bronze*, et de surcroît on trouve celle de *cadmium*.

Colonne 11 Colonne 12

29 63.546 Cu CUIVRE	30 65.39 Zn ZINC
47 107.87 Ag ARGENT	48 112.41 Cd CADMIUM



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

Courriel : pier.avenas@orange.fr

Chimie et beauté : la French touch !

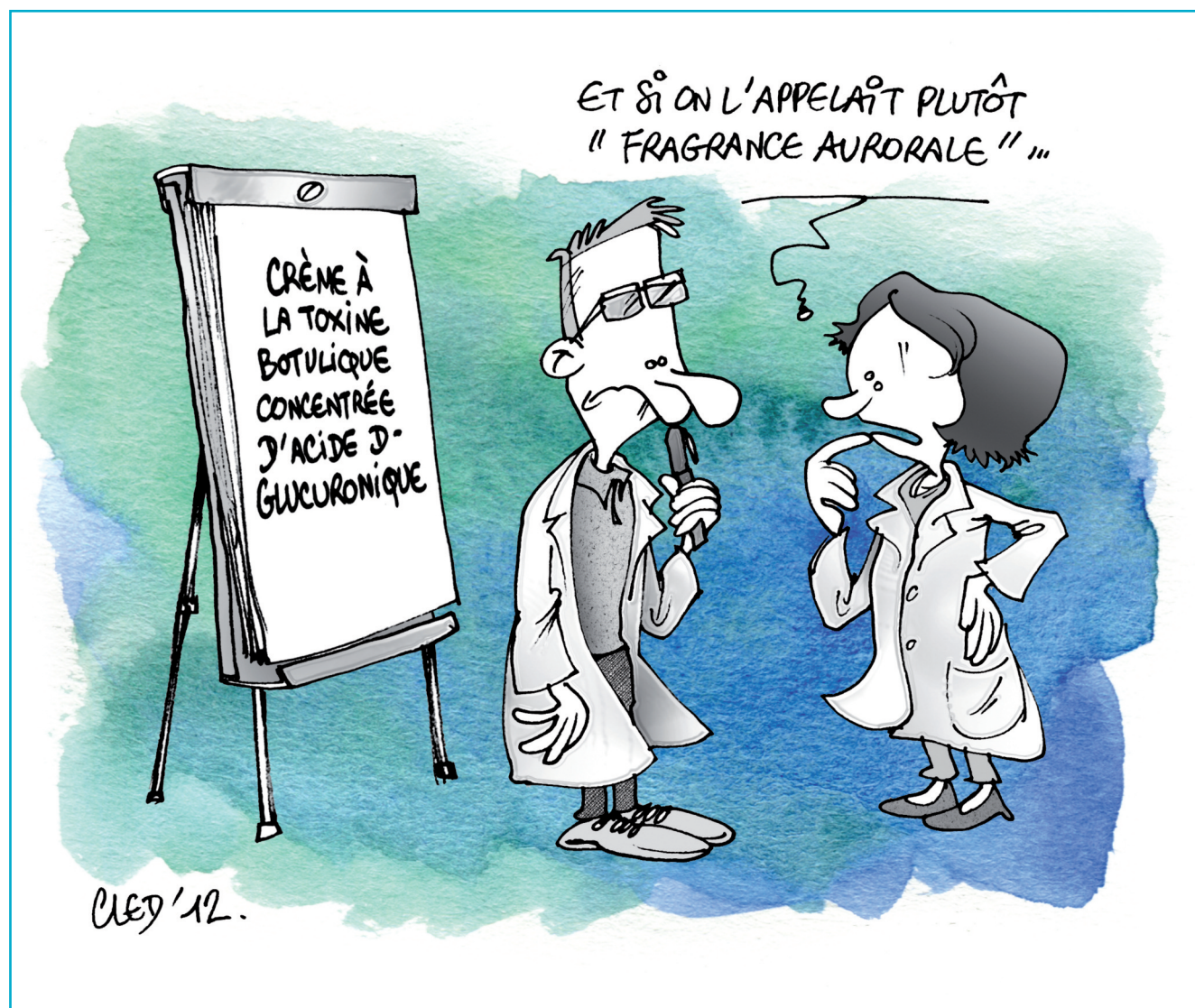
Si vous avez une fille ou petite fille adolescente, vous vous êtes sans doute déjà fait trainer durant de nombreuses minutes dans ces boutiques ou « showroom » où règnent le plus souvent des effluves très agréables des grandes marques de parfums, eaux de toilettes, cosmétiques, crayons divers, fards à paupières... Ne nous y trompons pas, ce marché où la chimie, la biologie, les matériaux sont présents est celui d'une véritable industrie qui génère le deuxième excédent commercial français, de l'ordre de 9 milliards d'euros en 2015. C'est qu'à côté d'une jeune clientèle avide de découvertes de nouveautés d'essais et de selfies, il existe une population vieillissante très soucieuse de gommer des ans l'irréparable outrage et qui succombe à la chirurgie esthétique et ses succédanés.

La « French aesthetic touch »

C'est une demande grandissante aux États-Unis, en Chine, au Brésil qui permet à des acteurs hexagonaux de surfer sur une réputation de pratiques fiables visant le naturel et non la sophistication hollywoodienne. À côté de crèmes anti-âges où le rétinol est roi et de molécules développées avec le CNRS, la France dispose de pépites de l'esthétique à l'image de Sebbin, devenu le quatrième mondial pour les prothèses mammaires. À la suite du scandale PIP, cette société apporte une attention particulière au silicone médical qui compose le gel de remplissage et l'enveloppe de la prothèse et un soin très minutieux au contrôle qualité du procédé de fabrication. Sa réputation lui a permis depuis 2012 une progression annuelle à deux chiffres.

Le marché du rajeunissement du visage est dominé par deux produits : le Botox® et l'acide hyaluronique.

La toxine botulique, qui a déjà fait quelques centaines de morts victimes de la bactérie botulique de jambons artisanaux mal conservés, est considérée ici comme un médicament. Son injection sous forme de gel paralyse les muscles et permet de s'attaquer aux plis entre les yeux. Le leader mondial est Allergan, qui la commercialise sous le nom de Botox® et qui lui a rapporté environ 2 milliards de dollars en 2015. L'acide hyaluronique ou hyaluronane est constitué d'une chaîne linéaire d'unités disaccharidiques de l'acide D-glucuronique et de D-N-acétylglucosamine. Cette structure supramoléculaire permet de préserver l'hydratation et la turgescence de la peau. En médecine esthétique, il est utilisé comme produit



de comblement des rides. En France, la société savoyarde VIVACY® fabrique le gel qui sera injecté dans la peau. Le marché mondial, dominé par la société Galderma, est en hausse de 9 % annuel et représente de l'ordre de 1,6 milliards d'euros. Attiré par ce marché en croissance, les groupes pharmaceutiques s'intéressent à ce secteur moins régulé et moins contraint au niveau des prix. Leur expertise médicale et leurs habitudes d'essais cliniques apportent une expérience qui peut être précieuse dans les process industriels ultra sécurisés. De nouveaux acteurs comme les industriels de la nutrition sont aussi sur les rangs. Galderma, à l'origine laboratoire de dermatologie cofondé avec l'Oréal, est devenu en 2014 filiale à 100 % du groupe Nestlé.

La French touch de la verrerie

La French touch ne concerne pas seulement le contenu mais aussi le contenant. Le flaconnage de parfumerie et des cosmétiques exige de la part des verriers une réactivité, une innovation et une inventivité du design qui doivent être constantes. Les verriers français comme Verescence, Brosse, Pochet... ont investi dans de nouveaux fours et des machines semi-automatiques, afin de garder le leadership mondial du flaconnage de luxe. Une caractéristique hexagonale est la concentration de ces verreries dans la vallée de la Bresle, à la frontière entre Seine-Maritime et Somme, entre Normandie et Picardie. Les historiens font remonter les origines de cette industrie verrière à l'époque gallo-romaine. Elle utilise le bois de la forêt d'Eu pour chauffer les fours jusqu'en 1873, où l'arrivée du chemin de fer permet de faire venir le charbon

d'Angleterre et concentre les usines en fond de vallée. L'automatisation de la fabrication dans les années 1950 spécialise les verreries dans les produits pour parfumeurs. On estime actuellement que le cluster de la vallée de la Bresle fournit de l'ordre de 70 % du flaconnage mondial de la parfumerie de luxe. Soixante-dix entreprises, près de 7 000 emplois et une flopée de sous-traitants – designers, maquettistes, moulistes et même des plasturgistes – complètent la filière. De nouvelles techniques, de nouvelles compositions de verre cristal sans plomb, pureté, recyclage de calcin, décoration par émaillage ou sérigraphie d'encres organiques font l'objet d'une R & D soutenue.

La diversification est également un atout de la filière. À côté des flacons haut de gamme 100 % made in France, on trouve des produits de flaconnage pour l'industrie pharmaceutique avec des verres moulés neutres de haute qualité et des équipements de salles blanches pour recevoir dans les flacons des médicaments administrés par injection ou perfusion. Plus ludique : certains fabricants se sont diversifiés vers le marché de carafes de luxe et spiritueux, marché en croissance à l'export pour les whiskys de luxe et cognacs haut de gamme à destination des États-Unis, du Japon et de la Chine.

Le maquillage au numérique

Reste une évolution nécessaire pour séduire les adolescentes dont nous parlions en introduction et la jeune clientèle : l'alliance de la cosmétique et du numérique. C'est l'objet du dossier « Beauty French tech » déposé en 2016 au ministère de l'Économie chargé de décerner le « label French tech » aux

réseaux thématiques industriels. De quoi s'agit-il ? Avec le numérique, le code de distribution des cosmétiques et dérivés est bouleversé par les sites qui aident le consommateur à choisir parmi les 150 000 références disponibles sur le marché français (par exemple Lucette, le « TripAdvisor » de la beauté). Il est aussi bousculé par le e-commerce avec les plateformes de produits chez Amazon ou Alibaba dont la distribution croît quatre fois plus vite que le marché global. Des start-up dynamiques mettent au point un distributeur de produits pour la salle de bain pour adapter votre maquillage à votre humeur du jour ; des masques de beauté bourrés de capteurs vous offriront des applications choisies et un coaching personnalisé... La reconnaissance faciale avec la transformation de l'écran du smartphone en miroir va révolutionner les achats. Alors que vient d'être lancée la brosse à cheveux connectée qui vous indique l'état de votre chevelure et vous conseille sur les meilleurs traitements, L'Oréal, en sortant en 2014 l'application gratuite Makeup Genius, avait déjà frappé fort : elle a été chargée 20 millions de fois dans 60 pays différents. Le patron de la Cosmetic Valley presse le mouvement : « L'alliance de la cosmétique et du numérique ouvrira un marché à 5 ans et non à trente ans ». D'ici à voir dans la rue de nouvelles Blanche-Neige interroger leurs smartphones : « Miroir, mon beau miroir, suis-je la plus belle en ces lieux ? »...



Jean-Claude Bernier
Janvier 2017



Prix Pierre Potier 2017

Appel à candidatures

La Fondation internationale de la Maison de la Chimie et l'Union des Industries Chimiques, sous le patronage de Christophe Sirugue, secrétaire d'État chargé de l'Industrie, reconduisent en 2017 pour la 11^e fois le Prix scientifique et technologique Pierre Potier, « **L'innovation en chimie en faveur du développement durable** ».

Les candidatures sont ouvertes à toutes les entreprises (grandes entreprises, PME/PMI, start-up...).

Les dossiers de candidatures doivent être adressés par courriel **avant le 31 mars 2017***.

* p.bridou-buffet@maisondelachimie.com
Pour en savoir plus : www.prixpierrepotier.fr

Apprivoiser les virus pour en faire des alliés

Claude Monneret

Il n'est guère d'années sans que l'actualité nous apporte son lot d'alertes sur l'apparition ou la réapparition de virus, ces agents infectieux nécessitant un hôte, souvent une cellule, dont ils utilisent le métabolisme et ses constituants pour se répliquer. La liste des virus pathogènes affectant les pays développés ne cesse de s'allonger : virus du SIDA (1981), virus Ebola (2014, Afrique de l'Ouest), ou encore virus Zika (2015, Brésil). Ce que l'on sait moins, c'est que ces mêmes virus peuvent devenir les alliés de l'homme pour combattre les cancers ou les bactéries.

Les virus oncolytiques

L'idée d'utiliser des virus pour combattre les cancers est plus ou moins liée à la sérendipité puisque cette idée a germé dès 1904, lors de l'observation d'une rémission soudaine chez une patiente atteinte de leucémie myéloïde, qui avait contracté une infection par le virus Influenza [1]. Une seconde rémission fut observée un demi-siècle plus tard, en 1953, chez un jeune garçon de quatre ans qui, souffrant d'une leucémie lymphoïde, contracta la varicelle. En quelques jours, tandis qu'il développait le rash cutané caractéristique de cette affection, sa rate et son foie retrouvèrent un volume normal et son taux de globules blancs revint à la normale [2].

L'un des premiers virus impliqués volontairement dans cette approche fut celui de l'hépatite dont on savait les effets bénéfiques, dès 1897, vis-à-vis de certaines pathologies. Ce n'est toutefois qu'en 1949, lorsque deux patients souffrant de la maladie de Hodgkin contractèrent ce virus et entrèrent en brève rémission [3], qu'un premier essai clinique impliquant 22 patients fut entrepris. Il faut bien dire que ce fut avec un succès limité. Trois autres essais cliniques importants, avec l'administration d'autres virus, suivirent en 1952, 1958 et 1974. Malgré quelques réponses impressionnantes, d'autres études eurent moins de succès, et ces travaux furent abandonnés en raison, notamment, d'effets secondaires non négligeables.

Il faudra attendre la fin des années 1990 et l'avènement de l'ingénierie génétique pour assister à la résurgence de ces virus dits oncolytiques [4]. Une autre raison est que l'on pensait jusqu'alors que les virus oncolytiques exerçaient leur activité seulement en se répliquant dans les cellules cancéreuses, puis en les détruisant. Entre-temps, on avait réalisé que les mécanismes de protection, de réparation cellulaire et d'apoptose étaient déficients dans les cellules cancéreuses, celles-ci pouvant devenir des cibles pour certains virus. De plus, on avait appris que, au-delà de la destruction de ces cellules tumorales, ces virus stimulaient le système immunitaire, agissant en quelque sorte comme des vaccins anticancer. Le virus devenait inducteur en provoquant la migration d'effecteurs immunitaires innés et adaptatifs au site tumoral.

La plupart des virus évalués aujourd'hui pour leurs capacités à détruire les tumeurs ont été génétiquement modifiés. Ces modifications consistent en général à inactiver les gènes viraux nécessaires à leur réplication dans les cellules normales mais indispensables dans un contexte néoplasique. Néanmoins, l'efficacité de ces virus risque toujours d'être limitée par la réponse immunitaire de l'hôte et l'induction de pathologies secondaires.

Un adénovirus modifié sélectivement pour se répliquer dans les cellules présentant des mutations du gène suppresseur de tumeurs p53, l'ONYX-015, fut le premier virus à entrer en clinique en 1996 en Chine pour le traitement de cancer. Bien qu'une phase III ait montré une réponse durable par traitement intralésionnel, c'est-à-dire au sein de la tumeur, l'ONYX-015 fut entretemps abandonné. C'est en fait une souche virale très proche, du nom de H101, qui reçut l'autorisation de mise sur le marché par les autorités réglementaires chinoises en novembre 2005 pour le traitement de cancers de la tête et du cou [5]. Toutefois, son développement hors de la Chine a été stoppé.

Il faut attendre 2015 pour voir la validation de la première virothérapie par les autorités américaines et européennes. Le talimogene laherparepvec (T-VEC) ou IMLYGIC®, dérivé du virus de l'herpès génétiquement modifié, a été validé dans le mélanome localement avancé ou métastatique et sans métastase viscérale, sur la base des résultats d'une étude de phase III. Commercialisé en suspension pour injection sous-cutanée, cette autorisation a été accordée après une étude clinique multicentrique, ouverte et randomisée incluant 250 patients et 186 patientes [6].

RIGVIR® est un virus oncolytique non modifié génétiquement qui est approuvé en Lettonie (International Virotherapy Center) mais pas en Europe. Il vient d'être autorisé à l'Institut Hope4Cancer au Mexique. Il contient le virus ECHO-7, vivant, non pathogène et non modifié génétiquement. Il est administré par voie intramusculaire pour le traitement du mélanome [7].

Actuellement, quarante essais cliniques sont en cours. Parmi les virus oncolytiques les plus développés en Amérique du Nord et en Europe, figurent : le virus JX-594 (pexastimogene devacirepvec) de Transgene [8] pour les carcinomes hépatocellulaires, en étude de phase III ; le GM-CSF-expressing adénovirus CG0070 pour le cancer de la vessie [9] ; et la Reolysine® (pela-reorep), un variant sauvage du réovirus qui provoque l'oncolyse des cellules tumorales Ras activées, pour les cancers de la tête et du cou [10]. Au Japon, le G47Δ, une troisième génération du virus de l'herpès HSV-1, est en essai de phase II chez des patients atteints de glioblastomes [11].

Les bactériophages

La seconde classe de virus susceptibles d'intervenir comme arme thérapeutique est celle des bactériophages, encore appelés phages (du grec *baktéria*, bâton, et *éphagon*, aoriste du verbe *esthiô*, manger [12]). Dans les années 1920-30, avant l'arrivée des antibiotiques, ceux-ci étaient couramment prescrits par les médecins pour soigner les infections bactériennes. Ces virus, prédateurs naturels de nombres de bactéries, qui laissent indemnes les cellules des mammifères et des plantes, étaient même l'apanage des compagnies pharmaceutiques comme Eli Lilly. On ne connaissait pas alors leur mode d'action et les résultats étaient aléatoires, mais c'est surtout l'arrivée massive des antibiotiques qui sonna le glas de ces phages.

Depuis quelques années maintenant, devant l'inflation grandissante des résistances aux antibiotiques, certains cherchent à réactiver ce champ thérapeutique. Les premiers résultats se situent essentiellement **au niveau de la sécurité alimentaire**.

Les intoxications d'origine alimentaire représentent un problème de santé publique puisqu'aux États-Unis, selon le « Center for Disease Control », on en dénombre 9,4 millions par an, causant 56 000 hospitalisations et environ 1 350 décès.

En France, selon l'Institut de veille sanitaire (InVS), les toxi-infections alimentaires collectives (TIAC) définies par l'apparition d'au moins deux cas similaires d'une symptomatologie, en général gastro-intestinale, dont on peut rapporter la cause à une même origine alimentaire, sont estimées pour 2014 à 1 380 foyers, affectant 12 109 personnes, dont 649 (5 %) ont été hospitalisées et deux sont décédées.

Pour lutter contre ces toxi-infections alimentaires, la société américaine Intralytix [13] a mis sur le marché trois additifs alimentaires : le ListShield™, utilisé comme additif alimentaire dans la viande hachée et la volaille, qui cible la *Listeria monocytogenes* responsable de la listériose, infection grave parfois mortelle ; un mélange de trois phages sous forme d'un liquide clair légèrement opalescent, EcoShield™, qui cible la bactérie pathogène *Escherichia coli* O157:H7, comme additif dans les hamburgers ; et enfin, un cocktail de six phages, SalmoFresh™, spécialement destiné à traiter les aliments susceptibles d'être contaminés par la *Salmonella* (viande rouge et volaille). Ces phages ont reçu le feu vert de la FDA comme « Food contact notification ».

Dans le domaine thérapeutique, en France, la première utilisation des phages chez l'homme remonte à 1919 à l'Institut Pasteur et à l'hôpital Necker par Félix d'Hérelle, avec la prise en charge de cas de dysenterie à *Shigella* [14]. Tandis que les pays occidentaux délaissaient par la suite les phages au profit des antibiotiques, ceux-ci ont continué à être prescrits dans les pays de l'Europe de l'Est et dans l'URSS, mais les essais pratiqués dans ces pays ne répondent pas aux standards actuels de la recherche clinique. Il n'existe donc que peu d'essais contrôlés randomisés contre placebo.

Néanmoins, deux essais thérapeutiques de phase I-II sont en cours. Un essai clinique multicentrique a débuté en juin 2015 dans le cadre de Phagoburn, un projet collaboratif européen qui vise à évaluer l'efficacité et la tolérance des bactériophages chez les grands brûlés. Deux cocktails de bactériophages sont testés contre deux bactéries associées à des complications particulièrement graves : *Pseudomonas aeruginosa* et *Escherichia coli*. Deux PME sont impliquées dans ce projet : Pherecydes Pharma et Clean Cells qui a réalisé la bioproduction des cocktails de bactériophages selon les exigences pharmaceutiques actuelles [15].

Lancé en juin 2015, le second projet de recherche, du nom de PNEUMOPHAGE [16], a pour objectif de démontrer l'intérêt de la phagothérapie inhalée pour traiter les infections respiratoires aiguës à *Pseudomonas aeruginosa* (pyo). Là encore, il s'agit d'un projet collaboratif qui comprend la société DFT (Diffusion Technique Française, spécialisée dans les aérosols), la société Pherecydes Pharma (cocktail de phages et homologation) et le Centre d'étude des pathologies respiratoires de Tours.

À quand la phagothérapie en France ?

Les indications thérapeutiques potentielles de la phagothérapie sont extrêmement nombreuses. Elles peuvent revêtir, soit une stratégie de traitement « prêt-à-porter » pour la prise en charge des infections avec pronostic vital ou fonctionnel engagé à court terme [14], soit une stratégie de traitement sur mesure pour les infections chroniques sans engagement de pronostic vital ou fonctionnel à court terme.

Selon le Dr Olivier Patey de l'hôpital intercommunal de Villeneuve-Saint-Georges [17], il faut noter l'existence de l'association PHAGOTHERAPIE 2020 (association loi 1901), dont l'objet est de développer un cadre spécifique pour une utilisation régulée de la phagothérapie, et plus particulièrement de susciter et promouvoir la recherche sur la phagothérapie, de centraliser et diffuser les connaissances scientifiques, de coordonner les

initiatives et les activités des organismes publics, des chercheurs, des industriels et des soignants, de favoriser les actions et décisions en matière sanitaire, d'évaluer l'intérêt de la phagothérapie et de la phagoprophylaxie, de définir les modalités pratiques d'utilisation de la phagothérapie (besoins, compositions, indications), et enfin d'accompagner les patients désireux de bénéficier de la phagothérapie.

Les spécialistes s'accordent à dire que la réglementation actuelle comporte des normes trop sévères, en tous cas non adaptées à de nombreuses utilisations cliniques dont celle des bactériophages. Pourtant, la situation actuelle avec l'apparition de nouvelles antibiorésistances comme celle à la colistine chez *Escherichia coli* (donc transférable entre entérobactéries) [18] ne devrait que favoriser l'accès à la phagothérapie. Seul point sensible : la difficulté de garantir la stabilité des cocktails de phages. C'est pourtant bien un produit stable et prêt à l'emploi qui devra être présenté à l'Agence nationale de sécurité du médicament (ANSM).

Le développement de la phagothérapie en France devrait limiter le tourisme médical vers la Géorgie où l'Institut Eliava à Tbilissi possède à ce jour la plus grande banque de phages et la plus grande expérience au monde.

Références

- [1] Pol J., Le Bœuf F., Diallo J.-S., Stratégies génétiques, immunologiques et pharmacologiques au service d'une nouvelle génération de virus anticancéreux, *Med. Sci.*, **2013**, 29, p. 165.
- [2] Kelly E., Russell S.J., History of oncolytic viruses: genesis to genetic engineering, *Mol. Ther.*, **2007**, 15, p. 651.
- [3] Hoster H.A., Zanes R.P. Jr, von Haam E., Studies in Hodgkin's syndrome. The association of viral hepatitis and Hodgkin's disease: a preliminary report, *Cancer Res.*, **1949**, 9, p. 473.
- [4] Moore A., Viruses with oncolytic properties and their adaptation in tumors, *Ann. N.Y. Acad. Sci. USA*, **1952**, 54, p. 945.
- [5] Garber K., China approves world's first oncolytic virus therapy for cancer treatment, *J. Natl. Cancer Inst.*, **2006**, 98, p. 298.
- [6] Gougis F., Teixeira L., Les virus oncolytiques, première validation pour une classe thérapeutique pas si nouvelle, *Oncologie*, **2016**, 18, p. 517.
- [7] Donina S. et al., Adapted ECHO-7 virus Rigniv immunotherapy (oncolytic virotherapy) prolongs survival in melanoma patients after surgical excision of the tumour in a retrospective study, *Melanoma Res.*, **2015**, 25, p. 421.
- [8] Breitbach C.J. et al., The emerging therapeutic potential of the oncolytic immunotherapeutic Pexa-Vec (JX-594), *Oncolytic Virother.*, **2015**, 4, p. 25.
- [9] Friedlander T.W. et al., Updated results of a phase I/II trial of intravesical CG0070 in patients with superficial bladder cancer after BCG failure, *J. Clin. Oncol.*, **2012**, 30(suppl. 5), abstr. 271.
- [10] Noonan A.M. et al., Randomized phase 2 trial of the oncolytic virus pelareorep (Reolysin) in upfront treatment of metastatic pancreatic adenocarcinoma, *Mol. Ther.*, **2016**, 24, p. 1150.
- [11] Fujihara H., Ino Y., Todo T., Oncolytic virus therapy: a new era of cancer treatment at dawn, *Cancer Sci.*, **2016**, 107, p. 1373.
- [12] <http://dictionnaire.acadpharm.org>
- [13] www.intralytix.com
- [14] Prevel R., Dufour N., Potentialités des bactériophages pour l'infectiologie moderne, *Revue de médecine interne*, **2016**, 37, p. 657.
- [15] <http://fr.pherecydes-pharma.com/etude-clinique-phagoburn.html>
- [16] <http://fr.pherecydes-pharma.com/projet-recherche-pneumophage.html>
- [17] Patey O., Place de la phagothérapie dans le traitement des infections bactériennes, Séance thématique penta-académique : « Antibiotiques, antibiorésistance et environnement : des raisons d'espérer ! » du 15 juin 2016, http://acadpharm.org/seances/html.php?zn=30&lang=fr&id=&id_doc=3285
- [18] MacGann P. et al., *Escherichia coli* harboring mcr-1 and blaCTX-M on a novel IncF plasmid: first report of mcr-1 in the United States, *Antimicrob. Agents Chemother.*, **2016**, 60, p. 4420.



Claude Monneret

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

* Institut Curie, 26 rue d'Ulm, F-75248 Paris Cedex 05.

Courriel : claudemonneret@curie.fr

« Chimie(s) et vérité(s) »

Retour sur les JIREC 2016

Katia Fajerwerg, Jean-Pierre Foulon, Thierry Hamaide et Jérôme Randon



Les 32^e JIREC ont rassemblé 130 participants.
© DEF/SCF.

Si l'origine de ces journées annuelles sur l'enseignement de la chimie remonte à 1962 (voir l'*encadré* sur Marc Laffitte p. 13), c'est à la réunion de 1984, organisée à Grenoble, que Paul Arnaud, Roger Viovy, Maurice Chastrette et Roland Lissillour leur donnèrent le nom de JIREC – Journées pour l'innovation et la recherche dans l'enseignement de la chimie – dans le cadre de la division Enseignement-Formation de la Société Chimique de France.

Des chercheurs, des industriels et des professeurs du second degré et du supérieur sont conviés à cette manifestation afin de présenter des communications et/ou participer à des tables rondes. La rencontre permet de partager non seulement des contenus d'enseignement adaptés aux différents niveaux de formation, mais aussi d'établir un dialogue fécond autour de l'offre de formation universitaire et de ses évolutions possibles ou souhaitables.

Afin de favoriser au maximum la diffusion de ces échanges, *L'Actualité Chimique*, revue de la Société Chimique de France [1], publie chaque année un numéro

consacré aux travaux présentés aux JIREC. Ces dossiers sont mis en ligne gratuitement sur son site [2].

En 2016, l'Université Claude Bernard Lyon 1 a organisé les 32^e JIREC, réunissant 130 participants, avec comme fil conducteur « Chimie(s) et vérité(s) » (voir *encadré* 1 p. 10). La science, et donc la chimie, tire sa spécificité de sa propriété de pouvoir être remise en cause. Cette mise à l'épreuve permanente est indispensable : elle fonde la légitimité de la démarche scientifique et la différence du dogme qui n'a pas besoin d'être justifié et se soustrait à la logique de la preuve [3].

Pour ces JIREC, les organisateurs ont souhaité proposer une réflexion sur l'impact des sciences humaines sur l'enseignement de la chimie, ses représentations, son évolution et ses pratiques. Parallèlement à cette thématique, comme à chaque session, ont aussi été abordées des problématiques pédagogiques plus générales sur les nouveaux outils numériques et le continuum lycée-enseignement supérieur.

« Apprendre les sciences, c'est acquérir des connaissances qui sont actuellement considérées comme valides, fructueuses, utiles, mais c'est aussi admettre le caractère approché, partiel, provisoire de la connaissance d'un monde que nous ne pouvons appréhender dans toute sa complexité » écrit J. Toussaint [4]. Ces 32^e JIREC ont permis d'aborder plusieurs questions :

- Comment transmettre la notion de modèle, d'une part, et le caractère évolutif et réfutable de tout modèle, d'autre part ?
- Comment adapter les contenus enseignés et les objectifs de formation à l'évolution de la connaissance scientifique ?
- Comment utiliser la formation scientifique pour établir une réelle distinction entre la connaissance objective et rationnelle, l'opinion et le dogme ?
- « La vérité » existe-t-elle en chimie et en science ?
- Quel rôle dans le processus de formation pour l'expérience qui permet d'obtenir une image de plus en plus fine du monde dit « réel » ?



Conférence en amphithéâtre et atelier pédagogique.
© DEF/SCF.

- Que signifient ces mots que l'on utilise quotidiennement : observation, expérimentation, expérience « cruciale », empirisme ?

Le chimiste construit des modèles rationnels du réel en recourant souvent au langage des mathématiques. Ces

modèles sont « universels » en ce sens qu'ils sont validés par des expériences reproductibles, du moins en principe, en tout temps et en tout lieu. Dans ce processus d'élaboration de la connaissance, le statut de l'expérience et de la méthode expérimentale constitue sans nul doute la clé de voute de l'enseignement. Mais la question de l'appropriation et de

Encadré 1

Les 32^e JIREC : « Chimie(s) et vérité(s) », Lyon, 11-14 janvier 2016

Les conférences suivies d'un astérisque* font l'objet d'une contribution dans ce numéro.

Plusieurs de ces conférences ont été filmées et sont disponibles sur le site de la Société Chimique de France (www.societe-chimiquedefrance.fr/JIREC-2016-a-Lyon.html#ArchiveJIREC2016).

Conférences pédagogiques

- *Chimie et vérité : initiation aux langages du réel**, Louis Roy (ITECH, Écully).
- *L'expérience, source et critère de toute(s) vérité(s) en chimie ?*, Michel Verdaguer (Université Pierre et Marie Curie, Paris).
- *Les nouveaux outils du numérique*, Christophe Batier (Université Claude Bernard Lyon 1).
- *Simulations moléculaires et vérités**, Serge Antonczak (Université Nice Sophia Antipolis).
- *Pasteur, la molécule et son image, le chimiste et son image**, Florence Boulc'h (Université d'Aix Marseille).
- *De la mémoire aux apprentissages scolaires*, Nadine Ravel (Centre de recherche en Neurosciences de Lyon, CNRS-Inserm, Université Lyon 1).
- *Mise en place de questions conceptuelles en amphithéâtre*, Odile Dechy-Cabaret (INP-ENSIACET, Toulouse Tech, Toulouse).
- *La chimie, ou la porte qui ouvre un nouveau paradigme sur la vérité*, Serge Walter (ENSC Mulhouse).
- *Réflexions à propos d'un visuel graphique pour les JIREC**, Camille Descombes (Lycée La Martinière, BTS Design Graphisme, Lyon) (voir encadré 2).
- *Analyse des contrefaçons dans les produits naturels et biosourcés**, Hervé Casabianca (Institut des Sciences analytiques, Villeurbanne).
- *Chimie et police*, Fabrice Besacier (Institut National de la Police Scientifique, Lyon).
- *L'alchimie*, Patrick Chaquin (Université Pierre et Marie Curie, Paris).
- *Modélisation et simulation*, Jean-François Le Maréchal (ENS Lyon).
- « Experts à l'École » : *présentation du plan d'équipement proposé par le dispositif ministériel « Sciences à l'École »**, Camille Mahé (Paris).

Ateliers pédagogiques

- *Régression linéaire et incertitude : du bon usage de la régression numérique et du coefficient de corrélation**, Emmanuel Curis (Université Paris Descartes).
- *WIMS (Web Interactive Multipurpose Server)**, Damir Buskalic (Université d'Annecy).
- *La démarche d'investigation et la résolution de problème au service de l'investigation policière et de la lutte contre la contrefaçon*, Magali Attagnant-Toresson (Lycée Saint-Exupéry, Lyon).
- *Les VIDEXOS**, Priscilla Bernard (École européenne de chimie, polymères et matériaux (ECPM), Strasbourg).
- *Les fictions cinématographiques : un outil pédagogique de premier choix** (François Grifaton, Créteil).
- *Utilisation de tablettes numériques pour un enseignement interactif de la chimie**, Sylvie Condom, Françoise Serein-Spirau (ENSC Montpellier).
- *Des boîtiers de vote en amphi : pourquoi, quand et comment ?**, Jean-François Parmentier, Christophe Rabut, Julitte Huez, Odile Dechy-Cabaret, Marie-Claude Betbeder (Toulouse Tech, Toulouse).

Ateliers expérimentaux

- *L'expérience, source et critère de toute(s) vérité(s) en chimie ?**, Michel Verdaguer (Université Pierre et Marie Curie, Paris).
- *Chimie et illusion**, Édith Amadei, Geneviève Canicave (Lycée Jean Perrin, Marseille).

Remise du prix 2016 de la division Enseignement-Formation de la Société Chimique de France à **Didier Astruc*** et **Freddy Minc** (voir encadré 3). Ce prix récompense des travaux et/ou un engagement reconnus en matière d'enseignement et/ou de formation en lien avec la chimie.

Des posters en chimie analytique et en recherche sur l'enseignement des sciences présentés lors de ces JIREC sont téléchargeables sur le site de l'*Actualité Chimique*, à partir de la page liée à cet article.

En soirée aussi...

- *La vérité dans vos assiettes. Gastronomie et chimie : la bonne recette ?*, Pierre Lanteri (Université Claude Bernard Lyon 1).
- *Textiles et chimie : de la soie lyonnaise aux textiles intelligents*, Laurence Schacher (ENSC Mulhouse).
- *Le clown Molécule**, Catherine Bied (ENSC Montpellier) (voir encadré 4).

Encadré 2

Réflexions à propos d'un visuel graphique pour les JIREC



L'idée d'une participation du lycée La Martinière Diderot aux JIREC 2016 à Lyon est née au cours d'une conversation lors de leur tenue à Poitiers en 2015. Ce lycée général et technologique dispose notamment d'un pôle supérieur de design et d'un pôle industriel et scientifique. La synergie entre ces deux formations a donné lieu à un projet dont la réalisation serait assurée par un étudiant. C'est ainsi que je me suis vu confier la réalisation de l'identité visuelle des JIREC dans le cadre de mon projet professionnel de fin d'études de BTS Design graphique. Dans un premier temps, mon objectif a été de proposer trois projets conceptuels différents, chacun permettant de donner à la communication des JIREC une cohérence d'ensemble grâce à une identité forte et articulée autour des notions de chimie et d'enseignement.



Axes de réflexion : comment enseigner la chimie aujourd'hui ? Cette discipline nécessite un discours adapté pour être accessible à tous. J'ai donc présenté à l'ensemble des participants des JIREC trois projets. Pour mon premier axe de réflexion, j'ai recensé le matériel « classique » de laboratoire de chimie que j'ai synthétisé en un vocabulaire de formes qui a donné lieu à un dispositif graphique. Pour le deuxième, j'ai traduit graphiquement par une combinaison de signes et de formes les étapes d'observation et de questionnement réalisées par les élèves au cours de leurs expériences. Et pour le troisième,

j'ai abordé la possibilité de représenter graphiquement des éléments relatifs à l'univers de la chimie *via* les nouvelles technologies (logiciels...).

À l'issue de la présentation aux JIREC, et en accord avec mes deux professeurs référents (Carole Guilloud et Yvan Gautier), le choix du premier axe a été retenu pour la réalisation du projet. Ainsi, en m'appuyant sur le travail consacré aux instruments de chimie, j'ai commencé par traiter l'intitulé du nom JIREC en tant qu'acronyme. Par la suite, s'est posée la question de comment mettre en place un dispositif graphique adaptable à un thème différent chaque année ? J'ai donc inclus des éléments extérieurs, comme de la photo, des aplats de couleur... pour renforcer mon vocabulaire de formes : JIREC. C'est ainsi que j'ai pu concevoir une identité et un dispositif graphique comprenant l'intitulé sous forme de sigle et de mention typographique, développés sur différents supports (affiches A3, site Internet, flyers, brochures).

Je remercie mes enseignants qui ont su me faire confiance en me proposant ce projet, et pour leur soutien tout au long de ce travail, notamment lors des phases de création et des rendez-vous extérieurs, ainsi que Audrey Larhant qui m'a apporté un regard extérieur tout en me conseillant, et Jérôme Randon et Thierry Hamaide pour cette collaboration qui s'est déroulée avec succès. Merci également à Monsieur Roussel, ancien proviseur, et Monsieur Ronchail, son successeur, sans qui ce projet n'aurait pu voir le jour.

Camille Descombes

Encadré 3

Prix 2016 de la division SCF Enseignement-Formation



Remise du prix 2016 de la division SCF Enseignement-Formation (DEF) à Didier Astruc (à droite) et Freddy Minc (au milieu) par Jérôme Randon, président de la DEF.
© DEF/SCF.

• **Didier Astruc**

Professeur émérite, Didier Astruc a développé tout au long de sa carrière d'enseignant des enseignements originaux, que ce soit lors de la création de l'IUT de Saint-Nazaire ou plus tard à Bordeaux lors de la création d'enseignements en chimie organométallique, catalyse, et les applications des métaux de transition à la synthèse organique en second cycle et en formation continue. Une contribution majeure et reconnue de Didier Astruc pour l'enseignement et la formation est la parution en septembre 2013 de son ouvrage pédagogique *Chimie organométallique et catalyse*, destiné aux étudiants de chimie et chimie physique (L3, M1, M2, ingénieur), mais aussi aux enseignants, enseignants-chercheurs et chercheurs des universités et aux professionnels de l'industrie, qui constitue un ouvrage de référence dans ce domaine.

• **Freddy Minc**

Professeur au lycée général et technologique Galilée, lycée des métiers de Gennevilliers, Freddy Minc contribue grandement à l'attractivité de la chimie auprès des jeunes et du public. En effet, sa passion pour les arts, l'histoire et la chimie l'a conduit à élaborer des enseignements sur projets dans divers domaines avec ses élèves : arômes, couleurs et matières, cartes postales, paysages de verre, couleurs et transparences, hommage à Mendeleïev, championnat de France de rugby, Paris de sciences, rouge, kémia, arts et pavages, jardin pédagogique, Année internationale de la chimie, prix Nobel de chimie, brou de noix et henné, centenaire de la Guerre 14-18, indigo blue*. Fort de ces expériences, Freddy Minc a aussi proposé des stages de formation pour les enseignants au Palais de la découverte, au Musée d'arts et d'histoire du judaïsme et à l'Institut du monde arabe.

*Voir le film sur <https://www.youtube.com/watch?v=yPDHcBPIYXQ>

Encadré 4

Le clown Molécule

Rencontre avec un clown médiateur scientifique



© DEF/SOF.

Comment est venue cette idée du personnage de clown pour parler sciences ?

Étant chimiste de formation et ayant également suivi depuis plus de vingt ans des formations en clown-théâtre (différent du clown de cirque habituellement plus connu), j'ai pratiqué pendant plusieurs années des interventions clowns à l'hôpital pour les enfants malades. Ces interventions m'ont permis de me rendre compte de l'impact du personnage du clown sur les enfants, qui sont tout de suite fascinés par ce personnage ; ils lui parlent spontanément d'égal à égal, cassant ainsi la barrière habituelle qui peut exister dans le dialogue entre enfants et adultes. Ainsi, ce personnage pouvait être utilisé pour transmettre facilement un message aux enfants, donc pourquoi pas pour les initier aux sciences ? Et en particulier à la chimie, qui souffre d'une très mauvaise image de marque ? D'où l'idée d'utiliser le personnage du clown comme médiateur scientifique.

Quel a été le chemin pour passer du personnage au spectacle proprement dit ?

Depuis plusieurs années, je monte des spectacles d'initiation à la chimie pour les enfants d'écoles primaires faisant intervenir le personnage de clown, qui leur montrent des expériences simples, qu'ils peuvent refaire chez eux, et qui suscitent leur curiosité pour la chimie avec l'envie d'apprendre grâce à une approche ludique et interactive. Ma première expérience de clown de sciences a commencé avec les *Atomes crochus*, association que nous avons créée en 2002 et qui continue à développer des animations scientifiques et culturelles innovantes*. Nous avons ainsi mis en place le premier spectacle, « Les aventures du Professeur Spatule et du clown Molécule », qui s'adresse aux enfants d'écoles primaires et fait intervenir le clown comme médiateur scientifique. D'autres ont suivi ensuite, jusqu'au dernier, « Marmites et molécules », que nous jouons actuellement avec une comédienne professionnelle.

Ce spectacle est aussi une façon de transmettre des contenus ?

Parallèlement, des recherches en didactique des sciences et en sciences de l'éducation ont clairement montré l'intérêt de l'utilisation du clown pour transmettre un message scientifique aux enfants. Les enfants s'identifient très facilement au clown, personnage naïf, sensible, émotif, spontané, qui devient donc beaucoup plus accessible qu'un scientifique en blouse blanche « détenant le savoir ». La barrière qui peut se créer entre celui qui sait et celui qui apprend est ainsi cassée et le message passe naturellement. Ce phénomène est encore accentué par l'approche interactive qui ouvre de nouvelles possibilités favorisant l'apprentissage. À ce propos, dès le XVIII^e siècle, Benjamin Franklin écrivait : « *Tu me dis, j'oublie. Tu m'enseignes, je me souviens. Tu m'impliques, j'apprends.* »

Quelle a été ton approche pour la soirée de gala des JIREC avec des enseignants ?

À la soirée de gala des JIREC, j'ai donné un aperçu de l'utilisation du personnage du clown en tant que médiateur scientifique, sous la forme d'un solo du clown Molécule, en présentant des expériences extraites de mes deux derniers spectacles, « Le Défi miam » et « Marmites et molécules », comme par exemple « le pastis propre », une purée de pommes de terre violettes qui change de couleur puis devient mousse, une pâte à tarte qui coule, une mousse de schtroumpfs, un café sucré qui devient solide... Le but de mon intervention en clown était de montrer le rôle de l'interactivité et de l'utilisation d'une approche ludique pour faciliter l'apprentissage, quel que soit le public auquel on s'adresse.

Qu'est-ce qui fait que ton approche fonctionne si bien avec les enfants ?

Habituellement, devant un public d'enfants d'écoles primaires, nous présentons le spectacle qui dure environ 40 minutes, puis je reviens sur scène en leur expliquant que je suis chimiste, que ce qu'ils ont vu n'est pas de la magie mais de la science et qu'on peut donc tout expliquer. On consacre donc un moment à discuter avec eux et répondre à leurs questions, le but étant bien sûr de ne pas les envahir avec des connaissances mais de susciter leur curiosité, de les amener à se questionner sur la science. Les retours très positifs que nous avons eus, que ce soit de la part des enfants, des parents d'élèves ou des professeurs des écoles, nous confortent dans l'idée que c'est important de sensibiliser les enfants à la chimie dès leur plus jeune âge, de leur donner une image positive de cette discipline en leur montrant combien elle est impliquée dans leur vie quotidienne et comment ils peuvent facilement eux-mêmes « mettre la main à la pâte » ! L'idée est donc de leur présenter des expériences originales et spectaculaires en lien avec la vie quotidienne, pour leur montrer que la chimie ne se réduit pas à « ça pue, ça pète et ça pollue ! », mais qu'elle nous sert dans de nombreux domaines et qu'elle nous aide à comprendre le monde qui nous entoure. En leur apportant une approche positive de cette discipline, on peut leur donner envie de s'y intéresser et d'aller plus loin... et pourquoi pas susciter des vocations !

Merci à toi Catherine !*www.atomes-crochus.org

Catherine Bied est maître de conférences hors classe à l'Université de Montpellier*, correspondante régionale Occitanie (ex Languedoc-Roussillon) de la commission « Chimie et Société »**.

* Laboratoire AM₂N-ICGM, ENSCM, 8 rue de l'École normale, F-34096 Montpellier Cedex 5.
Courriel : catherine.bied@enscm.fr

** www.maisondelachimie.asso.fr/chimiesociete

l'utilisation des langages scientifiques pour comprendre les représentations du réel est aussi posée [5].

On peut facilement admettre que nous n'enseignons pas la vérité, mais une description rationnelle et réaliste validée, et peut-être devrions-nous même laisser de côté la question de savoir si la vérité est un concept valide en science [6]. Pour autant, la notion de modèle doit être explicitement enseignée aux lycéens et aux étudiants, et discutée en termes de limites intrinsèques et d'évolution de la connaissance. Si « l'expert » manipule les modèles en connaissance de cause, la personne en situation d'apprentissage peut avoir des difficultés à faire la distinction entre le modèle et l'objet et à passer de l'un à l'autre.

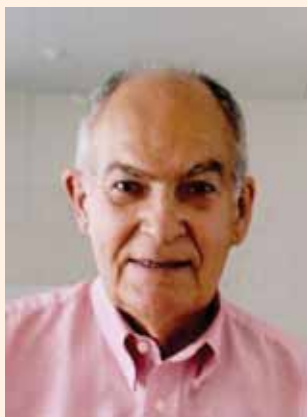
Pour éviter que les sciences ne soient perçues comme un système fermé avec ses lois intangibles, un enseignement explicite de la démarche scientifique est indispensable [3]. La pratique de la démarche scientifique, de l'école à l'université, contribue à sensibiliser l'élève à la manière dont la science « fonctionne », mais le contexte de l'apprentissage – le cours magistral, le dispositif expérimental ne visant qu'à la vérification d'une loi – peut conduire parfois à un dogmatisme implicite qui va à l'encontre du caractère essentiellement réfutable de toute proposition scientifique.

Cette explicitation permet de construire des repères pour penser et pour raisonner, qui peuvent ensuite être transférés dans des contextes non scientifiques.

L'expérience n'est pas une simple illustration des sciences : elle est au cœur même de la démarche scientifique, et la même rigueur, dans sa mise en œuvre et son analyse, est attendue que lors d'une démonstration théorique. C'est un point essentiel pour que les sciences ne soient pas perçues comme dogmatiques, arbitraires, subjectives ou révélées. Il n'y a pas d'expérience « qui marche » ou « qui ne marche pas ». L'expérience répond toujours aux conditions fixées par l'expérimentateur. L'analyse d'une expérience ou d'une observation doit être travaillée avec les élèves et les étudiants. Elle les forme à la rigueur, ce qui permet de mettre en œuvre des processus de vérification, de calculs d'incertitude (intervalle de confiance...) ou de remise en cause d'une assertion.

Entre modèle et résultat expérimental, la modélisation moléculaire trouve une place particulière. Ses résultats dépendent fortement de la complexité du système réel dont on veut modéliser la structure et/ou le comportement. En effet, la taille du système que l'on veut modéliser et le temps de réaction que l'on veut simuler sont des contraintes entre lesquelles on doit trouver un compromis présentant une part

Marc Laffitte, co-initiateur des JIREC, nous a quittés



Marc Laffitte est décédé le 20 septembre dernier à près de 87 ans.

Il était connu, dans notre communauté de chimistes, pour son goût prononcé à la fois pour la thermodynamique et pour l'enseignement de la chimie. Il avait pris goût à la thermodynamique pendant sa thèse au Laboratoire de Chimie Minérale de la Sorbonne, sous la direction de Jacques Bénard, puis auprès d'Oswald Kubaschewski, à Londres. Il a par la suite été directeur du Centre de Thermodynamique et de Microcalorimétrie du CNRS, à Marseille, de 1966 à 1981, et président de la Commission de Thermodynamique de l'IUPAC en 1977-1979.

Cependant, si une passion l'a animé du tout début jusqu'à la fin de sa carrière de professeur, c'est bien celle de l'enseignement de la chimie. Elle a pu éclore à la faveur du manque de locaux dans la Faculté des sciences de Marseille lorsqu'il y fut nommé maître de conférences en 1960. N'ayant pas de laboratoire pendant toute la première année, il se dédia à l'enseignement et souhaita tout de suite l'améliorer. C'est ainsi qu'il organisa chez lui, à Aubagne, en août 1961, une réunion qu'il avait intitulée « Mise en place d'une organisation permettant un effort pédagogique collectif au niveau du premier cycle universitaire de chimie », réunion à laquelle participaient Michel Lucain (de Lille), Jacques Jousseau-Dubien (de Bordeaux) et Paul Arnaud

(de Grenoble) et qui peut être considérée comme la réunion formatrice des JIREC. En effet, c'est là que furent établies les bases du premier « Colloque National sur l'Enseignement de la Chimie » qui se tint à La Bourboule en avril 1962, dans un hôtel qui accueillait congressistes et familles pendant les vacances de Pâques, alors communes à toutes les académies. L'équipe reçut les renforts enthousiastes de Roland Lissilour, Roger Viovy, Maurice Chastrette, Gérard Montel, Roger Ben Aïm et de bien d'autres et il s'ensuivit, pratiquement chaque année jusqu'à aujourd'hui, une série ininterrompue de « Colloques » (devenus « Internationaux » ou « Francophones » dès l'année suivante), puis de « Journées » telles que nous les connaissons aujourd'hui, abordant toutes les facettes du même thème central, dans un style souvent renouvelé.

Marc Laffitte a été pendant onze ans membre de la Commission Enseignement de l'IUPAC, et, de 1983 à 1991, il a présidé successivement les jurys de concours de CAPES puis d'agrégation de sciences physiques, option chimie.

Ce goût de l'enseignement et le désir de contribuer à son renouvellement l'avaient conduit à publier chez Gauthier-Villars, en 1965, *Les Bases Théoriques de la Chimie* et en 1966, un *Cours de Chimie Minérale*, tous deux traduits et publiés en espagnol, et, en collaboration avec Françoise Rouquerol, un livre en deux tomes intitulé *La Réaction Chimique* (Masson, 1991).

Très préoccupé par le désir de faire comprendre au grand public l'omniprésence de la chimie dans la vie quotidienne, il a, en tandem avec Michel Boyer, participé pendant cinq ans à la gestation et à la préparation du thème sur la chimie, « Transformer la matière », pour la Cité des Sciences et de l'Industrie de La Villette qui devait ouvrir en 1986. Tous deux ont présenté leur projet dans *L'Actualité Chimique* de septembre 1982. C'est dans le même esprit qu'il avait œuvré, en 1983, pour l'organisation de l'exposition « La chimie au quotidien » dans le centre-ville de Montpellier (avec publicité aérienne sur les plages du Languedoc, puisqu'on était au mois d'août), en marge de la 7^e Conférence Internationale sur l'Éducation en Chimie.

C'est enfin toujours son attrait pour l'enseignement qui lui a fait souhaiter faire, pour terminer sa carrière, une expérience pédagogique particulière comme professeur à l'Université de la Réunion.

Homme dynamique, courageux, compétent et travailleur, Marc Laffitte a laissé un fort souvenir à ceux qui l'ont connu.

Françoise et Jean Rouquerol

d'arbitraire. Grâce aux récents développements informatiques, les simulations moléculaires participent à l'analyse et à la compréhension des mécanismes de réaction et des interactions intermoléculaires, en appui de nombreux travaux expérimentaux. Les travaux de Karplus, Levitt et Warshel (prix Nobel de chimie en 2013) illustrent la prédiction des processus chimiques à l'aide de simulations.

Pour aider les élèves et les étudiants à tirer parti de l'enseignement des sciences, à savoir : comprendre le fonctionnement de ces disciplines, construire l'esprit critique, dépasser ses propres certitudes et représentations initiales, s'inscrire dans une dynamique d'innovation et de créativité, l'enseignant doit constamment réfléchir aux contenus et objectifs des enseignements qui leur sont proposés. Il faut réussir à allier l'enseignement de concepts et savoirs fondamentaux, la construction de compétences scientifiques et transversales, et l'ouverture à l'actualité scientifique et à l'évolution de la recherche scientifique.

Au-delà du thème, les JIREC sont aussi l'occasion de moments d'échanges sous forme d'ateliers pédagogiques. Ainsi, quatre séances de 1 h 30 ont permis la rotation de onze ateliers sur les deux premières journées (voir encadré 1 p. 10). Certains ateliers étaient directement en lien avec le thème des JIREC (fictions cinématographiques, démarche d'investigation, étalonnage et incertitudes, expériences et vérité, chimie et illusion), tandis que d'autres portaient sur des problématiques pédagogiques transversales (serveur numérique d'exercices, vidéos, tablettes numériques, questionnaires, boîtiers interactifs de vote).

Dans les pages suivantes, vous découvrirez que chaque séance au JIREC a été l'occasion d'échanges nombreux, avec parfois des visions divergentes, voire contradictoires, mais toujours dans un cadre constructif.

Dorénavant, les JIREC auront lieu tous les deux ans, et les prochaines se dérouleront en Bretagne du 20 au 23 mars 2018 autour du thème « Chimie et enjeu sociétaux ».

En 2017, deux journées thématiques sont organisées par la division Enseignement-Formation : une première l'a été à Paris le 18 janvier sur le thème « HistoireS et PhilosophieS de la chimie », et une deuxième se tiendra à Lyon le 17 mai autour du thème « Chimie et Jeu ».

Les animateurs des JIREC 2016 tiennent à remercier très chaleureusement les partenaires institutionnels (SCF, MENESR,

IGEN, UCBL, CPE, Axelera), les exposants (Speechi, Dunod, Bruker, Perkin Elmer, Chromacim, Crédit Mutuel), les membres de la division Enseignement-Formation de la SCF, tous les acteurs locaux (Christophe Batier, Isabelle Bonnamour, Didier Boussy, Thierry Caillot, Mathieu Carrie, Lorraine Christ, Caroline Felix, Christel Gozzi, Nathalie Pérol, Hélène Provendier, Nathalie Sintès), les conférenciers, les animateurs d'ateliers, les relecteurs des articles du dossier, et bien sûr tous les participants à ces JIREC.

Références

- [1] www.societechimiquedefrance.fr
- [2] www.lactualitechimique.org/spip.php?page=recherche&recherche=JIREC
- [3] Valeurs de la République et enseignement de la physique-chimie au cycle 4, éducol, 2016, <http://eduscol.education.fr/cid100248/ressources-physique-chimie-cycle-4.html>
- [4] Toussaint J., *Didactique appliquée de la physique-chimie*, Nathan, 1996.
- [5] Dossier JIREC 2015 : Formuler en chimie, *L'Act. Chim.*, 2016, 407, p. 17.
- [6] Klapper M.H., Truth and aesthetics in chemistry, *J. Chem. Edu.*, 1969, 46(9), p. 577.



K. Fajerwerg



J.-P. Foulon



T. Hamaide



J. Randon

Katia Fajerwerg est maître de conférences hors classe à l'Université Toulouse III-Paul Sabatier, Laboratoire de Chimie de Coordination (LCC)¹. Elle assure la coordination des dossiers JIREC publiés dans *L'Actualité Chimique* depuis les JIREC de 2007 et est également chargée de la rubrique « Enseignement et formation ».

Jean-Pierre Foulon² est retraité, ancien professeur de chimie en PC* au lycée Henri IV à Paris.

Thierry Hamaide est professeur à l'Université Claude Bernard Lyon 1³. Il préside la commission Enseignement du Groupe Français des Polymères et est membre de la division Enseignement-Formation de la SCF.

Jérôme Randon est professeur à l'Université Claude Bernard Lyon 1⁴. Il préside la division Enseignement-Formation de la SCF.

¹ LCC CNRS, 205 route de Narbonne, F-31077 Toulouse.

Courriel : katia.fajerwerg@lcc-toulouse.fr

² Courriel : jpfoulon@wanadoo.fr

³ Université Claude Bernard Lyon 1, Ingénierie des Matériaux Polymères, Polytech Lyon, F-69622 Villeurbanne Cedex.

Courriel : thierry.hamaide@univ-lyon1.fr

⁴ Université Claude Bernard Lyon 1, ENS Lyon, Institut des Sciences Analytiques, UMR CNRS 5280, 5 rue de la Doua, F-69100 Villeurbanne.

Courriel : jerome.randon@univ-lyon1.fr

45
Sc
21

Culture
sciencesChimie

ENS

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

Mis à disposition
**CAPES et
AGRÉGATION**
aux épreuves orales

Site de ressources en Chimie pour les enseignants

Thèmes en lien avec les
**PROGRAMMES
D'ENSEIGNEMENT**
Contenu validé par des
CHERCHEURS

Articles, Vidéos, Diaporamas
AGENDA, ACTUALITÉS
événements, conférences, parutions
scientifiques...

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

Chimies et vérités : initiation aux langages du réel

Louis Roy

Résumé L'enseignement de la science passe surtout par une transformation des représentations du réel. Le savoir spontané et l'épreuve quotidienne de la réalité, du hasard et de la fatalité, de même que la représentation symbolique des choses, doivent progressivement être traduits en équations quantifiées et en relations causales. De nombreux « obstacles » entravent ce travail de traduction. D'autant que le « langage scientifique » reste un langage avec son lot d'approximations et d'imperfections. Dès lors, ce ne sont pas les « vérités scientifiques » qui sont en jeu, c'est notre compétence à parler le langage de la science.

Mots-clés Enseignement, science, représentation, langage, réalité, JIREC 2016.

Abstract **Chemicals and truth: languages and reality**
Teaching sciences is especially a transformation of the representations of reality. The spontaneous knowledge and the daily test of the reality, of the fate, as well as the symbolic representation of things, must be gradually translated into quantified equations and causal relations. Numerous "obstacles" hinder this work of translation. Especially as the "scientific language" remains a language with its lot of approximations and imperfections. From then, it is not the "scientific truths" which are at stake; it is our skill to speak the language of science.

Keywords Teaching, science, representation, language, reality, JIREC 2016.

Nous vivons dans une société industrielle, technoscientifique [1], mais de nombreux obstacles entravent le travail aussi difficile qu'indispensable du professeur de science en général et de chimie en particulier. Il est en effet fréquent de croire que les modalités technoscientifiques qui dominent aussi bien notre culture que nos activités de production sont connues et familières à chacun de ses usagers. Autrement dit, il est assez facile de penser que tous les membres d'une société technoscientifique disposent de manière quasi innée des schémas nécessaires à sa compréhension et à son interprétation.

Notre expérience de l'enseignement des disciplines scientifiques en atteste tous les jours : ce n'est pas parce qu'on destine ses études à une discipline qu'on en est déjà « expert ». Cela signifie bien plutôt que c'est dans cette discipline qu'on a envie de le devenir par l'acquisition progressive et laborieuse des connaissances et des compétences attendues. Toutes les relations pédagogiques sont traversées par le paradoxe de la cithare [2] : si je veux jouer de la cithare, il faut que je l'apprenne. Pour l'apprendre, il faut que j'en joue, mais pour en jouer, il faut que je sache... La chimie n'échappe pas à ce problème et la question de la « vérité en chimie » ou du rapport entre « la chimie et la vérité » concerne moins la question de savoir si les connaissances de la discipline des chimistes sont « vraies » que de savoir de quelles manières nous pourrions les transmettre sans les « fausser » par des excès de vulgarisation ou de simplification. La réflexion est donc fort probablement de nature épistémologique, mais elle est sans doute aussi fortement pédagogique.

Le passage de l'ignorance à la connaissance

La question de la connaissance « véritable » est centrale dans l'histoire de la philosophie. Les processus par lesquels

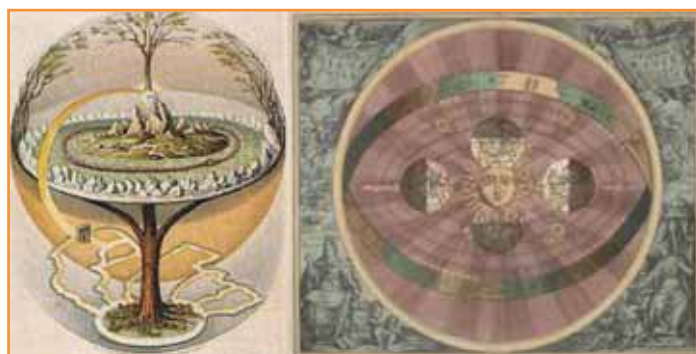


Figure 1 - Géocentrisme et héliocentrisme.

les êtres humains passent de l'ignorance à la connaissance concernent l'épistémologie. Cette discipline étudie les méthodes, les processus et les cheminements qui nous font passer d'un état d'ignorance à un état de connaissance sur une question donnée. L'épistémologie examine les raisons et les circonstances qui nous font changer d'idée à propos d'une certaine situation : pourquoi rejetons-nous une explication qui, précédemment, était pourtant admise (le passage du géocentrisme à l'héliocentrisme par exemple) [3] ? (figure 1).

L'épistémologie s'intéresse donc à la genèse de la connaissance et à son évolution. Elle admet que la science est le fruit d'une « dynamique cognitive » qui ne se constitue pas d'énoncés statiques et définitifs [4], mais de notions, de concepts et de théories qui en font un langage particulier sur le réel, avec ses néologismes et ses expressions surannées.

De l'esprit préscientifique à l'esprit positif

En tant que fondateur du « positivisme », Auguste Comte a joué un rôle d'une extrême importance dans le

développement de la philosophie scientifique [5]. Bien que jamais aucune philosophie ne soit sans faille, le positivisme d'Auguste Comte a connu, en France surtout, des critiques si violentes que son nom et sa philosophie « scientiste » sont devenus des expressions péjoratives. Il suffit même d'accabler une idée de « scientiste » pour la discréditer aussitôt et lui assigner une fin de non-recevoir.



Figure 2 - Un « label science » pourrait signifier « ceci est vrai ».

Mais il ne suffit pas de dénoncer un mal pour en être exempt ! On prendra très généralement pour « une évidence » que le discours scientifique, qui n'est pas vulgaire, jouit d'une supériorité infinie par rapport à tous les autres discours [6]. Ce qu'il faut simplement souligner, c'est qu'en admettant que le seul langage du réel est le langage scientifique, sans savoir ce qui en fait la véritable valeur, on affirme la « science » comme un « label

de vérité » (figure 2) et on passe à côté de tout ce qui pourrait féconder un processus d'apprentissage, de découverte ou d'innovation.

Pour Auguste Comte, le développement de l'humanité passe successivement par trois étapes hiérarchisées, couronnées par l'avènement de « l'esprit positif ». Le premier état est « théologique » ; il caractérise aisément le néolithique, l'Antiquité et le Moyen Âge où l'on se réfère sans cesse à des « causes surnaturelles » pour expliquer les phénomènes. Ce premier état se subdivise à nouveau en trois sous-états, successivement le fétichisme, le polythéisme et le monothéisme. En méprisant la chronologie et la cohérence historique, on pourrait associer cet âge à celui du mystère et de la « magie » (figure 3).



Figure 3 - Un magicien ou un chimiste ?
© debbiejew-Fotolia.com

Le second état est « métaphysique » ; c'est « l'âge abstrait », celui des grands principes et des généralisations abusives. Ce pourrait être l'âge de l'alchimie. Il doit bien y avoir dans le monde des secrets à découvrir, un langage de l'être, une mélodie cosmique ?

Le troisième état est « scientifique » ; on renonce alors à la connaissance des « causes premières » et à la question du « pourquoi », pour découvrir seulement les lois par lesquelles

les phénomènes se déploient, c'est-à-dire le « comment ». Le comment, c'est l'esprit de la véritable chimie, la chimie scientifique. Ce troisième âge, en un sens, est celui du renoncement à la rêverie et à l'imagination ; il faut se concentrer sur les faits. Soyons « factuels » : les faits, rien que les faits ! Tel est l'impératif moral de l'esprit scientifique pur et objectif.

Le savoir spontané et la connaissance scientifique

Cependant, contrairement à l'idée véhiculée par le positivisme, « l'état préscientifique » n'est pas un état de complète ignorance. La connaissance spontanée, qu'elle relève de la théologie ou de la métaphysique, n'est pas forcément ignorance ou fantasme. Le savoir spontané est bien plutôt une modalité de la connaissance liée à une certaine pratique. C'est une « grille d'analyse » (un ensemble de recettes et de principes) qui permet à celui qui la détient de se situer dans son environnement et dans son action. Cette gnose⁽¹⁾ se trouve généralement fort utile, même si elle est « scientifique-ment invalide ».

De la physique intuitive à la physique mathématique

On commence à percevoir que l'enseignement de la science (de la chimie en l'occurrence) ne peut pas être une simple transmission de connaissance (et ce n'est pas si simple !), mais une transmission de « modalité d'appréhension de la réalité ». Pour le profane, l'acquisition d'un regard scientifique sur le monde relève davantage de l'apprentissage d'une seconde langue que de l'apprentissage d'une liste de vocabulaire. La chimie est le langage des chimistes. Or ce langage, contrairement à celui des magiciens ou des alchimistes, est loin d'être intuitif. Il résulte d'une histoire qui nous mène du cosmos harmonieux à la rupture moderne de la quantification [7] (figure 4).



Figure 4 - Une tentative de calculer le cosmos.

Autrement dit (plus simplement), nous voyons toujours le monde au travers des lunettes que nous portons. Mais si nous finissons par croire que le réel se réduit à ce que nous voyons dans nos lunettes, nous ne verrons du monde que ce que nos lunettes nous permettent d'y voir et la réalité se verra réduite à sa part congrue. On retrouve ici encore une forme de paradoxe et on voit bien que la cohérence et la supériorité du langage scientifique viennent du fait que la science ne parle jamais que de ce que ses mots lui permettent de nommer (ou de ce que ses lunettes lui permettent de voir). Puisque la science est réduction quantitative, n'est réel que ce qui se mesure.

Le regard calculeur de la vision technoscientifique du monde a rapidement donné à la chimie ses lettres de crédibilité. Il n'y a point là de forces occultes ou de substantifique moelle. Il n'y a pas d'essences pures et incandescentes. « Rien ne se perd, rien ne se crée » disait encore notre philosophe Lavoisier [8] ! Ce qui, au fond, n'est qu'une autre

manière de dire la même chose. Pour se targuer du statut de « science », il faut laisser de côté l'expérience et privilégier l'expérimentation. Dans l'approche scientifique expérimentale, la formule magique « toutes choses étant égales par ailleurs » est un point de départ. Cela signifie en effet que, supposant que toutes les autres variables soient les mêmes, dans ces mêmes circonstances, les mêmes causes produiront les mêmes effets. Et on peut vérifier. Si par surprise, l'effet attendu n'advient pas, on saura que « toutes les choses n'étaient pas égales » et on pourra rechercher ce qui a varié [7]. Cela étant fait, on connaîtra une cause de plus sur les effets constatés et la science aura progressé. Cependant, cette manière de faire repose sur quelques préjugés qu'il faut dénoncer.

Le premier est celui de la « table rase » : « *L'homme naît avec des sens et des facultés ; mais il n'apporte avec lui en naissant aucune idée : son cerveau est une table rase qui n'a reçu aucune impression, mais qui est préparée pour en recevoir* » [9]. Il n'est pas très étonnant que cette idée soit celle d'un chimiste. Sans aucun doute, des philosophes l'ont eue avant lui, mais ils n'ont pas su la « formuler » avec autant de... réalisme ! En science de l'éducation cependant, on a constaté que très souvent on tente de « faire apprendre » à lire et à écrire à des enfants comme s'ils ne parlaient pas leur langue maternelle. Il est bien dit « faire apprendre » et non pas « enseigner » [10]. On voit dans cet exemple que l'on ne saurait enseigner la lecture et l'écriture en « dictant » des choses et en « écrivant » d'autres au tableau... Lorsqu'on essaie d'initier à la chimie sans tenir compte de la culture déjà acquise des apprenants, on se retrouve rapidement dans le même paradoxe.

Et nous nous retrouvons ici dans la situation de la seconde révolution Copernicienne, celle de Kant, où nous admettons sans problème que « *Nous ne connaissons des choses que ce que nous y mettons nous-mêmes* » [11]. La science est une représentation mentale qui nous permet d'organiser le perçu en enchaînements logiques. Chaque manière de nommer les choses est arbitraire et réductrice parce que la structure que nous imposons au monde n'est pas dans le monde. De même, le monde en lui-même n'est pas rationnel, mais « rationalisable ». Il existe sans doute un lien entre « science » et « réalité », mais nous ne savons pas lequel [12]. Encore une fois, il n'est pas question de dire que le langage de la science est totalement arbitraire, qu'il n'entretient aucun lien privilégié avec la réalité et qu'il ne peut pas se prévaloir de la « vérité ». Il est dit que la chimie est « un langage parmi d'autres ». Par contre, il faut aussi admettre que le langage de la science est beaucoup plus abstrait, plus conceptuel, moins intuitif que celui d'autres savoirs qui apportent, au quotidien, des connaissances suffisantes pour agir sans risquer sa vie.

Pour faire court, pareillement aux autres représentations, les hypothèses scientifiques peuvent être tenues pour vraies et se trouver par la suite fausses ou dépassées et être cependant efficaces. De plus, comme les paradigmes, les théories

scientifiques peuvent se succéder et se juxtaposer sans que cela ne pose de problème du côté de leurs utilisateurs (les physiques de Newton et d'Einstein par exemple). Cela révèle qu'en fait la science est une longue suite d'erreurs efficaces.

Or si on en reste là, on affirme seulement, comme Auguste Comte aurait pu le faire, que le discours scientifique est le plus « adulte » des discours et qu'il tient à sa supériorité. On pourrait dire qu'il est le « dernier né », le plus moderne ou le plus mature. On pourrait affirmer que sa valeur tient toute entière dans la précision de ses mesures et de ses quantifications. Sans doute pourrait-on dire que la science est « exacte » parce que le calcul des quantifications est exact.

En fait, c'est Thomas Kuhn, Karl Popper et les épistémologues contemporains qui nous le font le mieux comprendre. Si la science est un discours plus « vrai » que les autres, si la science est un langage plus en adéquation au réel, cela ne tient pas aux propriétés « essentielles » ou « magiques » du discours scientifique, mais au simple fait que, contrairement aux discours non scientifiques, la science sait qu'il y a un écart irréductible entre le réel et notre manière de le nommer et que nous ne parviendrons jamais à « parler la nature ». Le discours scientifique se sait imparfait, mais perfectible. Il se sait potentiellement faux, et temporairement juste. Il sait que la preuve du « vrai » est impossible et que nous ne sommes jamais sûrs de rien sauf du faux. De là, le discours scientifique se fait humble et discret. Il ne prétend pas tout recouvrir et expliquer mieux que des langages intuitifs ce qu'il peut décrire, mais il cherche cependant à « réduire » le doute qu'il peut avoir sur sa correspondance au réel et sur la valeur de ses prévisions en s'attardant à « prouver faux » ce qu'il croit pouvoir tenir pour vrai [13].

Au passage ici, je souligne que la distinction unique entre les « sciences dures » et les autres, les « sciences sociales », est ténue. Elle est relative en vérité non pas à une qualité intrinsèque des disciplines, mais au fait que par-dessus les difficultés communes de la mesure et de la quantification, l'objet des sciences sociales est fluctuant parce que relatif à des volontés humaines. Il est aussi instable parce que soumis à d'autres volontés humaines.

Le dernier préjugé à déconstruire est celui consistant à croire qu'il suffit de s'exprimer clairement pour être bien compris. Le problème de la communication, dans un processus pédagogique par exemple, est surtout celui de l'appropriation du message. En fait, le récepteur se servira toujours de son propre système de cohérence pour intégrer ou non l'information reçue. La question est de savoir si cette appropriation permettra ou non de répondre aux objectifs qu'on lui assigne. Autrement dit, la question n'est pas de savoir si l'on émet correctement des sons ou non, mais si le récepteur est en mesure de leur donner un sens à partir de ses propres représentations. On pourra tenter d'enseigner la lecture et l'écriture à des allophones⁽²⁾, on aura d'innombrables difficultés. Sauriez-vous lire le japonais sans le parler ? (figure 5). De même, la question n'est pas de savoir si « la nature nous parle une

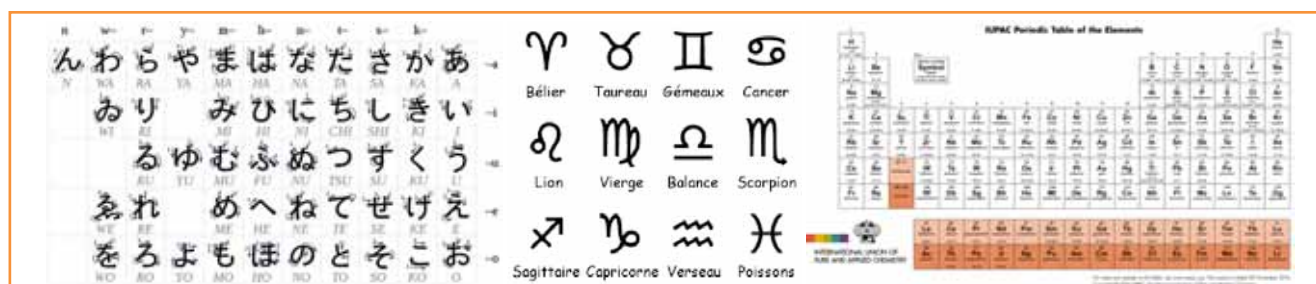


Figure 5 - Calligraphie japonaise, symboles astrologiques et tableau des éléments chimiques.

langue que nous pouvons comprendre » ; elle est de savoir si nous sommes en mesure de la lire convenablement à partir de nos représentations. Si la nature nous parlait, elle ne nous mentirait pas, mais il est probable que nous nous trompions dans l'interprétation de son message. Est-ce bien clair ?

En conclusion, la prise en compte des représentations profanes dans l'enseignement de la chimie scientifique est aujourd'hui une nécessité. Puisque toute personne a un système d'analyse de ce qu'elle perçoit en fonction de ce qu'elle veut faire, que toute personne a une « gnose pratique » qui lui permet d'organiser, de prévoir et d'agir dans le monde, on ne peut pas reprocher aux non-spécialistes de ne pas percevoir le monde à la manière des chimistes, puisqu'ils n'en parlent pas la langue.

Notes et références

- (1) La *gnose* désigne un savoir implicite (gnoséologie).
- (2) *Allophone* : personne dont la langue maternelle n'est pas celle de la communauté dans laquelle il se trouve.
- [1] Hottot G., *Le signe et la technique*, Aubier-Montaigne, 1984.
- [2] Aristote, *Ethique à Nicomaque*, trad. Tricot, Vrin, 1994.
- [3] Koyré A., *Du monde clos à l'univers infini*, Gallimard, 1973.
- [4] Popper K.R., *La logique de la découverte scientifique*, Payot, 1973.
- [5] Comte A., *Discours sur l'esprit positif* (1844), Vrin, 1996.
- [6] de Pracontal M., *L'imposture scientifique en dix leçons*, La Découverte, 2001.
- [7] Kojève A., *L'idée du déterminisme dans la physique classique et dans la physique moderne*, Livre de Poche, 1990.
- [8] Lavoisier A.L., *Traité élémentaire de chimie* (1789), 1864.
- [9] Lavoisier A.L., *Réflexions sur l'instruction civique*, 1793.
- [10] Meirieu P., *Un nouvel art d'apprendre ?*, Apprendre aujourd'hui, 10^e Entretiens de la Villette, 1999, (<https://www.meirieu.com/ARTICLES/nouvelartddapprendre.pdf>).
- [11] Kant E., *Critique de la raison pure*, 1781.
- [12] Quine W.V.O., Le domaine et le langage de la science, in *De Vienne à Cambridge : l'héritage du positivisme logique de 1950 à nos jours*, Gallimard, 1980.
- [13] Popper K., *Conjectures et réfutations. La croissance du savoir scientifique*, Payot, 2006.



Louis Roy
est professeur à l'ITECH*.

* Institut textile et chimique de Lyon (ITECH),
87 chemin des Mouilles, F-69134 Écully
Cedex.
Courriel : louis.roy@itech.fr



Étudier la Chimie à l'ENS



Le Département de Chimie de l'École Normale Supérieure offre une formation au plus haut niveau en chimie contemporaine :

- enseignement au cœur d'une activité de recherche intense,
- ouvertures aux frontières de la discipline,
- stages à l'international dans les meilleures universités étrangères.



Lieu d'émancipation intellectuelle et de maturation scientifique, le département de chimie de l'ENS ouvre à des carrières très variées :

- Chercheur (CNRS, Université, Industrie)
- Enseignant (Université, CPGE)
- Haut fonctionnaire
- Chef d'entreprise
- Analyste financier
- Directeur de la communication
- Médecin...



Département de
CHIMIE

www.chimie.ens.fr



Simulations (moléculaires) et vérité

Julien Diharce, Jérôme Golebiowski et Serge Antonczak

Résumé

Ces vingt-cinq dernières années ont vu l'essor des chimie et biochimie computationnelles au niveau atomique. Ces simulations, majoritairement basées sur les lois de la mécanique quantique et/ou de la mécanique classique, contribuent à l'analyse et à la compréhension des mécanismes réactionnels et des interactions intermoléculaires. Ces modèles viennent en appui de nombreuses recherches expérimentales d'autant que, pour certaines études, ces calculs peuvent être dorénavant réalisés sur des ordinateurs à la portée de tous. Mais la chimie reste une science expérimentale, la mise en application de ces simulations reste délicate et peut nous questionner sur la « réalité » des résultats obtenus.

Mots-clés

Simulation moléculaire, prédiction, modèle, JIREC 2016.

Abstract

Truth and (molecular) simulations

The last 25 years have seen the development of computational chemistry and biochemistry. These simulations, based on several theories, mainly quantum mechanics theories and molecular mechanics approaches, strongly contribute to the analysis and understanding of reaction mechanisms and intermolecular interactions. These protocols may support many experimental researches and nowadays, for some studies, these calculations can be performed on desktop computers. The implementation of these simulations remains difficult and makes us wonder about the "reality" of the results.

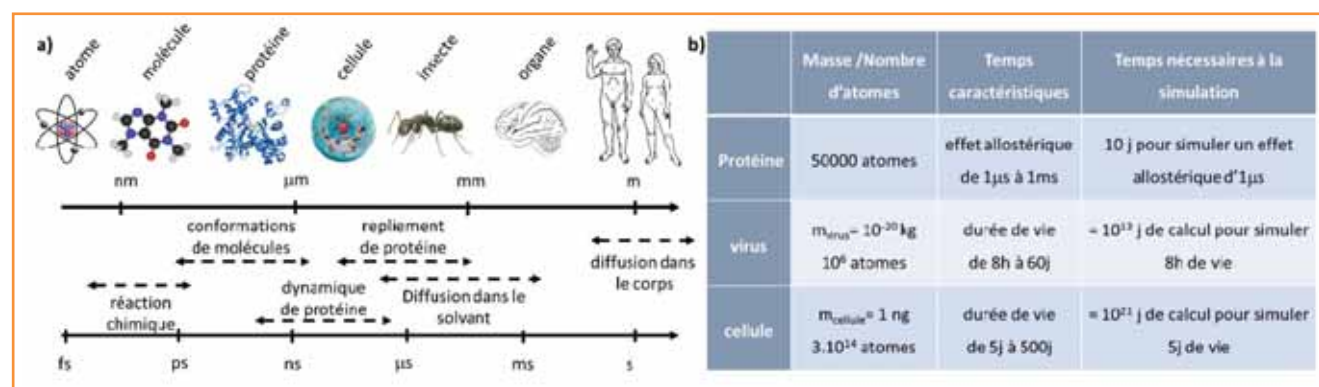
Keywords

Molecular simulation, prediction, model, JIREC 2016.

Les récents développements informatiques et algorithmiques, mais aussi les architectures des nouveaux ordinateurs, rendent possibles à moindre coût des études encore inimaginables il y a quelques années. L'ergonomie des logiciels offre la possibilité, même à des non-spécialistes, d'obtenir des résultats palpitants. Mais cette démocratisation a pu voir le jour avant tout grâce aux immenses progrès expérimentaux qui nous ont permis non seulement de mieux comprendre la matière, mais aussi de l'apprivoiser et donc de mieux la modéliser. Le prix Nobel de chimie 2013, qui a récompensé Martin Karplus, Michael Levitt et Arieh Warshel pour leurs travaux sur la modélisation des processus biochimiques⁽¹⁾, a mis en lumière plus encore le potentiel de telles méthodes [1]. Ici, derrière ce titre qui se veut provocateur,

il n'est pas question de remettre en cause le bien-fondé des théories qui ont été développées, ni leur utilité en tant qu'outil explicatif et prédictif, mais plutôt de souligner que cette mise en application est toujours en évolution et que, dès lors, il faut rester attentif à la portée des résultats obtenus.

La figure ci-dessous met en regard les temps associés aux processus chimiques et biochimiques non réactifs, pouvant être décrits par des simulations de mécanique classique, et la taille d'objets allant des particules aux organismes vivants. Actuellement, les simulations les plus longues, basées sur une représentation au niveau atomique, permettent de modéliser des systèmes d'une taille d'environ quelques centaines de nm ou de simuler des événements liés à des temps de l'ordre de la milliseconde. D'un point de vue plus classique,



Simuler : un problème de taille et de temps. a) Échelle de taille en fonction du système considéré et échelle de temps en fonction de l'événement considéré. b) Temps nécessaire à la simulation par des approches de mécanique moléculaire de différents systèmes. La première ligne correspond à un système « classique » considéré ici comme référence.

les simulations « quotidiennes » d'un laboratoire de modélisation moléculaire correspondent à des systèmes d'une taille de 100 nm (environ 50 000 atomes dans une boîte cubique de 100 nm de côté) qui sont simulés sur des temps de l'ordre de quelques centaines de ns à une μ s. À l'aide des derniers développements logiciel et d'une seule carte graphique (GPU) initialement développée pour l'affichage haute performance, la simulation du comportement dynamique pendant une microseconde d'un tel système peut être réalisée en dix jours. Par extrapolation, 27 milliards d'années seraient nécessaires pour simuler 8 h de vie d'un petit virus et environ un milliard de fois plus pour simuler cinq jours de vie d'une cellule.

De plus, le système modèle évoqué ci-dessus, qui nous sert de base pour nos estimations, est approximativement un milliard de fois plus petit, en termes de nombre d'atomes, qu'une cellule ou même 10^{22} fois plus petit qu'un corps humain. Et si l'on met en rapport le temps de simulation avec le temps simulé, il s'avère que la simulation est alors environ 10^{12} fois moins rapide que la réalité. La modélisation de phénomènes réactifs, notamment à l'aide de méthodes qui allient une description de la zone réactive par un modèle de mécanique quantique et la prise en compte du comportement dynamique de l'environnement, est encore plus coûteuse. Une simulation pour laquelle la coordonnée de réaction peut être approximée par une seule contrainte coûte approximativement 80 jours en temps processeur alors que le phénomène à simuler prend place en une dizaine de picosecondes. Le rapport (temps de la simulation)/(temps simulé) atteint alors 10^{21} . Ces considérations nous laissent comprendre que ces simulations ne peuvent prendre en compte la totalité de la complexité d'un système réel. Les limitations inhérentes à la taille du système et au temps de simulation nous obligent à nous focaliser sur l'événement d'intérêt et nous mènent principalement à conclure autour de cette hypothèse restrictive.

Bien que les progrès des matériels informatiques aient été impressionnants ces dernières années – l'état de l'art des simulations de la fin des années 1970 ne permettait que d'effectuer des simulations de quelques picosecondes du comportement dynamique d'une petite protéine –, la fin annoncée de la loi de Moore d'ici à une décennie ne nous permettra pas d'anticiper la simulation d'un organisme complet en utilisant des architectures matérielles telles que nous les connaissons actuellement. Toutefois, ces avancées, notamment basées sur l'optimisation de la parallélisation des ordinateurs et sur l'utilisation des cartes GPU, permettront de considérer des systèmes de tailles beaucoup plus importantes et d'effectuer les simulations sur des temps encore plus longs. Mais d'autres défis font déjà l'objet de recherche d'une plus grande proximité avec la réalité. La compréhension de certains phénomènes nécessite d'aller au-delà de la simulation d'un seul objet, en tenant compte d'un environnement plus subtil (conditions salines, valeur de pH, présence de co-réactifs ou de cofacteurs, mécanisme de saturation...), permettant alors d'obtenir des modèles théoriques plus élaborés, plus proches encore des résultats expérimentaux. La mise en place de stratégies multi-échelles, qui s'appuient sur l'utilisation de différents paradigmes, associées à une description plus ou moins fine des systèmes, permet de se refocaliser sur

l'événement. Par exemple, la diffusion d'une macromolécule (temps de l'ordre de la ms) pourra être étudiée par dynamique brownienne ou à l'aide d'une description « gros grain » du système [2], alors qu'il sera nécessaire de garder une description quantique d'un site actif lors de l'étude d'un mécanisme réactionnel (temps de l'ordre de quelques fs) [3].

Ainsi, si chacune des simulations évoquées précédemment reflète uniquement la « réalité » d'un instant, leur répétition mène à l'obtention d'un schéma plus complet et, au-delà de leur potentiel descriptif, permet l'élaboration de nouvelles hypothèses sur la réactivité et le comportement dynamique des systèmes étudiés. Mais leur plus grande force reste, tel un microscope computationnel [4], cette possibilité d'observer l'organisation du système moléculaire, atome par atome, et par-dessus tout de visualiser son comportement dynamique, ce qui permet de garder une part d'émerveillement dans le quotidien de la recherche.

Notes et références

- [1] Prix Nobel de chimie 2013 décerné à Martin Karplus, Michael Levitt et Arieh Warshel « pour le développement de modèles multi-échelle pour les systèmes chimiques complexes » (https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2013).
- [2] Voir le numéro spécial de *L'Actualité Chimique* « Modéliser et simuler la chimie : le défi de la chimie théorique », **2014**, 382-383.
- [3] Derreumaux P., Lavery R., Ouvrir une fenêtre sur le monde moléculaire pour mieux comprendre et agir sur les systèmes biologiques. *L'Act. Chim.*, **2014**, 382-383, p. 109.
- [4] Marquardt R., Hénin J., Dehez F., Chipot C., Dynamiques moléculaires quantiques et classiques, *L'Act. Chim.*, **2014**, 382-383, p. 56.
- [5] Dror R.O., Dirks R.M., Grossman J.P., Xu H., Shaw D.E., Biomolecular simulation: a computational microscope for molecular biology, *Annu. Rev. Biophys.*, **2012**, 41, p. 429.



J. Diharce



J. Golebiowski



S. Antonczak

Julien Diharce est postdoctorant à l'Institut de Chimie organique et analytique, Université d'Orléans¹.

Jérôme Golebiowski est professeur à l'Institut de Chimie de Nice et professeur adjoint au « Department of Brain & Cognitive Sciences » au DGIST, Corée du Sud²⁻³.

Serge Antonczak (auteur correspondant) est professeur à l'Institut de Chimie de Nice³.

¹ Institut de Chimie organique et analytique, UMR CNRS 7311, Université d'Orléans, 1 rue de Chartres, F-45067 Orléans Cedex 2.

² Department of Brain & Cognitive Sciences, DIST, 333, Techno JungAng Daero, HyeongPoong Myeon, Daegu (République de Corée).

³ Institut de Chimie de Nice, UMR CNRS 7272, Université Nice Sophia Antipolis, 28 avenue Valrose, F-06108 Nice Cedex 2.
Courriel : Serge.Antonczak@unice.fr

Analyse des contrefaçons dans les produits naturels et biosourcés

Hervé Casabianca et Patrick Jame

Résumé

Le marché économique que représentent les produits dits naturels est en très forte expansion depuis ces dernières années, poussé par l'engouement des consommateurs pour ce type de label. La très forte différence de prix avec les homologues de pure synthèse aboutit à un phénomène de fraude par une non-conformité entre l'étiquetage et le contenu des produits formulés. Cet article présente deux méthodes permettant d'obtenir une signature physicochimique spécifique à une origine naturelle : la spectrométrie de masse des rapports des isotopes stables et la chromatographie énantiosélective (ou chirale). Des applications illustrent les potentialités dans le domaine du contrôle de la naturalité (ou authenticité).

Mots-clés

Rapports d'isotopes stables, impuretés, énantiomères, naturalité, authenticité, JIREC 2016.

Abstract

Counterfeiting analysis in natural and biobased products

The economic market represented by the natural products has been in very strong expansion for these last years, pushed by the craze of the consumers for this type of label. The very strong price difference with the equivalent flavor from pure synthesis results in a phenomenon of fraud by a non-compliance between the labeling and the contents of the formulated products. This article presents two methods allowing to obtain a specific physico-chemical fingerprint for natural origin: stable isotopes mass spectrometry, and enantioselective gas chromatography. Applications illustrate the potentialities in the field of naturalness control.

Keywords

Stable isotopes ratio, impurities, enantiomers, authenticity, JIREC 2016.

Les substances d'origine naturelle sont utilisées dans des secteurs aussi variés que l'agroalimentaire, la pharmacie et la parapharmacie, les produits d'hygiène et de soins, les cosmétiques, et entrent dans nos produits de consommation courante de façons aussi diverses que les emballages, peintures et autres formulations à base de produits biosourcés. Dans l'objectif de contrôler au mieux ce marché en très forte croissance économique, des moyens analytiques ont été développés pour pouvoir attester du caractère naturel de ces ingrédients, appelé ici naturalité. Malheureusement, de nombreuses affaires liées à un manque flagrant de traçabilité, à un étiquetage douteux et un commerce par correspondance en pleine expansion ont fait apparaître de nombreuses failles relatives à la qualité des ingrédients. Les laboratoires ont effectué dans ce domaine analytique des travaux de R & D afin de pouvoir proposer des méthodologies fiables de contrôle de la naturalité. Nous présentons dans cet article des méthodes permettant la mesure des rapports des isotopes organiques stables (empreinte de la photosynthèse d'une plante) et l'étude de la répartition des énantiomères (signature d'une catalyse enzymatique stéréosélective).

L'identification des constituants d'un mélange complexe peut être obtenue par la plupart des méthodes analytiques actuelles (techniques séparatives, méthodes spectroscopiques). Par contre, ces méthodes ne permettent pas de différencier un produit d'origine naturelle de son homologue « identique nature » issu de la synthèse à base de pétrochimie. Du point de vue des législations en vigueur, l'affichage « naturel » doit répondre à certaines considérations, tout manquement constituant une fraude. Des méthodes telles que l'étude des rapports isotopiques d'éléments organiques stables ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) ou instables (^{14}C) ainsi que

la chromatographie énantiosélective (ou chirale) sont développées permettant d'établir des diagnostics de naturalité de molécules dans un mélange. Leur présentation est accompagnée de nombreux exemples illustrant le potentiel de ces méthodes particulières.

Les isotopes stables

Une plante utilise le dioxyde de carbone atmosphérique comme source de carbone lui servant par la suite à la photosynthèse et l'élaboration des chaînes carbonées des métabolites primaires et secondaires indispensables à sa vie. Trois mécanismes de fixation du dioxyde de carbone ont été mis en évidence qui impliquent principalement deux processus et enzymes spécifiques (les cycles de Calvin ou C3 [1] et celui de Hatch et Slack ou C4 [2-3]) ; le troisième mécanisme (CAM ou « crassulacean acid metabolism ») est en fait un compromis des deux premiers alterné sur les périodes diurne et nocturne et présenté par les travaux d'Osmond et O'Leary *et coll.* [4-5]. Ces mécanismes vont donner à la plante une signature isotopique particulière à partir du rapport isotopique du CO_2 atmosphérique.

La *figure 1* schématise un végétal en interaction avec son environnement : des éléments tels que le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote ainsi que les éléments métalliques contenus dans le sol sont en interaction avec l'environnement du végétal (zones géographiques, nature des engrais, évapotranspiration du végétal...) et donnent à ce dernier une empreinte spécifique.

Les isotopes stables organiques ^2H , ^{13}C , ^{15}N et ^{18}O sont principalement mesurés à l'aide de spectromètres de masse des rapports isotopiques (SMRI) qui effectuent la



Figure 1 - Flux des matières permettant une signature isotopique à un végétal.

détermination de ces rapports dans des gaz (H_2 , CO , CO_2 , N_2 ...). Le résultat est communiqué en une unité isotopique appelée delta (δ) dont la formule est la suivante :

$$\delta \left({}^{13}C/{}^{12}C \right) = \left[\frac{R \left({}^{13}C/{}^{12}C \right) \text{ échantillon}}{R \left({}^{13}C/{}^{12}C \right) \text{ standard}} - 1 \right]$$

où $R \left({}^{13}C/{}^{12}C \right)$ échantillon est le rapport isotopique ${}^{13}C/{}^{12}C$ de l'échantillon.

Les résultats sont exprimés relativement au standard international pour la mesure du ${}^{13}C$ qui est un carbonate de calcium appelé « Vienna pee dee belemenite » (VPDB). Pour ${}^{15}N/{}^{14}N$, le standard international est la valeur isotopique de l'azote de l'air, et pour ${}^2H/{}^1H$ et ${}^{18}O/{}^{16}O$, c'est une eau qui provient du milieu du Pacifique appelée « standard mean ocean water » (SMOW). Mais pour obtenir ces rapports isotopiques, le SMRI sera connecté à un appareil de minéralisation permettant la transformation des éléments organiques, des composés étudiés, en gaz. Dans le cas de mesures isotopiques globales d'échantillons, notamment pour le contrôle de l'authenticité de matières premières ou d'arômes purifiés (vanilline), le SMRI sera couplé à un analyseur élémentaire (AE) selon le module spécifique :

- analyseur carbone-azote pour la mesure ${}^{13}C$ et/ou ${}^{15}N$ par combustion et réduction pour obtenir CO_2 et N_2 qui seront envoyés séparément dans le SMRI ;
- analyseur hydrogène-oxygène pour la mesure 2H et/ou ${}^{18}O$ par pyrolyse à température élevée dans un tube en carbone et transformation des gaz en H_2 et CO qui seront injectés également séparément dans le spectromètre de masse isotopique.

La technique de mesure globale (AE-SMRI) est très rapide (temps d'analyse de l'ordre de 10 mn) pour un coût financier abordable (moins de cinquante euros) permettant aux industriels de tester rapidement des lots de matières premières lors de transactions.

Un exemple intéressant est celui du squalane, un émollient largement utilisé dans les crèmes cosmétiques et fabriqué par hydrogénation du squalène issu de deux principales origines naturelles : végétale (olive) et animale (foie de requin). Or les représentants de l'industrie cosmétique tendent à bannir les origines animales dans la préparation de leurs composés commerciaux et le requin n'est pas considéré comme une source renouvelable et durable. La mesure du ${}^{13}C$ du squalane a permis ces dernières années de garantir l'origine de ce composé, que ce soit en mesure globale lors de transactions

commerciales de squalane pur comme matière première, ou bien par extraction et chromatographie en phase gazeuse pour assurer au consommateur l'origine végétale de ce composé dans les crèmes cosmétiques commercialisées [6-7]. Les valeurs isotopiques du squalane issu du squalène originaire du requin ont des $\delta^{13}C$ proches de - 20 ‰ alors que celles ayant comme origine végétale l'olive sont proches de - 28 ‰. L'incertitude de mesure étant proche de $\pm 0,3$ ‰, la méthode est pertinente pour détecter des ajouts de plusieurs dizaines de pourcents de squalane de requin dans du squalane d'olive. Depuis quelques années, la société Amyris produit à partir de la canne à sucre, par un procédé biotechnologique, du squalane qui a une signature isotopique $\delta^{13}C$ proche de - 10 ‰. Cette valeur étant très différente de l'origine animale requin, la technique isotopique reste donc la méthode de référence pour la validation de l'origine du squalane.

Cependant, la vérification de l'authenticité concernera souvent des composés plus complexes (huiles essentielles, préparations aromatiques...) nécessitant des extractions ou des purifications, mais surtout l'utilisation de méthodes séparatives car le composé comprendra un mélange de molécules. L'appareillage le plus utilisé est le couplage CG-C/P-SMRI. Un chromatographe en phase gazeuse permettant la séparation des molécules cibles sera associé à une unité de combustion (C) ou de pyrolyse (P) permettant de minéraliser les molécules cibles en gaz afin de déterminer les rapports isotopiques (mêmes transformations chimiques que pour la mesure globale).

Dans le cas d'authentification d'huiles essentielles, comme l'huile essentielle de cannelle (*Cinnamomum zeylanicum*), c'est la mesure isotopique du 2H du (*E*)-cinnamaldéhyde (50 % environ de l'huile essentielle) qui sera pertinente pour valider l'origine naturelle du composé.

Sur la base de plus de 120 huiles essentielles authentiques, nous avons déterminé que l'intervalle de distribution du rapport isotopique δ^2H du cinnamaldéhyde doit être compris entre - 172 et - 69 ‰, alors que les équivalents de synthèse sont entre + 60 et + 540 ‰. Une huile essentielle commerciale contrôlée à + 250 ‰ ne fait aucun doute sur sa totale non-conformité de naturalité. De plus, comme le présentera le paragraphe suivant, la mise en évidence d'une impureté caractéristique d'un procédé de synthèse a été faite, confirmant l'anomalie de la distribution isotopique.

Pour certaines huiles essentielles, il est possible de mesurer les rapports isotopiques de la molécule à expertiser et de trouver une corrélation isotopique avec un ou des précurseurs directement liés à sa biosynthèse. Le thymol et le carvacrol sont issus de l'hydroxylation enzymatique du *p*-cymène, lui-même issu de la déshydrogénation du γ -terpinène. Il a été démontré une corrélation entre les rapports isotopiques ${}^2H/{}^1H$ de ces molécules permettant d'utiliser les deux précurseurs comme standard interne pour la mesure du phénol dans le but d'authentifier des huiles essentielles de thym, de sarriette et d'origan [8].

La chromatographie énantiosélective (ou chirale)

Le diphosphate de géranyle (GPP) est le précurseur physiologique universel des monoterpènes [9]. Il est cyclisé à partir de son isomère allylique tertiaire, le (-)-(3*R*) ou (+)-(3*S*) diphosphate de linalyle, selon la stéréospécificité des enzymes. Les réactions catalysées par les monoterpènes synthétases sont stéréosélectives à différents degrés

d'énantiosélectivité. Ceci est parfaitement illustré par l'exemple de la biosynthèse de la carvone à partir du limonène dans des plantes telles que la menthe poivrée (*Mentha piperita*) et le carvi (*Carum carvi*). Sous l'effet de la limonène-6-hydroxylase permettant la synthèse régiosélective du *trans*-carvéol ((+) pour la menthe et (-) pour le carvi), les (+) et (-) carvones dans ces plantes permettent ainsi de valider l'origine botanique [10].

Les colonnes capillaires sur lesquelles ont été greffées des cyclodextrines modifiées permettent dans de nombreux cas la résolution chromatographique de ces mélanges. Elles sont utilisées par les laboratoires de contrôle pour valider les excès énantiomériques spécifiques à la signature de naturalité de molécules cibles [11-15]. La figure 2 présente un exemple de résolution des énantiomères de molécules importantes (le linalol et son acétate [12]) dans de nombreuses huiles essentielles (lavande, bergamote, laurier, cardamome, ylang-ylang...) par chromatographie en phase gazeuse et détection par ionisation de flamme.

L'un des inconvénients majeurs des produits naturels est la variabilité observée pour une analyse physicochimique donnée. Des facteurs tels que la variété, le terroir, la maturité, le procédé de production, les effets saisonniers, influent sur le métabolisme et la composition des métabolites secondaires présents dans un extrait d'intérêt. Il est donc nécessaire de disposer de banques de données conséquentes permettant de palier et prendre en compte toutes ces possibilités de variations. Pour ce faire, de nombreux échantillons naturels sont indispensables afin d'en valider la distribution selon une loi normale, ce qui permet à partir de la moyenne et de l'écart type d'obtenir des probabilités et bornes de distributions indispensables à l'expertise. Lorsque cette étude est appliquée à l'huile essentielle de lavande (*Lavandula angustifolia*), sur la base d'une distribution normale obtenue à partir de 250 échantillons certifiés authentiques, les données statistiques indiquent que l'énantiomère (*R*) du linalol doit au minimum être à 91,7 % et l'acétate de (*R*)-linalyle au minimum à 98,8 %.

La même stratégie appliquée à l'huile essentielle de rose (*Rosa damascena*) avec 120 échantillons indique une pureté optique pour la molécule de citronellol au minimum à 98,6 % pour l'énantiomère (*S*). Cette démarche statistique est indispensable afin de rendre un résultat d'expertise avec un risque calculé.

Malgré la puissance de cette méthode, certaines réserves sont à prendre en compte. Dans certains cas, une distribution racémique peut être observée naturellement pour certaines

molécules ; on peut citer les cas du linalol dans l'huile essentielle de bois de rose (*Aniba rosaeodora*) ainsi que le géraniol (*Pelargonium rosat*). Il en est de même pour le citronellal dans l'eucalyptus citronné (*Eucalyptus citriodora*). À ces exceptions s'ajoute une possibilité de racémisation naturelle observée par exemple pour le linalol, l' α terpinéol et le terpinén-4-ol en milieu aqueux et acide. De ce fait avec le temps, on observe une perte d'excès énantiomérique, par exemple du (*R*)-linalol dans des matrices telles que l'eau florale de lavande, de fleurs d'orange et du jus de muscat [12].

Conclusion

Ainsi, plusieurs méthodologies analytiques permettent de certifier l'authenticité de molécules d'intérêt. La spectrométrie de masse des rapports isotopiques permet de déterminer avec une très grande précision les rapports isotopiques d'éléments organiques tels que $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$ et $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. Dans de très nombreux cas, le métabolisme de la plante affecte aux métabolites secondaires une signature isotopique très différente de la molécule « identique nature » obtenue par synthèse à partir de matières premières d'origine fossile. Par la détermination de plusieurs rapports isotopiques et/ou par comparaison avec la signature de molécules voisines (métaboliquement liées), cette méthode permet très régulièrement des expertises relatives à la naturalité de molécules.

Dans les procédés de synthèse enzymatique au sein des plantes, un énantiomère est très régulièrement en fort excès par rapport à son stéréoisomère. La chromatographie chirale permet donc d'envisager le caractère naturel d'une molécule, l'homologue de synthèse présentant une distribution racémique. Il faut toutefois tenir compte de certaines limites, car il existe naturellement des distributions racémiques et, au cours du temps et dans certaines conditions d'acidité de la matrice, des énantiomères purs peuvent se racémiser (eaux florales, jus de fruits). En amont de ces approches, des traces d'impuretés ou de catalyseurs peuvent être aussi une signature de procédé de synthèse (cette partie est développée dans la version longue en ligne de l'article⁽¹⁾).

Note et références

- (1) Téléchargeable sur la page liée à cet article à partir du sommaire de ce numéro sur www.lactualitechimique.org
- [1] Calvin M., The photosynthetic carbon cycle, *J. Chem. Soc.*, **1956**, p. 1895.
- [2] Hatch M.D., Slack C.R., Photosynthetic CO_2 fixation pathways, *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **1966**, p. 21.
- [3] Hatch M.D., Slack C.R., Photosynthesis by sugarcane leaves, *Biochem. J.*, **1966**, *101*, p. 103.
- [4] Osmond B., Crassulacean acid metabolism: a curiosity in context, *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **1978**, *29*, p. 379.
- [5] O'Leary M.H., Osmond B., Diffusional contribution to carbon isotope fractionation during dark CO_2 fixation in CAM plants, *Plant Physiol.*, **1980**, *66*, p. 931.
- [6] Jame P., Casabianca H., Batteau M., Goetinck P., Salomon V., Differentiation of the origin of squalene and squalane using stable isotope ratio analysis, *SOFW J.*, **2010**, *136(1/2)*, p. 2.
- [7] Jame P., Casabianca H., Batteau M., Goetinck P., Guibert S., Watts R., Determination of squalene origin in commercial cosmetic creams using isotope ratio mass spectrometry, *SOFW J.*, **2011**, *137(1/2)*, p. 12.
- [8] Nhu-Trang T.-T., Casabianca H., Grenier-Loustalot M.-F., Deuterium/hydrogen analysis of thymol, carvacrol, gamma terpinene and para cymene in thyme, savory and oregano essential oils by gas chromatography-pyrolysis-isotope ratio mass spectrometry, *J. Chrom. A*, **2006**, *1132*, p. 219.
- [9] Lamarti A., Badoc A., Deffieux G., Biogénèse des monoterpènes III - Monoterpènes synthétases, *Bull. Soc. Pharm. Bordeaux*, **1994**, *133*, p. 100.
- [10] Dewick P.M., The biosynthesis of $\text{C}_5\text{-C}_{25}$ terpenoid compounds, *Nat. Prod. Rep.*, **2002**, *19*, p. 181.

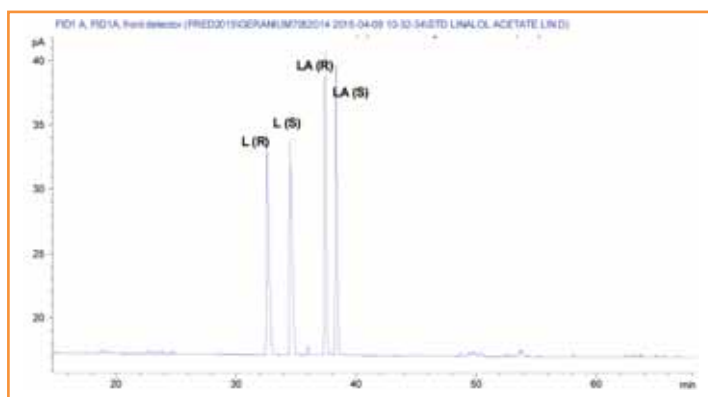


Figure 2 - Résolution des énantiomères du linalol (L) et de l'acétate de linalyle (LA) par GC-FID. Sélecteur chirale : 6-tertiobutyldiméthylsilyl-2,3-diéthyl- β -cyclodextrine.

- [11] Casabianca H., Graff J.B., Jame P., Perrucchiotti C., Application of hyphanated techniques to the chromatographic authentication of flavors in food products and perfumes, *J. High Resolut. Chromatogr.*, **1995**, *18*, p. 279.
- [12] Casabianca H., Graff J.B., Faugier V., Fleig F., Grenier C., Enantiomeric distribution studies of linalool and linalyl acetate: a powerful tool for authenticity control of essential oils, *J. High Resolut. Chromatogr.*, **1998**, *21*, p. 107.
- [13] König W.A., Krüger A., Icheln D., Runge T., Enantiomeric composition of the chiral constituents in essential oils. Part 1: Monoterpene hydrocarbons, *J. High Resolut. Chromatogr.*, **1992**, *15*, p. 184.
- [14] König W.A., Gehrcke B., Icheln D., Evers P., Dönnecke J., Wang W., New selectively substituted cyclodextrins as stationary phases for the analysis of chiral constituents of essential oils, *J. High Resolut. Chromatogr.*, **1992**, *15*, p. 367.
- [15] Bicchi C., Artuffo G., D'Amota A., Galli A., Galli M., Cyclodextrin derivatives in the GC separation of racemic mixtures of volatile compounds, Part IV, *J. High Resolut. Chromatogr.*, **1992**, *15*, p. 655.



H. Casabianca

Hervé Casabianca est ingénieur de recherche CNRS, responsable de l'équipe « Produits naturels et bio-sourcés », et **Patrick Jame**, ingénieur de recherche CNRS, responsable de la plateforme « Analyses organiques et isotopiques », à l'Institut des Sciences analytiques de Villeurbanne*.



P. Jame

* Institut des Sciences analytiques, UMR 5280, 5 rue de la Doua, F-69100 Villeurbanne.

Courriel : herve.casabianca@isa-lyon.fr



Laboratoire de Chimie et Biologie des Métaux

UMR CNRS-CEA-UGA 5249

Une recherche fondamentale
centrée sur les métaux,
à l'interface chimie/biologie
et tournée vers l'innovation

ENVIRONNEMENT

Catalyse bio inspirée

Biomatériaux

Fonctionnalisation de surfaces

Spectroscopie Mössbauer

ENERGIE

Biocapteurs

Photocatalyse

Toxicité des nanoparticules

SANTÉ

Modélisation

Homéostasie des métaux

Biocatalyse

Nouvelles approches thérapeutiques



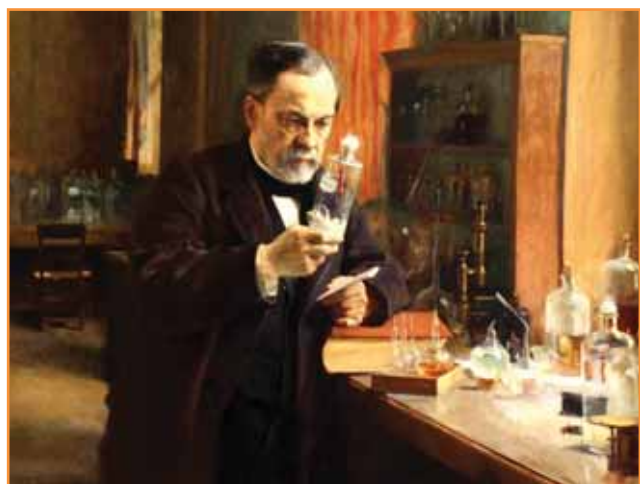
<http://www.cea.fr/drf/big/CBM>

32 biochimistes et biologistes, 20 chimistes,
40 doctorants et post-doctorants

La question de la vérité posée à travers les écrits de Pasteur

Florence Boulc'h

- Résumé** Les étudiants associent généralement le nom de Pasteur au vaccin contre la rage et ignorent bien souvent qu'il fut le fondateur de la chimie en trois dimensions. Nous avons donc choisi, au sein de la licence Sciences et Humanités (Université d'Aix Marseille), d'introduire les cours de stéréochimie développés en deuxième année par l'étude de deux conférences que fit Pasteur, en 1860 et en 1883, sur ses premières découvertes devant la Société Chimique de Paris. Celles-ci nous donnent l'occasion de présenter le génie expérimental de Pasteur, mais aussi de questionner son regard critique sur ses propres résultats.
- Mots-clés** Pasteur, conférences, stéréochimie, JIREC 2016.
- Abstract** The question of the truth posed through the writings of Pasteur
Students generally associate Pasteur to the vaccine against rabies. They often ignore he was the founder of chemistry in three dimensions. We have therefore at Aix Marseille University chosen to introduce our courses of stereochemistry in L2 by studying two lectures made by Pasteur in 1860 and in 1883 on his first discoveries. They give us the opportunity to present his experimental genius, but also to question his critical mind.
- Keywords** Pasteur, lectures, stereochemistry, JIREC 2016.



Louis Pasteur, chimiste et biologiste français. Huile sur toile (1885) d'Albert Gustav Edelfelt (Musée d'Orsay, Paris).

L' édition 2016 des Journées pour l'innovation et la recherche dans l'enseignement de la chimie (JIREC) a retenu pour thème « Chimie et vérité(s) ». Nous entendons ici le terme « vérité » comme l'adéquation entre une théorie et sa validation expérimentale à un moment donné de l'histoire des sciences. Dans ce cadre, le chimiste exprime-t-il la vérité ? Afin de tenter de répondre à cette question, ou du moins d'amener les étudiants à y réfléchir, nous avons choisi d'étudier les écrits de Pasteur relatifs à son travail sur les propriétés de l'acide paratartrique. Notons d'ailleurs que les étudiants associent généralement le nom de Pasteur au vaccin contre la rage et ignorent bien souvent qu'il fut le fondateur de la chimie en trois dimensions. Par conséquent, sous forme de débat et en tant qu'introduction au cours formel de stéréochimie, nous leur proposons l'étude de deux conférences que fit Pasteur, en 1860 et en 1883, sur ses premières découvertes devant la Société Chimique de Paris [1].

Pourquoi proposons-nous aux étudiants de travailler sur la conférence de 1860 ?

Les qualités pédagogiques développées par Pasteur lors de cette conférence sont remarquables. Pour illustrer ce propos, penchons-nous sur l'extrait suivant bien souvent retenu par les étudiants : « Le quartz direz-vous ? Permettez-moi de présenter grossièrement quoique au fond avec justesse, la structure du quartz et celle des produits organiques naturels. Imaginez un escalier tournant dont les marches seraient des cubes, ou toute autre objet superposable. Détruisez l'escalier, et la dissymétrie aura disparu. La dissymétrie de l'escalier n'était que le résultat du mode d'assemblage de ses marches élémentaires. Tel est le quartz. Le cristal de quartz, c'est l'escalier tout construit. Il agit à ce titre sur la lumière polarisée. Mais le cristal est-il dissous, fondu, détruit dans sa structure physique d'une manière quelconque, sa dissymétrie se trouve supprimée et avec elle toute action sur la lumière polarisée. Imaginez, au contraire, le même escalier tournant formé de tétraèdres irréguliers pour marches. Détruisez l'escalier et la dissymétrie existera encore parce que vous aurez affaire à un ensemble de tétraèdres. Ils pourront avoir des positions quelconques, mais chacun d'eux n'en aura pas moins une dissymétrie propre. Tels sont les corps organiques où toutes les molécules ont une dissymétrie propre qui se traduit dans la forme du cristal. »

Les étudiants sont de plus sensibles à l'enthousiasme de Pasteur, tout particulièrement lorsque le savant décrit sa relation avec Biot : « L'annonce des faits qui précèdent me mit naturellement en rapport avec M. Biot qui n'était pas sans concevoir des doutes au sujet de leur exactitude. Chargé d'en rendre compte à l'Académie, il me fit venir chez lui pour répéter sous ses yeux l'expérience décisive. [...] Alors très visiblement ému, l'illustre vieillard me prit le bras et me dit « Mon cher enfant, j'ai tant aimé les sciences dans ma vie que cela me fait battre le cœur ». »

Enfin, de nombreux étudiants apprécient les quelques réflexions exprimées par Pasteur à propos de son métier de



Modèles du carbone tétraédrique réalisés par van't Hoff en 1874-1875 (Musée Boerhaave de l'histoire des sciences, Leyde, Pays-Bas).

chimiste : « Il y a dans la vie de tout homme voué à la carrière des sciences expérimentales, un âge où le prix du temps est inestimable : cet âge rapide où fleurit l'esprit d'invention, où chaque année doit être marquée par un progrès. S'arrêter alors volontairement aux choses acquises est une gêne et un danger, qui compensent trop le plaisir et l'utilité même de voir mes idées se répandre au gré de nos désirs. »

Parallèlement aux qualités pédagogiques et littéraires de cette conférence, elle nous permet aussi de mettre en évidence la construction de la pensée de Pasteur qui décrit ainsi son cheminement : « Huygens et Newton avaient observé que la lumière qui a traversé un cristal de spath d'Islande ne se comportait plus comme la lumière directe. [...] À la fin de l'année 1808, Malus annonça que la lumière réfléchiée par tous les corps opaques contractait de nouvelles propriétés fort extraordinaires, qui la distinguaient essentiellement de la lumière que nous transmettent directement les corps lumineux. Malus appela polarisation la modification que la lumière subit dans l'acte de sa réflexion. En 1811, Arago constata que des lames de cristal de roche taillées d'une certaine façon et placées sur le parcours d'un faisceau de lumière polarisée font subir à celui-ci une modification remarquable. Quelques années plus tard, Biot trouva que cette déviation se produit soit vers la gauche pour certains cristaux, soit vers la droite pour d'autres. Voilà les précédents physiques, si je puis m'exprimer ainsi, des recherches dont j'ai à vous entretenir. Voici les précédents minéralogiques de mes recherches. » Nous sommes convaincus qu'il est important d'insister auprès des étudiants sur le fait que l'idée originale de Pasteur repose sur le recoupement de plusieurs axes de recherches restés pendant longtemps sans rapport [2]. Le premier axe s'inscrit dans le prolongement des controverses millénaires sur la nature de la lumière. Le deuxième est constitué par les travaux de ceux qui venaient d'arracher le cristal au statut de monstre ou de curiosité qu'il avait gardé pendant des siècles dans le cadre de la minéralogie. Pasteur introduit ainsi un nouveau croisement des connaissances et des techniques : le goniomètre, instrument du minéralogiste, mesurait les angles du cristal, le polarimètre était utilisé en optique comme instrument d'analyse de la lumière. L'objet d'étude initial est la polarisation de la lumière, propriété qui devient un moyen d'investigation de la structure de la matière.

Comment poursuivons-nous ce travail de lecture ?

Pasteur conclut sa conférence de 1860 en affirmant l'existence d'une forme inactive par nature des acides malique et aspartique. Pourquoi se trompe-t-il ? Afin de répondre à cette

question, nous distribuons, dans un second temps, les articles de Le Bel et van't Hoff publiés dans le *Bulletin de la Société Chimique de Paris* respectivement en 1874 et 1875 [3]. En effet, van't Hoff introduit ici la notion d'atome de carbone asymétrique et propose une explication à l'inactivité optique d'un composé de l'acide tartrique. De la même manière, van't Hoff et Le Bel réfutent l'existence d'un composé inactif ou « détordu » pour l'acide malique.

Nous proposons enfin aux étudiants d'étudier la conférence de Pasteur donnée en 1883. Il n'y présente que ses résultats relatifs à la détermination de la nature de l'acide paratartrique et ne revient nullement sur le composé d'acide tartrique « détordu », dont van't Hoff et Le Bel ont proposé une interprétation de l'inactivité optique. Comment pouvons-nous expliquer que Pasteur ne fasse pas état des interprétations que les nouveaux modèles apportent aux faits qu'il avait découverts ? Il est pourtant connu, lorsqu'il reprend la parole en 1883, qu'une substance qui ne possède qu'un seul atome de carbone asymétrique, contrairement à celles qui en possèdent plusieurs, ne peut pas exister sous la forme d'un isomère optiquement inactif. Quelle interprétation pouvons-nous donner à ce choix de Pasteur de ne pas exploiter les découvertes faites par d'autres ? Nous ne savons pas. Et nous ne souhaitons pas nous attacher aux traits de caractère de l'auteur pour justifier sa position.

Conclusion

Pourquoi proposer de travailler sur ces conférences ? Le lecteur contemporain des écrits de Pasteur ne peut manquer d'être frappé par l'évident et imposant génie du chimiste, fait d'un mélange sans pareil de goût du détail, de sens de l'exécution des expériences et de logique dans l'examen de leurs conclusions. Quelles qu'aient été les erreurs de Pasteur, voire ses faiblesses prétendues, cette impression subsiste et possède une valeur éminemment formatrice. Nous sommes persuadés que souligner les tâtonnements et les difficultés rencontrées et non résolues derrière les certitudes affichées est véritablement source d'enrichissement et contribue à la construction de l'esprit critique des étudiants.

Enfin, en traçant une esquisse du développement de la démarche pastoriennne et en nous aidant de ses écrits, nous établissons un modèle qualitatif de la démarche interdisciplinaire. Quelles que soient les limites des techniques employées, la démarche de Pasteur illustre d'abord le fait qu'il ne peut y avoir d'interdisciplinarité fructueuse s'il n'y a pas au préalable maîtrise des outils disciplinaires. Encourager l'interdisciplinarité dans les sciences doit s'accompagner d'une exigence de précision dans l'utilisation des langages et le maniement des concepts au service de la résolution des problèmes.

Notes et références

- [1] Ces deux conférences ont été publiées aux éditions Christian Bourgeois sous le titre *Sur la dissymétrie moléculaire* (1986). La conférence de 1883 est disponible sur le site de Bibnum : <https://www.bibnum.education.fr/chimie/chimie-organique/la-dissymetrie-moleculaire> (consulté le 12 mai 2016).
- [2] Jacques J., *La molécule et son double*, Hachette, 1992.
- [3] Ces deux articles sont disponibles sur la bibliothèque numérique Gallica de la Bibliothèque nationale de France.



Florence Boulc'h

est maître de conférences au Laboratoire MaDIREL, Université d'Aix-Marseille*.

* Université d'Aix-Marseille, Laboratoire MaDIREL, UMR 7246, Avenue Escadrille Normandie Niemen, F-13397 Marseille.
Courriel : florence.boulch@univ-amu.fr

« EXPERTS à l'École »

Une opération menée par « Sciences à l'École »

Camille Mahé

Résumé

Le dispositif ministériel Sciences à l'École contribue à la diffusion de la culture scientifique et technique dans les établissements du second degré. L'opération « EXPERTS à l'École », menée en partenariat avec l'Institut de Recherche Criminelle de la Gendarmerie Nationale (IRCGN), permet la réalisation de projets pédagogiques en collège ou lycée sur le thème de la recherche criminelle. Du matériel scientifique adapté à une utilisation en classe est prêté aux établissements scolaires sélectionnés lors des appels à candidatures. Les équipes enseignantes impliquées travaillent en réseau, créent et partagent des ressources pédagogiques et participent à des stages de formation. Des pistes d'activités sont proposées par le comité scientifique de l'opération parmi une liste non exhaustive des thèmes de travail possibles : identification par l'analyse de traces papillaires, entomologie, palynologie, analyse chimique, reconstitution de scènes et balistique, identification de faux documents, analyse vocale...

Mots-clés

JIREC 2016, « Sciences à l'École », recherche criminelle, collège, lycée, projet.

Abstract

Crime Scene Investigation in school by « Sciences à l'École »

The ministerial organization "Sciences à l'École" contributes to the diffusion of scientific and technical culture in secondary schools. The scheme "EXPERTS à l'École", conducted in partnership with the "Institut de Recherche Criminelle de la Gendarmerie Nationale" (criminal research institute), enables the realization of educational projects in secondary school on the subject of the criminal investigation. Schools are selected through calls for applications, and a scientific equipment suitable for a classroom use is lent. The teaching teams involved are networked, create and share educational resources and participate in training courses. Examples of activities are provided by the scientific committee from a non-exhaustive list of possible areas of work: identification by fingerprints analysis, entomology, palynology, chemical analysis, scenes reconstitution and ballistics, false documents identification, voice analysis...

Keywords

JIREC 2016, « Sciences à l'École », criminal investigation, secondary school, educational projects.

Le dispositif « Sciences à l'École »



Le dispositif ministériel Sciences à l'École [1] a pour objectif de soutenir et de promouvoir des projets de culture scientifique et technique pour les établissements du second degré. Les actions qu'il pilote sont réparties selon trois axes :

- Plans d'équipement : prêt de matériel scientifique et accompagnement des équipes pédagogiques qui mettent en place des projets avec leurs élèves. Il existe sept plans d'équipements : « ASTRO à l'École », « COSMOS à l'École », « EXPERTS à l'École », « GÉNOME à l'École », « MÉTÉO à l'École », « SISMOS à l'École », « TECHNOS à l'École ».
- Concours : préparation, sélection et accompagnement des délégations françaises aux Olympiades internationales de chimie, de géosciences et de physique ; organisation des

concours nationaux « C.Génial-collège » et « C.Génial-lycée » pour lesquels les élèves réalisent en équipe des projets innovants dans les domaines scientifiques et techniques.

- Opération LUNAP (l'Univers à portée de main) et « Chercheurs dans les classes » : soutien financier à des projets menés par des scientifiques à destination d'élèves du second degré ; financement de déplacements pour permettre des rencontres entre élèves du second degré et scientifiques.

L'opération « EXPERTS à l'École »



Créée en partenariat avec l'Institut de Recherche Criminelle de la Gendarmerie Nationale (IRCGN), cette opération met en place et anime un réseau d'une trentaine de collèges et de lycées répartis sur le territoire, sélectionnés lors d'appels à candidatures sur présentation d'un projet, et équipés de matériel de recherche criminelle. Une formation de quatre jours à l'IRCGN permet aux professeurs impliqués

Tableau I - Liste du matériel mis à disposition des établissements scolaires.

Microscope numérique, éclairage ultraviolet et infrarouge	Assortiment de poudres et pinceaux	Tamis en métal
Microscope numérique, éclairage en lumière blanche	Assortiment de matériel de mesure balistique	Centrifugeuse angulaire
Support pour microscopes digitaux	Mesureur de température automatique	Lot de dix piluliers
Appareil photographique numérique	Webcam	Boîte pour cartouches
Assortiment de sources lumineuses indépendantes	Microphone	Terrarium pour élevage de mouches et tulle
Assortiment de lunettes de protection	Câble chauffant et thermostat	Logiciel d'exploitation des microscopes

d'appréhender les thématiques de la recherche criminelle et d'acquérir la maîtrise du matériel prêté.

Un cahier pédagogique, téléchargeable sur le site Internet de Sciences à l'École [2], est mis à disposition des équipes. Régulièrement enrichi, il contient des fiches techniques, des protocoles et des informations utiles à la réalisation des projets. La liste du matériel (voir *tableau I*) a été conçue pour que les équipes pédagogiques puissent aborder divers thèmes de la recherche criminelle, en lien avec les programmes scolaires des disciplines scientifiques.

Une liste non exhaustive de thèmes de travail possibles est présentée ci-après, ainsi que des pistes d'utilisation du matériel pour chacun des thèmes retenus. Une grande liberté est toutefois laissée aux équipes pédagogiques dans la définition des projets.

Identification par l'analyse de traces papillaires

Les traces papillaires relevées sur le terrain sont généralement peu contrastées. Pour améliorer le contraste d'une empreinte, les élèves peuvent en première intention utiliser l'assortiment de poudres et pinceaux. Ils modifient ensuite la longueur d'onde de l'éclairage grâce aux différentes lampes de type « crime light » et aux filtres colorés. Si le contraste est encore insuffisant, des protocoles de révélation chimique sont mis en œuvre. Le protocole utilisé dépend du type de support (poreux, non poreux, coloré, blanc, noir, magnétique...). Sur un support poreux et clair, on utilise la ninhydrine qui réagit avec les acides aminés du dépôt sudoral et forme du pourpre de Ruhemann. Sur un support lisse et foncé, on utilise le cyanoacrylate de méthyle qui polymérise au contact de l'humidité du dépôt sudoral pour former un solide blanc (*figure 1*). Les élèves utilisent l'appareil photo muni des filtres colorés adaptés pour capturer l'image et l'analyser par comparaison à d'autres empreintes.



Figure 1 - Observation d'empreintes : le contraste est amélioré par l'utilisation du cyanoacrylate. © Sylvain Thibault.

Entomologie

Un corps en décomposition est colonisé successivement par différentes espèces d'insectes. La connaissance du cycle de développement des insectes permet de dater le début de la décomposition. Les élèves utilisent le terrarium, muni du câble chauffant et du thermostat, la webcam et le microscope numérique pour élever des insectes et observer les stades de leur développement (*figure 2*).

Palynologie

L'analyse des pollens retrouvés sur des chaussures ou des vêtements renseigne sur les lieux fréquentés par un suspect. Le tamis, la centrifugeuse (*figure 3*) et le microscope numérique permettent aux élèves de réaliser l'extraction puis l'observation des grains de pollens d'un substrat.



Figure 2 - Terrarium mis à disposition et insectes élevés dans le cadre de l'opération « EXPERTS à l'École ». © Sciences à l'École.



Figure 3 - Matériel mis à disposition pour l'analyse des pollens.
© Sciences à l'École.

Analyse chimique

La chimie occupe naturellement une place importante en criminalistique [3] et permet de détecter des traces infimes de substances, de comparer deux échantillons, ou d'identifier un produit. Les appareils utilisés par les experts ne peuvent généralement pas faire l'objet de prêt à des établissements scolaires (spectromètres de masse, chromatographes en phase gazeuse...). Les équipes pédagogiques intègrent ces thèmes au projet en fournissant des résultats fictifs aux élèves.

Reconstitution de scène et balistique

Les scènes de crime sont systématiquement reconstituées en trois dimensions par les experts. Un kit comprenant notamment un mesureur d'angles, des tiges et cônes et un pointeur laser permet aux élèves de matérialiser des directions et de reconstituer une scène.

Identification de faux documents

La falsification d'un document peut être mise en évidence par une observation sous une lumière infrarouge ou ultraviolette. À l'aide du microscope numérique équipé de lampes UV et IR intégrées, les élèves peuvent par exemple observer la

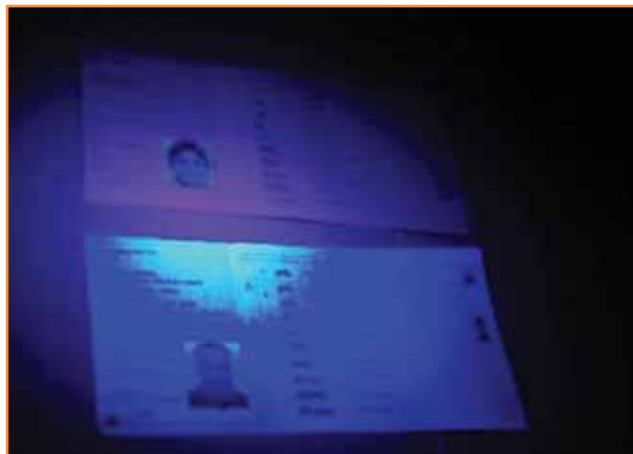


Figure 4 - Observation de permis de conduire falsifiés sous une lumière UV. © Sciences à l'École.

différence entre deux encres ou deux types de papiers qui semblaient identiques à l'œil nu (figure 4).

Analyse vocale

L'analyse d'enregistrements audio peut contribuer à l'identification d'un suspect. L'utilisation du microphone et du logiciel libre Audacity permet d'identifier des individus sur des enregistrements sonores.

Lien avec les programmes scolaires

De nombreux thèmes des programmes scolaires de physique-chimie et sciences de la vie et de la Terre (collège, cycle 4, et lycée général et technologique) peuvent être travaillés dans le cadre de l'opération « EXPERTS à l'École » (voir tableau II).

Le plan d'équipement « EXPERTS à l'École » favorise le travail en équipe pédagogique et permet de montrer comment chaque discipline, dans ses spécificités, peut nourrir et enrichir un projet collectif et contextualisé qui n'a de sens que dans une approche interdisciplinaire. Le partenariat avec l'IRGCN et ses déclinaisons locales apportent également une dimension de découverte des métiers particulièrement motivante pour les élèves impliqués [4]. Il est possible de créer un événement en lien avec le projet pour y associer l'établissement et son environnement.

Tableau II - Thèmes des programmes scolaires de physique-chimie et SVT mobilisables dans le cadre de l'opération « EXPERTS à l'École ».

Thèmes des programmes scolaires de physique-chimie et SVT	Niveaux scolaires et filières concernées
Organisation et transformations de la matière	Collège cycle 4
Mouvements et interactions	Collège cycle 4
L'énergie et ses conversions	Collège cycle 4
La planète Terre, l'environnement et l'action humaine	Collège cycle 4
Le vivant et son évolution	Collège cycle 4
Le corps humain et la santé	Collège cycle 4
Enseignements pratiques interdisciplinaires	Collège cycle 4
Sciences et investigation policière	2 nd MPS
Énergie et sols	2 nd
Extraction, séparation et identification d'espèces chimiques	2 nd
Appareil photographique	2 nd SL, 1 ^{ère} S, 1 ^{ère} STL, Term STD2A
Matériaux polymères	1 ^{ère} STI2D, 1 ^{ère} STL
Organisation des systèmes vivants	1 ^{ère} STL

Tableau II - Suite.

Thèmes des programmes scolaires de physique-chimie et SVT	Niveaux scolaires et filières concernées
Utilisation du microscope	1 ^{ère} STL
Structures cellulaires	1 ^{ère} STL
Énergie d'un point matériel en mouvement	1 ^{ère} S
Ondes sonores, propagation	1 ^{ère} STI2D, 1 ^{ère} STL
Mise en mouvement référentiel, trajectoires	1 ^{ère} STL
Perception des couleurs, synthèse additive et soustractive	1 ^{ère} S, 1 ^{ère} ES – L, 1 ^{ère} STD2A
Mesures et incertitudes de mesure	1 ^{ère} S, 1 ^{ère} STL, Term S, Term STI2D, Term STL
Rayonnement électromagnétique visible, UV, IR, absorption	1 ^{ère} S, 1 ^{ère} STI2D, 1 ^{ère} STL, Term S, Term STI2D, Term STL
Analyse spectrale, spectres UV-visible, spectres IR	Term S, Term STL
Trajectoire dans le champ de pesanteur, énergie mécanique	Term S
Télémétrie ultrason et laser	Term STL
Transformation en chimie organique	Term S
Émetteurs et récepteurs sonores, voix, acoustique physiologique, microphone, casque audio, reconnaissance vocale	Term S spécialité physique
Atmosphère, hydrosphère, climat : du passé à l'avenir	Term S spécialité SVT

Notes et références

- [1] www.sciencesalecole.org
 [2] Thibault S., Etnier C., Hasnaoui C., Deneux, A., Liegard F., Paulhac C., Thollon F., Rojat D., Vigneron M., Tournon P., Pierrini G., Mahé C., Cahier pédagogique « EXPERTS à l'École », 2016. Ce cahier contient de nombreuses références bibliographiques sur les thèmes développés dans le cadre de l'opération (www.sciencesalecole.org/plan-experts-a-lecole-ressources-pedagogiques-ressources-scientifiques).
 [3] Numéros thématiques « La chimie mène l'enquête », *L'Act. Chim.*, 2010, 342-343 ; « Saison 2 », 2013, 378-379.

- [4] Voir le projet construit par Sandrine Labat, professeur de mathématiques-physique-chimie au lycée professionnel Théophile Gautier, Paris : <http://lelabodetheophile.wix.com/lelabodetheophile>



Camille Mahé*

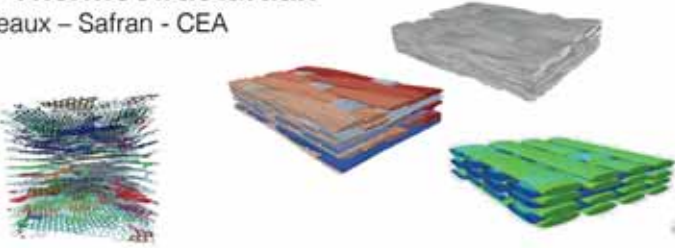
est enseignante de physique-chimie ; elle a été membre de la cellule de ressources de Sciences à l'École** de 2013 à 2016.

* Courriel : camille.mahé@ac-caen.fr

** Sciences à l'École, 61 avenue de l'Observatoire, F-75014 Paris.



Laboratoire des Composites Thermostructuraux
 UMR 5801 CNRS – Université de Bordeaux – Safran - CEA
 3, Allée de la Boétie - 33600 Pessac
 05 56 84 47 00
<http://www.lcts.u-bordeaux1.fr>
 Directeur : Pr. Gerard L. Vignoles



Son activité concerne le développement de matériaux pour des applications en environnements extrêmes pour l'Aéronautique, le Spatial ou l'Energie. Le laboratoire a un effectif de 70 personnes dont 30 permanents et 20 doctorants.



Créé en 1988, le LCTS conduit des recherches fondamentales et appliquées dans le champ des Composites à Matrice Céramique (CMC) et des mousses céramiques renforcées. Il a été le premier laboratoire public associé avec un partenaire industriel : le groupe SAFRAN. Il partage aussi ses travaux avec le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA).



Principaux Axes de Recherches :

Conception et développement de CMC composés de fibres longues de Carbone ou de Carbure de Silicium intégrées dans une matrice céramique, et de mousses céramiques renforcées.

Caractérisation physico-chimique et structurale à différentes échelles.

Analyse du comportement sous contraintes mécaniques, thermiques, oxydantes ou corrosives.

Modélisation et simulation de la structure et du comportement des matériaux thermostructuraux. Modélisation de leurs procédés d'élaboration.






Développement de l'enseignement de la chimie moléculaire des éléments de transition

Quelques pistes

Didier Astruc

Résumé	Le sous-développement des programmes d'enseignement de la chimie moléculaire des éléments de transition en France et l'importance de ce domaine de la chimie sont soulignés dans cet article qui propose aussi une analyse explicative de notre retard par rapport aux pays anglo-saxons ainsi que quelques pistes qui pourraient permettre de structurer cet enseignement à travers les différents cycles universitaires.
Mots-clés	Enseignement, éléments de transition, chimie de coordination, chimie inorganique moléculaire, chimie organométallique, catalyse, propriétés physiques.
Abstract	Development of teaching molecular chemistry of the transition elements: some directions The underdevelopment of the teaching programs in the molecular chemistry of the transition elements in France and the importance of this area of chemistry are underlined in this article that also suggests an analytical explanation of our backwardness compared to Anglo-Saxon countries as well as some directions that might allow to organize this teaching in the university studies.
Keywords	Teaching, transition elements, coordination chemistry, inorganic chemistry, organometallic chemistry, catalysis, physical properties.

Le poids des traditions scientifiques affecte singulièrement l'enseignement de la chimie moléculaire des métaux de transition organométallique et inorganique en France. Ceci apparaît très nettement si l'on compare les programmes de cette matière dans nos universités et classes préparatoires aux grandes écoles avec ceux en vigueur dans les pays anglo-saxons.

La première raison en est la prédominance des mathématiques et de la physique dans l'enseignement secondaire et préparatoire aux grandes écoles au détriment de la chimie. Il est vrai que l'excellence de la France dans ces deux disciplines est indiscutable, notre pays figurant, avec les États-Unis, au premier plan mondial des récipiendaires de Médailles Fields en mathématiques et comptant, depuis la dernière Guerre mondiale, sept lauréats Nobel en physique et seulement trois en chimie. À travers divers mécanismes administratifs et psychosociologiques, il en résulte qu'à somme constante, l'enseignement de la chimie demeure le parent pauvre des matières scientifiques. Elle est souvent enseignée par des agrégés ou certifiés physiciens qui ont, de surcroît, tendance à minorer le temps qui doit lui être consacré et aussi à la considérer à travers le prisme de la physique.

Ce sont aussi les traditions qui privilégient, depuis le XIX^e siècle, le poids de la chimie organique, de la chimie physique et de la chimie minérale au détriment de la chimie moléculaire des éléments de transition, plus récente, qui ne trouve pas sa place dans cette classification rigide. Pour s'en convaincre, il suffit d'ailleurs de lire les intitulés des trois sections de chimie du Conseil national des universités : « chimie théorique, physique et analytique » (31), « chimie organique, minérale, industrielle » (32) et « chimie des matériaux » (33), qui font abstraction, en particulier, de la chimie

de coordination. Parmi les cinq sections du CNRS, cette dernière est représentée seulement par un tiers de la section 14. Il est vrai que ce domaine de la chimie a démarré tardivement en France, au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, par rapport aux pays anglo-saxons. Dans ce contexte, il semble judicieux de rationaliser l'intégration de l'enseignement de la chimie moléculaire des métaux de transition permettant de remettre à leur juste place ces éléments au cours des cursus scolaire et universitaire.

Importance de la chimie moléculaire des éléments de transition

Les éléments de transition, par définition ceux qui présentent une couche d incomplète dans le tableau périodique [1], occupent tout le centre de ce tableau si l'on y ajoute les lanthanides et les actinides. Les symboles de ces éléments sont donc présents dans toutes les bonnes salles de classe de chimie de nos écoles, mais demeurent résolument bien mystérieux pour les millions d'élèves qui ont la classification de Mendeleïev en face d'eux pendant plusieurs années. Pourtant nombreux sont ceux qui rentrent dans la composition de matériaux très divers. Les « biométaux », sur la première ligne (et le molybdène sur la deuxième ligne), en font partie, constituant les sites actifs des métallo-enzymes, transporteurs d'éléments et acteurs des métabolismes. Parmi les très nombreux complexes organométalliques des éléments de transition, dont des exemples célèbres sont illustrés sur la *figure 1*, les familles les plus notables sont les métallocènes – notamment le ferrocène, avec sa chimie très riche et ses nombreuses applications, dont les antipludiques et anticancéreux –, les métaux carbonyles, les

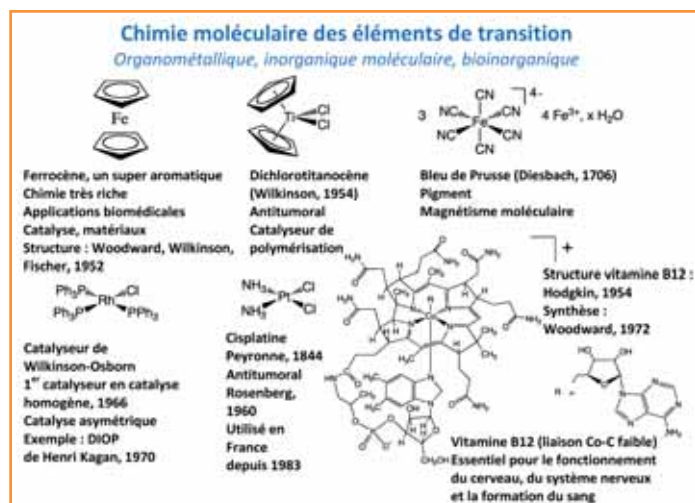


Figure 1 - Quelques composés emblématiques des éléments de transition.

métaux phosphines, les métaux-hydrures, les métaux pyridine ou polypyridine, les métaux-porphyrines et phtalocyanines, les métaux carbènes, les clusters et nanoparticules métalliques, et la majorité des complexes possédant plusieurs types de ligands [2].

De nombreux complexes dans ces familles sont actifs comme matériaux moléculaires et catalyseurs homogènes de réactions très variées. Ils peuvent servir à fabriquer des catalyseurs supportés hétérogènes recyclables pour la chimie « verte ». Beaucoup de procédés industriels utilisent ces complexes comme catalyseurs, et la recherche actuelle se focalise sur le remplacement des métaux nobles, qui sont rares et coûteux, par les biométaux, bon marché et abondants, et dont la Nature a prouvé l'efficacité dans les enzymes [2].

Les complexes des métaux de transition comportent aussi des propriétés optoélectroniques utiles en médecine (photothérapie) et dans la technologie moderne (capteurs, diodes, convertisseurs d'énergie solaire, batteries, etc.), ainsi que des propriétés magnétiques [3], en particulier à transition de spin pour la création de capteurs thermiques ou optiques [4].

Cette science est déjà très développée, mais elle présente aussi devant nous d'énormes défis tels que la conversion rentable de l'énergie solaire, la maîtrise de sources alternatives d'énergie et son stockage avec l'hydrogène, la fixation efficace de l'azote atmosphérique, l'oxydation efficace et sélective du méthane en méthanol à basse énergie, la compréhension des mécanismes d'action des médicaments et la mise au point de nouveaux médicaments (« magic bullet » pour la vectorisation médicale), la lutte contre des maladies actuellement incurables, etc. Tous ces défis impliquent les métaux de transition, et la compréhension de leurs modes d'action est essentielle pour la mise au point de nouveaux matériaux et processus.

Comment situer la chimie organométallique et moléculaire des éléments de transition parmi les disciplines classiques de la chimie ?

La chimie organométallique est définie par les composés présentant au moins une liaison métal-carbone. Cependant,

la chimie inorganique moléculaire comprenant des liaisons métal-élément présente des règles similaires et comparables et devrait être enseignée en même temps que la chimie comprenant des liaisons métal-carbone afin d'en élargir le champ d'étude et d'applications. D'ailleurs, la majorité des complexes présentent à la fois des ligands organiques et inorganiques. Ces disciplines sont issues de la chimie de coordination. Cette dernière englobe également les éléments des groupes principaux et correspond à la nomenclature anglo-saxonne « inorganic chemistry », bien que cette dernière comprenne aussi toute la chimie des solides minéraux inorganiques.

Exemple de répartition de l'enseignement de la chimie moléculaire des éléments de transition en licence et master

Licence 1 (second semestre) Les notions de base

Les complexes

- Définition des ligands X et L et des éléments de transition suivant la convention impliquant que tous les ligands soient considérés comme neutres.
- Les principaux ligands organiques et inorganiques.
- Représentation d'un complexe quelconque sous la forme $[ML_nX_p]^q$ en sommant les ligands X et L.
- Définition et calcul du nombre d'électrons de valence, du nombre d'électrons non liants, du degré d'oxydation et de la coordinance.
- Règle (ou tendance) des 18 et 16 électrons de valence. Catégories de complexes respectant et ne respectant pas la règle des 18 électrons.
- État de spin. Levée de dégénérescence des orbitales dans un champ de ligands octaédriques et état de spin des complexes en fonction de la force du champ de ligands.
- Ligands accepteurs π et donneurs π . Liaison π en retour.
- Degrés d'oxydation.
- Quelques grandes familles de complexes.

Les réactions

- Échange de ligands et synthèse des complexes.
- Addition oxydante et élimination réductrice.
- Insertion et extrusion.

La catalyse

- Notion de cycle catalytique et exemple de catalyse.
- Hydrogénation des oléfines catalysée par le catalyseur d'Osborn-Wilkinson.
- Catalyse d'hydrogénation asymétrique.
- Autres réactions d'hydro-élémentation.

Licence 2 - Catalyse : réactions de métathèse, de carbonylation et d'oxydation

- Les complexes de H_2 et leur acidité. Comparaison avec l'addition oxydante.
- Métathèse de liaisons σ et comparaison avec l'addition oxydante.
- Application à l'activation C-H des alcanes ; fonctionnalisation des aromatiques.
- Application des réactions d'insertion et de métathèse de liaison σ à la polymérisation Ziegler-Natta des oléfines.
- Les carbènes singulets et triplets : stabilité et complexes.

- Métathèse des oléfines et des alcynes et applications en synthèse organique.
- Polymérisation par métathèse d'alcènes et d'alcynes.
- Réactions de carbonylation : méthanol (procédé Monsanto), hydroformylation (procédé oxo) et carbonylation des alcènes et des alcynes (procédé Reppe).
- Oxydation (procédé Wacker), époxydation et hydroxylation des oléfines.

Licence 3 - Chimie bioinorganique et bioorganométallique

- Rôle des métaux en biologie ; co-enzyme vitamine B12 ; hémoglobine et myoglobine ; médiateurs redox biologiques : cytochromes, protéines fer-soufre et clusters, protéines à cuivre.
- Structures et mécanismes d'oxydation des monooxygénases : le cytochrome P450 et la ribonucléotide réductase. Mécanisme cancérigène du benzopyrène.
- Aspects structuraux et modes d'action des enzymes nitrogénases.
- Les enzymes au nickel : CO déhydrogénase et enzymes méthano-gènes.
- Les hydrogénases.
- Imagerie médicale ; toxicologie de certains composés organométalliques ; applications de complexes de l'or en médecine.
- Structure, chimie et propriétés redox du ferrocène. Chiralité planaire.
- Capteurs électrochimiques du glucose sanguin basés sur le ferrocène.
- Thérapie anticancer et antipaludisme : cis-platine et dérivés des métallo-cènes ; mécanisme d'action du cis-platine.

Master 1 - Catalyse de couplage C-C et C-N : application en synthèse organique

- Protection de fragments organiques insaturés.
- Réactions nucléophiles et électrophiles sur les ligands carbonés (Cr, Fe, Pd).
- Formation de liaisons carbone-carbone par addition d'organo-cuprates. Principe du couplage C-C par transmé-tallation catalysée au palladium.
- Couplages de Negishi, Schwarz, Stille, Suzuki, Sonogashira, Heck.
- Carbonylation des halogénures catalysée au palladium.
- Le réactif de Kagan, Sml_2 , et son aspect catalytique.
- Trimérisation des alcynes catalysée au cobalt.
- Réaction de Pauson catalysée au cobalt.
- Réaction « click » : couplage des alcynes avec les azotures catalysé au cuivre.
- Catalyse par les complexes de l'or.
- Les complexes de lanthanides en tant que catalyseurs acides de Lewis.

Master 2 - La liaison métal-métal, les clusters et nanoparticules et leurs applications en magnétisme moléculaire, nanomédecine et catalyse

- Complexes binucléaires et ligands pontants. Liaisons à 3 centres et 2 électrons ; valence mixte. Composés isostructuraux, isoélectroniques et analogie isolobale.
- Clusters boranes, organométalliques et métalloboranes ; règles de Wade-Mingos [5].

- Rappel de voltammétrie cyclique. Systèmes électrochimiques E_{rev} , E_{irr} , et EC [6].
- Réversibilités chimique et électrochimique et transformations structurales : exemples du ferrocène, des fullerènes et des clusters $[\text{Fe}_4\text{Cp}_4(\text{CO})_4]$ et $[\text{Os}_6(\text{CO})_{18}]$ [2].
- Systèmes électrochimiques ECE. Catalyse par transfert d'électron en chaîne [6-7] ; exemples des échanges de ligands et de l'insertion de CO.
- Nanoparticules et nanosciences. Définitions et domaines de recherches.
- Magnétisme moléculaire [3] : interaction d'échange, molécules-aimant, transition de spin, photo-magnétisme [4]. Propriétés optiques (absorption UV-vis-IR, luminescence, ONL).
- Nanoparticules d'or, absorption plasmonique et applications biomédicales [8].
- Application des nanoclusters/nanoparticules métalliques en catalyse.
- Introduction à la catalyse hétérogène. Fixation des nanoparticules métalliques sur supports : oxyde de graphène, zéolithes, tamis moléculaires, polymères, dendrimères et autres supports.
- Catalyse Fischer-Tropsch et comparaison mécanistique avec les modèles [2].
- Transformation des hydrocarbures par catalyse hétérogène et métathèse d'alcane, d'alcènes et d'alcynes. Les oxydes en tant que ligands supportés [9].
- Réactions d'oxydation en catalyse hétérogène [2].

Conclusion

On remarque l'étendue des aspects fondamentaux et appliqués de la chimie moléculaire des éléments de transition. Cette large gamme de programmes nécessite une sensibilisation préalable sérieuse et consistante dans les classes de lycée, avec un rééquilibrage des disciplines scientifiques et à l'intérieur de la chimie, ainsi qu'une répartition sur l'ensemble des trois années de la licence et des deux années du master, et une concertation transdisciplinaire impliquant la biologie, la médecine et la physique.

L'auteur remercie les professeurs Jean-Marie Basset (KAUST), Azzedine Bousseksou, (Toulouse), Jean-René Hamon (Rennes), Henri B. Kagan (Orsay), Frank Launay (Paris) et Jean-Yves Saillard (Rennes) pour leur lecture critique de cet article.

Références

- [1] Green M.L.H., Parkin G., Application of the covalent bond classification method for the teaching of inorganic chemistry, *J. Chem. Ed.*, **2014**, 91, p. 807.
- [2] Astruc D., *Chimie Organométallique et Catalyse*, EDP Sciences, **2013**.
- [3] Kahn O., *Molecular Magnetism*, VCH, **1993**.
- [4] Bousseksou A., Molnar G., Salmon L., Nicolazzi W., Molecular spin crossover phenomenon: achievements and prospects, *Chem. Soc. Rev.*, **2011**, 40, p. 3313.
- [5] Fehner T.P., Halet J.-F., Saillard J.-Y., *Molecular Clusters. A Bridge to Solid State Chemistry*, Cambridge University Press, **2007**.
- [6] Savéant J.-M., Catalysis of reactions by electrodes, *Acc. Chem. Res.*, **1980**, 13, p. 323.
- [7] Astruc D., *Electron Transfer and Radical Processes in Transition Metal Chemistry*, VCH, **1995**.
- [8] Boisselier E., Astruc D., Gold nanoparticles in nanomedicine: preparations, diagnostic, therapy and toxicity, *Chem. Soc. Rev.*, **2009**, 38, p. 1759.
- [9] Pelletier D.A., Basset J.-M., Catalysis by design: well-defined single-site heterogeneous catalysts, *Acc. Chem. Res.*, **2016**, 49, p. 664.



Didier Astruc

est professeur émérite à l'Université de Bordeaux*.

Il a reçu le prix de la division Enseignement-Formation de la SCF en 2016.

* UMR CNRS 5255, Université de Bordeaux.
Courriel : didier.astruc@u-bordeaux.fr

La plateforme d'enseignement WIMS

Damir Buskulić



Objectifs

Les objectifs de l'atelier étaient de faire découvrir la plateforme d'enseignement WIMS (« Web Interactive Multi-purpose Server »), en simulant la création d'une classe, l'inclusion de quelques exercices et la démonstration de la création d'un exercice dans l'éditeur interactif.

La plateforme WIMS est utilisée par une centaine d'établissements en France et en Europe dans le primaire, le secondaire et le supérieur, pour un ensemble très varié de disciplines : mathématiques, physique, chimie, biologie, anglais, français, informatique, électronique... Les particularités qui en font un outil unique dans le domaine de l'enseignement en ligne sont :

- une articulation autour d'une banque d'exercices interactifs déjà bien fournie (environ 4 000 exercices) ;
- un caractère collaboratif, libre (le projet est « open-source ») et ouvert ; les exercices peuvent être publiés et distribués sur les différents serveurs ;
- un très fort caractère aléatoire : un enseignant peut décider que les valeurs présentées, les dessins, les mots, les exercices doivent être choisis aléatoirement par le logiciel lorsque l'exercice est proposé à l'étudiant ; celui-ci peut ainsi faire le même exercice un grand nombre de fois différemment afin de maîtriser toutes les compétences nécessaires à sa résolution ;
- une grande variété de types de réponses : liste à choix, valeur numérique, réponse formelle, click sur un graphique ou un dessin, glisser-déposer, dessin de droites ou courbes interactives... ;
- le support de plusieurs langues ;
- le support d'outils logiciels externes (JSMol, JSXGraph, Povray, maxima...), le support de LaTeX et du html standard, de Javascript, de Java (même s'il est de moins en moins utilisé)... ;
- des outils de suivi personnalisé des étudiants : résultats par compétences, par taux de réussite, par la qualité du travail...

Cette plateforme n'entre pas en concurrence avec les différents espaces numériques de travail (ENT) présents dans les établissements et vient au contraire en complément de ceux-ci. Par exemple, à l'Université Savoie Mont Blanc

(USMB), nous utilisons WIMS et Moodle conjointement, en exploitant les qualités propres de chaque environnement.

Activités réalisées lors de chaque session de cet atelier

- Présentation de l'interface.
- Création d'une classe, structure regroupant plusieurs feuilles d'exercices et documents, sur le serveur de l'USMB.
- Recherche d'un exercice dans la base d'exercices en utilisant le moteur de recherche.
- Recherche d'un exercice en fonction d'un classement selon les disciplines (biologie, français, chimie...) et les matières associées (chimie organique, chimie minérale...).
- Inclusion dans la classe de certains exercices déjà présents dans la base d'exercices : c'est une première approche avant la création d'exercices et c'est le point d'entrée utilisé par de nombreux débutants.
- Création d'un exercice simple à partir d'un modèle préparé : les modèles préparés permettent de créer un ensemble d'exercices standard (QCM par exemple) avec leurs limites.
- Pour aller plus loin, nous avons réalisé un éditeur interactif d'exercices ; cet éditeur est en cours de développement et devrait être intégré au serveur WIMS dans le courant de l'année 2017. Les participants à cet atelier ont pu appréhender cet outil. Ils ont par ailleurs été conviés au colloque WIMS organisé à Annecy en juin 2016⁽¹⁾.

Ressources

- Les serveurs publics suivants peuvent être utilisés pour des tests ainsi que des mises en production (il y a plusieurs autres serveurs si nécessaire) : <http://wims.univ-savoie.fr> ; <http://wims.u-psud.fr/wims> (le plus à jour).
- Un tutoriel pour la création de classes peut être trouvé sur <https://wims.di.u-psud.fr/wims/wims.cgi?module=help/teacher/docbeginner.fr>
- Site de l'association WIMSEDU, sur lequel on trouve beaucoup de documentation, un wiki et un forum d'entraide : <http://wimsedu.info>

Remarques : sur chaque serveur, il est possible de sélectionner quelques exercices dans les classes dites « ouvertes » (cliquer sur « classes ouvertes » dans le menu d'un site). Les classes ouvertes permettent d'explorer l'étendue des ressources disponibles sans s'authentifier. Par exemple, le bouton « École » permet d'explorer certains contenus adaptés à l'école primaire. Il est également possible de visualiser les modules d'exercices disponibles en fonction des différents niveaux primaire/secondaire/supérieur (cliquer sur « Site » puis « Parcourir le site » puis « par niveau »).

(1) Actes disponibles sur <http://lapp.in2p3.fr/WIMS2016>.



Damir Buskulić

est enseignant-chercheur au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules (LAPP), Université Savoie Mont Blanc*.

* LAPP, Université de Savoie, Chemin de Bellevue, BP 110, F-74941 Annecy-le-Vieux Cedex. Courriel : buskuli@lapp.in2p3.fr

Utilisation de tablettes numériques pour un enseignement interactif de la chimie

Sylvie Condom et Françoise Serein-Spirau

L' introduction des tablettes numériques à l'École Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier (ENSCM) pour la formation des élèves-ingénieurs a été présentée lors des JIREC par un diaporama suivi d'un atelier interactif. Quarante-six personnes ont manifesté de l'intérêt pour cette problématique et ont assisté aux deux « présentations-ateliers » programmés.

Dans le cadre de l'évolution permanente de l'offre de formation et de son adaptation aux nouvelles générations d'apprenants d'une part et aux nouvelles exigences socio-professionnelles d'autre part, l'ENSCM a pris en compte la nécessité d'accorder une place croissante aux pratiques et ressources pédagogiques numériques, en tant qu'outils.

Les nouvelles générations d'étudiants ont vécu l'importance croissante d'Internet et la banalisation de l'usage des smartphones. Les relations à l'information et à la connaissance ont profondément changé, et des comportements pour des accès simples et immédiats à de l'information la plus transparente possible ont émergé. Ainsi, les anciennes méthodes d'enseignement, qui ont fait les preuves de leur pertinence et de leur efficacité jusqu'à très récemment, ne rendent pas les contenus assez attractifs pour les élèves actuels dont il est de plus en plus difficile de capter l'attention et chez qui il est de plus en plus difficile d'entretenir la motivation.

Afin de responsabiliser ses élèves, en les mettant au cœur de leur propre formation, l'ENSCM a décidé de les rendre plus actifs dans leurs apprentissages en étant plus attentive à leurs méthodes d'appréhender des contenus nouveaux. Elle a décidé pour cela d'utiliser des tablettes numériques pour contribuer à leur formation, sachant que beaucoup d'applications, peu coûteuses ou gratuites, sont disponibles pour l'apprentissage de la chimie, y compris à un stade avancé [1-2].

Depuis la rentrée 2014, l'établissement prête à ses élèves et à ses enseignants, moteurs dans ce projet, une tablette numérique et fournit les applications logicielles indispensables pour la formation des élèves-ingénieurs (figure 1).

Pour la sauvegarde des données, la Direction des systèmes d'information (DSI) de l'ENSCM a mis en place un espace de stockage des données, hébergées en interne, au sein duquel chaque utilisateur accède à son espace, grâce à l'application *Own Cloud*.

Les tablettes numériques interviennent sur tous les aspects de la formation des ingénieurs chimistes :

- en cours, les exposés sont rendus plus interactifs en utilisant *Explain Everything* et les élèves peuvent les annoter grâce à *PDF Expert* (figure 2) ;
- un exemple de détermination de structure moléculaire par RMN ^1H et ^{13}C a été présenté pour illustrer leur utilisation en travaux dirigés (TD) ;
- en travaux pratiques (TP), les élèves utilisent un cahier de laboratoire électronique et construisent leur expérience du jour à partir de protocoles placés en « Open Science » sur le serveur de *Hivebench* [3]. En fin de séance, chaque élève signe son compte rendu qu'il envoie à l'enseignant.

Des « quizz » développés sur *Socrative* peuvent être facilement mis en œuvre en cours, TD et TP et aident les élèves à travailler avec plus d'assiduité.

Les tablettes numériques facilitent le travail collaboratif des élèves et contribuent efficacement à la pédagogie par projets mise en œuvre à l'ENSCM.

Les développements actuels de ce projet ont été évoqués et s'articulent sur :

• La formation des usagers à l'utilisation des tablettes tactiles

Concernant les élèves, leurs habiletés numériques sont très différentes et une initiation courte leur est proposée pour leur permettre d'utiliser au mieux l'ensemble des outils.

Concernant les enseignants, leur formation annuelle, par un formateur qualifié dans l'utilisation des tablettes numériques à des fins pédagogiques, est un facteur clé de la réussite de ce projet.

• La mise en œuvre de nouveaux outils et de nouvelles pratiques, tels que :

- l'accès à des ouvrages numériques de référence dans les divers domaines de la chimie,
- l'utilisation de plateformes adaptées pour créer un cartable numérique,
- l'évolution vers une plus grande dématérialisation des examens,
- le développement de classes inversées au sein desquelles le rôle transmissif de l'enseignant disparaît au profit d'un rôle de modérateur des acquisitions.



Figure 1 - Applications délivrées sur les tablettes des usagers, de gauche à droite : Documents ; PDF Expert ; Explain Everything ; Chem Draw ; Hivebench ; Evernote ; Own Cloud ; Socrative (« teacher » et « student »).



Figure 2 - Utilisation des tablettes numériques à l'ENSCM.
© ENSCM/Francis Cuberes.

À l'issue de la présentation, l'ensemble des participants a manifesté beaucoup d'intérêt pour cette démarche et a demandé des précisions sur la mise en œuvre des différentes applications pédagogiques présentées telles que le cahier de laboratoire électronique, l'outil de quizz et de prises de notes (temps et facilité d'appropriation par les élèves et les enseignants, apport intrinsèque...). Des questions sur le retour d'expérience ont naturellement été soulevées, leur réponse étant encore un peu prématurée pour un projet mis en œuvre depuis moins de 18 mois.

En conclusion, l'utilisation de tablettes tactiles à l'ENSCM représente un défi ambitieux pour continuer à délivrer une formation mieux adaptée aux usages des apprenants mais

qui garde les mêmes ambitions en termes de volume et de qualité. Cependant, tous les enseignements ne sont pas adaptés à une utilisation judicieuse des tablettes numériques et doivent garder leur présentation traditionnelle pour garder le maximum de leur pertinence. L'ENSCM articule sa formation autour d'une diffusion hybride des connaissances où le numérique prend une place importante afin de continuer à communiquer avec ses élèves-ingénieurs, la communication étant le premier pré-requis pour dispenser de la formation.

- [1] Pienta N.J., Online courses in chemistry: salvation or downfall?, *J. Chem. Educ.*, **2013**, 90, p. 271.
- [2] Libman D., Huang L., Chemistry on the go: review of chemistry apps on smartphones, *J. Chem. Educ.*, **2013**, 90, p. 320.
- [3] www.shazino.com ; <https://www.hivebench.com>



S. Condom

Sylvie Condom est maître de conférences à l'ENSCM et **Françoise Serein-Spirau** (auteur correspondant), professeur à l'ENSCM et chargée de mission TICE*.

* École Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier (ENSCM), 8 rue de l'École normale, F-34296 Montpellier Cedex 5.
Courriels : sylvie.condom@enscm.fr ; francoise.spirau@enscm.fr



F. Serein-Spirau



L'Union des professeurs de physique et de chimie

Une association d'enseignants au service des enseignants

Tous les Bup de 1907 à ce jour
en téléchargement gratuit pour toute adhésion et abonnement

Publication numérique mensuelle
avec impression papier trimestrielle



Consultation du Bup en ligne
par articles et par numéro avec BupDoc

- ◆ Pour tous : 1907 → 2012
- ◆ Pour les abonnés : 2013 → 2017




Un congrès organisé chaque année
par une académie différente



Le site : <http://www.udppc.asso.fr>

Espace Labo Textes statutaires et documents Gestion du laboratoire...	Espace Collège Programmes Liens intéressants	Espace Lycée Enquêtes Programmes...	Documents thématiques Autour de la classification périodique Métrologie...
--	---	--	---

Siège social et courrier : 42 rue Saint-Jacques - 75005 PARIS
 Tél. : 01 40 46 83 80 - Fax : 01 46 34 76 61 - secretariat.national@udppc.asso.fr

Des boitiers de vote en classe

Pourquoi, quand et comment ?

Jean-François Parmentier, Christophe Rabut, Julitte Huez, Odile Dechy-Cabaret et Marie-Claude Betbeder

Dans le cadre du projet Actifs (Action pour des Cours Toulouse-Ingénierie, Interactifs, Formatifs, Solidaires), quinze écoles de l'enseignement supérieur de Midi-Pyrénées développent les cours interactifs en amphi à l'aide de « questions conceptuelles » : périodiquement, l'enseignant pose à l'ensemble des étudiants une question révélatrice de la compréhension du point important qui vient d'être présenté. Les étudiants répondent de manière anonyme à la question au moyen de « boitiers de vote » et l'enseignant accède instantanément à leurs réponses, ce qui lui permet d'adapter son cours au niveau de compréhension. L'enseignant peut aussi proposer des temps de débats et d'échanges entre étudiants pour confirmer ou infirmer leur vote individuel. Cette méthode, appelée « instruction par les pairs », s'applique aussi bien aux petites classes d'une vingtaine d'étudiants qu'aux grands amphithéâtres de 200 personnes et permet des apprentissages beaucoup plus pérennes que la simple transmission d'un savoir par l'enseignant [1].

Pourquoi ?

L'objectif est d'abord de rendre les étudiants plus actifs pendant le cours et donc d'augmenter leur motivation [2]. L'anonymat du vote individuel est une composante indispensable pour une large participation ; il permet de déjouer la réticence des étudiants à exprimer leur point de vue en présence de leurs pairs. Ces cours interactifs permettent aussi à l'enseignant de mieux identifier ce que les étudiants savent ou ne savent pas et d'être plus attentif à leurs difficultés.

Quand ?

Les questions peuvent être posées au début du cours pour introduire un nouveau concept ou valider la compréhension de concepts déjà présentés. Elles peuvent être posées à la fin d'un cours ou d'un module pour faire un bilan sur les notions les plus importantes ; les étudiants peuvent alors s'autoévaluer et mieux identifier ce qu'il faut retenir. Elles peuvent être posées tout au long du cours (à raison de trois à cinq questions par heure) pour rythmer le cours, varier les activités et mettre en valeur certains concepts.

Comment ?

Une des difficultés est la formulation de questions fermées suscitant un débat [3] ; il s'agit donc de proposer de « bonnes » mauvaises réponses. Les questions les plus pertinentes sont celles construites à partir des mauvaises conceptions des étudiants. Il pourra aussi être intéressant d'exploiter les différentes représentations d'une notion ou d'un phénomène : description mathématique par une équation, image décrivant une situation concrète, représentation schématique ou phrases.



Étudiants discutant entre eux avant de donner leur réponse à l'aide du boîtier de vote Turning Technologies.

Dans la pratique, différents outils peuvent être utilisés pour faire voter les étudiants [4] : simple main levée, cartons de couleurs ou QR-code (application VotAR), smartphones ou tablettes avec Socrative ou avec Moodle (DirectQuiz), ou boîtiers de vote avec récepteur dédié (Turning Point, i-Pericles...). Le choix de l'outil est lié aux conditions matérielles de l'établissement (financement des boîtiers de vote, accès wifi...) et à l'aisance de l'enseignant dans l'utilisation.

Depuis la mise en place du projet sur le site toulousain, environ 7 000 étudiants et 120 enseignants ont été impliqués. Les premiers retours obtenus sont très positifs tant du côté des étudiants que de celui des enseignants [5]. Attirés par un nouvel outil numérique permettant de rendre les cours en amphi plus dynamiques, des enseignants ont clarifié leurs objectifs, ont été plus à l'écoute de leurs étudiants et ont initié une analyse réflexive de leurs pratiques. À chaque établissement maintenant de développer les communautés de pratiques ainsi créées où il fait bon discuter pédagogie et amélioration des apprentissages.

Lors de l'atelier proposé pendant les JIREC 2016, la prise en main de l'outil par un public majoritairement non connaisseur a été très rapide. Les aspects matériels ont d'abord été évoqués : quel coût, quels avantages et quels inconvénients des boîtiers de vote ? Quelle organisation pour la mise en œuvre (boîtier confié à l'élève ou distribué à chaque séance) ? Si l'attribution du boîtier est nominative, une évaluation sommative peut-elle être envisagée avec cet outil ? Les enseignants présents ont ensuite partagé autour de différentes interrogations : comment formuler des questions pertinentes ? Y a-t-il des thèmes/concepts plus propices que d'autres pour trouver des « questions faisant débat » ? Quel est le nombre optimal de questions par séance ? N'y a-t-il pas un risque de lassitude des étudiants ? Comment montrer qu'il y a une réelle amélioration des apprentissages [6] ?

Finalement, grâce à un nouvel outil numérique facile d'accès, les enseignants ont posé des questions sur leur pédagogie et sur les apprentissages de leurs étudiants.

- [1] Mazur E., *Peer instruction: a user's manual*, Prentice Hall, **1997**.
- [2] Mercier F., David B., Chalou R., Berthet J.-P., Amphithéâtres interactifs dans l'enseignement supérieur, *Technologies de l'Information et de la Connaissance dans l'Enseignement Supérieur et de l'Industrie*, Oct. **2004**, UTC Compiègne, p. 400-406.
- [3] Quelques exemples sont donnés dans la présentation « Mise en place de questions conceptuelles en amphithéâtre » des JIREC 2016 (www.jirec.fr/index.php/les-jirec/programme-2016).

- [4] **VotAR** (<https://libre-innovation.org>) ; **Socrative** (www.socrative.com) ; **DirectQuiz** (www.directquiz.fr) ; **Turning Point** (www.turningtechnologies.com) ; **i-Pericles** (www.i-pericles.fr). Des photos des dispositifs sont accessibles en ligne.
- [5] http://video.upmc.fr/differe.php?collec=E_enseignement_interactif-120628 ; https://www.youtube.com/watch?v=fy548AXsvN4&feature=player_embedded
- [6] **Parmentier J.-F., Lamine B., Bonnafé S., Changer les conceptions en mécanique des étudiants en L1 à l'Université, Proceeding du 22^e Congrès Français de Mécanique, Lyon 24-28 août 2015.**

Jean-François Parmentier est ingénieur pédagogique au sein du projet ACTIES¹.

Christophe Rabut coordonne le projet ACTIFS¹ ; il est professeur à l'INSA de Toulouse².

Julitte Huez et **Odile Dechy-Cabaret** sont maîtres de conférences à l'INP-ENSIACET³ et conseillères pédagogiques de l'INP Toulouse.

Marie-Claude Betbeder est PRAG à l'INP-ENSIACET³ et chargée de mission Innovation Pédagogique à l'INP Toulouse.

- 1 Projet ACTIFS, Toulouse Ingénierie, IDEFI Défi Diversités.
2 Université de Toulouse, INSA, 135 avenue de Rangueil, F-31077
Toulouse.
3 Université de Toulouse, INP-ENSIACET, 4 allée E. Monso, F-31030
Toulouse.
4 Réseau des conseillers pédagogiques IDEFI Défi Diversités.
Contacts : jf.parmentier@gmail.com ; Odile.DechyCabaret@ensiacet.fr ;
MarieClaude.Betheder@ensiacet.fr

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



Analytical and Bioanalytical Chemistry
 Springer
 the language of science

WILEY-VCH
Les journaux de ChemPubSoc*
*ChemPubSoc regroupe 14 sociétés de chimie européennes, dont la IUPAC

- European Journal of Inorganic Chemistry
- European Journal of Organic Chemistry
- Chemistry - A European Journal
- ChemBioChem
- ChemCatChem
- ChemElectroChem
- ChemMedChem
- ChemPhotoChem
- ChemPhysChem
- ChemPlusChem
- ChemistrySelect
- ChemSusChem
- ChemistryOpen
- ChemViews

L'Actualité Chimique
 Société Chimique de France

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

© www.magdesign.fr

Analytical
and
Bioanalytical Chemistry

 Springer
the language of science

WILEY-VCH



Les journaux de ChemPubSoc*

* ChemPubSoc regroupe 14 sociétés de chimie européennes dont la IUPAC

- European Journal of Inorganic Chemistry
- European Journal of Organic Chemistry
- Chemistry - A European Journal
- ChemBioChem
- ChemCatChem
- ChemElectroChem
- ChemMedChem
- ChemPhotoChem
- ChemPhysChem
- ChemPlusChem
- ChemistrySelect
- ChemSusChem
- ChemistryOpen
- ChemViews

L'Actualité Chimique

The logo of the Société Chimique de France (SCF) is a blue circular emblem containing the white letters 'S' and 'C' intertwined.

Société Chimique de France

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

Régression linéaire, droite d'étalonnage et incertitude

Emmanuel Curis et Jérôme Randon

Cet atelier avait pour but de réfléchir sur la notion d'incertitudes dans la construction d'une courbe d'étalonnage et des critères qui peuvent amener à valider ou invalider une méthode expérimentale, compte tenu de ses caractéristiques opérationnelles. Il couplait une partie « théorique » de présentation de la démarche statistique applicable, présentée aux JIREC 2015 et dont on trouvera une présentation dans l'article paru en décembre 2015 dans ce même journal [1], et une application pratique.

L'exemple pratique retenu était celui de la tartrazine, colorant jaune à usage alimentaire (E 102) : à partir de solutions étalons de ce colorant, préparées à partir d'une même solution mère, chaque trinôme de participants a pu relever une mesure d'absorbance de ces solutions puis construire une courbe d'étalonnage, utilisée pour déterminer la concentration d'une solution « inconnue ». Grâce à une feuille de calcul (disponible en téléchargement sur le site de *L'Actualité Chimique**, accompagnée de son formulaire), l'entrée des valeurs obtenues a permis d'obtenir les paramètres statistiques nécessaires à la validation de la courbe étalon : les taux de recouvrement (biais relatifs) et l'intervalle d'étalonnage de la concentration inconnue (« précision »).

Le premier constat de cet atelier est l'importance de rencontres de ce type entre statisticiens et chimistes afin de s'accorder sur un vocabulaire commun, les méthodes utilisées et leurs limites. Ainsi, si la notion d'« exactitude » ou de « précision » paraît intuitive, pour le statisticien, cela se traduira par des « espérances » et des « variances », alors que les termes de « justesse », « fidélité », « répétabilité », « reproductibilité » viendront à l'esprit de l'expérimentateur. En termes de méthode, plusieurs points ont pu être abordés et discutés :

- les limites du coefficient de détermination (carré du coefficient de corrélation), R^2 , dans la validation d'une linéarité et, plus généralement, d'une courbe d'étalonnage quelle qu'elle soit ;
- les limites statistiques de l'utilisation d'une droite forcée à passer par l'origine qui suggèrent de renoncer à cette approche (de nombreuses formules ne s'appliquent plus, à commencer par celle du coefficient de détermination), alors que la théorie physico-chimique sous-jacente incite à imposer cette contrainte (« quand il n'y a rien, il n'y a pas de signal ») ;

- les hypothèses sous-jacentes à la régression linéaire habituelle, et en particulier en termes de variabilité : elle doit être la même, quelle que soit la concentration étudiée, et ne porter que sur la valeur mesurée, pas sur les concentrations des solutions d'étalonnage ;
- les avantages et les limites de l'utilisation des taux de recouvrement obtenus à partir des solutions étalons, lorsque l'on ne dispose pas d'une référence externe ;
- l'absence de critère absolu pour juger de la qualité d'une courbe étalon, et plus généralement d'une méthode expérimentale de dosage : elle sera toujours imparfaite et ne pourra toujours être validée que par rapport à un cahier des charges défini compte tenu de son usage pratique.

Ces échanges enrichissants suggèrent que d'autres rencontres de ce type puissent avoir lieu, en particulier pour présenter ou apporter des solutions aux limitations évoquées ci-dessus : que faire lorsque les incertitudes sur les concentrations ne sont pas négligeables ? Lorsque celles sur les mesures ne sont pas constantes ? Comment s'introduisent, et s'estiment, les notions de répétabilité, de reproductibilité... dans cette évaluation des qualités de la méthode ?

* www.lactualitechimique.org, page liée à cet article.

[1] Curis E., Menet M.-C., Quantifier les imprécisions en travaux pratiques : détermination de la précision d'une concentration inconnue obtenue à partir d'une droite d'étalonnage, *L'Act. Chim.*, **2015**, 402, p. 45.



E. Curis

Emmanuel Curis est maître de conférences au Laboratoire de biomathématiques de la Faculté de pharmacie, Université Paris Descartes*.

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



J. Randon

* Laboratoire de biomathématiques, Faculté de pharmacie, Université Paris Descartes, 4 avenue de l'Observatoire, F-75006 Paris.
Courriel : emmanuel.curis@parisdescartes.fr

** Université Claude Bernard Lyon 1, ENS Lyon, Institut des Sciences Analytiques, UMR CNRS 5280, 5 rue de la Doua, F-69100 Villeurbanne.
Courriel : jerome.randon@univ-lyon1.fr

Les VIDEXOS

Vincent Villar, Priscilla Bernard et Stéphane Despax

© Catherine Schröder/Unistra.



Les VIDEXOS sont des objets pédagogiques développés et utilisés en cycle préparatoire intégré à l'ECPM, l'école européenne de chimie, polymères et matériaux de Strasbourg. Il s'agit de vidéos courtes, réalisées par les étudiants en temps limité et présentant la correction d'un exercice.

L'atelier, conduit à l'occasion des JIREC 2016, s'articulait autour d'une présentation générale de ce que sont les VIDEXOS, leurs caractéristiques, et l'objectif visé au travers de leur réalisation, et d'autre part autour d'une discussion sur leur utilisation et sur la façon de proposer aux étudiants un retour sur leurs travaux.

L'idée des VIDEXOS est née de la volonté d'insister sur la prise d'initiatives, l'autonomie et l'appropriation des travaux dirigés (TD) « classiques » par les étudiants. Le but de ces objets est de renverser le schéma classique des TD, durant lesquels on constate souvent que les étudiants attendent passivement qu'une correction leur soit fournie.

Les étudiants sont ici responsables d'un énoncé, travaillent en groupe, commencent par chercher à résoudre l'exercice ou le problème, puis filment la résolution au tableau. La réussite du VIDEXO passe par l'identification des étapes clés de la résolution du problème, afin de ne mentionner oralement que les étapes constructives du raisonnement ou les résultats pertinents pour avancer davantage. Les VIDEXOS développent l'autonomie des étudiants et leur prise d'initiatives : parce qu'ils travaillent en groupe, ils font d'abord appel à leurs pairs en cas de problème et ne se tournent vers les enseignants, pour la résolution des problèmes qui se posent à eux, qu'en dernier recours. Les VIDEXOS permettent aux étudiants de se rendre compte des difficultés qu'ils ont, des notions ou techniques qu'ils ne maîtrisent pas. Souvent,

la lecture d'une solution d'exercice ou d'une démonstration les convainc qu'ils sauront refaire le calcul ou réemployer la démarche ; c'est en étant confronté au tableau blanc (ou noir) et à la caméra – qui filme quoi qu'il advienne – que l'étudiant réalise qu'il est en difficulté. Etre en mesure de trouver les mots justes pour expliquer ou commenter ce que l'on écrit, c'est avoir compris ce que l'on écrit et pourquoi on le fait.

La discussion s'est essentiellement concentrée sur l'évaluation, mais aussi et surtout, la critique des VIDEXOS par les enseignants. Nous sommes convenus que l'évaluation du VIDEXO, dès lors qu'elle serait assortie d'une note, représenterait un danger pour l'objet pédagogique et risquerait d'empêcher le VIDEXO de servir son but : l'implication de l'étudiant, la prise d'initiative et de risque, la mise au jour des difficultés des étudiants.

En revanche, l'établissement d'une grille de compétences, ou plutôt d'une liste de points clés, associée à chaque énoncé et d'origine composite, c'est-à-dire réalisée par les enseignants et par les étudiants, constituerait un outil pertinent pour la critique des VIDEXOS, tant par l'enseignant que par les pairs.

L'idée d'une correction collaborative des VIDEXOS par les étudiants, après qu'ils aient visionné l'ensemble des films réalisés sur un sujet, a également émergé au cours de l'atelier. Cette façon de procéder permettrait non seulement à tous les étudiants de voir les travaux réalisés par leurs camarades, de les critiquer, mais également de s'accorder sur une solution qui servira de correction à l'ensemble de la classe.

Cet atelier a été l'occasion d'une discussion constructive qui nous a permis d'avancer davantage dans la mise en place de notre projet VIDEXOS, et d'en faire un objet performant pour l'objectif que nous poursuivons : la construction, par les étudiants, de leur savoir, de leurs compétences.

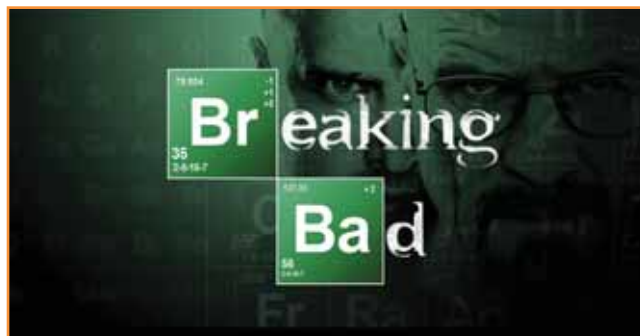
Vincent Villar, Priscilla Bernard (*auteur correspondant*) et **Stéphane Despax** sont professeurs agrégés, en cycle préparatoire intégré de la Fédération Gay-Lussac, ECPM, Université de Strasbourg*.

* Cycle préparatoire intégré de la Fédération Gay-Lussac, ECPM, Université de Strasbourg, 25 rue Becquerel, F-67087 Strasbourg Cedex 2.
Courriels : vincent.villar@unistra.fr ;
priscilla.bernard@unistra.fr ; despax@unistra.fr

Les fictions cinématographiques

Un outil pédagogique de premier choix

François Griffaton



Depuis longtemps maintenant, les élèves se sont habitués à voir des documentaires ou des émissions scientifiques dans les cours de sciences. L'utilisation de supports vidéo, *a priori* non scientifiques, comme les films de science fiction ou les séries TV, bien que moins rigoureux sur le plan scientifique, présentent d'autres avantages qui peuvent être exploités par l'enseignant.

Au cours de l'atelier présenté aux JIREC, nous avons visionné quelques extraits de films ou séries et, pour chaque extrait, étudié une activité en lien avec lui. L'objectif était de montrer des exemples très concrets de ce qui peut être mis en place avec les élèves, d'un niveau seconde à un niveau bac + 2, et de voir quels intérêts en retirent les élèves et l'enseignant.

Outre le fait d'éveiller la curiosité lors de la projection, un film permet de mieux fixer dans la mémoire la notion étudiée. Si l'on décide par exemple d'introduire la notion de chiralité auprès d'élèves de terminale scientifique à l'aide d'un extrait de la série *Breaking Bad* [1] dans lequel le personnage principal Walter White, ancien professeur de chimie reconverti en spécialiste de la synthèse de méthamphétamine, évoque cette même notion avec ses élèves, on est pratiquement certain d'attirer l'attention de la classe. On peut également espérer susciter des discussions après le cours. Ce souvenir du cours sera associé à la notion étudiée, et celle-ci sera donc certainement mieux mémorisée.

Un autre atout de ce genre de support est directement lié à la nature même de celui-ci. Là où un documentaire apporte bien souvent des réponses à des questions scientifiques, la fiction apporte plutôt un questionnement. En cela, elle peut être une excellente base de cours, d'activité ou de résolution de problème. Par exemple, après avoir diffusé un extrait d'une trentaine de secondes du film *Star Wars*, épisode 1 : *La Menace fantôme* [2], on peut, comme le fait Roland Lehoucq dans son livre *Faire des*

sciences avec Star Wars [3], proposer à des élèves de première scientifique de calculer la puissance volumique d'un sabre laser afin de voir si, au moins de ce point de vue, sa fabrication est imaginable dans notre triste monde dépourvu de midi-chloriens [4]. Ce genre de problème est très motivant pour les élèves, mais il favorise également la prise d'initiative et le regard critique, non seulement sur les résultats que l'on trouve, mais également sur les hypothèses que l'on est amené à faire pour parvenir à ceux-ci.

Notons enfin qu'un même support vidéo peut parfois être exploité à des niveaux de classe différents, en adaptant le questionnement aux objectifs de formation. Ainsi dans l'épisode 9 de la saison 2 de *Breaking Bad*, Walter White et son ancien élève Jesse Pinkman se retrouvent bloqués en plein milieu du désert, suite à une panne de batterie de leur camionnette. Walter entreprend alors de fabriquer une pile à l'aide du matériel disponible dans le van et, au cours de la fabrication, explique succinctement à Jesse le principe de fonctionnement de la pile. Cet extrait, anodin en apparence, peut sans difficulté être utilisé à un niveau de classe de première pour introduire le principe de fonctionnement d'une pile et définir des termes comme anode, cathode ou pont salin. Mais, lorsque l'on tente une analyse plus quantitative, le problème se corse et, à partir du même extrait, on peut proposer à des élèves de classes préparatoires aux grandes écoles de calculer la constante thermodynamique de la réaction qui a lieu ou la force électromotrice de la pile. Ce faisant, on sera amené à manipuler des diagrammes potentiel/pH et surtout, on pourra répondre clairement à l'épineuse question que se poseront alors les élèves : les personnages vont-ils vraiment pouvoir faire redémarrer leur engin avec cette pile ?

Les quelques exemples de films et séries étudiés lors de l'atelier et notions de sciences physiques associées montrent comment sciences, art et esprit critique peuvent s'articuler dans une mise en contexte bien plaisante à la fois pour le professeur et les élèves. De nombreux films de science-fiction, comme *Gravity* [5], ou séries, telles que *The Big Bang Theory* [6], témoignent de l'attention des réalisateurs à éviter les pires aberrations scientifiques – et deviennent donc étudiables – ; d'autres se contentent de présenter quelques solutions colorées ou fumantes dans un bécot ou une fiole pour vous immerger dans un laboratoire..., ce qui ne présente plus le moindre intérêt.

- [1] Série de Vince Gilligan créée en 2008, avec B. Cranston et A. Paul.
- [2] Film de George Lucas sorti en 1999, avec L. Neeson, E. McGregor et N. Portman.
- [3] Lehoucq R., *Faire des sciences avec Star Wars*, Le Béal, 2005.
- [4] Dans *Star Wars*, les midi-chloriens sont des micro-organismes présents dans tous les êtres vivants. Ils déterminent la réceptivité de l'individu à la Force et donc sa capacité à devenir un Jedi.
- [5] Film d'Alfonso Cuarón sorti en 2013, avec S. Bullock, G. Clooney et E. Harris.
- [6] Série de Bill Prady et Chuck Lorre créée en 2007, avec J. Parsons, J. Galecki et K. Cuoco.
- [7] Film de David Fincher sorti en 1999, avec B. Pitt et E. Norton.
- [8] Film de Peyton Reed sorti en 2015, avec P. Rudd.
- [9] Film de Brad Bird sorti en 2011, avec T. Cruise.

Films ou séries	Notions/thèmes étudiés
<i>Breaking Bad</i> [1]	chiralité, fonctionnement d'une pile
<i>The Big Bang Theory</i> [6]	effet Doppler, réaction d'oxydoréduction, télémétrie
<i>Fight Club</i> [7]	saponification
<i>Ant-Man</i> [8]	masse volumique, structure lacunaire de l'atome
<i>Star Wars</i> , épisode 1 : <i>La Menace fantôme</i> [2]	calorimétrie
<i>Mission : Impossible - Protocole fantôme</i> [9]	interactions de van der Waals



François Griffaton
est professeur agrégé de chimie au lycée
François 1^{er} à Fontainebleau*.

* 19 bd Crevat Durant, F-77300 Fontainebleau.
Courriel : francois-gilles.griffaton@ac-creteil.fr

Évaluation des connaissances des lycéens en chimie-thermodynamique à l'entrée à l'INSA

Mise en place de questionnaires de rentrée inter-INSA

Marion Fregonese, Hélène Métivier, Carole Daiguebonne, Philippe Gall, Isabelle Delaroche, Jean-Noël Foussard, Stéphane Mathe, Claire Moulis, Jean-Philippe Andrieu et Nicolas Serres

La réforme des lycées ayant conduit à de profonds bouleversements, aussi bien dans les contenus scientifiques enseignés que dans les méthodes d'apprentissage, il est apparu important aux premiers cycles des INSA (Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Rennes, Rouen, Strasbourg, Toulouse) de développer un moyen de mesurer l'impact de cette réforme sur les connaissances/compétences des étudiants à leur entrée dans le supérieur, dans le but de détecter d'éventuelles lacunes et, le cas échéant, de mettre en œuvre une remédiation. Cette évaluation a été faite au travers de questionnaires disciplinaires soumis aux étudiants depuis la rentrée 2013.

Cet atelier avait pour but de présenter le contenu des questionnaires concernant la chimie et la thermodynamique et leurs résultats, afin d'échanger avec les collègues du secondaire et du supérieur autour de cette réforme.

Élaboration des questionnaires

Les différents INSA ont collaboré pour la mise en place d'une banque de questions disponible sur la plate-forme Moodle2. Riche de 206 questions rédigées en français et de 30 questions en version bilingue français/anglais, cette banque a été élaborée à partir des ouvrages de 2^{nde}, 1^{ère} et terminale utilisés dans les lycées (tableau I). Chaque INSA a ensuite élaboré son questionnaire (hébergé en interne) en sélectionnant 20 à 30 questions (tableau II) réparties dans les différentes catégories.

Résultats

Les résultats obtenus s'avèrent très homogènes et comparables d'un établissement à l'autre. Les notions acquises à l'issue

de la terminale sont dans l'ensemble parfaitement maîtrisées (nomenclature, cinétique...). Les notions qui demeurent confuses relèvent souvent des programmes de 2^{nde} et 1^{ère} (atomistique...).

Bien qu'un des objectifs annoncés de la réforme soit l'autonomie dans la démarche scientifique, on constate cependant que les étudiants sont en difficulté dès qu'il faut faire appel à des calculs, à une problématique spécifique, à une démonstration.

Et après...

Suite à ces tests, chaque INSA a mis en place une remédiation pour aider les étudiants. Elle se décline sous forme de cours de révision des notions du lycée, cours de soutien pendant l'année, suivi personnalisé des étudiants les plus en difficulté.

Les échanges avec les participants des JIREC ont été particulièrement riches. Les discussions ont montré que les difficultés des étudiants dans le supérieur étaient les mêmes quels que soient les établissements et filières d'origine. Les écueils rencontrés confirment l'analyse des collègues du secondaire concernant les notions partiellement acquises par les lycéens.

Marion Fregonese et **Hélène Métivier**, INSA Lyon, **Carole Daiguebonne*** et **Philippe Gall***, INSA Rennes, **Isabelle Delaroche**, INSA Rouen, **Jean-Noël Foussard**, **Stéphane Mathe** et **Claire Moulis**, INSA Toulouse, **Jean-Philippe Andrieu** et **Nicolas Serres**, INSA Strasbourg.

* Contacts : philippe.gall@insa-rennes.fr ; carole.daiguebonne@insa-rennes.fr

Tableau I - Exemples de catégories de questions (à gauche) et de sous-catégories de la catégorie 5 (à droite).

Catégories	Nombre de sous-catégories associées	Sous-catégories	Lignes de programme
C1. Atome, élément, propriétés des éléments	5	C5a	Combustion : équation, énergie
C2. Molécules	6	C5b	Réactifs, produits, réactif limitant Détermination de l'état final d'un système chimique, avancement, tableau d'évolution
C3. États de la matière	3	C5c	Équilibrage, effet thermique lors d'une réaction (lien avec les changements d'état)
C4. Solutions	4	C5d	Oxydoréduction : pile Daniell, couple oxydant/réducteur, ajuster une demi-équation redox (par la technique des charges), puis l'équation globale
C5. Réactions chimiques	8	C5e	Cinétique : durée d'attente de l'avancement final, temps de demi-réaction, influence de la température et du milieu réactionnel, catalyse Suivi temporel par CCM et spectrophotométrie

Tableau II - Exemples de questions.

Équilibrer l'équation bilan suivante (les coefficients stœchiométriques a, b, c, d, e sont des entiers, saisir la réponse sous la forme du nombre abcde) : $a \text{ Fe} + b \text{ H}_3\text{O}^+ \rightarrow c \text{ Fe}^{2+} + d \text{ H}_2 + e \text{ H}_2\text{O}$
Réponse :
Un couple redox est constitué par un réducteur Red et un oxydant Ox reliés par la relation :
Veillez choisir une réponse :
☐ $\text{Ox} + n \text{ e}^- \rightleftharpoons \text{Red}$ ☐ $\text{Ox} + \text{Red} \rightleftharpoons n \text{ e}^-$ ☐ $\text{Ox} \rightleftharpoons \text{Red} + n \text{ e}^-$

Ateliers expérimentaux

Chimie et illusion

Atelier animé par **Édith Amadei** et **Geneviève Canicave**, lycée Jean Perrin, Marseille

Les expériences proposées se présentent de prime abord comme des « tours de magie » pour quelqu'un qui ne connaît pas la chimie. La plupart de ces expériences ne demandent pas un matériel ni des produits sophistiqués et peuvent être réalisées sur une durée relativement courte.

Elles peuvent illustrer un cours ou servir de support pour une démarche d'investigation. Elles reposent sur des concepts et des théories plus ou moins complexes selon le niveau enseigné.

Exemples de transformations chimiques mises en jeu dans les expériences présentées

- Réactions de précipitation et de réduction avec le permanganate de potassium acidifié (les verres magiques) ;
- Déplacement de ligands d'un complexe de fer (le tissu caméléon) ;
- Électrolyse d'une solution de sulfate de sodium (le papillon magique) ;
- Réactions oscillantes d'oxydoréduction (la bouteille multicolore) ;
- Photoisomérisation de l'azobenzène (une drôle de CCM) ;
- Propriétés magnétiques des oxydes de fer (les ferrofluides) ;
- Découvrir la chimie cachée derrière ces « tours » peut être attractif pour les élèves ou les étudiants.

Ouvrages de référence utilisés

- D. Cachau-Herreillat, *Des expériences de la famille Acide-Base : réussir, exploiter et commenter 50 manipulations de chimie*, De Boeck, 2009.
- P. Depovere, *La chimie exocharmique : quiz, tours de magie et autres anecdotes ou démonstrations chimiques extraordinaires*, De Boeck, 1993.

• Contacts : canicavegenevieve@yahoo.fr ; edithamadei@gmail.com

L'expérience, source et critère de toute(s) vérité(s) en chimie

Atelier animé par **Michel Verdaguer**, professeur émérite de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris

L'atelier, qui s'est déroulé dans une salle de TP bien équipée, avait été remarquablement préparé par les collègues du lycée. Le travail consistait à étudier à tour de rôle quatre séries de démonstrations pédagogiques, en particulier : la précipitation du bleu de Prusse, le paramagnétisme du dioxygène liquide, l'équilibre $N_2O_4 = 2 NO_2$, la photosynthèse.

Chaque expérience était accompagnée d'une fiche-matériel et d'un protocole expérimental préparés par l'animateur*.

Toutes les expériences peuvent être présentées à différents niveaux de lecture : conférence expérimentale « grand public », dans le but de susciter des vocations scientifiques (dont le pays a grand besoin...) ; démonstrations pédagogiques pour des élèves de lycées, des étudiants de CPGE ou d'université ; base pour un travail expérimental en autonomie pour des étudiants de premier ou même de second cycle universitaire.

Dans cette optique, nous avons discuté, pour chacune des expériences, des résultats observés, de leur validité, du choix des hypothèses dans la construction d'un modèle d'interprétation plus ou moins évolué, d'éventuels artefacts, de la possibilité « d'aller plus loin » en proposant des manipulations plus quantitatives dans le but d'un travail expérimental plus approfondi (TP, projet personnel).

Les conditions de sécurité et d'emploi de certains réactifs ont été constamment rappelées.

Ce compte-rendu a été rédigé par Jean-Pierre Foulon et relu par Julien Lalande.

- * Les fiches expérimentales des manipulations sont disponibles auprès de Michel Verdaguer.
- Contact : michel.verdaguer@upmc.fr



© DEF/SFC



Bioproduction fermentaire de l'isobutène

Enjeu industriel et défi scientifique

Philippe Marlière et Mathieu Allard

Résumé Les alcènes gazeux figurent parmi les molécules qui pourraient se dériver des ressources végétales comme les hydrates de carbone en conservant la plupart de l'énergie accumulée par la photosynthèse. Pour effectuer cette conversion, des réactions chimiques inédites doivent être programmées génétiquement dans le métabolisme des cellules microbiennes. L'élaboration d'une telle filière fermentaire est explicitée dans le cas de l'isobutène, synthon crucial de l'industrie des carburants, des élastomères et des résines.

Mots-clés **Biologie de synthèse, ingénierie métabolique, rétro-biosynthèse, oléfines gazeuses, isobutylène, Global Bioenergies.**

Abstract **Fermentative bioproduction of isobutene: industrial stake and scientific challenge**

Gaseous alkenes represent a large class of compounds which in principle could be derived from renewable resources such as carbohydrates, while retaining most of the energy stored during photosynthesis. In order to achieve such a conversion at the industrial scale, novel chemical reactions will have to be genetically programmed in the metabolism of microbial cells. This review discusses fermentation processes currently elaborated for generating isobutene, a major molecule of petrochemistry that is transformed into fuels, elastomers and resins.

Keywords **Synthetic biology, metabolic engineering, retro-biosynthesis, gaseous olefins, isobutene, Global Bioenergies.**

Les oléfines gazeuses – éthylène, propylène, isobutylène, butylènes, butadiène et isoprène – constituent la catégorie générique de molécules organiques la plus abondante et réactive que fabrique et convertit l'industrie chimique [1].

Produites à l'échelle de dizaines de millions de tonnes par craquage du pétrole, elles servent à la fabrication de carburants, d'élastomères et de résines, occasionnant à l'issue de leur utilisation, de leur combustion ou biodégradation un ajout au cycle géochimique du carbone et à la surcharge de l'atmosphère en CO₂. L'option de produire des oléfines gazeuses à partir de ressources renouvelables présente à la fois un enjeu colossal et un défi technologique pour l'industrie et la biologie de synthèse.

Enjeu colossal, car ce sont des réactions métaboliques, précisément commandées par des instructions génétiques appropriées dans des micro-organismes reprogrammés et confinés, qui seront le mieux à même de maximiser productivité, rendement et pureté des hydrocarbures produits à partir de matière première végétale. Seuls en effet les bioprocédés peuvent faire usage de la prolifération cellulaire et de la sélection génétique pour s'améliorer.

Défi technologique, car les organismes vivants naturels se gardent bien de produire des alcènes gazeux, hormis l'éthylène et l'isoprène émis parcimonieusement par les plantes à des fins de signalisation et de climatisation : la volatilisation massive des flux carbonés entrainerait en effet une déperdition nutritionnelle et énergétique que la sélection naturelle a forcément évitée au cours de l'évolution des espèces. Les filières de bioproduction des oléfines gazeuses devront par conséquent être inventées et implantées de toute pièce dans des cellules microbiennes, bactéries ou levures.



Figure 1 - Usine de démonstration de Leuna, en Allemagne. Équipée d'un bioréacteur de 5 000 L, cette installation représente la dernière étape de montée en échelle du procédé de production d'isobutène de Global Bioenergies avant l'usine commerciale. Cette dernière comprendra une série de fermenteurs de très grande taille, et demandera une nouvelle montée en échelle d'un facteur 50 environ (par fermenteur).

La société Global Bioenergies⁽¹⁾, fondée en 2008 et cotée en bourse depuis 2011, a entrepris de remplacer la provenance fossile du jeu complet des oléfines gazeuses par une ressource renouvelable dans l'industrie.

Le cas le plus abouti est celui de l'isobutène, dont la bioproduction par des bactéries est sur le point de commencer à l'échelle d'une usine de démonstration (Leuna, en Allemagne, figure 1) exploitant des voies de biosynthèse inédites dans les écosystèmes terrestres et une diversification

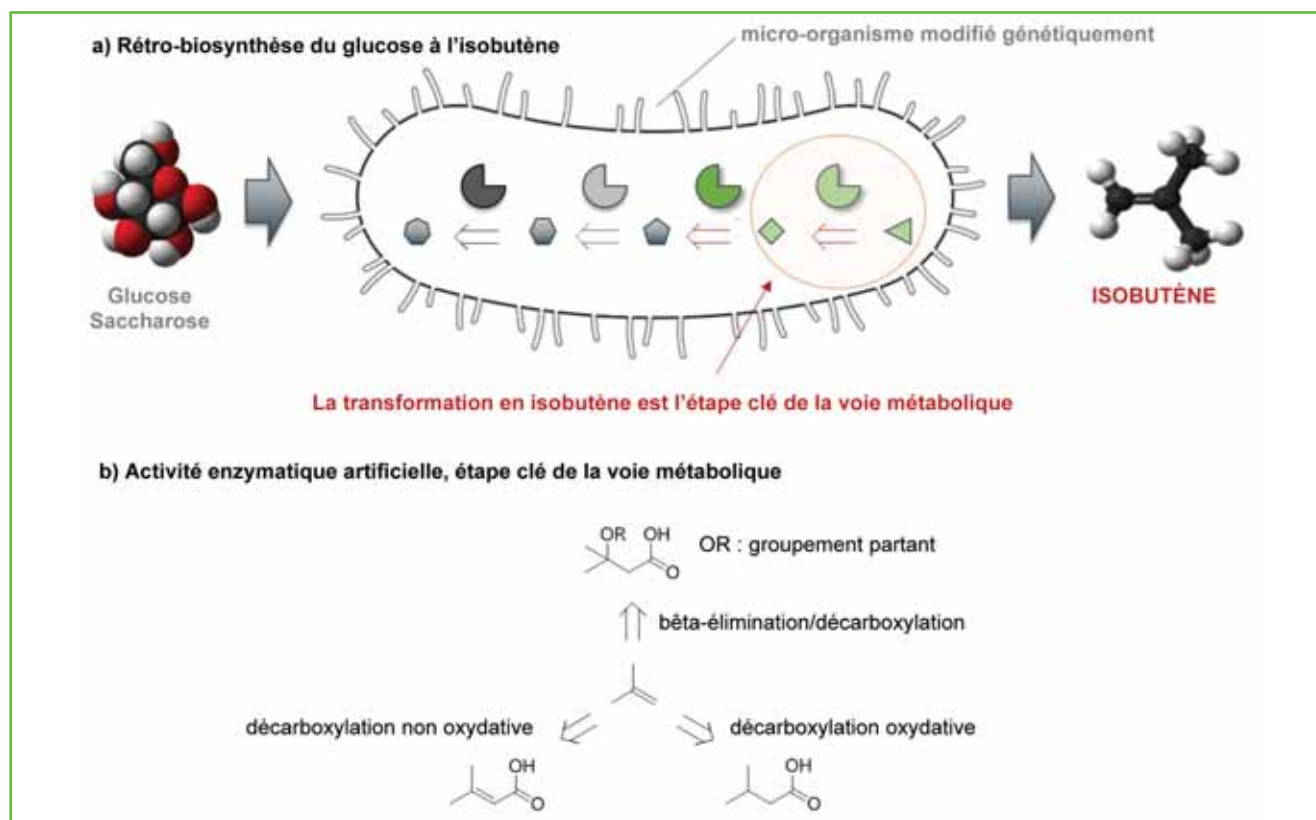


Figure 2 - a) Rétro-biosynthèse et élaboration d'enzymes artificielles pour produire des oléfines légères, en premier lieu l'isobutène. b) Différents mécanismes biocatalytiques envisagés pour convertir un acide carboxylique en isobutène.

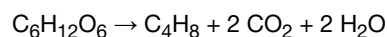
artificielle de différents enzymes naturels pour qu'ils produisent efficacement ce gaz hydrocarbure. Cet article relate la démarche suivie pour y parvenir. L'approvisionnement en isobutène représente un enjeu d'importance primordiale pour l'industrie, car cette oléfine se prête aisément aux réactions de polymérisation et d'alkylation *via* le carbocation tert-butyle. L'isooctane (2,2,4-tri-méthyl-pentane), qui constitue le carburant principal de l'essence, ainsi que l'isododécane (2,2,4,6,6-penta-méthyl-heptane), qui répond aux spécifications d'un kérosène renouvelable pour les turboréacteurs, s'obtiennent ainsi par hydrogénation du dimère et du trimère de l'isobutène. Notons également que la catalyse acide conduit très efficacement à l'alkylation des alcools par l'isobutène [2], ce qui ouvre la perspective de produire, à partir d'éthanol et d'isobutène d'origine végétale, une version entièrement renouvelable de l'éther peu volatil ETBE (éthyl tertio butyl éther). Ce faisant, la proportion de biocarburant dans l'essence pourrait être augmentée tout en évitant les inconvénients de miscibilité, d'évaporation et de corrosion occasionnés par l'éthanol non alkylé.

État de l'art

La formation biologique d'isobutène par la levure *Rhodotorula minuta* a été décrite à la fin des années 1980 comme résultant de la décarboxylation oxydative de l'acide isovalérique catalysée par un enzyme, une hémoprotéine de la famille des cytochromes P450 [3-4]. L'activité infime de cet enzyme (0,001 conversion par enzyme par jour) ne permet pas de l'exploiter dans un procédé industriel. Aucun autre enzyme naturel n'a depuis été identifié qui soit capable de catalyser de manière efficace la formation d'isobutène.

C'est la raison pour laquelle Global Bioenergies a été amenée à concevoir des voies métaboliques produisant de

l'isobutène suivant des réactions non naturelles et mettant en œuvre des biocatalyseurs absents dans la nature. De telles voies métaboliques sont systématiquement conçues de façon à satisfaire une stœchiométrie théorique, une équation de fermentation idéale, par exemple une molécule d'isobutène à partir d'une molécule de glucose :



Chacune de ces voies métaboliques virtuelles se caractérise par le nombre des réactions enzymatiques qu'elle emprunte et qui n'ont pas été décrites, son « horizon prophétique ». Cette démarche s'apparente à celle de la rétrosynthèse, bien connue des organiciens (figure 2a). Ce sont principalement les réactions enzymatiques de formation du produit isobutène lui-même et des substrats précurseurs de cet hydrocarbure qui suscitent l'exploration la plus intensive et la plus novatrice. En particulier, les mécanismes de décarboxylation ont fait l'objet d'une étude comparative, à savoir une bêta-élimination couplée à une décarboxylation, une décarboxylation oxydative ainsi qu'une décarboxylation non oxydative (figure 2b).

Pour ce faire, des enzymes connus pour catalyser la production de molécules comportant un motif structural proche de l'isobutène sont testés pour convertir les substrats appropriés en cet hydrocarbure. Des gènes synthétiques sont assemblés pour exprimer dans des bactéries les enzymes candidats, lesquels sont évalués comparativement par chromatographie en phase gazeuse suivant un protocole automatisé. Même quand sont testés de la sorte de vastes effectifs d'enzymes homologues, c'est-à-dire descendant tous d'un ancêtre commun mais provenant d'espèces distantes généalogiquement, seules de faibles activités catalytiques sont détectées pour de rares candidats. Il est donc nécessaire d'améliorer considérablement les enzymes pour

parvenir à les intégrer dans un procédé de biologie industrielle. À cette fin, Global Bioenergies a développé une plateforme robotisée d'évolution dirigée et de criblage à haut débit des enzymes.

Un bref récapitulatif est offert des catégories d'enzymes naturels découverts pour produire de l'isobutène et destinés à s'améliorer par évolution artificielle, ainsi que des voies métaboliques approvisionnant chaque enzyme en son substrat convertible.

Mévalonate diphosphate décarboxylases (MVD)

Les mévalonate diphosphate décarboxylases ou MVD (EC 4.1.1.33) sont des enzymes essentiels au métabolisme des cellules eucaryotes et de quelques embranchements bactériens. Ces enzymes assurent la biosynthèse des terpénoïdes, au premier rang desquels le cholestérol et l'ubiquinone [5]. Les MVD catalysent la phosphorylation puis la décarboxylation du mévalonate 5-diphosphate en isopentényl-diphosphate (figure 3a). Il s'agit de l'une des rares réactions biochimiques identifiées qui conduisent à la formation d'une insaturation terminale. Ce mécanisme peut formellement s'appliquer à la conversion d'un acide organique, le 3-hydroxy-3-méthyl-butyrate ou β -hydroxy-isovalérate (HIV), en isobutène (figure 3b).

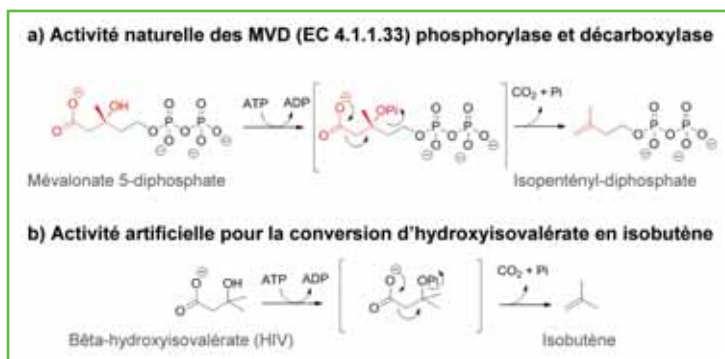


Figure 3 - a) Activité naturelle et mécanisme catalytique des mévalonate diphosphate décarboxylases (MVD), b) appliquée pour la conversion de β -hydroxy-isovalérate en isobutène.

Le β -hydroxy-isovalérate (HIV) n'est pas naturellement présent chez les micro-organismes utilisés couramment en biologie industrielle, comme *Escherichia coli* ou *Saccharomyces cerevisiae*. Une autre activité artificielle doit donc être implantée pour accéder à cette molécule à partir d'un composé biologique accessible naturellement. Une possibilité est d'appliquer le mécanisme catalytique des

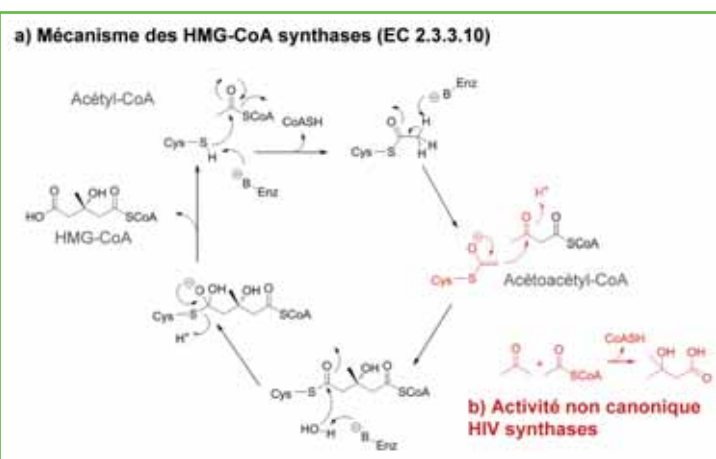


Figure 4 - Activité naturelle et mécanisme catalytique des HMG-CoA synthases pour la formation de β -hydroxy-isovalérate à partir d'acétone et d'acétyl-CoA.

hydroxy-méthyl-glutaryl-coenzyme A synthase ou HMG-CoA synthase (EC 2.3.3.10).

Cet enzyme catalyse la formation de l'hydroxy-méthyl-glutaryl-CoA (HMG-CoA) à partir d'acétyl-CoA et d'acétoacétyl-CoA via un mécanisme de type condensation de Claisen (figure 4). L'acétyl-CoA est un intermédiaire métabolique central chez tous les organismes vivants. En appliquant ce mécanisme à un accepteur non physiologique, l'acétone, au lieu de l'acétoacétyl-CoA, la réaction devrait conduire au HIV (figure 4).

L'acétone est naturellement produite par certains micro-organismes à partir d'acétyl-CoA, dont les plus répandus appartiennent au genre *Clostridium* [6-7]. Les gènes responsables de la biosynthèse de l'acétone ont été identifiés et largement utilisés en biologie industrielle [8]. L'approche rétro-biosynthétique consiste ici à produire l'acétone en tant que précurseur du HIV à partir d'acétyl-CoA par expression hétérologue chez *Escherichia coli* des gènes de *Clostridium* (figure 5).

Une autre voie de biosynthèse du HIV se conçoit à partir de l'acétyl-CoA en empruntant certains enzymes de la biosynthèse de composés myxothiazole chez *Myxococcus xanthus* [9-10]. Cette voie métabolique comporte davantage d'étapes biocatalytiques que celle ayant l'acétone pour intermédiaire, mais elle reste une alternative intéressante puisqu'elle n'implique qu'une seule activité « non naturelle » contrairement à la première voie proposée, diminuant ainsi le travail d'ingénierie enzymatique à réaliser (figure 6). La formation de HMG-CoA à partir d'acétyl-CoA est bien connue dans la voie de biosynthèse de l'isopentényl pyrophosphate

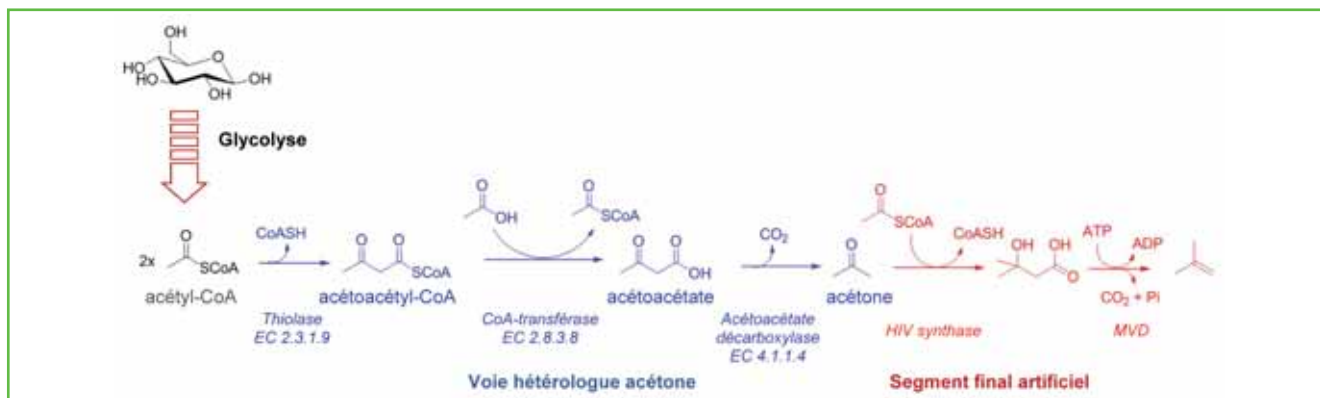


Figure 5 - Voie métabolique pour produire l'isobutène via l'acétone et HIV.

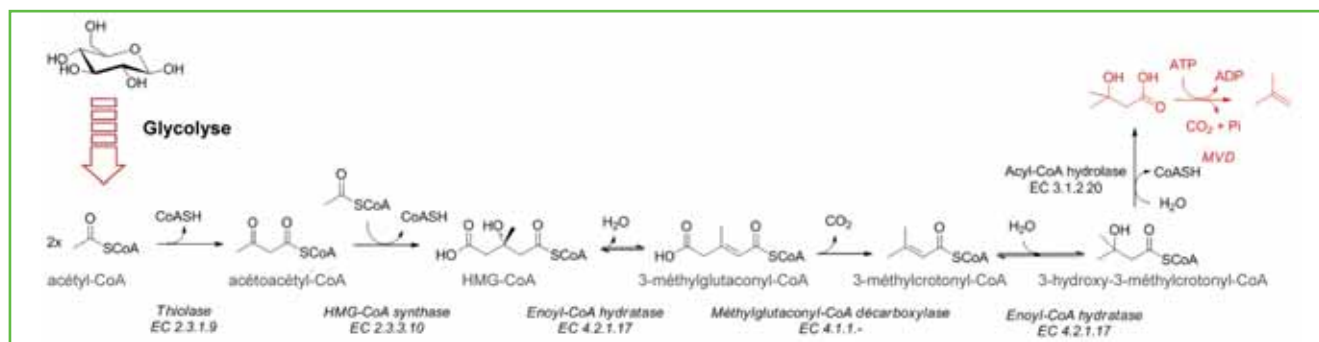


Figure 6 - Voie métabolique pour produire l'isobutène via différents intermédiaires acyl-CoA et HIV.

et du di-méthyl-allyle pyrophosphate, comme expliqué précédemment. L'étape clé est ici la décarboxylation du 3-méthyl-glutaconyl-CoA en 3-méthyl-crotonyl-CoA. Ce type d'activité enzymatique est souvent associé à des enzymes utilisant la biotine comme cofacteur, et impliquant l'ATP comme co-substrat. Toutefois, cette décarboxylase issue de *Myxococcus xanthus* (3-méthylglutaconyl-CoA décarboxylase) n'utilise pas ce type de mécanisme réactionnel et ne dépend pas d'un cofacteur ; il n'interfère donc pas avec le métabolisme énergétique de la souche de production [11]. Ces propriétés en font un enzyme particulièrement intéressant pour élaborer un procédé industriel d'ingénierie métabolique.

Olefin forming enzyme (OleC)

Certaines bactéries sont connues pour produire naturellement des traces d'alcènes à longue chaîne (plus de vingt carbones) chez des bactéries du genre *Burkholderia*, *Shewanella* ou *Micrococcus*. L'opéron (regroupement de gènes aux fonctions liées) responsable de cette voie métabolique comporte quatre gènes OleA, OleB, OleC et OleD. Le gène spécifiant l'enzyme responsable de la conversion finale en alcène (OleC) a été particulièrement étudié [12-13].

L'enzyme OleC appartient à une famille annotée comme « AMP-dependent synthetase and ligase », à l'origine impliquée dans la biosynthèse d'acyl-CoA via un intermédiaire réactionnel acyl-adénylate, activité commune à tout enzyme appelé « adénylate forming enzyme » ou AFE [14]. Cette activité d'adénylation entraîne la conversion d'une molécule d'ATP en pyrophosphate inorganique et la condensation de l'adénylate (AMP) par une liaison phospho-anhydride à l'acide carboxylique, conversion réversible dont l'enthalpie libre n'est que de $-3 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ (figure 7). De tels intermédiaires acyl-adénylates sont labiles et réagissent par une attaque nucléophile sur le carbonyle ainsi activé, conduisant habituellement dans le métabolisme à la formation de thioesters.

Il a été démontré que la famille d'enzymes OleC intervenant dans la biosynthèse d'alcènes à longue chaîne est incapable de catalyser la formation d'alcènes à partir de β -hydroxy acides à plus courte chaîne. L'activité de formation de l'acyl-adénylate dépend de la longueur de la chaîne alkyle du substrat, ce qui explique la sélectivité de l'enzyme [15].

L'analyse du mécanisme réactionnel permet donc d'envisager de découpler la réaction catalysée par OleC en deux étapes. La première étape consiste à former l'acyl-adénylate d'un β -hydroxy acide via un mécanisme classique des AFE, et la seconde étape, spécifique à la famille OleC, entraîne la transformation de l'intermédiaire β -hydroxy-acyl-adénylate vers un alcène terminal.

Ainsi, dans l'approche poursuivie par Global Bioenergies, un premier enzyme capable de catalyser la formation du β -hydroxy-isovaléryl-adénylate est utilisé de manière concomitante avec un enzyme appartenant à la famille OleC qui catalyse quant à elle la formation de l'acyl-adénylate formé en alcène. La formation du β -hydroxy-isovaléryl-adénylate est catalysée par un enzyme de type AFE, efficace sur les β -hydroxy-acides à courte chaîne. L'étape d'adénylation étant réversible, l'utilisation de pyrophosphatase permet de déplacer l'équilibre vers la formation de l'intermédiaire acyl-adénylate, et d'empêcher ainsi la réversibilité de la réaction, ce qui améliore grandement l'efficacité du système multienzymatique.

L'utilisation concomitante d'un enzyme AFE, d'un enzyme OleC et de pyrophosphatase conduit à une cascade efficace pour convertir le β -hydroxy-isovalérate en isobutène. Un mécanisme réactionnel possible serait le transfert intramoléculaire de l'adénylate sur l'hydroxyle en bêta, entraînant une élimination couplée à une décarboxylation et la formation de l'alcène terminal (figure 7).

Cytochrome P450 et décarboxylation oxydative

Les cytochromes P450 (CYP450) sont des métallo-enzymes à cofacteur hémique (hémoprotéines) impliqués dans de nombreuses réactions d'oxydation sélective comme des hydroxylations ou des époxydations. L'utilisation d'une telle hémoprotéine pour la biosynthèse d'isobutène avait été abordée par l'équipe d'Hideo Fukuda au Kumamoto Institute of Technology [3-4]. Toutefois, le cytochrome P450

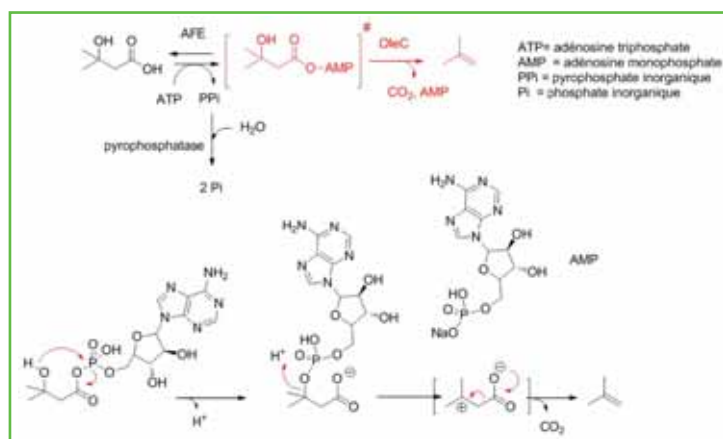


Figure 7 - Système bi-enzymatique AFE/OleC permettant la bioconversion du β -hydroxy-isovalérate en isobutène via un intermédiaire acyl-adénylate et mécanisme réactionnel envisagé d'élimination/décarboxylation.

de *Rhodotorula minuta* semble difficilement exploitable par un procédé de biologie industrielle. Outre le fait que son activité catalytique soit très faible comme expliqué précédemment, ce CYP450 est localisé dans la membrane et donc très difficilement transposable chez des bactéries couramment utilisées en biologie industrielle [3-4].

Une autre famille de CYP450 capable de catalyser la décarboxylation oxydative d'acide organique en alcène terminal a été découverte par la société LS9 Inc. Cette nouvelle hémoprotéine, dénommée OleT, est issue d'une bactérie halophile, *Jeotgalicoccus* sp., et présente l'avantage d'appartenir à la famille CYP152, constituée par les CYP450 bactériens solubles, localisés dans le cytoplasme. Il semble que OleT ne puisse catalyser que la conversion d'acide aliphatique à longue chaîne carbonée en alcène terminal ($\geq C_{15}$). Seule a été démontrée une activité de type peroxygénase (formation de l'espèce à haut degré d'oxydation par un mécanisme de type « peroxide shunt »). L'analyse phylogénétique suggère que cette nouvelle famille d'hémoprotéines est proche des CYP450 impliqués dans des réactions de β -hydroxylation [16-19], mais un acide aminé de la face distale de l'hème (histidine 85) dirige le mécanisme réactionnel vers la décarboxylation oxydative plutôt que la β -hydroxylation (figure 8a).

La capacité de OleT à catalyser, avec une activité catalytique plus faible, la décarboxylation oxydative d'acides aliphatiques à plus courtes chaînes a été décrite [20]. On peut donc s'attendre à ce que l'évolution dirigée de ce métallo-enzyme améliore la production de l'isobutène à partir de l'isovalérate (3-méthyl-butérate), cet acide organique étant facilement accessible dans le métabolisme (figure 8b).

UbiD, décarboxylation non oxydative

Il est connu depuis les années 1990 que certaines espèces de levures ou de moisissures comme *Aspergillus niger* sont capables de convertir l'acide cinnamique en styrène [21]. Les deux gènes commandant cette activité enzymatique ont été identifiés et annotés comme « ferulic acid

decarboxylase » (FDC, parfois annotés UbiD) et « phenylacrylic acid decarboxylase » (PAD, parfois annotés UbiX). Toutefois, le mécanisme exact de ces enzymes restait inconnu. Leurs interactions moléculaires et le mécanisme catalytique formant les alcènes terminaux ont été magistralement élucidés il y a peu par l'équipe de David Leys de l'Université de Manchester [22-23].

Les deux enzymes sont indispensables à l'activité de décarboxylation de l'acide cinnamique en styrène. Par ailleurs, ces deux gènes sont également impliqués dans la biosynthèse de l'ubiquinone, cofacteur que l'on trouve dans les réactions de la chaîne respiratoire.

UbiD (FDC) est l'enzyme responsable de la bioconversion de cinnamate en styrène et constitue donc une véritable décarboxylase. UbiX (PAD) est en réalité une prényl-transférase, responsable de la biosynthèse du coenzyme indispensable à UbiD, lequel dérive de la flavine mononucléotide (FMN). En effet, l'acte catalytique de UbiD proprement dit est assuré par ce coenzyme jusqu'alors inconnu, qui correspond à l'adduction au FMN d'un motif prénylé provenant du diméthylallyl-phosphate. Ce nouveau coenzyme flavonoïde tétracyclique a été dénommé « prenylated flavin cofactor », ou PFC (figure 9a).

Le mécanisme de UbiD a été caractérisé par des études spectroscopiques. Il implique la formation d'un adduit covalent entre le substrat cinnamate et le coenzyme PFC par cycloaddition 1,3 dipolaire, conduisant à une décarboxylation de type Grobe, à la formation de l'alcène et la régénération du coenzyme (figure 9b). La particularité de cette transformation est la réversibilité du mécanisme, permettant sous certaines conditions la carboxylation du styrène en cinnamate. Comme l'a montré Global Bioenergies, ce mécanisme original peut aussi s'appliquer à la conversion d'un acide organique α,β -insaturé en un alcène, en particulier le 3-méthyl-crotonate (3-méthyl-2-buténoate) en isobutène.

Une voie de biosynthèse du 3-méthyl-crotonate découle directement de la voie métabolique produisant l'acide isovalérique, comme précédemment évoquée.

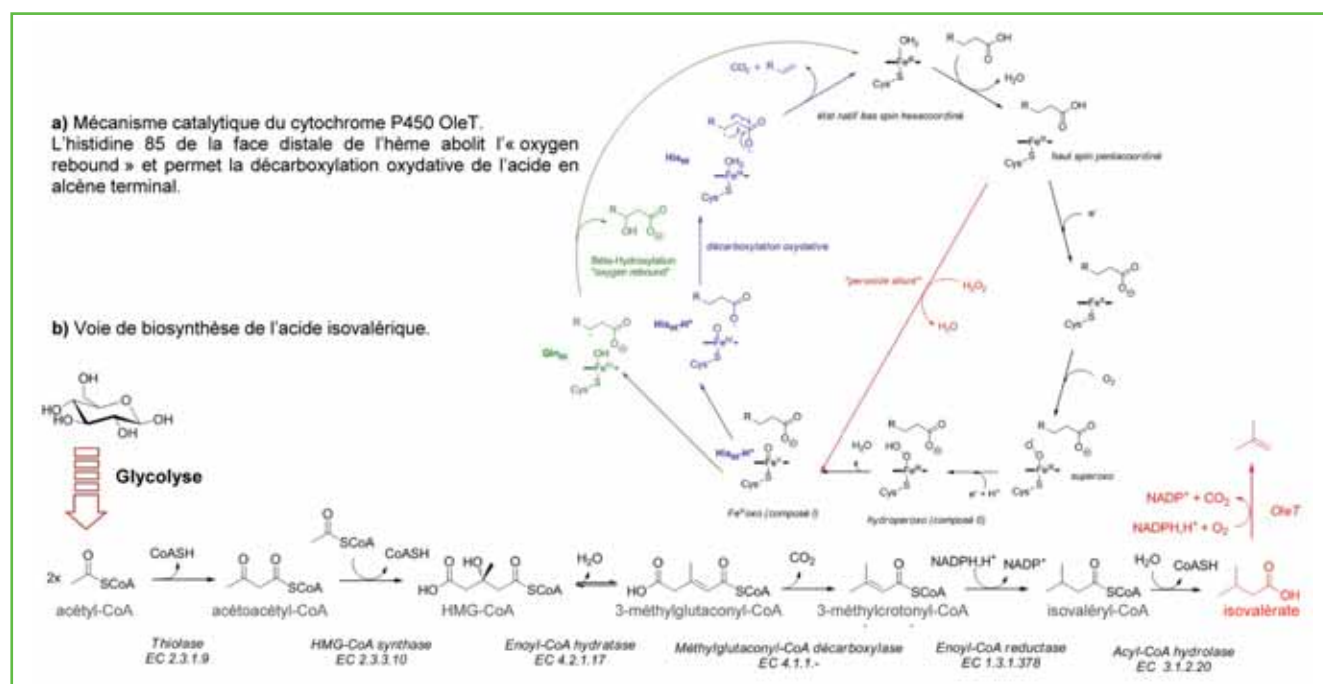


Figure 8 - a) Mécanisme réactionnel et particularité de OleT responsables de l'activité de type décarboxylation oxydative. b) Voie de biosynthèse de l'acide isovalérique.

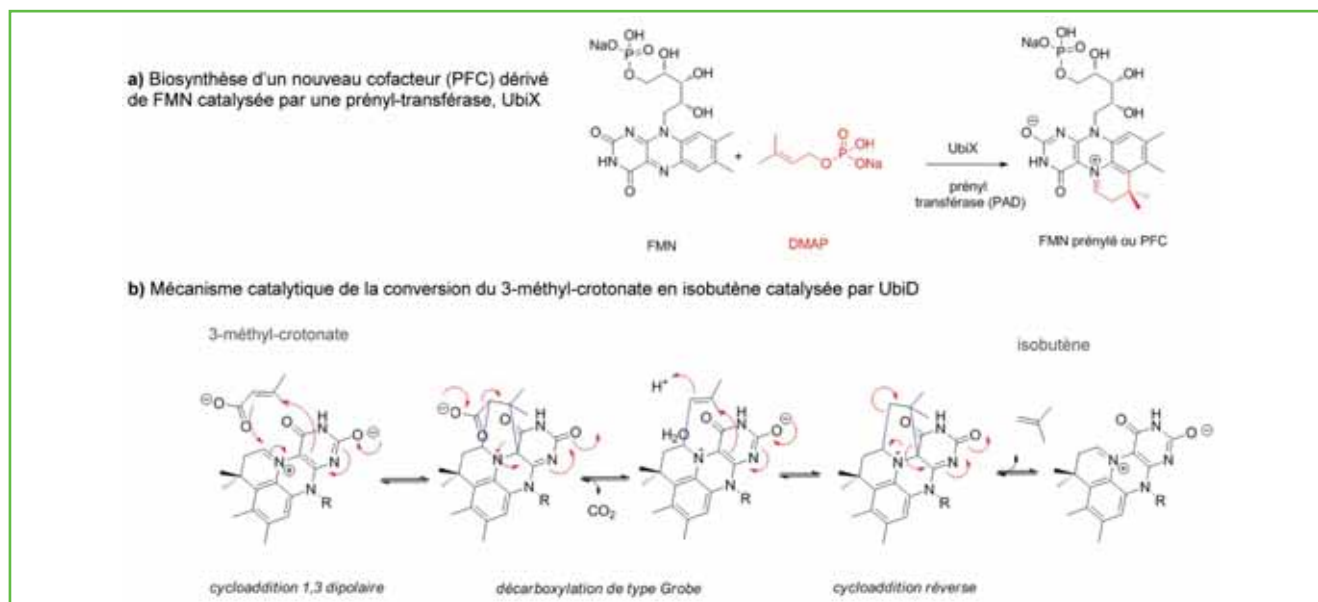


Figure 9 - a) UbiX est responsable de la biosynthèse du coenzyme essentiel à l'activité de décarboxylation de UbiD (« prenylated flavin cofactor », ou PFC). b) Mécanisme catalytique de la conversion du 3-méthyl-crotonate en isobutène catalysée par UbiD et son coenzyme original PFC.

Conclusion

La nature gazeuse de l'isobutène, comme celle des autres oléfines légères ciblées par Global Bioenergies, a constitué une aubaine décisive. En effet, ces molécules sont complètement insolubles dans le milieu aqueux où prolifèrent les bactéries, ce qui permet d'éviter l'intoxication des souches productrices par le produit, comme c'est généralement le cas lors de l'accumulation d'un soluté tel que l'éthanol ou l'isobutanol. La volatilisation de l'isobutène procure aussi des avantages lors de la production industrielle et a donné lieu à l'élaboration de fermenteurs innovants. À l'étape de la R & D, la volatilisation du produit facilite en outre l'analyse quantitative, par chromatographie en phase gazeuse, et qualitative, par spectrométrie de masse, lors de l'évolution dirigée des enzymes produisant des alcènes gazeux ainsi que des voies métaboliques approvisionnant ces enzymes en substrats. Au stade d'efficacité où est parvenu le procédé de bioproduction fermentaire de l'isobutène, on peut désormais aller jusqu'à compter sur la sélection naturelle pour augmenter à la fois la viabilité et la productivité des souches en minimisant le fardeau toxique des intermédiaires métaboliques et en maximisant l'élimination du produit final dans l'effluent gazeux du bioréacteur.

Note et références

- (1) www.global-bioenergies.com
- [1] Boulamanti A., Moya J.A., Production costs of the chemical industry in the EU and other countries: ammonia, methanol and light olefins, *Renew. Sust. Energy Rev.*, **2017**, 68, p. 1205.
- [2] Mahdi H.I., Muraza O., Conversion of isobutylene to octane-booster compounds after methyl tert-butyl ether phaseout: the role of heterogeneous catalysis, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2016**, 55, p. 11193.
- [3] Fujii T., Ogawa T., Fukuda H., Preparation of a cell-free, isobutene-forming system from *Rhodotorula minuta*, *Appl. Environ. Microbiol.*, **1988**, 54, p. 583.
- [4] Fukuda H. et al., Purification and characterization of cytochrome P450 from an isobutene-forming microorganism, *Rhodotorula minuta*, *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **1993**, 57, p. 1599.
- [5] Lombard J., Moreira D., Origins and early evolution of the mevalonate pathway of isoprenoid biosynthesis in the three domains of life, *Mol. Biol. Evol.*, **2011**, 28, p. 87.
- [6] Reinharz J., Science in the service of politics: the case of Chaim Weizmann during the First World War, *Eng. Hist. Rev.*, **1985**, 100, p. 572.
- [7] Weizmann C., Improvement in the bacterial fermentation of carbohydrates and in bacterial cultures for the same, Brevet UK 4845, **1915**.

- [8] Cornillot E., Soucaille P., Solvent forming genes in *Clostridia*, *Nature*, **1996**, 380, p. 489.
- [9] Gogerty D.S., Bobik T.A., Formation of isobutene from 3-hydroxy-3-methylbutyrate by diphosphomevalonate decarboxylase, *Appl. Environ. Microbiol.*, **2010**, 76, p. 8004.
- [10] Mahmud T. et al., A biosynthetic pathway to isovaleryl-CoA in myxobacteria: the involvement of the mevalonate pathway, *ChemBioChem*, **2005**, 6, p. 322.
- [11] Li Y., Luxenburger E., Müller R., An alternative isovaleryl CoA biosynthetic pathway involving a previously unknown 3-methylglutaconyl CoA decarboxylase, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2013**, 52, p. 1304.
- [12] Frias J.A., Richman J.E., Wackett L.P., C29 olefinic hydrocarbons biosynthesized by *Arthrobacter* Species, *Appl. Environ. Microbiol.*, **2009**, 75, p. 1774.
- [13] Beller H.R., Goh E.-B., Keasling J.D., Genes involved in long-chain alkene biosynthesis in *Micrococcus luteus*, *Appl. Environ. Microbiol.*, **2010**, 76, p. 1212.
- [14] Schmelz S., Naismith, J.H., Adenylate-forming enzymes, *Curr. Opin. Struct. Biol.*, **2009**, 19, p. 666.
- [15] Frias J., Microbial synthesis of fuel hydrocarbons: enzymes and metabolic pathways, Thèse de doctorat, Michigan University, **2011**.
- [16] Rude M. et al., Terminal olefin (1-alkene) biosynthesis by a novel P450 fatty acid decarboxylase from *Jeotgalicoccus* Species, *Appl. Environ. Microbiol.*, **2011**, 77, p. 1718.
- [17] Liu Y. et al., Hydrogen peroxide-independent production of α -alkenes by OleTJE P450 fatty acid decarboxylase, *Biotechnol. Biofuels*, **2014**, 7.
- [18] Belcher J. et al., Structure and biochemical properties of the alkene producing cytochrome P450 OleTJE (CYP152L1) from the *Jeotgalicoccus* sp. 8456 bacterium, *J. Biol. Chem.*, **2014**, 289, p. 6535.
- [19] Grant J.L., Hsieh C.H., Makris T.M., Decarboxylation of fatty acids to terminal alkenes by cytochrome P450 compound I, *J. Am. Chem. Soc.*, **2015**, 137, p. 4940.
- [20] Dennig A. et al., Oxidative decarboxylation of short-chain fatty acids to 1-alkenes, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2015**, 54, p. 8819.
- [21] Mukai N. et al., PAD1 and FDC1 are essential for the decarboxylation of phenylacrylic acids in *Saccharomyces cerevisiae*, *J. Biosci. Bioeng.*, **2010**, 109, p. 564.
- [22] Payne K.A.P. et al., New cofactor supports α,β -unsaturated acid decarboxylation via 1,3-dipolar cycloaddition, *Nature*, **2015**, 522, p. 497.
- [23] White M.D. et al., UbiX is a flavin prenyltransferase required for bacterial ubiquinone biosynthesis, *Nature*, **2015**, 522, p. 502.



P. Marlière

Philippe Marlière est co-fondateur et président du Conseil scientifique de Global Bioenergies* et **Mathieu Allard** y est chef de projet.



M. Allard

* Global Bioenergies, 5 rue Henri Auguste Desbruères, F-91000 Évry.
Courriels : philippe.marliere@global-bioenergies.com ; mathieu.allard@global-bioenergies.com

Athanase Peltier (1785-1845) et la thermoélectricité

Benoît Boucher

Résumé Athanase Peltier est l'un des acteurs principaux de la thermoélectricité. Cependant, l'histoire l'a quelque peu négligé, lui attribuant souvent une autre nationalité et un autre portrait ! Cet article, étoffé de quelques éléments biographiques, essaie de rappeler la vérité sur Athanase Peltier.

Mots-clés **Athanase Peltier, thermoélectricité, effet Peltier.**

Abstract **Athanase Peltier (1785-1845) and the thermoelectricity**
Athanase Peltier is a main actor of thermoelectricity. However, he has been somewhat neglected by history since another citizenship and portrait are often attributed to him! This article, supported by biographical elements, comes to bring back the truth concerning Athanase Peltier.

Keywords **Athanase Peltier, thermoelectricity, Peltier effect.**

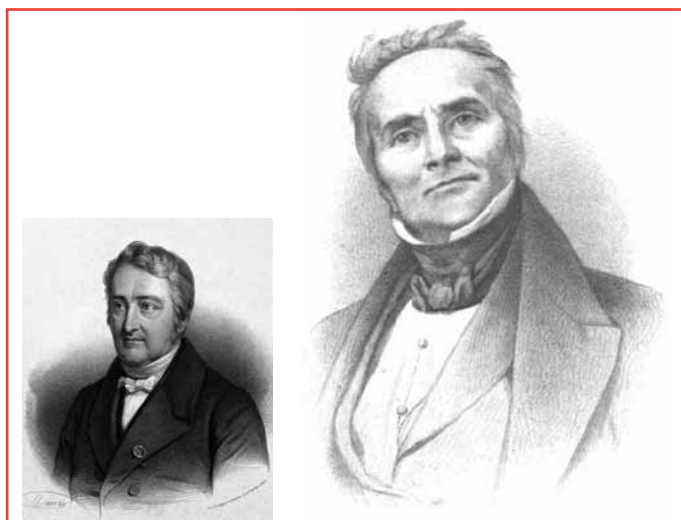


Figure 1 - Athanase Peltier (à droite) a souvent été confondu avec Joseph Pelletier (à gauche) (voir [4]).

Au fil des revues et livres traitant de la thermoélectricité, nous apprenons de Peltier, l'un des découvreurs de cette science, que c'était un horloger genevois, ou encore que son portrait est celui de gauche sur la figure 1 [1-3]. Remettons les pendules à l'heure : Athanase Peltier est en fait né en France et son portrait est celui de droite sur la figure 1. Le portrait de gauche représente un de ses contemporains : le chimiste et codécouvreur de la quinine et de la strychnine Joseph Pelletier (nous le verrons plus loin, cette confusion existait déjà à leur époque). Il semblerait qu'Athanase Peltier ait été oublié assez rapidement après sa mort. Revenons sur certains de ses éléments biographiques.

Brève biographie d'Athanase Peltier

Tout d'abord, bien que certains parlent de Jean, d'autres de Jean-Charles ou d'autres encore de Jean Charles Athanase Peltier [1-3], son acte de décès faisant foi, il s'appelait Jean Charles Athanase Peltier (figure 2). Cependant, c'est

parce qu'il signait lui-même ses travaux scientifiques *Athanase Peltier* (figure 3) [5] que nous utiliserons ce prénom dans cet article. Ferdinand Athanase Peltier, son fils, dans la biographie qu'il écrit sur son père nous fournit un large résumé sur sa vie et son travail scientifique [4]. Cependant, quelques éléments n'y apparaissent pas ; or ils permettent de mieux connaître Athanase Peltier.

Athanase Peltier naquit à Ham (généralité d'Amiens, aujourd'hui Picardie) le 22 février 1785. Fils d'un sabotier, il présenta très tôt certaines aptitudes pour les sciences. Aux côtés de Michael Faraday, Joseph Fourier ou encore James Thomson (le père de William Thomson, Lord Kelvin), pour n'en citer que quelques-uns, Athanase Peltier se place parmi les nombreux exemples de scientifiques du XIX^e siècle qui, partis de rien à leur naissance ont, par leur travail acharné, laissé leur nom à la postérité. Il apprit le fonctionnement des montres d'abord à Saint-Quentin, près de Ham, avec un certain

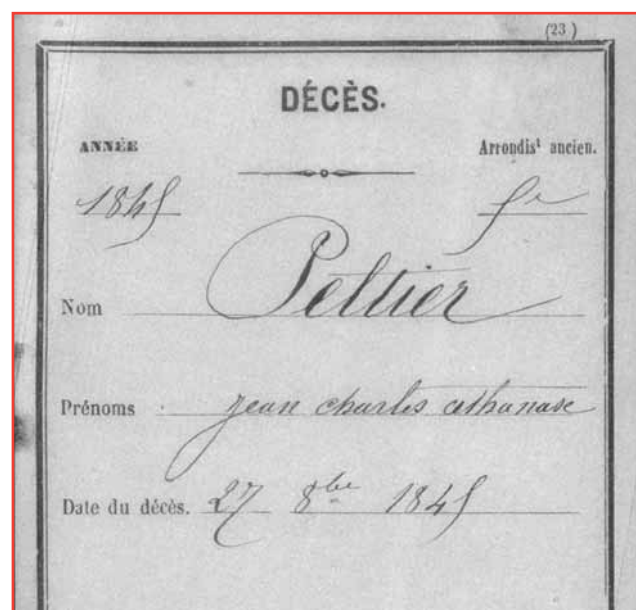


Figure 2 - Acte de décès d'Athanase Peltier (archives.paris.fr).

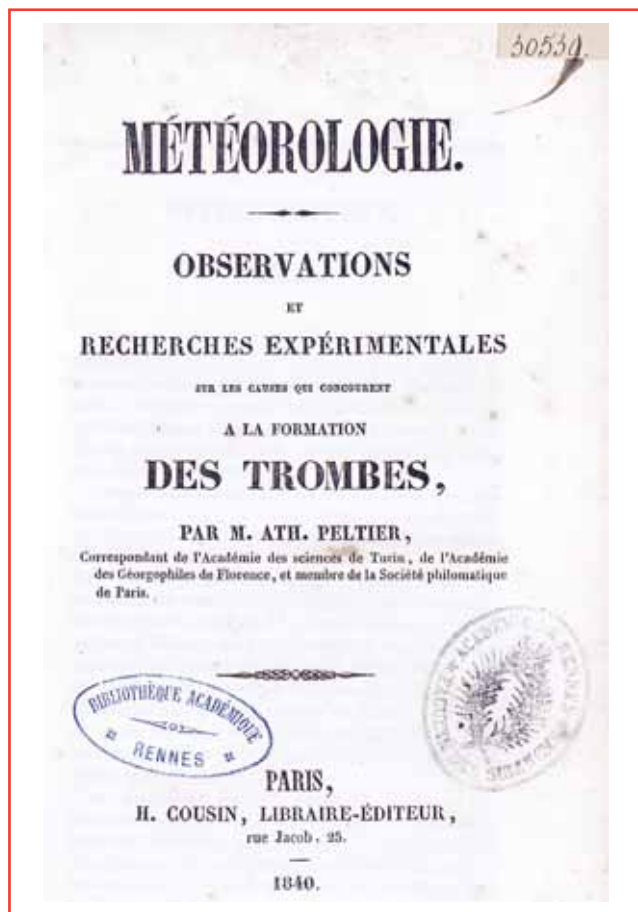


Figure 3 - *Traité de météorologie* de Peltier [5] (Service commun de la documentation de l'Université de Rennes 1).

Brown. Puis il se rendit à Paris chez Abraham-Louis Breguet, fondateur de l'entreprise de montres homonyme encore existante à l'heure actuelle (Swatch Group), pour qui il travailla avant d'établir son propre commerce en 1806. Il restera en bons termes avec la famille Breguet puisque c'est chez Louis-Antoine Breguet (fils du précédent), proche de Champceuil et Corbeil, que Peltier aura l'opportunité d'effectuer des mesures de l'électricité en altitude avec notamment des instruments, fournis par Breguet, qu'il placera sur un cerf-volant. Le 22 juillet de la même année, Athanase Peltier épousa Marie Magdeleine Dufaut à l'église Saint-Germain l'Auxerrois à Paris. Le 20 avril 1808 naquit leur unique enfant, Ferdinand Athanase. En 1815, à la mort de sa belle-mère, Athanase reçut un petit héritage qu'il décida de consacrer à l'éducation de son fils et à sa propre formation. Retiré du commerce et vivant de ses rentes, il débutait donc des études à l'âge de... 30 ans ! Il se procura quelques livres et assista à des cours publics. Ayant acquis un certain niveau scientifique, il fut amené à consulter les *Comptes Rendus de l'Académie des sciences*. Toutefois, il ne négligea pas l'éducation de son fils puisque ce dernier devint médecin.

Peltier est décédé le 27 octobre 1845 à l'âge de soixante ans. Au cimetière du Père-Lachaise à Paris, sur la partie gauche du tombeau érigé par sa veuve et son fils, figure l'inscription suivante : « *Il a laissé des empreintes de son génie dans toutes les sciences dont il s'est occupé. Il a fait faire des progrès immenses à l'électricité dont il a donné la véritable théorie et il peut être considéré comme le fondateur de la météorologie* » (figure 4, à gauche). Dans son discours lors des obsèques de Peltier, Henry Milnes-Edward, médecin

et zoologiste, en sa qualité de président de la Société philomathique, dont Peltier faisait partie, y soulignait la réussite de Peltier, mais aussi l'originalité de ses recherches et la reconnaissance par ses pairs interrompue par sa disparition : « *Si la mort n'était venue avant le temps interrompre le cours de ses travaux, si fortement empreints du cachet de l'originalité, il aurait obtenu toutes les récompenses dues à son mérite ; car bientôt ses pairs, sans doute, l'auraient choisi pour être un de ses représentants de la science qu'il cultivait avec éclat* » [3]. En effet, Peltier n'avait aucune position académique qui aurait pu permettre d'en ouvrir les portes, il n'entra donc jamais à l'Académie des sciences française. Selon Edouard Diaz [6], il aurait été inscrit aux élections de 1837, 1840 et 1841 pour la section de physique, mais se vit préférer Claude Pouillet, Jacques Babinet et Jean-Marie Duhamel. Outre la Société philomathique de Paris, il fut correspondant des Académies des sciences de Turin, Lyon, Nancy, Liège, Pesaro, et plus encore.

D'après son fils, Athanase Peltier « *était voué aux opinions conservatrices les plus décidées* » [4]. En effet, habitant au 26 rue de la Poissonnière (aujourd'hui 2^e arrondissement), il refusa la mairie du 5^e arrondissement de Paris que la préfecture de la Seine lui offrit en 1834. C'était alors la monarchie de Juillet. De surcroît, en 1843 et 1844, il rendit visite au prince Louis-Napoléon qui était incarcéré au fort de Ham entre 1840 et 1846. Voici deux extraits de lettres du prince destinées à Hortense Cornu, filleule d'Hortense de Beauharnais, datées du 22 juin 1843 : « *J'ai la visite d'un savant, M. Pelletier (sic), et nous parlons physique. C'est un homme bien distingué* », et du 30 décembre 1844 : « *M. Peltier est venu me voir le 30 juillet. Je venais de renvoyer le manuscrit. Je lui ai parlé d'un mot que je ne pouvais pas lire et il me promit de charger M. Hoefer, auteur d'une Histoire de la Chimie, de déchiffrer ce mot* » [7]. Notons la confusion entre Pelletier et Peltier dans le premier extrait. À la même époque [8], Faraday, correspondant d'Athanase Peltier, écrivait à son concitoyen George Merryweather pour l'informer que le journal *London Gazette Medical* avait fait la même erreur. Erreur qui se retrouvait citée dans l'essai de Merryweather sur le baromètre à sangsues [9].

Aujourd'hui, un lycée porte son nom à Ham. En 2015, la Société Internationale de Thermoélectricité (ITS) offre une stèle en forme de module Peltier à la ville de Ham (figure 4, à droite). En Antarctique, son nom est donné à un chenal lors de la première des deux expéditions menées par Jean-Baptiste Charcot au début du XX^e siècle. J. Rey, chargé des



Figure 4 - À gauche : tombeau d'Athanase Peltier au cimetière du Père-Lachaise (photo B. Boucher, DR). À droite : Monument dédié à Athanase Peltier à Ham (Thomas Froehlich/Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0).

mesures liées à la météorologie, note dans le journal de l'expédition : « *Nous nous félicitons, en terminant ce rapide exposé, d'avoir pu rapporter de notre voyage quelques documents originaux pour l'étude d'une branche de la météorologie, qui, née en France des immortelles recherches, trop peu connues, du physicien Peltier, avait paru, pendant quelque temps, devoir devenir une science exclusivement allemande, et qui le fût devenue en effet sans les récents travaux de MM. Mascart, Langevin, André, Brunhes, Lecadet, Marchand, Nordmann, savants qui ne nous ont ménagé ni leurs encouragements ni leurs conseils, et à qui nous adressons nos respectueux remerciements* » [10].

Les prémices de l'effet Peltier

Le travail d'Athanase Peltier se place au début du XIX^e siècle. Le physicien italien Alessandro Volta était déjà célèbre pour sa pile inventée en 1800. Le Danois Hans Christian Ørsted découvrait les effets magnétiques du courant électrique en 1820. Les savants du monde entier s'emparèrent aussitôt de cette découverte. Ainsi André-Marie Ampère en France et Michael Faraday en Angleterre seront des personnalités phares dans cette nouvelle science dite électromagnétisme. En Allemagne, Thomas Johann Seebeck publiait sa découverte de la thermoélectricité en 1823 [11]. La même année, Ørsted et Fourier construisaient la première pile thermoélectrique (voir *encadré*) [12]. Dans l'élaboration de sa loi, l'Allemand Georg Simon Ohm utilisa une pile thermoélectrique dans son montage expérimental. En 1831 en Italie, Leopoldo Nobili et Macedonio Melloni (que Peltier rencontrera plus tard à Naples) associèrent une pile thermoélectrique à un galvanomètre et obtinrent ainsi un thermomètre d'une extrême sensibilité puisqu'il était affecté par la chaleur naturelle d'une personne placée à la distance de 25 à 30 pieds (un peu moins de dix mètres) [13]. Melloni utilisa ensuite ce montage dans ses études sur la chaleur rayonnante.

Peltier avait beaucoup étudié l'électricité et souhaitait même écrire un ouvrage sur le sujet afin de mettre à jour toutes les connaissances dans le domaine (ouvrage qui donnera finalement lieu à un mémoire publié par l'Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique [14]). Comme Ohm, Nobili et Melloni avant lui, Peltier introduisit la thermoélectricité dans ses travaux, et notamment pour la mesure de la température d'ébullition de l'eau. C'est ainsi qu'il fit la découverte de l'effet que l'on appelle aujourd'hui l'*effet Peltier*. Entre temps, Fourier publiait sa *Théorie analytique de la chaleur* en 1822. L'étude de la chaleur devint un sujet de recherche à la mode dans la communauté scientifique. Elle débouchera plus tard sur la thermodynamique. Mais Peltier, plutôt que de se concentrer sur l'étude de la chaleur en elle-même, préférera étudier les phénomènes électriques liés aux météores.

Pionnier de la météorologie

Peltier est aujourd'hui connu grâce à la thermoélectricité, mais c'est en s'appuyant sur cette science qu'il s'est intéressé à la météorologie. Il fut l'un des premiers à s'intéresser et à poser les bases de cette science qui, à cette époque, n'avait pas beaucoup évolué depuis le temps d'Aristote [5]. Son approche peut être placée dans la continuité des travaux du Britannique Luke Howard et avant lui du Français Jean-Baptiste de Lamarck [15]. En rupture avec le modèle humboldtien qui met l'accent sur les mesures et observations de terrain, Peltier apporte une approche électrique des météores

[15]. Bien que les phénomènes électriques liés aux météores étaient déjà connus à l'époque, grâce par exemple à Benjamin Franklin, ils n'étaient pourtant pas encore très étudiés. La méthode employée par Peltier était nouvelle et ne peut être mieux explicitée que par son séjour au mont Faulhorn (2 680 mètres d'altitude et plus haute habitation de l'époque dans les Alpes suisses) [16]. Après plusieurs jours d'observations pendant lesquels il ne fera que confirmer ses théories sur les météores, il retournera à Paris, laissant derrière lui Auguste Bravais – qui était déjà venu l'année précédente – ainsi que Charles Martins. Ces derniers, héritiers du modèle humboldtien, étaient présents au Faulhorn pour y accumuler des mesures et des observations [15]. Athanase Peltier fit le lien entre l'électricité et les perturbations météorologiques. Jusqu'à sa mort, il fut sollicité pour ses connaissances dans ce domaine, et c'est grâce à ses travaux que la trombe dévastatrice (des dizaines de morts et plus d'une centaine de blessés) d'août 1845 survenue en Normandie à Monville (aujourd'hui Montville) et Malaunay pu être considérée comme de nature électrique et obligea les assurances à intervenir [15].

Après son expédition sur le mont Faulhorn, sa santé commença à décliner et il débuta une course contre la montre pour rédiger son *Traité de météorologie*, synthèse de tout son travail (*figure 3*) [5]. En météorologie, Peltier se servait de pinces thermoélectriques. En effet, il avait construit un thermocouple fer/cuivre de 42 mètres de long qu'il étendait dans son jardin du fond de son puits jusqu'à son laboratoire, puis du haut de la cheminée jusqu'à son laboratoire. Avec un système ainsi disposé, il n'avait qu'à mettre la jonction dans un vase dans son laboratoire puis la refroidir ou la réchauffer jusqu'à obtention de l'équilibre thermique entre les deux jonctions. Il pouvait ainsi déterminer la température d'un milieu à distance, le tout en restant dans son laboratoire. Il se servait de systèmes du même type pour connaître la température dans un lac jusqu'à une certaine profondeur, ou bien la température de l'air jusqu'à une certaine altitude. Enfin, Peltier utilisait ce thermocouple pour analyser les échanges électriques entre l'atmosphère et le sol [17].

Et la chimie dans tout ça ?

Il faudra attendre plus d'un siècle après les découvertes de Seebeck et de Peltier pour voir la thermoélectricité évoluer et concurrencer les autres formes de générateurs électriques et les réfrigérateurs conventionnels. Aujourd'hui, un matériau thermoélectrique est défini par sa figure de mérite ZT, qui est proportionnelle au carré de son coefficient de Seebeck (propriété d'un matériau à transformer une différence de flux de chaleur en électricité), à sa conductivité électrique, et est inversement proportionnelle à sa conductivité thermique. Trois périodes jalonnent l'histoire de la thermoélectricité [18]. La première voit le développement de la théorie et la compréhension du phénomène. On cherche à découvrir des matériaux simples et qui pourraient présenter une valeur ZT élevée. Selon la température à laquelle on souhaite travailler, des composés dérivés de Bi₂Te₃ pour les basses températures, PbTe pour les moyennes températures et enfin SiGe pour les hautes températures seront préférés, avec une efficacité de conversion de l'ordre de 4-6 % et des valeurs ZT autour de 1. La deuxième période, des années 1990 au début des années 2010, vise à augmenter la figure de mérite ZT à l'aide de nouvelles idées théoriques, notamment basées sur l'effet de taille des matériaux [19-20]. Ceci débouchera sur de nouveaux composés avec une forte diminution de la

La thermoélectricité

La thermoélectricité, observée dans certains matériaux, se traduit par la transformation d'une différence de flux de chaleur en un courant électrique. Ce phénomène est réversible et un courant électrique peut se transformer en une différence de flux de chaleur.

Effet Seebeck

S'il est avéré aujourd'hui que la découverte de cet effet thermoélectrique est antérieure à Thomas Johann Seebeck, grâce notamment à Franz Aepinus, ou encore Alessandro Volta et Luigi Galvani [32], c'est bien Seebeck, correspondant de l'Académie des sciences de Paris, qui le premier a diffusé cette découverte à l'Académie des sciences de Prusse en 1823 devant de nombreux auditeurs dont Hans Christian Ørsted. Suite à la découverte d'Ørsted du phénomène électromagnétique, Seebeck se lança dans l'étude de l'électricité et fit la découverte suivante : deux demi-cercles d'antimoine (A) et de cuivre (K) sont connectés en *a* et *b* ; en chauffant (« warm ») la jonction *b* et/ou en refroidissant (« kalt ») la jonction *a*, l'aiguille d'une boussole placée à proximité du montage se dirigera alors vers l'est (O) (*figure a*). À l'inverse, en chauffant la jonction *a* et/ou en refroidissant la jonction *b*, l'aiguille se dirigera vers l'ouest (W) [11]. C'est ce montage que l'on appelle un thermocouple. Notons que déjà Seebeck pensait appliquer sa découverte pour juger de la pureté d'un alliage en comparant l'effet Seebeck de l'alliage considéré pur avec celui des alliages obtenus dans différentes usines. De plus, Seebeck pensait à tort, y voir la cause du champ magnétique terrestre puisqu'en effet, le globe terrestre est plus chaud à l'équateur et plus froid aux pôles. Cependant, Seebeck ne voyait pas la création d'une force électromagnétique, mais uniquement d'un champ magnétique. C'est alors Ørsted qui fit le pas suivant en France, de concert avec Joseph Fourier. En effet, Ørsted contribua à propager la découverte de Seebeck lors de son voyage à Paris. Ayant mieux compris ce phénomène que Seebeck, Ørsted fut le premier à suggérer le mot *thermoélectrique* [33]. Enfin, dans une série d'expériences, toujours en compagnie de Fourier, ils établirent ensemble la première pile thermoélectrique et conclurent ce qui se voulait déjà une des limites de la thermoélectricité : nous parlons ici d'un faible rendement des piles thermoélectriques comparées aux piles galvaniques (pile de Volta) [12].

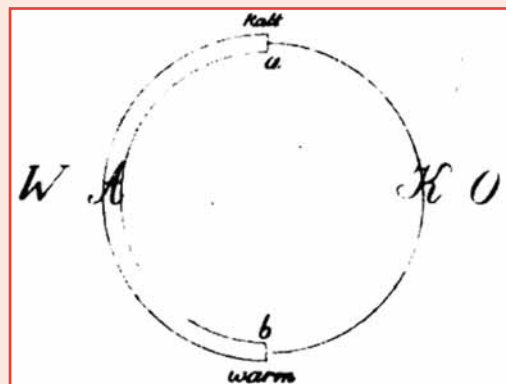


Figure a - Thermocouple de Seebeck [11].

Effet Peltier

Athanase Peltier, déjà très versé dans l'électricité, s'est intéressé à la thermoélectricité dans le cadre de son travail sur les météores. Le but visé était de connaître, lors d'un processus d'évaporation de l'eau, la température de l'eau restante dans le récipient. Pour ce faire, l'utilisation de l'hygromètre construit par l'Écossais John Leslie perdait son intérêt à cause de sa lenteur et son manque de sensibilité. Peltier construisit un nouvel appareil à l'aide d'une pile thermoélectrique. Pour reprendre les propos de Peltier, la qualité de ses hygromètres, contrairement à celui de Leslie, « *indiquent un centième de degré centigrade et l'indiquent promptement* » [5]. L'emploi de mauvais métaux tel le bismuth ou l'antimoine accroît la sensibilité de ces appareils. Dans l'élaboration de ces instruments, il analysa l'effet calorifique du courant (que l'on n'appelait pas encore effet Joule) dans le bismuth ou l'antimoine. C'est ainsi qu'il remarqua que pour ces deux métaux, la température à l'extrémité de la barre de métal était inférieure à la température ambiante au lieu d'être supérieure en raison de l'effet calorifique du courant. Pour confirmer cette découverte, il fabriqua une pince thermoélectrique capable de quantifier instantanément la chaleur émise à l'extrémité de la barre [34].

C'était en effet un phénomène nouveau que l'on appelle aujourd'hui l'effet Peltier. En prenant le même montage que sur la *figure a* et en faisant cette fois-ci passer un courant électrique dans le circuit fermé, le passage d'une densité des charges mobiles à une autre (d'un métal à un autre) s'accompagne alors d'un flux de chaleur avec le milieu extérieur. Ce phénomène rencontra de nombreuses contestations, tout comme celui qu'Antoine Becquerel crut avoir découvert avant lui (lire ci-après). Et il faudra attendre près de cinq ans pour que l'Allemand Emil Lenz confirme la découverte de Peltier en refroidissant de l'eau et la transformant en glace en 1838 [35]. Aujourd'hui, on peut facilement acheter des modules Peltier (*figure b*), qui sont des petits carrés de quelques millimètres d'épaisseur, composés de très nombreux thermocouples en série. En y faisant passer un faible courant, on crée une différence de température entre les deux faces carrées. À l'inverse, en chauffant un côté et/ou en refroidissant un autre, on crée un petit courant électrique continu. Nombreuses sont les vidéos sur Internet montrant comment recharger un téléphone portable ou créer un petit moteur à l'aide d'un module Peltier.

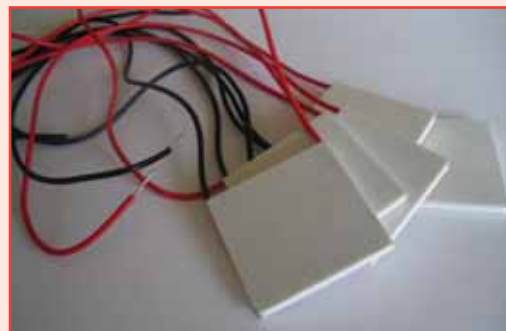


Figure b - Modules Peltier (photo B. Boucher, DR).

Effet Thomson

En 1823, rapidement après la découverte de la thermoélectricité par l'Allemand Seebeck, James Cumming en Angleterre avait observé qu'augmenter la différence de température entre les jonctions d'un thermocouple pouvait, dans certains cas, conduire à une diminution puis une inversion du courant. Cela est observé par exemple pour un thermocouple composé de fer et de cuivre. Quelques années après la découverte de l'effet Peltier et afin d'expliquer les observations faites par Cumming, William Thomson (Lord Kelvin) démontrera que de l'effet Seebeck résultent deux effets : l'effet Peltier (aux jonctions d'un thermocouple traversé par un courant), et un effet supplémentaire (le long des branches du thermocouple traversé par un courant et soumis à un gradient de température) : l'effet Thomson. Il s'efforça lui-même de trouver une expérience pour mettre ce second effet en évidence [36].

Ainsi, il construisit un montage qui permet de faire passer un courant électrique à travers un fil métallique échauffé en son milieu (un fil de cuivre dans de l'eau bouillante par exemple). La température du fil sera plus (pour le cuivre) ou moins importante dans la première moitié du fil que dans la seconde, et cela dépendra du métal.

Il est à noter que ce nouvel effet Thomson avait été touché du bout des doigts par Becquerel. Celui-ci pensait avoir découvert un effet thermoélectrique en utilisant un unique fil métallique qu'il contournait en spirale ou y faisait un nœud. Il fut démontré plus tard que cet effet était dû à une différence d'homogénéité du fil métallique produit par la torsion ou l'écrasement du fil.

conductivité thermique et donc l'augmentation de ZT autour de 1,3-1,7 et une efficacité de conversion de l'ordre de 11-15 %. C'est l'heure des nanomatériaux. Enfin, la période actuelle fait la part belle à une chimie de synthèse élaborée. Les expérimentateurs cherchent à créer un désordre de l'échelle atomique à l'échelle mésoscopique (nanosynthèse endotaxiale, joints de grain, interfaces), le tout débouchant sur une approche dite *panoscopique* [18]. La chimie théorique tente aussi d'apporter sa pierre à l'édifice. Une analyse précise des propriétés électroniques et vibrationnelles de composés thermoélectriques permet d'obtenir des informations dont on peut tirer profit pour améliorer les propriétés de conceptions électrique et thermique et ainsi augmenter les performances thermoélectriques [21]. Les progrès récents en informatique offrent la possibilité de calculs massifs permettant le criblage virtuel d'un très grand nombre de composés potentiellement intéressants. Des composés avec des valeurs ZT de l'ordre de 1,8-2,2 et des efficacités de conversion de 15-20 % ont d'ores et déjà été rapportés, laissant entrevoir des possibilités d'application à grande échelle dans un avenir relativement proche.

Applications actuelles

En thermoélectricité, Peltier laisse son nom, comme nous l'avons vu, avec l'effet Peltier et le coefficient Peltier. La thermoélectricité est une solution pour récupérer la perte d'énergie dégagée sous forme de chaleur. Par exemple, on estime qu'environ deux tiers de l'énergie sont perdus sous forme de chaleur dans une voiture [22] ou dans une centrale nucléaire [23], et que près de la moitié de la production d'énergie mondiale est perdue sous forme de chaleur [24]. La thermoélectricité pourrait permettre de réduire fortement ces pertes de chaleur, mais aussi de remplacer nos réfrigérateurs et de diminuer les gaz à effet de serre. Le lecteur trouvera facilement des informations complémentaires sur la thermoélectricité en lisant la référence [25] et pour une approche thermodynamique du sujet, la référence [26] ou les cours d'Antoine Georges au Collège de France [27].

Les refroidisseurs thermoélectriques sont utilisés pour refroidir certains composants informatiques comme dans le MacBook Air d'Apple par exemple. Notons également comme autres applications, les glaciers et les caves à vin [28]. Les applications commerciales restent cependant des niches.

Les générateurs thermoélectriques ne sont pas en reste. Leur utilisation la plus célèbre est la génération d'électricité dans les sondes spatiales se servant de la désintégration de l'oxyde de plutonium (PuO_2) comme source de chaleur et du froid interstellaire comme source de refroidissement [29]. Cependant, le plutonium étant une ressource rare et onéreuse [30], ce type d'alimentation est parfois remplacé par le photovoltaïque, et cela même pour les sondes spatiales dirigées vers l'extérieur du système solaire à l'instar de la sonde Juno [31]. Aujourd'hui, la marque d'horlogerie japonaise Seiko commercialise une montre utilisant la chaleur du corps humain (opposée à la température ambiante, plus froide) comme source d'alimentation électrique. La boucle est ainsi bouclée puisque c'est dans une horlogerie que Peltier débute sa carrière.

L'auteur remercie Jean-François Halet, directeur de recherche au CNRS, Régis Gautier, professeur à l'École Nationale Supérieure de Chimie de Rennes, et Danielle Fauque, historienne des sciences, Université Paris-Sud, pour leur généreuse contribution, ainsi que la Région Bretagne et la société Max-Planck pour leur soutien financier.

Références

- [1] Linder A., *La thermoélectricité*, Presses Universitaires de France, **1970**, p. 5.
- [2] Zhang X., Zhao L.-D., Thermoelectric materials: energy conversion between heat and electricity, *J. Materiomics*, **2015**, 1(2), p. 92.
- [3] Maciá-Barber E., *Thermoelectric Materials Advances and Applications*, CRC Press, Boca Raton, **2015**, p. 8.
- [4] Peltier F.-A., *Notice sur la vie et les travaux scientifiques de J.-C.-A. Peltier*, E. Baudouin, Paris, **1847**.
- [5] Peltier A., *Météorologie*, H. Cousin, Paris, **1844**.
- [6] Diaz E., Les méconnus ou ignorés de la science – J. C. Peltier, *La Science française : revue populaire illustrée*, **1898**, Année 8, Numéro 2, p. 275.
- [7] *La Revue de Paris*, **1937**, Année 44, Numéro 13, p. 33.
- [8] James F.A.J.L., *The Correspondence of Michael Faraday*, Vol. 4 1849-1855, F.A.J.L. James, Londres, **1999**, p. 273.
- [9] Merryweather G., *An Essay Explanatory of the Tempest Prognosticator in the Building of the Great Exhibition for the Works of Industry of All Nations*, J. Churchill, Londres, **1851**, p. 48.
- [10] Joulin L., *Expédition Antarctique française (1903-1905)*, Masson et Cie, Paris, **1908**, p. 405.
- [11] Seebeck T.J., Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz, *Abh. Akad. Wiss. Berlin* 1822-1823, **1825**, p. 265.
- [12] Ørsted H.C., Fourier J., Sur quelques nouvelles expériences thermoélectriques faites par M. le baron Fourier et M. Ørsted, *Ann. Chim. Phys.*, **1823**, 22, p. 375.
- [13] Nobili L., Melloni M., Recherches sur plusieurs Phénomènes calorifiques entreprises au moyen du thermo-multiplicateur, *Ann. Chim. Phys.*, **1831**, 48, p. 198.
- [14] Peltier A., Essai sur la coordination des causes qui précèdent, produisent et accompagnent les phénomènes électriques, *Mémoires couronnés et mémoires des savants étrangers*, **1845-1846**, 19.
- [15] Locher F., Dans la brume électrique. La physique des météores sous la monarchie de Juillet, *Romantisme*, **2015**, 3(169), p. 97.
- [16] Martins C., *Du Spitzberg au Sahara*, J.-B. Baillière et fils, Paris, **1866**, p. 273.
- [17] Loos P.W., *Archives des découvertes et des inventions nouvelles*, Treuttel et Würtz, Paris, **1835**, p. 148.
- [18] Zhao L.D., David V.P., Kanatzidis M.G., The panoscopic approach to high performance thermoelectrics, *Energy Environ. Sci.*, **2014**, 7(1), p. 251.
- [19] Hicks L.D., Dresselhaus M.S., Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit, *Phys. Rev. B*, **1993**, 47(19), p. 12727.
- [20] Slack G.A., *CRC Handbook of Thermoelectrics*, M. Rowe, CRC, Boca Raton, **1995**, p. 407.
- [21] Zeier W.G., Zevalink A., Gibbs Z.M., Hautier G., Kanatzidis M.G., Snyder G.J., Thinking like a chemist: intuition in thermoelectric materials, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2016**, 55(24), p. 2.
- [22] Minet P., Un matériau thermoélectrique plus performant, *La Recherche*, **2012**, 470, p. 30.
- [23] Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Le bilan énergétique de la France, **2015**, p. 52.
- [24] www.llnl.gov (rubrique « Missions », « Energy », « Energy Flow Charts »).
- [25] Hébert S., La recherche de nouveaux matériaux thermoélectriques, *Reflète de la physique*, **2014**, 41, p. 18.
- [26] Diu B., Guthmann C., Lederer D., Roulet B., *Thermodynamique*, Hermann, Paris, **2007**, p. 508.
- [27] www.college-de-france.fr (rubrique « Enseignement », « Physique et Chimie »).
- [28] Bell L.E., Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems, *Science*, **2008**, 321, p. 1457.
- [29] LaLonde A.D., Pei Y., Wang H., Snyder G.J., Lead telluride alloy thermoelectrics, *Materials Today*, **2011**, 14(11), p. 526.
- [30] Griggs M.B., Nasa can make 3 more nuclear batteries, and that's it, **2015** (www.popsci.com).
- [31] Stirone S., How Juno broke the distance record for solar powered spacecraft, **2016** (www.popsci.com).
- [32] Goupil C., Quedane H., Zbrocki K., Seifert W., Hinsche N.F., Müller E., *Continuum Theory and Modeling of Thermoelectric Elements*, C. Goupil (ed.), Wiley-VCH Verlag, **2016**, p. 1.
- [33] Ørsted H.C., Nouvelles expériences de M. Seebeck sur les actions électromagnétiques, *Ann. Chim. Phys.*, **1823**, 22, p. 199.
- [34] Peltier A., Nouvelles expériences sur la calorité des courants électriques, *Ann. Chim. Phys.*, **1834**, 56, p. 371.
- [35] Lenz E., Einige Versuche im Gebiete des Galvanismus, *Ann. Phys.*, **1839**, 120(6), p. 342.
- [36] Verdet E., *Théorie mécanique de la chaleur*. Tome 8, G. Masson, Paris, **1872**, p. 193.



Benoît Boucher

est doctorant à l'École Nationale Supérieure de Chimie de Rennes* et à l'Institut Max-Planck de chimie physique du solide de Dresde.

* Institut des Sciences chimiques de Rennes, UMR 6226 CNRS, Université de Rennes 1, ENSC de Rennes, 11 allée de Beaulieu, F-35708 Rennes Cedex 7.
Courriel : benoit.boucher@ensc-rennes.fr

Recherche et développement

Du plastique produit par des bactéries marines bretonnes



Granules de PHA bactérien.
© ENSCR.

Depuis plusieurs années, les travaux de recherche de Jean-Luc Audic, membre de l'équipe CIP (« Chimie et ingénierie des procédés ») à l'École Nationale Supérieure de Chimie de Rennes, portent sur l'élaboration de nouveaux matériaux biosourcés et/ou biodégradables à partir de coproduits issus de l'industrie agroalimentaire. Après avoir mis au point un film plastique à partir de protéine du lait, puis élaboré une vaisselle végétale 100 % biodégradable à partir de feuille de Sal (arbre indien), tous deux brevetés, il s'intéresse désormais aux plastiques bactériens et participe au programme de recherche BluEcoPHA soutenu par l'Ademe, qui associe chercheurs et industriels (Europlastique, Triballat-Noyal, Séché Environnement, Elixance).

Plus précisément, il étudie la production de plastique par fermentation bactérienne. Des bactéries marines provenant des côtes bretonnes présentant cette aptitude ont été mises en culture dans un bioréacteur dans un substrat composé de coproduits issus de l'activité agricole ou de l'industrie agroalimentaire. Après l'obtention d'une croissance des micro-organismes satisfaisante, les bactéries sont soumises à un stress alimentaire. Privées de certains nutriments, elles se mettent alors à faire des réserves énergétiques en produisant des granules de PHA (polyhydroxyalcanoate). Une fois extrait des micro-organismes, ce PHA, biopolymère de la famille des polyesters, est rendu disponible sous forme de granules.

Livrés à des entreprises spécialisées dans la transformation des matières plastiques, ces granules permettront de fabriquer les nouveaux matériaux biodégradables de demain. Compte tenu de ses bonnes propriétés barrière aux gaz, le PHA constitue justement un plastique d'intérêt dans la fabrication

de matériaux d'emballage utiles à la préservation des aliments.

La mise en œuvre du procédé de fermentation bactérienne et de production du plastique à l'échelle semi-industrielle est en cours et l'étape de pré-industrialisation du projet BluEcoPHA est prévue pour courant 2017.

• Source : ENSCR, 05/01/2017.

Une IRM 10 000 fois plus sensible

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est l'un des plus puissants outils pour le diagnostic clinique, mais sa performance dépend de celle des agents de contraste. Des chercheurs du Laboratoire des biomolécules (CNRS/Sorbonne universités/ENS), de l'École polytechnique fédérale de Lausanne et de l'Institut des sciences analytiques (CNRS/Université de Lyon 1/ENS de Lyon) ont préparé une nouvelle génération d'agents de contraste, en augmentant leur sensibilité par un facteur de l'ordre de 10 000. Autre atout, ces agents présentent une très longue durée de vie et pourront donc être délivrés à distance. L'hyperpolarisation consiste à préparer des solutions de molécules dans un état fortement magnétisé, ce qui permet d'augmenter la sensibilité de la détection. Grâce à cette technique, la détection en temps réel de tumeurs *in vivo* par imagerie est devenue une réalité. Le problème majeur de l'hyperpolarisation est que les agents de contraste utilisés ont des propriétés magnétiques de courtes durées de vie, d'une minute environ. Ils doivent donc impérativement être produits à quelques mètres de l'IRM et utilisés immédiatement. Aujourd'hui, seuls quelques centres d'imagerie dans le monde sont équipés pour réaliser l'hyperpolarisation.

La nouvelle approche mise au point a permis de préparer ces agents de contraste de façon à allonger la durée de vie des états magnétiques hyperpolarisés de la minute à la dizaine d'heures. Le principe, d'une grande simplicité, réside dans une combinaison originale de nouvelles méthodes de transfert de polarisation et de formulations d'échantillons innovantes.

Cette avancée est la première étape vers une démocratisation de l'hyperpolarisation pour tous en élargissant le nombre de centres susceptibles de profiter de cette technique.

• Source : Institut de Chimie/CNRS, 17/01/2017.
Réf. : Ji X., Bornet A., Vuichoud B., Milani J., Gajan D., Rossini A.J., Emsley L., Bodenhausen G., Jannin S., Transportable hyperpolarized metabolites, *Nature Comm.*, 2017, 8, doi : 10.1038/ncomms13975.

Bourses L'Oréal-UNESCO Pour les Femmes et la Science 2017

Appel à candidatures



En partenariat avec l'UNESCO et l'Académie des sciences, la Fondation L'Oréal est heureuse de vous annoncer l'ouverture

de l'appel à candidatures de l'édition 2017 des Bourses France L'Oréal-UNESCO Pour les Femmes et la Science.

En 2017, la Fondation L'Oréal remettra **30 bourses** :

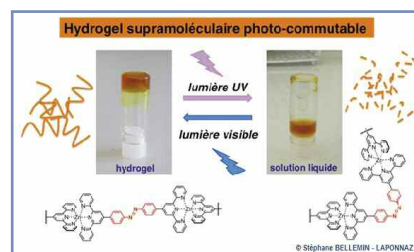
- d'un montant de **15 000 € chacune à des doctorantes**,
- d'un montant de **20 000 € chacune à des post-doctorantes**.

Créé en 2007, ce programme a pour objet de révéler et récompenser de jeunes chercheuses talentueuses. Au total, 170 jeunes femmes ont bénéficié d'une Bourse France L'Oréal-UNESCO Pour les Femmes et la Science.

Date limite de candidature : 27 mars 2017.

• Pour en savoir plus : www.fwis.fr/fr/fellowships/217394880

Des hydrogels photocommutable pour des applications biomédicales



Capables de retenir de grandes quantités d'eau du fait de leurs réseaux tridimensionnels, doux, flexibles, biocompatibles, les hydrogels présentent une forte ressemblance avec les tissus vivants. On imagine donc bien leur importance pour le domaine biomédical : lentilles de contact, produits d'hygiène, pansements, ingénierie tissulaire, vectorisation de médicaments...

Les chercheurs de l'Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg et de l'Institut de sciences et d'ingénierie supramoléculaires (CNRS/Univ. Strasbourg) ont franchi une nouvelle étape dans l'élaboration de ces gels hydrophiles. Ils ont d'abord synthétisé des polymères à base de métaux, formant des hydrogels stables à

Chemists know...

La chanson de *La Reine des Neiges* parodiée par des chimistes ? C'est ce que nous proposons Gianmarc Grazioli, guitariste-chanteur-chimiste, et ses collègues du Département de chimie de l'Université de Californie à Irvine à travers le clip « Chemists know ». La vidéo a déjà été vue plus de 335 000 fois sur YouTube. À quand des hits des labos de chimie français... ?

• https://www.youtube.com/watch?v=iM_l6rtlgno

faible concentration massique en matériau et absorbant des quantités d'eau inégales. À l'instar des tissus vivants, ces hydrogels présentent des propriétés d'autocicatrisation ou d'autoréparation car ils sont constitués de macromolécules en équilibre dynamique. Plus important encore, ils sont capables de se transformer en fonction du type de lumière : la lumière ultraviolette les rend liquides, la lumière visible rétablit leurs propriétés gélifiantes. Les scientifiques viennent donc de démontrer qu'un gel composé majoritairement d'eau pouvait être photocommutable et adaptatif !

• Source : CNRS, 03/01/2017.

Réf. : Borré E., Bellemin-Laponnaz S., Mauro M., Amphiphilic metallopolymer for photoswitchable supramolecular hydrogels, *Chem. Eur. J.*, 2016, 22, p. 18718.

Le CNRS et Solvay renforcent leur partenariat scientifique

Le CNRS et Solvay, le groupe international de chimie et de matériaux avancés, ont signé en décembre dernier un nouvel accord-cadre de collaboration, afin de relever les défis de la chimie de demain. D'une durée de cinq ans, cet accord vient prolonger un partenariat initié il y a plus de 40 ans et construit autour d'une cinquantaine de laboratoires du CNRS. Jusqu'à ce jour, les recherches menées conjointement ont par exemple mené au développement de nouveaux agents tensioactifs, de polymères et de revêtements destinés aux applications d'hygiène personnelle, de produits agrochimiques et de récupération assistée du pétrole. Ces travaux ont également abouti à la mise au point de nouveaux processus chimiques et physico-chimiques, plus sûrs, plus respectueux de l'environnement et aux rendements bien meilleurs.

Depuis 2006, le partenariat a donné lieu à plus de 110 brevets, 450 contrats et près de 280 publications scientifiques. Quatre structures de recherche ont été créées dans le monde : deux en France (le Laboratoire du futur à Bordeaux et le Laboratoire polymères et matériaux avancés à Lyon), une en

Chine (Eco-efficient products and processes lab à Shanghai), et une aux États-Unis (Complex assemblies of soft matter à Bristol).

Ce nouveau contrat vient réaffirmer les liens indéfectibles, au cœur des stratégies du CNRS et de Solvay, entre la science, la recherche et l'innovation. Il permettra aux deux partenaires de partager moyens humains et financiers afin de développer des recherches innovantes dans de nombreux domaines, comme la catalyse, les tensioactifs, la polymérisation ou la microfluidique.

• Source : CNRS, 19/01/2017.

Enseignement et formation

Ma thèse en 180 secondes, édition 2017



Le concours « Ma thèse en 180 secondes » permet à des doctorants de présenter leur sujet de recherche, en français et en

termes simples, à un auditoire profane et diversifié. Chaque étudiant(e) doit faire, en trois minutes, un exposé clair, concis et néanmoins convaincant sur son projet de recherche. Le tout avec l'appui d'une seule diapositive.

Ce concours s'inspire de « Three minute thesis » (3MT®), conçu à l'Université du Queensland en Australie. Le concept a été repris en 2012 au Québec par l'Association francophone pour le savoir (Acfas) qui a souhaité l'étendre à l'ensemble des pays francophones.

Chaque année, un appel est lancé à l'ensemble des regroupements universitaires de France, afin que chacun organise un concours interne régional. Le lauréat ainsi sélectionné représentera son établissement à la finale nationale qui se tiendra en juin 2017. La finale internationale aura lieu à l'automne 2017 à Liège (Belgique).

Pour participer à l'édition 2017, les étudiants doivent s'adresser sans tarder aux coordinateurs du concours dans leur regroupement d'université (liste disponible sur le site*).

* mt180.fr

Faire sa thèse avec l'Ademe

Appel à candidatures

Chaque année, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie sélectionne 50 nouveaux doctorants, sur une base moyenne de 200 candidats. Depuis 1992, plus de 1 500 étudiants ont ainsi bénéficié de ce programme de

formation. Le candidat retenu sera salarié de l'Ademe à temps complet et préparera sa thèse dans les locaux du(des) laboratoire(s) d'accueil.

L'édition 2017 porte sur les thématiques suivantes : villes et territoires durables ; économie circulaire ; énergie durable ; bioéconomie ; pollutions et impact ; énergie, environnement et société.

**Date limite de dépôt
des candidatures : 3 avril 2017.**

• www.thesenet.ademe.fr

BTS Métiers de la chimie

Dans le cadre de la mise en place de cette nouvelle formation, l'association RASF* se propose de collecter et diffuser les offres de stages que les entreprises de la chimie pourraient offrir aux étudiants en BTS Métiers de la chimie. Les domaines recherchés sont l'analyse, la synthèse et la formulation.

* Réseau Analyse, Synthèse et Formulation, association de professionnels du BTS Métiers de la chimie, www.rasf.fr
Contact : stages@rasf.fr

Industrie

Les lauréats 2016
du « Challenge Air Liquide
des molécules essentielles »

Les molécules essentielles, telles que O₂, N₂, H₂ et CO₂, représentent le territoire scientifique d'Air Liquide. Dans sa volonté de s'appuyer sur la science pour accélérer l'innovation, le groupe a lancé un concours annuel baptisé « Challenge Air Liquide des molécules essentielles ». Parmi les 130 propositions issues d'équipes universitaires, de départements de R & D et de start-up provenant de vingt-cinq pays, les lauréats distingués sont :

- **Jean-Michel Savéant**, **Marc Robert** et **Cyrille Costentin**, professeurs à l'Université Paris-Diderot/CNRS (France) : « CO₂, rends ton O₂ », ou comment produire de l'oxygène et du monoxyde de carbone à partir du CO₂ grâce à des procédés respectueux de l'environnement ;

- **Kevin Sivula**, professeur à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse) : « H₂ solaire en bouteille », ou comment produire de l'hydrogène à partir de l'eau en utilisant l'énergie du Soleil ;

- **Susumu Kitagawa**, professeur à l'Université de Kyoto, et **Ryotaro Matsuda**, professeur à l'Université de Nagoya (Japon) : « Petites molécules dans ma poche », ou comment identifier des matériaux se comportant comme des éponges, permettant de



stocker des gaz à haute densité et de les restituer en toute sécurité.

Le prix décerné aux lauréats pour chaque thème est assorti d'une dotation de 50 000 € en récompense de projets originaux pouvant offrir des solutions innovantes en faveur de la transition énergétique et environnementale. Le groupe financera également à hauteur de 1,5 million d'euros des projets de collaboration avec ces lauréats afin de développer leurs propositions scientifiques et de les transformer en technologies innovantes adaptées au marché.

• Source : Air Liquide, 28/11/2016.

Accessibilité accrue à l'hydrogène : conséquences pour la santé publique urbaine par la diminution de la pollution atmosphérique

L'utilisation de l'hydrogène [1] n'était possible qu'avec de grandes précautions auxquelles nous nous étions soumis comme nos prédécesseurs (Cueilleron, Hackspill, Moissan). Il devient possible aujourd'hui d'avoir accès à de l'hydrogène de façon banale ! Cette possibilité est d'autant plus opportune que la pollution atmosphérique à Paris a fait décréter

aux autorités en décembre dernier une circulation alternée des véhicules utilisant des hydrocarbures.

Retour d'expérience : une course en taxi Hyundai IX 35 à Paris (photo 1) nous a fait découvrir l'utilisation de l'hydrogène au lieu d'hydrocarbures. Le réservoir de couleur gris clair contient de l'hydrogène à une pression de 750 bars (photo 2). Il est logé dans le coffre arrière et il reste une place non négligeable pour des bagages. L'autonomie est de l'ordre de 450 km. La motorisation électrique nous a semblé souple et peu bruyante.

L'hydrogène au contact de l'anode de la pile à combustible crée des électrons et des protons qui, séparés, produisent l'électricité utilisée par le moteur. De l'autre côté de la membrane de la pile à combustible, l'oxygène de l'air réagit avec les protons en donnant de la vapeur d'eau. Le véhicule rejette ni CO₂, ni particule. Le « plein » du réservoir est effectué au moyen de tuyau et d'un pistolet (photos 3 et 4). Le temps de remplissage est de l'ordre de 3-5 min.

L'hydrogène est fourni par la société Air Liquide. Il provient de l'électrolyse de l'eau, d'hydrocarbures et du reforming de biogaz [2-3] produit par transformation biotechnologique de résidus. Le CO₂ est valorisé autant que se peut.

Air Liquide a réussi de nombreuses innovations (accessibilité de l'oxygène...) qui améliorent notre vie quotidienne, en particulier dans le domaine de la santé. C'est dans ce domaine qu'il intervient à nouveau indirectement, en diminuant la pollution atmosphérique due aux hydrocarbures et à leurs additifs pour les moteurs deux temps. Air Liquide a réussi en particulier à rendre non dangereux l'approvisionnement en hydrogène par des non-spécialistes des gaz industriels. Rappelons que d'après l'OMS, la pollution de l'air a divers effets négatifs sur la santé tels que l'accroissement des maladies respiratoires, cardiovasculaires...

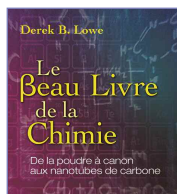
Philippe Pichat

L'auteur remercie Denis Déliot, responsable Sécurité et Sûreté chez Air Liquide (siège social) qu'il a vu fortuitement faire le plein de sa voiture utilisée quotidiennement, et le Dr Jean-Louis Dianoux, médecin en région parisienne.

- [1] Cueilleron J., Pichat P., Action de l'hydrogène sur le bore, *Bull. Soc. Chim. Fr.*, **1964**, p. 2547.
- [2] Pichat P., Déchets et biotechnologies, *L'Act. Chim.*, **2013**, 375-376, p. 65.
- [3] Rapports d'expertises sur la production de biogaz.

Et n'oubliez pas les « Actualités web » alimentées régulièrement sur www.lactualitechimique.org

Livres



Le beau livre de la chimie De la poudre à canon aux nanotubes de carbone

D.B. Lowe
529 p., 29 €
Dunod, 2016

Mes chers amis et amies de la Rédaction de *L'Actualité Chimique* m'ont fait un magnifique cadeau de Noël en me proposant de procéder à la recension de ce très beau (ceci n'est pas une faute de frappe) livre format 180 x 210 mm, qui est bien loin d'être « bêta » : c'est en effet l'alpha et l'omega de l'histoire de la chimie qu'il nous propose en 250 dates clés, couvrant de - 5 000 siècles avant J.-C. à nos jours, plus un brin d'anticipation sur la transition énergétique jusqu'à 2030. Je précise que la résolution temporelle s'accroît fortement entre le XIX^e siècle et nos jours, avec l'avènement de la science chimique. Pour chaque date une découverte, un fait marquant pour l'humanité issu de la chimie, et deux pages : un texte clair et concis à gauche, une image frappante à droite. La table des matières initiale renvoie aux dates et aux pages, la section « notes et bibliographie » fournit pour chacun des sujets des références ou liens Internet à qui voudrait approfondir, et *in fine* un index permet de retrouver rapidement noms, substances et mots-clés.

Le choix fait par l'auteur de ces 250 bornes milliaires est très éclectique : il célèbre aussi bien l'invention de l'Erlenmeyer, de l'extracteur Dean-Stark et du spectromètre de masse que la découverte du mécanisme de la métathèse, ou celle des quasi-cristaux

(les connaisseurs français apprécieront tout particulièrement cette illustration là) ; il couvre tous les champs de la matière, de l'inerte au vivant, de la métallurgie aux biomolécules, toutes les applications qui ont changé notre vie quotidienne, des polymères à la santé, en passant par l'énergie et l'agrochimie. Il montre enfin qu'il n'y a pas de chimies nationales, mais une œuvre collective de l'humanité, riche de sa diversité culturelle, mais reliée par la vérité scientifique. S'il donne à voir les meilleures, il ne masque en rien les pires productions de l'apprenti sorcier : poisons et toxiques, explosifs, guerre chimique, effet de serre additionnel... Cet amour de la chimie n'est pas aveugle, cet enthousiasme invite à la lucidité, comme il se doit en science si elle n'est pas ruine de l'âme...

L'auteur amoureux qui nous livre ainsi, non pas un autre dictionnaire, mais plutôt un « handbook » à sa façon, travaille dans l'industrie pharmaceutique et tient depuis 2002 un blog bien connu aux États-Unis (« In the pipeline »). Son traducteur, Paul Depovere, professeur émérite à l'UCL Louvain et à l'Université Laval, a lui aussi fait un très beau travail, quoique les chimistes vraiment francophones que nous sommes à la SCF tiqueront sans doute à certains termes : « réactionnel », « réactant », quand nous disons « réactif » pour les deux concepts. Mais peut-être est-ce là un sage parti pris de précision (je n'ai pas vérifié si l'IUPAC a déjà entériné). Quoiqu'il en soit, version américaine et version française ont été publiées toutes deux en 2016, et donc chapeau pour le court délai.

Réservez d'urgence 36 mm dans votre bibliothèque, même si elle est sans doute aussi « surbookée » que la mienne, pour ce plaisir gourmand, et offrez-le aussi sans modération à vos proches de 7 à 77 ans (voire plus), qui en tireront enfin une autre image de la chimie (250 même). En vente aussi dans les bonnes maisons de Nature et Découverte.

Hervé Toulhoat



La révolution thérapeutique sous les trente glorieuses Faits et anecdotes

C. Monneret
160 p., 41,90 €
Éditions Universitaires Européennes,
2016

Avec son inimitable capacité à mêler science et humour, faits et anecdotes, Claude Monneret, président de l'Académie nationale de pharmacie en 2016, nous offre un nouvel opus consacré aux innovations thérapeutiques des trente glorieuses, c'est-à-dire de 1950 à 1980 environ. Cette période, comme son sobriquet l'indique, a été particulièrement riche : la France se reconstruisait après la Seconde Guerre mondiale, l'optimisme et les investissements régnaient, l'éducation et la recherche portaient les espoirs de la nation.

Cet ouvrage, et ses nombreuses références, ne cachent pas les « ratages », sans en faire une charge contre les coloniaux, l'incurie médicale ou le complotisme chers à certains livres à succès. Le mal, comme très souvent, vient de l'ignorance, non pas l'ignorance volontaire, voire idéologique, mais celle qui attend les progrès de la connaissance pour créer les conditions des réussites. D'une humilité de bon aloi, il montre avec de nouveaux exemples le rôle de la « sérendipité », c'est-à-dire la capacité de garder l'esprit ouvert et de se saisir d'analogies ou de rapprochements inattendus pour faire œuvre novatrice. Il rappelle ainsi la formule de Claude Bernard : « *C'est toujours par le hasard que tout commence. La science ne vient qu'après, et elle raisonne sur ce que le hasard a montré.* » Encore faut-il avoir des yeux pour voir !

L'organisation du livre en chapitres thématiques est particulièrement intéressante sur le plan pédagogique, car elle apporte informations et détails par catégorie de médicament ou plutôt de sujet : éradication de la poliomyélite, de la tuberculose, et aussi la cortisone et les corticoïdes, la pilule (ou l'amour libéré), les sulfamides... On découvre que le premier antitumoral utilisé en chimiothérapie était le gaz moutarde, c'est-à-dire l'ypérite, et pourquoi. Pour être encore plus utile, il manque cependant un sommaire permettant

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° 990 (janvier 2017)

- TIMSS, PISA, et le quotidien des enseignants, par V. Parbelle.
- « Les quatre éléments » : récit d'un parcours scientifique en classe de maternelle, par T. Philippe et C. Saxod.

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

de rechercher les informations d'intérêt. Il s'agit d'un petit livre riche en informations, communes ou originales, qui illustre bien, sans pédanterie, la célèbre formule d'Albert Einstein de 1949 : « J'ai du mal à supporter les scientifiques qui prennent une planche de bois, cherchent sa partie la plus fine et partent là où il est facile de percer. » Recommandable et recommandé donc.

Rose Agnès Jacquesy



La lumière en lumière : du photon à l'Internet

B. Boulanger, S. Guellati-Khélifa, D. Hennequin, M. Stehle (coord.)
156 p., 29 €
EDP Sciences, 2016

Cet ouvrage est destiné à un large public ayant une culture générale scientifique de base. Il contient 34 courts chapitres, chacun écrit par un auteur spécialiste. Chaque chapitre se termine par une ou deux références d'ouvrages plus précis « pour aller plus loin ». La qualité pédagogique des textes et celle des photos sont remarquables. Cependant, l'absence d'un index gêne un peu le lecteur.

Tous les aspects de la lumière sont présentés, certes de manière concise, mais on y apprend un grand nombre d'informations précises et anecdotiques ! Citons par exemple l'origine du mot champ (de type magnétique) qui résulte de l'observation de Faraday depuis un ballon des sillons issus des labours dans un champ.

Le chapitre sur la notion d'onde sans calcul est un bel exemple de savoir-faire mathématique. De belles phrases pleines de sens physique sont à mentionner, telles : « *Le photon est un être indivisible mais grégaire* », « *Le pixel*

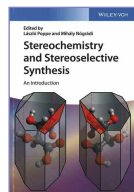
est à l'image ce que l'atome est à la matière »... Mais quand cela est nécessaire, des interprétations plus quantitatives sont proposées dans le chapitre « Atomes et photons ».

Toutes les applications de la lumière sont évoquées avec des illustrations judicieusement choisies. Citons au passage la bioluminescence, la photosynthèse, les diodes électroluminescentes, l'horloge biologique circadienne, les télescopes, les fibres optiques, sans oublier le chapitre très important sur l'énergie qui aborde le photovoltaïque et la fusion nucléaire contrôlée par confinement inertiel.

Cet ouvrage, qui ne traite pas toujours de la chimie, est d'un grand intérêt pour augmenter notre culture générale scientifique.

Jean-Pierre Foulon

NDLR : Cet ouvrage a reçu le « coup de cœur des médias » du 29^e Prix Roberval.



Stereochemistry and stereoselective synthesis An introduction

L. Poppe, M. Nográdi (ed.)
265 p., 46,90 €
Wiley, 2016

Ce livre d'enseignement, écrit par des chimistes de l'Université de Budapest, aborde avec méthode et une grande clarté pédagogique les différents aspects de la synthèse stéréosélective en chimie organique. Chaque chapitre est suivi de références de traités fondamentaux sur la stéréochimie et de problèmes choisis (on regrettera cependant l'absence des solutions directement accessibles dans l'ouvrage).

Une première partie traite des concepts généraux de stéréochimie avec deux

tableaux synthétiques remarquablement présentés : le premier sur les définitions des termes d'isomérisation configurationnelle et conformationnelle, le second sur les relations structurales entre les conformations sur les cyclanes et les alcènes. Les auteurs insistent sur les différences des aspects microscopiques et macroscopiques de ces notions. L'excellent chapitre 5 est consacré aux différentes méthodes de détermination des excès énantiomériques, en particulier la RMN, mais surtout la chromatographie chirale avec de très bons schémas d'explications (qui vont servir de supports à de nombreux cours j'en suis sûr !).

Une seconde partie est consacrée aux différentes sélectivités des réactions, avec un beau tableau sur les définitions des termes fondamentaux : chimiosélectivité, régiosélectivité, sélectivité diastéréoisomérique, diastéréotopique, énantiomérique, énantiotopique. Signalons en particulier la présentation remarquable d'imagination d'un schéma expliquant la diastéréotopie stéréosélective lors de la résolution d'un mélange racémique par un réactif chiral, sans oublier d'ajouter la méthode de résolution de Horeau qui est très clairement illustrée.

La dernière partie (plus de 50 pages) se compose d'applications réactionnelles illustrant chaque concept présenté dans les parties précédentes.

En résumé, un ouvrage plein de rigueur et de clarté sur des notions parfois difficiles à expliquer aux étudiants, avec une annexe électronique d'animations dynamiques réactionnelles.

Jean-Pierre Foulon

À signaler



Une théorie géométrique du noyau de l'atome

Y. Lauffenburger
162 p., 13 €
Connaissances et savoirs, 2016

Palmarès du 29^e Prix Roberval

Des œuvres pour comprendre la technologie

Nous avons sélectionné parmi les lauréats :

- Lauréat Grand public et Coup de cœur des médias : *Les déchets – Du big bang à nos jours*, de C. Duquennoy (Éditions Quæ).
- Lauréat Enseignement supérieur : *La physique autour de nous – De l'observation à l'innovation*, par D. Babot et V. Massardier-Jourdan (Presses polytechniques et universitaires romandes).
- Coup de cœur des médias : *La lumière en lumière*, par B. Boulanger, S. Guellati-Khélifa, D. Hennequin et M. Stehle (EDP Sciences).
- Coup de cœur de l'Académie des technologies : *La chimie dans les TIC (technologies de l'information et de la communication)*, par C. Agouridas, J.-C. Bernier, D. Olivier et P. Rigny (EDP Sciences, collection Chimie et Junior).
- Mention spéciale du jury : *Traité de la matière*, par L. Zuppiroli (Presses polytechniques et universitaires romandes).

• Pour en savoir plus : <http://prixroberval.utc.fr>



22 février 2017

La chimie et les sens

Paris

Dans le cadre des colloques « Chimie et... » à la Maison de la Chimie.

- <http://actions.maisondelachimie.com/index-p-colloque-i-34.html>

24-25 février 2017

Village de la chimie 2017

Paris

- www.villagedelachimie.org

27-28 février 2017

OrgSyn 50

Developments in organic chemistry

Manchester (Royaume-Uni)

- <http://orgsyn.co.uk>

7 mars 2017

Les machines moléculaires

Colloque des trois prix Nobel 2016 :

J.-P. Sauvage, J.F. Stoddart et B.L.

Feringa

Paris

Inscription obligatoire.

- www.academie-sciences.fr/fr/Colloques-conferences-et-debats/les-3-prix-nobel-2016-de-chimie-a-l-academie-des-sciences.html

20-23 mars 2017

GFECI 2017

Congrès annuel du Groupe Français d'Étude des Composés d'Insertion (GFECI)

Saint-Dié-des-Vosges

- <https://gfeci2017.sciencesconf.org>

23-24 mars 2017

IGCS 2017

International green catalysis symposium

Rennes

- <https://igcs2017.sciencesconf.org>

24-26 mars 2017

ICNBS Egypt 2017

5th International conference on nanotechnology, biotechnology and spectroscopy

Ghizé (Égypte)

- www.ises-nakaa-conf.webs.com

28 mars 2017

Journée de printemps de la division Chimie organique

Paris

Voir p. 61.

- <https://dco-printemps17.sciencesconf.org>

10-13 avril 2017

20th Microencapsulation industrial convention

Nantes

- http://bioencapsulation.net/2017_Nantes_i

19-21 avril 2017

SFHST 2017

Congrès de la Société Française d'Histoire des Sciences et des Techniques

Strasbourg

- <http://sfhst.hypotheses.org/congres-2017>

26-27 avril 2017

7th European algae industry summit

Nice

- <http://www.wplgroup.com/aci/event/european-algae-industry-summit>

27 avril 2017

Journée de la chimie PACA

Marseille

- www.journee-chimie-paca.fr/JCPaca_2017.html

30 avril-4 mai 2017

52nd Bürgenstock conference

SCS Conference on stereochemistry

Brunnen (Suisse)

- www.stereochemistry-buergenstock.ch/nextconf.html

4-5 mai 2017

Instrumenter et innover en chimie physique pour préparer l'avenir

Paris

- <https://instrumenteretinnover.lise.upmc.fr/doku.php>

11 mai 2017

Chimie analytique pour l'énergie

Paris

Journée thématique de la subdivision Chimie analytique.

- nicole.jaffrezic@univ-lyon1.fr

11-12 mai 2017

SCF Grand Est 8

Mulhouse

La manifestation rassemblera les chimistes des sections régionales Alsace, Bourgogne Franche-Comté, Champagne-Ardenne, Lorraine, et est ouverte à toutes les disciplines de la chimie.

- www.grandest8.uha.fr

15-18 mai 2017

CFCF 2017

Colloque français de chimie du fluor

Muroi

- <https://cfcf2017.sciencesconf.org>

15-18 mai 2017

25^e Gecom-Concoord

Forges-les-Eaux

- <https://gecom2017.sciencesconf.org>

16-19 mai 2017

ISGC 2017

International symposium on green chemistry

La Rochelle

- www.isgc-symposium.com

17-18 mai 2017

3rd Future of formulations in cosmetics

Barcelone (Espagne)

- www.wplgroup.com/aci/event/future-of-formulations-in-cosmetics

22-23 mai 2017

REACH conference 2017

Prague (Rép. Tchèque)

- <http://reachconference.eu>

29 mai-1^{er} juin 2017

GECat 2017

Congrès du Groupe d'étude en catalyse

Ile d'Oléron

- www.gecat.fr

11-15 juin 2017

ISMEC 2017

International symposium on metal complexes

Dijon

- <https://ismec2017.sciencesconf.org>

26-29 juin 2017

JE 2017

Journées d'électrochimie

Bordeaux

Voir p. 61.

- <https://je2017.sciencesconf.org>

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

Médaille du Centenaire

Pour l'ensemble de leurs actions au service de la SCF durant de nombreuses années, il a été décidé d'attribuer la Médaille du Centenaire de la SCF à **Rose Agnès Jacquesy, Olivier Homolle et Igor Tkatchenko**.

La SCF et les revues européennes

La SCF fait partie du consortium européen des journaux ChemPubSoc (Wiley-VCH), qui comprend treize journaux scientifiques et un magazine, et qui regroupe seize sociétés nationales de chimie. Une réunion annuelle réunit les représentants de ces sociétés co-proPRIÉTAIRES des journaux pour discuter la stratégie des journaux et le calcul des redevances. Cette réunion est préparée en avance par le Comité des présidents, constitué des représentants de quatre sociétés (actuellement Allemagne, Espagne, France et Italie). Les redevances sont calculées pour chaque société au prorata du nombre de publications faites par les chercheurs de chacun des pays. En clair, plus les chercheurs français publient dans les journaux de ChemPubSoc, plus de redevances rentrent dans les caisses de la SCF.

La SCF est aussi co-proPRIÉTAIRE (avec 12,5 % des actions du journal) du journal *Analytical and Bioanalytical Chemistry* (ABC, Springer-Nature) avec l'Allemagne, l'Espagne, l'Autriche, la Suisse, l'Italie et la Pologne. Là aussi, des dividendes sont versés chaque année au prorata des actions, mais dans ce cas sans distinction de la provenance des articles scientifiques. En clair, plus le journal ABC publie d'articles, plus de redevances seront reversées aux sociétés co-proPRIÉTAIRES.

La SCF perçoit ainsi chaque année plus de 200 000 euros de dividendes provenant de ces journaux. **Ces journaux sont les nôtres, continuez à les soutenir en y publiant vos résultats.**

Par ailleurs, compte tenu de sa grande expérience dans les revues européennes auxquelles la SCF est associée et co-proPRIÉTAIRE, **Christian Amatore** a été nommé le 1^{er} janvier dernier **chargé de mission** auprès du Bureau de la SCF pour représenter notre association dans les instances décisionnaires d'*Analytical and Bioanalytical Chemistry* et des journaux de ChemPubSoc Europe.

Le Bureau de la SCF



Une nouvelle vidéo pour présenter la SCF

En ce début d'année, Gilberte Chambaud, présidente de la SCF, présente l'association et ses missions dans une vidéo qui ouvre la voie à une prochaine série de témoignages de chimistes. À suivre...

• Pour voir la présentation (et la diffuser !) : www.societechimiquedefrance.fr/Nouvelle-video-de-presenta-tion-de-la-SCF.html

Manifestations de et avec la SCF

28 mars 2017

Journée de printemps de la division Chimie organique Paris

Au programme :

- Ben Feringa (University of Groningen), prix Nobel de chimie 2016 ;
- Karl Gademann (University of Zürich) ;
- Amir Hoveyda (Boston College) ;
- Christian Bruneau (Institut des sciences chimiques de Rennes), prix Le Bel 2016 ;
- les lauréats des prix de la DCO : Sébastien Alazet (Institut de chimie et biochimie moléculaires et supramoléculaires,

Lyon), prix de thèse Dina Surdin ; Abderrhamane Amgoune (Laboratoire d'hétérochimie fondamentale et appliquée, Toulouse), prix Jeune chercheur ; Thomas Poisson (COBRA, Rouen), prix Enseignant-chercheur ;

- et trois communications orales de jeunes chercheurs.

• <https://dco-printemps17.sciencesconf.org>

26-29 juin 2017

JE 2017

Journées d'électrochimie Bordeaux

Cette manifestation est organisée en coordination avec la subdivision Électrochimie. Les éditions successives de cette manifestation bisannuelle sont

Prix 2017

de la division Chimie organique

Appel à candidatures

La division attribuera en 2017 deux prix de thèse (candidature par nomination), deux prix jeune chercheur et enseignant-chercheur (candidature directe), un prix chercheur/enseignant-chercheur avancé (candidature directe), un prix industriel (candidature par nomination) et le prix de la division (candidature par nomination), ainsi que le prix Émergence, un nouveau prix pour les actifs ayant moins de six ans de métier dans la recherche après la thèse (candidature directe).

Les lauréats, qui doivent tous être membres de la SCF, seront invités à présenter leurs travaux lors des manifestations organisées par la division.

Date limite de réception des candidatures : 27 février 2017 (à midi).

• www.societechimiquedefrance.fr/IMG/pdf/prixdco2017.pdf

organisées dans différents lieux depuis 1983. Après Grenoble (2011), Paris (2013) et Rome (2015), c'est au tour de Bordeaux d'accueillir la communauté des électrochimistes francophones pour faire le point sur les avancées de ce domaine autour de plusieurs thématiques :

- Photo- et spectroélectrochimie ;
- Électrocatalyse, électrochimie moléculaire et électrosynthèse ;
- Électroanalyse, capteurs ;
- Nanoélectrochimie, microscopie électrochimique et laboratoires sur puces ;
- Énergie : batteries, supercondensateurs et piles à combustible ;
- Bioélectrochimie, biocapteurs et biopiles ;
- Génie électrochimique : électrolytes, recyclage, procédés hydrométallurgiques ;
- Corrosion, revêtements et traitements des surfaces.

Conférences plénières au programme :

- *Les batteries : évolution et révolution*, par Jean-Marie Tarascon (Collège de France, Paris).

- *Électrocatalyse moléculaire appliquée à la réduction du CO₂. Bilan et perspectives*, par Sylvie Chardon (Département de Chimie moléculaire, Grenoble).

- *Méthodologies électroanalytiques et exemples de détection de monoxyde d'azote et de nitrosothiols dans des fluides biologiques*, par Fethi Bedioui (Unité de Technologies chimiques et biologiques pour la santé, Chimie ParisTech).

Date limite de soumission des résumés : 28 février.

• <https://je2017.sciencesconf.org>

Paul Hagenmuller (1921-2017) Le « vieux lion » est mort



Paul Hagenmuller, interviewé en 2008 pour *L'Actualité Chimique*.

Août 1921-janvier 2017 : presque 96 ans de vie bien remplie pour Paul Hagenmuller décédé en ce début 2017. Toute une génération de chimistes du solide est en deuil et un peu orpheline.

Strasbourgeois, Paul Hagenmuller a 18 ans en 1939, et avec ses parents, il est évacué sur Clermont-Ferrand où il s'inscrit à la Faculté des sciences de l'Université de Strasbourg qui, rapatriée, a été accueillie par les Clermontois. C'est en juin 1943 qu'il est pris avec d'autres étudiants dans la rafle de la Gallia et déporté au camp de Buchenwald, puis à Dora, dans le « tunnel de Dora » où se fabriquaient les V1 et V2. Beaucoup de déportés y sont morts sous les coups ou d'épuisement.

Animé par une volonté farouche de survie, libéré en 1945 dans un état physique effrayant, il se reconstruit en acceptant une bourse en chimie que lui propose le professeur Chrétien. La chimie en solution ne le convainc pas. Après sa thèse en 1950 et un bref passage au CNRS, il part en 1954 comme maître de conférences au Vietnam à Hanoï, puis à Saïgon après la défaite de Dien Bien Phu.

En 1956, il prend un poste de professeur de chimie minérale à Rennes ; c'est là, avec une équipe de jeunes thésards, qu'il forge sa vision nouvelle en appliquant systématiquement les mesures physiques aux résolutions des problèmes de synthèse à l'état solide. En se rapprochant des physiciens, il « invente » la chimie du solide moderne et navigue plus vers « l'école Chaudron » que vers « l'école Chrétien ». Polyglotte (avec accents), il noue des liens avec le Royaume-Uni, l'Allemagne et les États-Unis.

Les Bordelais, séduits par le dynamisme de ce jeune professeur rennais et de son équipe, l'attirent en 1960. L'université et le CNRS l'aident, avec la plupart de ses jeunes collaborateurs qui l'ont suivi, à créer un laboratoire de chimie du solide qui va prendre assez vite une aura nationale et internationale. En 1964, il organise à Bordeaux un colloque international sur les composés oxygénés des éléments de transition à l'état solide mêlant minéralistes, physiciens, métallurgistes et industriels. Certains y

voient un élément fondateur de la chimie du solide française. Les contacts avec J. Goodenough, S. Anderson, O. Kubaschewski, A. Wold, A. Magneli et R. Roy apportent une dimension et une renommée internationales au laboratoire qui grandit rapidement en taille et en notoriété. En 1965, il est l'un des premiers à être associé au CNRS. En 1974, il devient le Laboratoire de chimie du solide (LCS), laboratoire propre du CNRS, et s'installe sur trois étages d'un bâtiment de la Faculté des sciences de Bordeaux. Plus de cent personnes le composent. Cinq domaines chimiques, sept types de propriétés physiques étudiées sur plusieurs plateformes techniques (spectroscopies, rayons X, hautes pressions...) montrent une organisation à l'anglo-saxonne d'une efficacité remarquable. Parallèlement, les collaborations industrielles se multiplient et nombre de thésards bénéficient de bourses cofinancées ; après leur thèse, ils sont engagés dans l'industrie et vont enrichir le réseau « Hagen ».

De nombreux chercheurs du LCS essaient dans les universités de Nantes, Marseille, Toulouse, Le Mans, Limoges, Amiens, Strasbourg... ; ils y apportent les méthodes modernes de recherche et la façon bordelaise de nouer des relations internationales. En 1986, le père fondateur doit quitter la direction du laboratoire, frappé par « la règle des douze ans », ce qu'il n'a jamais vraiment accepté, d'où parfois des heurts et de rudes discussions avec son successeur, Jean Etourneau.

Après les années 1990, la nouvelle direction lance le projet d'un institut ; ce sera l'Institut de chimie de la matière condensée (ICMCB), inauguré en 1995, qui marque une transition entre une chimie du solide et la science des matériaux. Depuis, l'ICMCB a vu se succéder deux autres directeurs, C. Delmas et M. Maglione. Il est fort de 113 permanents et de 143 non-permanents (doctorants, postdoctorants et contractuels), et perpétue à Bordeaux l'excellence de la recherche fondamentale en science des matériaux, dans le droit fil de l'héritage de Paul Hagenmuller.

Que laisse comme trace le professeur Hagenmuller ? D'abord l'image d'un manager de la recherche exceptionnel. Est-ce ce qu'il a subi en déportation qui l'a rendu aussi audacieux ? Aussi ouvert à l'international ? Aussi déroutant dans une université d'après-guerre plutôt endormie ? Aussi habile en marketing des travaux de son laboratoire ? Il est clair qu'après avoir résisté en 1945 à la broyeuse nazie, il n'avait plus peur de grand-chose. Il restera un grand nom de la chimie, un grand nom de la science bordelaise, et surtout un grand nom respecté dans un grand nombre de pays étrangers.

Jean-Claude Bernier

Pour en savoir plus

- Rigny P., Pouchard M., Rencontre avec Paul Hagenmuller, *L'Act. Chim.*, **2008**, 319, p. 5.
- Teissier P., Paul Hagenmuller : itinéraire de l'enfant terrible de la chimie du solide française, *L'Act. Chim.*, **2008**, 319, dossier p. I-XVI.
- Bernier J.-C., Il y a 70 ans déjà, les heures noires de la chimie strasbourgeoise, *L'Act. Chim.*, **2013**, 378-379, p. 7.
- www.icmcb-bordeaux.cnrs.fr/IMG/pdf/communique_presse_hommage_de_paul_hagenmuller.pdf

Les textiles tissent le futur

Les textiles existent depuis des millénaires. Si au XVIII^e siècle, la mécanisation permet une avancée remarquable, c'est à la fin des années 1920 que la chimie s'en mêle avec la création de la rayonne, puis du Nylon dans les années 1930.

Depuis, de nouveaux textiles ont été développés auxquels les chercheurs et les industriels ont conféré de nouvelles fonctionnalités ou performances. Ils peuvent être visibles, comme le sont les revêtements de siège dans un avion, ou non visibles comme les filtres, les joints, les matrices de renforts de pneus ou de matériaux composites. Ils peuvent aussi être de taille micro, voire nano, soit mille fois plus petits qu'un cheveu. Ces textiles ont ainsi trouvé leur place dans la quasi-totalité des secteurs industriels, de l'automobile au médical, du génie civil à la construction, du sport à l'aéronautique...

Textiles fonctionnels

La réalisation de ces produits passe par la mise en œuvre d'étapes, partant d'un matériau de base, la fibre, dont l'origine peut être naturelle (soie, laine, coton...), synthétique (polyamide, polyester...), ou inorganique ou minérale (verre, silice...). La figure 1 présente un aperçu des matières premières utilisées, des étapes de fabrication, des domaines d'applications et des principales fonctions et performances recherchées qui permettront au matériau fibreux d'être tour à tour thermorégulateur, antibactérien, anti-UV, antimagnétique, antistress, libérateur de produits médicamenteux ou de parfums, infroissable, antitache, etc. [1].

Fonctionnalité passive

Les fonctionnalités espérées ont le potentiel d'accroître la valeur des produits et elles sont activement recherchées par les communautés scientifiques relevant des domaines de la chimie,

des matériaux et du textile. Elles sont obtenues par un certain nombre de procédés et, que l'on en ait besoin ou pas, elles sont présentes dans le textile qui est alors dit « à fonctionnalité passive ». On trouve de nos jours couramment des réussites commerciales, comme par exemple les textiles antimicrobiens, utilisés comme vêtements ou sous-vêtements, et qui sont composés de fibres possédant naturellement certaines propriétés bactéricides intrinsèques comme les fibres de bambou, ou qui les obtiennent grâce à des traitements chimiques. Les composés antibactériens, qui peuvent être par exemple du triclosan, déjà utilisé dans l'hygiène et la cosmétique, ou de l'aluminium ou du cuivre, sont alors intégrés directement sur ou au cœur du textile et plusieurs façons sont envisageables :

- Par dépôt, avec ou sans liant : dans le premier cas, le traitement s'applique à des produits à usage unique puisque les produits déposés ne résisteront pas au lavage, tandis que l'on peut espérer une certaine résistance (ou solidité) au lavage lorsqu'un liant est ajouté. On peut trouver par exemple ce type de traitement pour les coulis des matelas (ou oreillers). On les identifie par la mention sur l'étiquette (par exemple Actigard®).
- Par addition dans le polymère visqueux avant les opérations de filage lorsqu'il s'agit de fibres artificielles ou synthétiques, comme par exemple la fibre Rhovyl® As® antibacterial, chlorofibre comportant un composé organométallique.
- Par greffage chimique ou radiochimique par faisceau d'électrons, procédés plus récents dont le développement est encore à l'étude.

Fonctionnalité active

Lorsque le textile fabriqué est capable de réagir de manière active en fonction de son environnement, en pouvant par exemple surveiller à domicile une personne âgée, protéger du

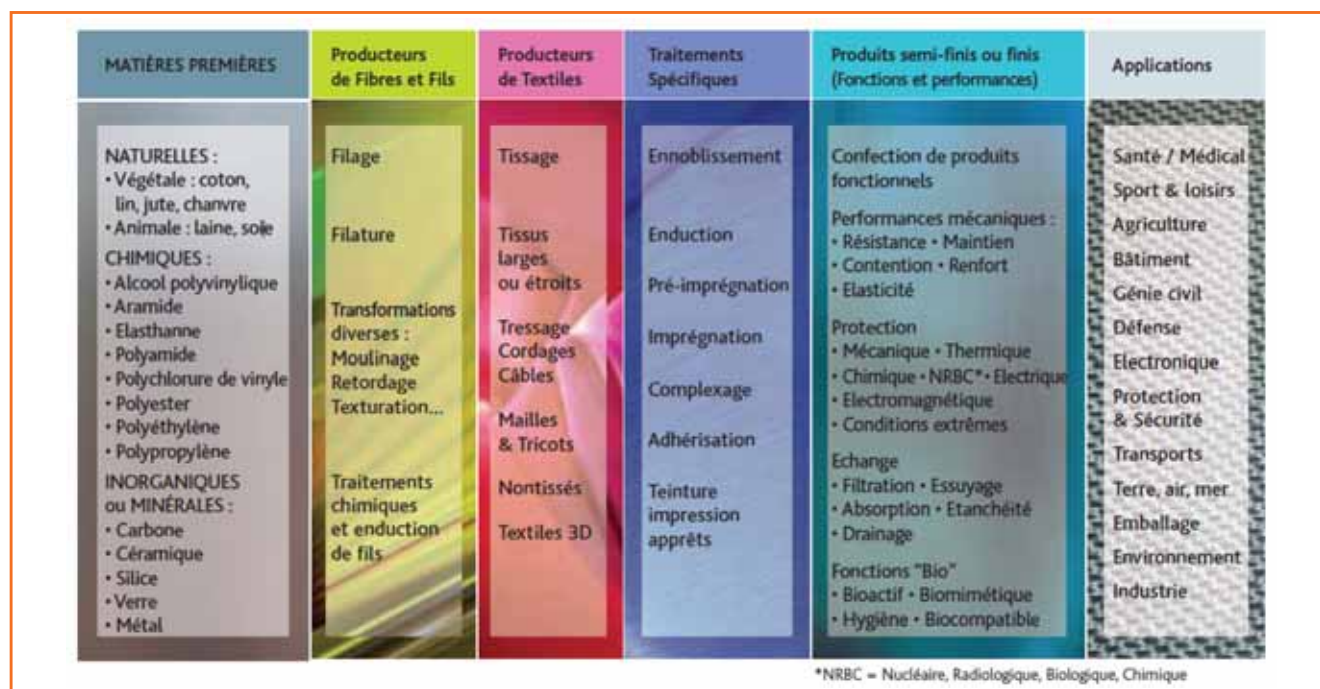


Figure 1 - Textiles techniques [1].

froid ou du chaud en fonction de la température extérieure ou de l'activité de la personne, les textiles entrent dans la catégorie des textiles à fonctionnalités « actives ». On peut les voir appelés aussi « smart textiles » ou « textiles intelligents ». L'Europe a compris le potentiel d'innovation et de croissance de ce domaine et a mis en place très tôt des programmes de recherche pour faciliter les partenariats entre industriels, universités et centres techniques (programmes 2bFunTex [2] et BioTex Initiative [3] par exemple). La France a également initié un plan d'actions « Textiles techniques et intelligents », qui s'intègre dans la démarche destinée à relancer l'industrie française lancée par la Présidence de la République en septembre 2013. L'ambition est de retrouver une place majeure parmi les grands pays industriels en créant les objets du futur.

Dans ce cadre, les travaux menés et les résultats obtenus ont la particularité d'être à cheval sur plusieurs domaines, autres que ceux déjà cités, comme la microélectronique, la connectique pour cette microélectronique, voire même les sciences de la vie. On trouve ainsi des projets et des premières réalisations pour le développement de textiles communicants, « e-wear », intégrant des fibres conductrices, fibres d'alliages métalliques ou fibres de carbone, comme celles proposées par la société LEXTRONIC [4], des capteurs miniaturisés pour mesurer le rythme cardiaque, la respiration, la température, et plus largement recueillir des données sur l'état physiologique de la personne et son activité. La société américaine SparkFun Electronics se positionne typiquement sur ce marché. Les produits développés peuvent inclure des matériaux à changement de phase microencapsulés [5] et donc capables de réagir immédiatement aux changements des températures environnementales : quand une élévation de la température se produit, les microcapsules (en phase solide) absorbent la chaleur pour se liquéfier. À l'opposé, lorsque la température décroît, les microcapsules (phase liquide) libèrent cette énergie calorifique préalablement stockée pour se solidifier. Cette découverte date des années 1970-80 et a été développée par la NASA. Ces nouveaux produits peuvent aussi inclure des matériaux polymères à mémoire de forme qui ont la caractéristique d'être déformés de manière stable, dans un certain domaine de température, et de retourner, par un changement de température, à leur forme initiale comme le présente le schéma de la figure 2.

Ces nouveaux matériaux, à base de Nitinol (alliage de nickel et de titane), peuvent trouver des applications dans les vêtements où, placés au niveau des zones à fortes sudations, ils peuvent en améliorer le confort.

Exemples d'applications de textiles à fonctionnalités actives

Dénommés PROTEX (« TEXtiles pour la PROtection »), ils ont été développés à l'origine pour un usage professionnel, militaire, notamment pour être utilisés dans un environnement hostile (fortes chaleurs, feu, froid extrême, agressions chimiques...). Mais bientôt, ils seront à disposition des sportifs de haut niveau

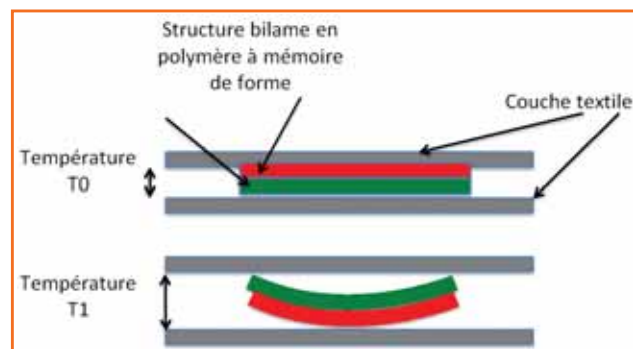


Figure 2 - Principe de fonctionnement d'un matériau multicouche intégrant des polymères à mémoire de forme.

en quête de performances, et enfin des sportifs amateurs ou d'un public plus large en quête de confort et bien-être. D'autres populations peuvent également, à terme, bénéficier de ces innovations. Ainsi récemment, l'Université de Haute-Alsace à Mulhouse a lancé, en partenariat avec EDF, le projet « Smart Chair » [6], alliant des objectifs d'écomobilité et d'autonomie pour des personnes âgées et/ou handicapées. Il s'agit d'un fauteuil roulant au sein duquel il est prévu d'intégrer des capteurs physiologiques. Les parties textiles (assise, dossier, accoudoirs) en seront équipées et c'est le fauteuil lui-même qui sera ainsi connecté. Cette approche présente l'avantage de lever les verrous technologiques qui se posent dans le cas de l'intégration de composants électroniques qu'il faut alimenter en énergie dans un vêtement qu'il faut entretenir (lavage, séchage). Elle présente également l'avantage de remplacer, pour la population ciblée, des objets connectés comme les ceintures cardiofréquence-mètres, les montres GPS, les podomètres ou les bracelets de monitoring que nous connaissons et qui ne seraient pas adaptés (trop intrusifs ou compliqués à positionner).

En conclusion, les textiles ont de tous temps accompagné l'homme dans ses activités, mais les nouvelles technologies qui apparaissent et qui ne relèvent pas du champ traditionnel de leurs activités leur permettent d'étendre largement leurs domaines d'applications. Même si de nombreuses actions n'en sont encore qu'à la phase de recherche et développement, plusieurs sociétés investissent dans ce domaine et le public montre un véritable intérêt pour les produits textiles fonctionnels. Ainsi, on peut penser qu'au-delà des usages professionnels (vêtements de protection, équipements de sécurité), un réel développement de ce secteur dans le marché grand public verra bientôt le jour.

- [1] « Textiles techniques », Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, 2006.
- [2] www.2bfuntex.eu
- [3] www.textile-platform.eu/bio-tex-collaboration
- [4] www.lextronic.fr
- [5] Viallier P., Utilisation des matériaux à changement de phase en textile, *L'Act. Chim.*, **2012**, 360-361, p. 34.
- [6] <http://alsace.edf.com/innover/favoriser-handicap-autonomie-uha-crm>

Cette fiche a été préparée par **Laurence Schacher**, professeur des Universités, École Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud Alsace, Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles (laurence.schacher@uha.fr).

Les fiches « Un point sur » sont coordonnées par un comité éditorial mené par Jean-Pierre Foulon et Séverine Bléneau-Serdel (contact : bleneau@lactualitechimique.org). Elles sont regroupées et en téléchargement libre sur www.lactualitechimique.org/spip.php?rubrique11.

Abonnement 2017 (numéros spéciaux inclus)

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

	Abonnement papier + électronique*		Abonnement électronique seul*	Abonnement multiple**
	France	Étranger	France / Étranger	France / Étranger
Particuliers	☐ 105 €	☐ 110 €	☐ 55 €	(pour les lycées et les institutions)
Lycées	☐ 120 €	☐ 140 €	☐ 70 €	☐ 420 €
Institutions	☐ 205 €	☐ 220 €	☐ 155 €	☐ 420 €

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

Complétez votre collection

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

Tous les articles et numéros de plus de cinq ans sont téléchargeables gratuitement

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

- ☐ La sonochimie, ou comment les ultrasons font vibrer la chimie ! (sept. 2016) : 20 €
- ☐ Chimie et transition énergétique (juin-juil.-août 2016) : 32 €
- ☐ L'électrochimie au cœur des sciences (oct.-nov. 2015) : 32 €
- ☐ La chimie fête la lumière (juin-juil. 2015) : 32 €
- ☐ Chimie organique et moléculaire : les défis du XXI^e siècle (fév.-mars 2015) : 32 €
- ☐ La chimie et la ville de demain. Colloque Recherche de la Fédération Gay-Lussac (nov. 2014) : 24 €
- ☐ 2014, Année internationale de la cristallographie (juil.-août-sept.-oct. 2014) : 32 €
- ☐ Modéliser et simuler la chimie (fév.-mars 2014) : 32 €
- ☐ La chimie mène l'enquête, saison 2 (oct.-nov. 2013) : 32 €
- ☐ Biotechnologies et chimie : nouveaux développements (juin-juil.-août 2013) : 32 €
- ☐ CO₂, où en sommes-nous ? (fév.-mars 2013) : 32 €
- ☐ Toxicologie environnementale et humaine (oct.-nov. 2012) : 32 €
- ☐ Danses avec les spins. La résonance magnétique nucléaire en chimie (juin-juil.-août 2012) : 32 €
- ☐ Fibres et textiles chimiques : matériaux du XXI^e siècle (fév.-mars 2012) : 32 €
- ☐ Le rayonnement synchrotron, une lumière pour comprendre la chimie (oct.-nov. 2011) : 15 €
- ☐ Chimie et société : construire un dialogue (sept. 2011) : 15 €
- ☐ La chimie prépare notre avenir, vol. 2 (juin-juil.-août 2011) : 15 €
- ☐ La chimie prépare notre avenir, vol. 1 (janv.-fév. 2011) : 15 €

Retrouvez tous les numéros thématiques précédents sur www.lactualitechimique.org

Achat à l'unité hors numéros spéciaux

11 € pour les numéros avant 2015 ; 20 € à partir de 2015
(également disponibles en version électronique sur le site)

- ☐ Numéro(s) souhaité(s) :

Collection "Chimie et...", co-éditée et diffusée par EDP Sciences

Dernières parutions :

- Chimie, dermo-cosmétique et beauté (janv. 2017) : 25 €
- Chimie et changement climatique (sept. 2016) : 25 €
- Chimie et expertise : santé et environnement (janv. 2016) : 25 €
- Chimie et cerveau (sept. 2015) : 25 €
- Chimie et expertise : sécurité des biens et des personnes (janv. 2015) : 25 €
- Chimie et technologies de l'information (sept. 2014) : 25 €
- Chimie et transports (janvier 2014) : 24 €
- Chimie et enjeux énergétiques (sept. 2013) : 24 €
- La chimie et la nature (oct. 2012) : 24 €

**À commander
chez votre libraire
ou directement sur
laboutique.edpsciences.fr**



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.
abonnement@lactualitechimique.org - www.lactualitechimique.org**



Un outil **LUDIQUE** et **PÉDAGOGIQUE**

- ➡ Adapté aux **programmes des Collèges**
et des **Enseignements Pratiques Interdisciplinaires (EPI)**
- ➡ Des **fiches métiers** pour guider nos enfants vers leur **avenir professionnel**
- ➡ Une présentation des **plus récents résultats en Recherche & Développement**



► La chimie et la sécurité

EPI : Sécurité / Transition écologique / Développement durable
Disciplines : Physique, Chimie, SVT, Maths, Technologie

PRIX ROBERVAL 2016
 Coup de cœur de l'Académie des Technologies

► La chimie dans les TIC

EPI : Information / Communication / Citoyenneté
Disciplines : Physique, Chimie, SVT, Maths, Technologie



► La chimie dans le sport

EPI : Sport / Santé / Bien-être / Monde professionnel
Disciplines : Physique, Chimie, SVT, Maths, Education physique et Technologie

À paraître en 2017
 «Chimie, énergie et changement climatique»

