

l'actualité chimique

Le journal de la Société Chimique de France
Mai 2015 - N° 396

**La couleur,
un enseignement transdisciplinaire**

La palette des JIREC 2014



Société Chimique de France



La **PLATEFORME COMMUNE D'ANALYSE ET DE CARACTÉRISATION (PAC)** du Pôle Chimie Balard est un des éléments clés pour le personnel au sein du Pôle, mais aussi pour le développement des relations Pôle chimie Balard/PME-PMI régionales. Organisée en nacelles, autour d'un savoir-faire technologique reconnu et d'équipements performants, la PAC rassemble les équipements des Instituts du Pôle de Chimie Balard (IBMM, ICGM, IEM, ICSM), de l'ENSCM et des services communs de l'UM rattachés à la Chimie. Ainsi, selon le niveau d'information requis, la détection, l'identification ainsi que la caractérisation structurale sont des prestations à disposition au sein de la PAC et accessibles aux chercheurs du Pôle chimie Balard, à la communauté universitaire, et aussi aux industriels.

Le projet "**Equipements Scientifiques du Pôle Chimie Balard**", porté par la Fédération de Recherche Chimie Balard FR3105 du CNRS et soutenu par la Région Languedoc-Roussillon, a été subventionné par le Fonds Européen de Développement Régional FEDER, le Contrat Plan-Etat-Région CPER, le CNRS, l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier, l'Université de Montpellier et le LabEx ChemISys, permettant l'acquisition d'équipements de haute technologie : en 2013, un spectromètre de masse et un spectromètre RMN 400 MHz et, en 2014, un analyseur thermogravimétrique et calorimétrique couplé à un spectromètre de masse. Ces équipements contribuent à permettre aux chercheurs du Pôle Chimie Balard de rester à la pointe de ce qui se fait de mieux au niveau des analyses et caractérisations.



Cet appareillage de spectrométrie de masse haute résolution **Waters SYNAPT G2-S HDMS**, hébergé à l'Université de Montpellier est complété par un dispositif de mesure de mobilité ionique, non disponible au niveau des plateformes analytiques régionales. Cet instrument permet le couplage avec un système de chromatographie liquide UPLC pour des mesures de masse précises en LC/MS et LC/MS/MS à haute résolution pour la détermination des formules chimiques et des éléments structuraux. Le dispositif de mesure de mobilité ionique, apparenté à un procédé de séparation en phase gazeuse selon la forme des composés étudiés, apporte des informations structurales complémentaires. Les projets scientifiques qui pourront être réalisés à l'aide d'un tel instrument couvrent de nombreux domaines d'applications, de l'analyse de petites molécules organiques aux macromolécules, des biomolécules aux matériaux.

Le nouvel équipement **Netzsch STA-449 F1 JUPITER**, hébergé à l'Université de Montpellier permet l'accès à une technique actuellement peu représentée au niveau régional. L'analyse thermogravimétrique, l'analyse thermique différentielle et la calorimétrie différentielle à balayage permettent d'étudier des caractéristiques physico-chimiques de solides associées à leurs changements d'état ou leur dégradation thermique. Le couplage avec la spectrométrie de masse permet la séparation des gaz émis, leur détection et leur identification de manière qualitative et quantitative. L'ensemble de ces informations sont déterminantes pour la compréhension des transformations au sein de la matière, des mécanismes réactionnels de dégradation thermique des matériaux ou des relations structure-propriétés (transitions de phases, réactions, chimiques, décomposition, ...).



Le spectromètre **Bruker RMN liquide 400 MHz** trois canaux, équipé de plusieurs sondes 5 mm, est localisé à l'École Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier. Il permet d'analyser des composés organiques en solution. Une sonde deux canaux de dernière génération, optimisée fluor, permet de couvrir l'ensemble des demandes d'expériences mono et multidimensionnelles standard. Des sondes trois canaux permettent en outre d'étudier les liaisons chimiques entre hétéroatomes. La configuration 1H/X/13C (X=15N-31P) est adaptée à la majorité des composés organiques, la configuration 1H/19F/X est complémentaire pour les matériaux fluorés. Cette acquisition augmente le potentiel analytique de la plateforme dédiée à la caractérisation des échantillons en solution.

RÉDACTION

Rédactrice en chef : Rose Agnès Jacquesy
Rédactrice en chef adjointe :
 Séverine Bléneau-Serdel
Secrétaire de rédaction : Roselyne Messal
Chef de rubrique, Collection « L'Actualité Chimique - Livres » : Minh-Thu Dinh-Audouin
Conseiller de la Rédaction : Jean-Pierre Foulon
Secrétariat : Martine Maman
Webmestre : Pierre Miquel

Comité des rubriques :

Recherche et développement : Rose Agnès Jacquesy,
 Industrie : Jacques Bousquet, Enseignement et formation : Katia Fajerweg, TP : Xavier Bataille,
 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, R. Lescouezec, J. Livage, P. Massiani, M.-T. Ménager, C. Monneret, N. Moreau, J.-M. Paris, P. Pichat, A. Picot, J. Rangapanaiken, F. Rocquet, H. Toulhoat, L. Valade, P. Walter

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

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

ÉDITION : Société Chimique de France
 250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris

Rédaction : 28 rue Saint-Dominique, 75007 Paris
 Tél. : 01 40 46 71 64 - Fax : 01 40 46 71 63
 edition@lactualitechimique.org
 www.lactualitechimique.org

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

Imprimerie : Friedling Graphique, 68170 Rixheim

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

Maquette hors articles : Mag Design
 www.magdesign.info

ISSN version papier 0151 9093

ISSN version électronique 2105 2409

PUBLICITÉ

EDIF, Le Clemenceau, 102 avenue Georges Clemenceau, 94700 Maisons-Alfort

Tél. : 01 43 53 64 00 - Fax : 01 43 53 48 00
 edition@edif.fr, www.edif.fr

Index des annonceurs : p. 62

© SCF 2015 - Tous droits réservés

Dépôt légal : mai 2015

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 2015 - L'ACTUALITÉ CHIMIQUE

(11 numéros par an)

Abonnement papier + électronique

Particuliers : France 102 € - Étranger 107 €

Institutions : France 202 € - Étranger 215 €

Lycées : France 115 € - Étranger 135 €

Abonnement électronique seul (France/Étranger)

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

Membres de la SCF : abonnement inclus dans la cotisation ou à tarif préférentiel

Abonnement : SCF, Nadine Colliot

250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris

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

abonnement@lactualitechimique.org

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

Éditorial

Les JIREC, pourquoi c'est important, par **R.A. Jacquesy et J.-P. Foulon** 2

Clin d'œil étymologique

À propos du vanadium, par **P. Avenas** 3

Chroniques

Les COMUE et le financement des universités, par **J.-C. Bernier** 4

À propos de

L'or, un métal paré de mille vertus thérapeutiques, par **C. Monneret** 6

Parcours de chimistes

Histoire d'un laboratoire. Grenoble : du LEDSS au DCM, par **R.A. Jacquesy** 8

JIREC 2014 : La couleur (coord. : K. Fajerweg et F. Boulc'h)

La palette des JIREC 2014

La couleur, un enseignement transdisciplinaire, par **N. Blanc, G. Canicave, E. Amadéi-Giuseppi, D. Cachau-Herreillat, M. Comtat, K. Fajerweg et F. Boulc'h** 11

Comment enseigner la chimie organique ?, par **X. Bataille** 16

Les dispositifs de promotion de la réussite en 1^{ère} année à l'Université de Namur, par **V. Wathélet** 16

Les orbitales moléculaires avec *OrbiMol*, par **F. Volatron, B. de Bonneval et P. Chaquin** 17

Chimie et couleur de l'huile d'olive, par **N. Blanc et G. Canicave** 18

Les ateliers expérimentaux 19

Rencontre avec Patrice Thiriet, créateur du MOOC « FOVEA » 21

Rencontre avec quelques scientifiques provençaux, par **M. Comtat** 22

La couleur

Comment jouer avec le feu et la lumière pour colorer les verres et les céramiques, par **J. Livage (prix de la division Enseignement-Formation)** 25

La genèse des couleurs, un dialogue entre lumière et matière, par **B. Valeur** 29

Comprendre le geste du peintre dans son atelier : approches croisées entre chimie et histoire de l'art, par **P. Walter** 34

Les innovations pédagogiques

Le recours à l'histoire dans l'enseignement des sciences : exemple des couleurs de l'arc-en-ciel, par **O. Morizot et P. Abgrall** 38

Introduction à la chimie inorganique : théorie du champ cristallin ou théorie des orbitales moléculaires ?, par **F. Volatron et P. Chaquin** 40

Copex-chimie, un environnement numérique pour aider les élèves à concevoir une expérimentation de dosage spectrophotométrique, par **I. Girault et C. d'Ham** 44

Chimie et société

Les Rencontres Chimie & Terroir, une passerelle entre chimie et grand public, par **A. Ouali** 47

Redlove® et SmartFresh™, ou « peut-on encore manger des pommes ? », par **R.A. Jacquesy** 53

En bref

Livres et médias

Agenda

Actualités de la SCF

Un point sur

Le charbon actif, par **R. Poisson** 63

Couverture : Tableau de Laura Beullier, licence Sciences et Humanités (Univ. Aix-Marseille), 2013. Reproduit avec son aimable autorisation. **Conception graphique** : Mag Design - www.magdesign.info



Les JIREC, pourquoi c'est important

Depuis plus de trente ans, les Journées de l'innovation et de la recherche pour l'enseignement de la chimie (JIREC) sont le rendez-vous annuel de l'enseignement de la chimie. Elles sont animées par les membres de la division Enseignement-Formation (DEF) de la Société Chimique de France (SCF), avec la participation d'une école ou d'une université et l'appui du Ministère de l'Éducation nationale, en particulier de l'Inspection générale de physique-chimie qui les a inscrites dans les plans de formation des professeurs des lycées. Lieu de rencontres et d'échanges particulièrement conviviaux, elles font le lien entre les enseignements du secondaire et du supérieur, et les chercheurs des laboratoires de recherche, universitaires ou industriels. Conférences, ateliers expérimentaux (très appréciés par les participants) et tables rondes réunissent chaque année quelques 150 personnes autour d'un thème : la couleur en 2014 ; la formulation en 2015 ; « Chimie et vérités » prévu pour janvier 2016 à Lyon. Les éléments les plus significatifs, et notamment les conférences assurées par nos meilleurs chercheurs, font l'objet d'articles publiés chaque année dans *L'Actualité Chimique* (en accès libre en ligne) sous la houlette de Katia Fajerweg.

Il serait sans doute souhaitable que les divisions de la SCF y prennent une place plus importante, pour y débattre des nouveaux cursus, des difficultés d'enseignement de certains concepts dans les lycées, écoles et universités. De telles confrontations (dans la meilleure acception du terme) peuvent être décisives en ce qu'elles décloisonnent les informations, favorisent et enrichissent des partenariats dont l'objectif est bien de faire comprendre et aimer la chimie. La présence cette année de membres du Réseau des Jeunes chimistes (RJ-SCF) est un élément important du nécessaire passage de relais entre générations. De même, la participation effective et efficace d'industriels pourrait être plus grande encore, permettant de prendre en compte, dans la réflexion générale sur la transmission de la chimie aux étudiants, le point de vue de potentiels employeurs. Et pourquoi pas une soirée grand public, à l'instar (en plus modeste) des journées « Chimie & Terroir », dont un bilan-analyse est justement publié dans ce numéro ?

La SCF a toujours été attentive à promouvoir et soutenir les actions rapprochant la recherche et l'enseignement, comme le colloque « De la recherche à l'enseignement » qui réunit

en septembre plus de 100 professeurs de chimie des CPGE et de lycées, avec des conférenciers lauréats récents de la SCF, du CNRS ou de l'Académie des sciences. Encore une initiative qui, chaque année, mêle, dans une atmosphère aussi studieuse que chaleureuse, des participants de tous âges et de formations variées, en quête de connaissances nouvelles et d'inspiration. D'ailleurs, *L'Actualité Chimique* entretient des relations étroites avec l'Union des professeurs de physique et de chimie (UdPPC), relations qu'elle tient à maintenir et même renforcer. À titre d'exemple, le partage de nos fiches « Un point sur ».

Si les découvertes et les innovations sont le fait d'auteurs (reconnus comme tels ou non), ce sont, comme en musique, les interprètes qui font aimer et comprendre la culture scientifique. Ce rôle est trop souvent sous-estimé, voire ignoré. Une chimie vivante, renouvelée en relation avec l'actualité, la présence de spécialistes de la pédagogie et de la didactique, d'historiens des sciences, mais aussi de chimistes, d'informaticiens, de mathématiciens, de physiciens... font le succès de ces journées.

Cependant, l'influence de la SCF sur l'enseignement comme sur la recherche serait décuplée si tous les chimistes, au moins ceux du secteur public, se sentaient suffisamment responsables pour adhérer au « réseau des chimistes »... Le noyau dur de notre association plafonne à 3 000 adhérents alors que l'Allemagne et le Royaume-Uni enregistrent plusieurs dizaines de milliers d'adhérents pour des tailles sensiblement comparables. L'esprit gaulois a son charme, mais l'union a aussi son intérêt, par exemple vis-à-vis des instances européennes dans lesquelles le retour vers nos laboratoires et amphithéâtres est bien inférieur à ce qu'il devrait être. Une adhésion massive renforcerait notre support spécifique d'informations, *L'Actualité Chimique* et son site Internet, et permettrait d'envisager une diffusion plus européenne (au moins), et quelle motivation pour nos quelque 350 auteurs que nous tenons à remercier à nouveau !

Comme l'écrit Antoine de Saint-Exupéry, et comme notre tentation jacobine l'oublie trop souvent : « Pour ce qui est de l'avenir, il ne s'agit pas de le prévoir mais de le rendre possible. »

Rose Agnès Jacquesy (rédactrice en chef) et
Jean-Pierre Foulon (conseiller de la Rédaction)



À propos du vanadium

C'est une histoire pleine de rebondissements que celle de la découverte du *vanadium*, dont le nom nous entraîne dans la mythologie scandinave, certainement moins présente que les références gréco-latines dans les appellations de la chimie.

Une découverte incomprise, au Mexique

En 1801, l'histoire commence pourtant à Mexico, où le minéralogiste del Rio annonçait la découverte d'un nouveau métal dans un minerai du Mexique. Cependant, la communauté scientifique a considéré que le métal en question n'était que du chrome impur. En fait, c'est del Rio qui avait raison. On a compris plus tard qu'il avait bien trouvé le vanadium, situé dans la classification juste à côté du chrome. Vauquelin venait d'identifier ce dernier métal, et de le nommer en 1798 à partir du grec *khroma*, « couleur », à cause de ses sels diversement colorés. Le métal que del Rio pensait avoir trouvé produisait d'ailleurs des sels de couleur rouge intense, d'où le nom *erythronium*, du grec *eruthros*, « rouge », qu'il avait proposé, en vain.

La redécouverte, en Suède

Près de trente ans plus tard, le chimiste et minéralogiste suédois Nils Gabriel Sefström, examinant « une espèce de fer remarquable par son extrême mollesse », montrait qu'un nouvel élément était responsable de cette propriété, et redécouvrait ainsi le vanadium. Sefström travaillait alors chez son ancien professeur, Berzelius, qui écrivait en 1830 : « Nous n'avons pas encore fixé définitivement le nom de cette substance. Nous l'appelons provisoirement vanadium, de Vanadis, nom d'une divinité scandinave. » Berzelius laissait la primeur de l'annonce à Sefström, qui confirmait, dès 1831, le nom du nouveau métal : « Comme le nom est indifférent par lui-même, je l'ai dérivé de Vanadis, surnom de Freyja, principale déesse de la mythologie scandinave. » Un nom peut-être pas si indifférent que cela, puisqu'il lui permettait de signer cette découverte d'un nom scandinave. Compte tenu de l'originalité des travaux de Sefström, la communauté scientifique a effectivement retenu *vanadium*, au détriment d'*erythronium* proposé par del Rio.

La déesse Vanadis, une inspiratrice

Dans la mythologie scandinave, les dieux se répartissent entre les Ases, qui ont des pouvoirs de justice et de guerre, et les Vanes, tournés vers la fertilité et la prospérité. Freyja fait partie des Vanes, d'où son surnom de *Vanadis*. Comme Vénus chez les Romains, elle est la déesse de la fécondité et de la beauté, des qualités illustrées par le vanadium, qui est remarquable par la diversité et les riches couleurs de ses dérivés.

Berzelius était, semble-t-il, inspiré par Vanadis. Dans une lettre de 1831 à son confrère allemand Wöhler, célèbre pour avoir réussi la synthèse de l'urée, voici à peu près ce qu'il écrivait : vous avez frappé une fois à la porte de Vanadis, elle n'a pas répondu, et vous n'avez pas insisté, mais quelque temps après Sefström n'a cessé de frapper à sa porte, elle a fini par s'ouvrir, et « de cette union est né le vanadium ». Une puissante métaphore que Wöhler a prise du bon côté puisque la même année, il écrivait cette fois à Liebig : « je suis un âne » de ne pas avoir découvert le vanadium dans le minerai mexicain. Pour terminer sur ces échanges, citons encore Berzelius, consolant Wöhler en lui disant que la synthèse de l'urée nécessitait plus de génie « que la découverte de 10 nouveaux éléments. »



Le couple de la mythologie nordique Freyja ou Vanadis, déesse de la beauté et de la fertilité, et Thor, dieu du tonnerre et de la guerre : une alchimie des principes contraires inspiratrice des noms des éléments chimiques vanadium (V) et thorium (Th) !

Que d'émotion autour du vanadium... et de la belle Vanadis... qui, plus tard, a aussi inspiré les astronomes, puisqu'un astéroïde découvert en 1884 a été baptisé *Vanadis* : encore une correspondance entre un astre et un métal (cf. À propos de l'uranium, *L'Act. Chim.* n° 395), mais *a priori* fortuite cette fois.

Thor, une autre divinité scandinave

Berzelius avait déjà puisé dans la mythologie scandinave pour nommer *thorium* en 1818 un métal qu'il croyait nouveau, à partir du nom de *Thor*, le dieu du tonnerre et des éclairs. Armé de son marteau, ce dieu est un avatar de *Jupiter*, et de *Donar* dans la mythologie germanique. Plus tard, lorsque Berzelius découvre, réellement cette fois, un nouveau métal en 1829, à peu près en même temps d'ailleurs que la redécouverte du vanadium, il reprend ce nom *thorium*.

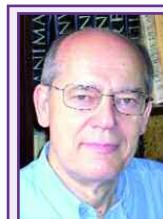
Dans la classification, le thorium (Th), 90^e élément et 2^e actinide, est fort éloigné du vanadium (V), 23^e élément et 3^e métal de transition. Pourtant, dans la symbolique des jours de la semaine, le *jeudi/Thursday/Donnerstag*, dédié à Jupiter, Thor et Donar, précède juste le *vendredi/Friday/Freitag*, dédié à Vénus, Frigg et Freyja, dite *Vanadis*, parfois confondue avec Frigg.

Latin	<i>Jovis dies</i> (jour de Jupiter)	<i>Veneris dies</i> (jour de Vénus)
Français	<i>jeudi</i>	<i>vendredi</i>
Espagnol	<i>jueves</i>	<i>viernes</i>
Anglais	<i>Thursday</i> (jour de Thor)	<i>Friday</i> (jour de Frigg)
Allemand	<i>Donnerstag</i> (jour de Donar)	<i>Freitag</i> (jour de Freyja)

Épilogue

Grâce au grand chimiste suédois Berzelius, la mythologie scandinave est représentée dans la classification des éléments par le *vanadium* et le *thorium*.

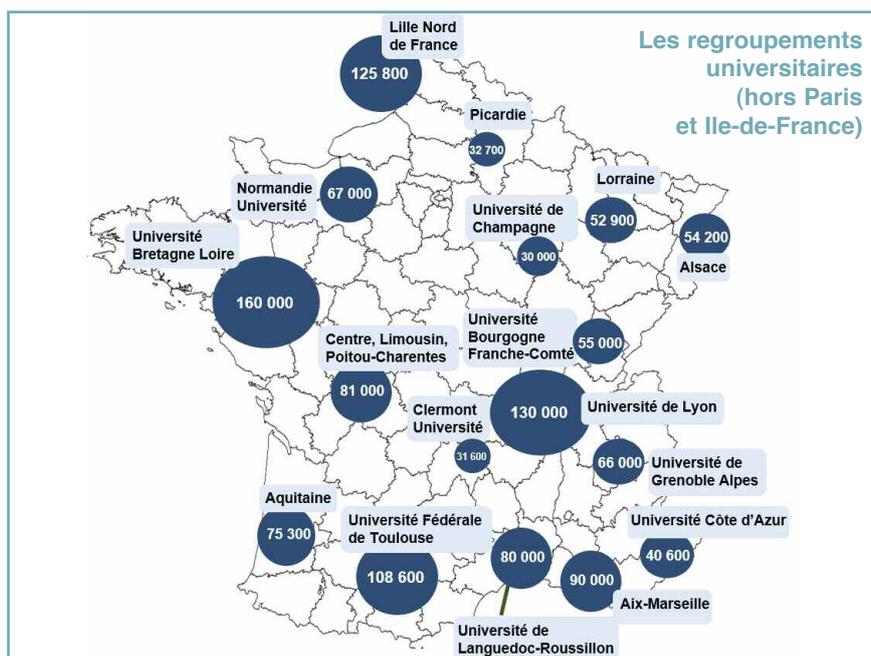
La déesse *Vanadis*, parmi les Vanes, en face du dieu *Thor*, parmi les Ases, symbolisant le *vanadium*, un oligoélément, qui rend l'acier ductile et donne des dérivés de toute beauté, en face du *thorium*, deux fois plus lourd, radioactif, et dont l'oxyde résiste aux très hautes températures... Serait-ce une référence implicite à la philosophie du yin (yin est la terre, la souplesse, le « féminin ») et du yang (yang est le ciel lumineux, la dureté et le « masculin »), à la base de l'alchimie chinoise ?



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

Courriel : pier.avenas@orange.fr

Les COMUE et le financement des universités



Après la loi LRU du précédent gouvernement, qui avait initié les premiers regroupements d'universités sous forme de pôles de recherche et d'enseignement supérieur (PRES), la loi Enseignement Supérieur et Recherche (ESR) de 2013 impose de nouvelles organisations. En fonction de l'article L718-2 du Code de l'éducation, trois modes sont possibles :

- la fusion, qui paraît adaptée à un même site ;
- l'association à un EPCSCP ou à une COMUE (communauté d'universités et d'établissements), ce qui globalement ne change rien ! ;
- la COMUE, qui majoritairement s'établit sur plusieurs sites.

S'y ajoute une application de l'article L718-5 sur l'élaboration de la politique d'accueil et d'amélioration de la vie étudiante avec les œuvres universitaires et scolaires (CROUS).

Les COMUE

Dans le cadre de la loi ESR, des compétences sont transférées touchant à la formation, à la délivrance des diplômes, à la stratégie numérique, aux dispositifs d'orientation, à la recherche, à l'intitulé des publications scientifiques et au transfert de l'innovation.

En ligne de mire des COMUE, la préparation des IDEX (Initiatives d'excellence) – maintenant I-SITE (Initiatives science – innovation – territoires – économie) –, devant répondre au programme national PIA2 (Investissements d'avenir), qui ne représente pourtant que moins de 1 % des moyens financiers des universités.

Dès juillet 2014, les universités devaient déposer les projets de statuts de cette « nouvelle race d'universités ». Suivant la CPU (Conférence des présidents d'universités), le Ministère a prolongé le délai jusqu'en juillet 2015, laissant le temps aux anciens Conseils des PRES d'approuver les nouvelles configurations et aux nouveaux d'entériner les statuts.

À ce jour, quatre fusions sont réalisées, cinq sont sur le point d'être effectives, et 21 COMUE sont en gestation, dont quatre en Île-de-France. Enfin, cinq associations sont programmées pour quelques établissements voulant garder le maximum d'indépendance.

Quelles ont été les motivations du gouvernement en incitant ces regroupements ? « *Nous sommes des pastilles vues de Shanghai* » disait en 2013 Geneviève Fioraso (alors ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche) en faisant allusion à ce célèbre classement. Donner une taille critique pour apparaître dans les classements internationaux est peu

convaincant quand on voit que de « petites » universités américaines trustent le top 10. L'argument du contrat de site qui ancre une communauté dans son territoire paraît plus compréhensible, en dépit du télescopage avec la réforme des grandes régions. La réduction du nombre d'interlocuteurs pour le Ministère est probablement le vrai déterminant, d'autant que les moyens n'arriveront plus directement aux universités mais d'abord à la COMUE.

Le rapport de la cour des comptes

C'est en cette période de mutations qu'est publié par la Cour des comptes fin janvier son rapport sur l'allocation des moyens de l'État aux universités. Il apporte des opinions très contrastées entre l'appréciation nationale globale et les réalités parfois vivement revendiquées sur le terrain. Que dit en effet la Cour ?

Elle constate que les universités ont été largement exonérées des normes de réduction des dépenses publiques. En effet, entre 2008 et 2012, les crédits ont augmenté de 9,6 % pour atteindre 11 milliards d'euros (Md€) en 2012, sans compter les financements extra-budgétaires en forte hausse de 2 Md€. De ce fait, la France a rattrapé les niveaux des pays membres de l'OCDE, avec des dépenses annuelles par étudiant de 12 047 €, à comparer à la moyenne de 10 930 €. La Cour constate également une situation financière globalement équilibrée avec un excédent de 110 M€ et un fond de roulement de 1,5 Md€ fin 2012. De 2007 à 2012, la priorité donnée à l'enseignement supérieur s'est aussi manifestée par une évolution de l'emploi de + 7,8 %, avec cependant une hausse soudaine en 2009 de 7 000 emplois totalement artificielle, car résultat de la comptabilisation des effectifs recrutés sur les ressources propres des établissements dont le Ministère n'avait jusque

Petit lexique du jargon universitaire à usage des non-initiés

ANR :	Agence nationale de la recherche
COMUE :	Communauté d'universités et d'établissements
CPU :	Conférence des présidents d'universités
CROUS :	Centre des œuvres universitaires et scolaires
EPCSCP :	Établissement public à caractère scientifique, culturel et professionnel
FCS :	Fondation de coopération scientifique
LRU :	Loi libertés et responsabilités des universités
PIA :	Programme d'investissements d'avenir
PRES :	Pôle de recherche et d'enseignement supérieur
SATT :	Société d'accélération du transfert de technologie

là qu'une connaissance partielle. La Cour note cependant que 17 universités présentent un déficit en 2012, en soulignant que l'autonomie passe par l'appropriation par les présidents d'universités de leur responsabilité d'ordonnateurs principaux dans un contexte de forte tension sur les finances publiques. Le passage aux responsabilités et compétences élargies (RCE) ayant pu parfois impliquer des décisions de gestion hasardeuses : contrats léonins, augmentations de salaires, primes diverses, non prise en compte pour la masse salariale du glissement vieillesse technicité (GVT)... qui ont conduit par médias interposés en 2014 et mars 2015 à des revendications à l'État providence (Versailles, Montpellier, Aix, Paris Sud...).

Du difficile apprentissage de l'autonomie

C'est une manifestation parmi d'autres de la difficile application par un État centralisateur des principes de l'autonomie, dans un dispositif d'allocation de moyens annualisé et un très faible cadrage pluriannuel. Le Ministère est par ailleurs dans l'incapacité de connaître le niveau réel des ressources des universités. Il est vrai que les multiples opérateurs – universités, PRES, écoles, COMUE... –, la multiplication des sources et guichets – les fondations FCS, l'ANR, l'Europe, les SATT, le CNRS, l'Inserm... –, l'implication des collectivités – communautés urbaines, départements, régions... –, rendent assez kafkaïenne la quête des données ! Sont également montrées du doigt la méconnaissance des crédits associés à la maintenance du patrimoine immobilier et l'identification des bénéficiaires finaux des crédits du programme Investissements d'avenir (PIA). C'est poser d'une autre façon la question de la gouvernance des universités dans un esprit des universitaires et des fonctionnaires ministériels, esprit qui reste essentiellement jacobin. La loi ESR a introduit un Conseil académique avec les compétences d'une « Faculty Governance » au travers des départements et d'une sorte de Sénat académique. Mais il est en concurrence avec un Conseil d'administration à majorité d'élus et il a *in fine* peu d'influence. Tant qu'un Conseil d'administration sera élu, il ne saura être un Conseil exécutif et restera sous la tutelle de l'État avec une délégation de pouvoirs factices. Dans le modèle américain des « States Systems », qui pourraient ressembler aux COMUE, en Californie par exemple, trois systèmes existent dont l'« University of California » avec dix campus

La Nexera UC, un système multifonctions SFE/SFC

Conçue pour améliorer votre productivité, la nouvelle Nexera UC de SHIMADZU est le premier système au monde, associant les techniques d'extraction par fluide supercritique (SFE) et d'analyse par chromatographie en phase supercritique (SFC).

Elle allie, préparation d'échantillons en ligne totalement automatisée, rapidité d'analyse et haute sensibilité de détection. Son process entièrement automatisé, du prétraitement, à la détection, rend possible le traitement de molécules peu stables.

Ce système offre une multitude d'applications dans les secteurs agroalimentaires, de santé et environnemental.

Plusieurs configurations sont disponibles afin de répondre à toutes les demandes d'analyses.



(Berkeley, UCLA, Riverside...) que nous connaissons assez bien. Elle a à sa tête un « Board of Trustees » dont les membres sont nommés par le gouverneur de l'État qui nomme aussi le « chancellor ». Il existe à côté un « Faculty Council ». Un étudiant et le président du Faculty Council peuvent être dans le Board, mais sans droit de vote. Dans les COMUE, la composition des Conseils, malgré des élections qui se feront sans doute dans les plus importantes au suffrage indirect, en respectant au mieux la représentation des établissements composants, les catégories des personnels universitaires et les statuts, est loin de ce modèle. La tradition jacobine française et les traditions plus syndicales que réelles de démocratisation empêchent de promouvoir un vrai Conseil exécutif dont les membres et le président seraient nommés. Il m'apparaît cependant clairement qu'à la suite des dimensions élargies des COMUE, qui pourraient comprendre parfois de quatre à six PRES, leurs directions demanderont des dirigeants et des équipes de direction d'expérience et aguerries en management et gestion pour une stratégie politique. Il leur faudra en effet, sans ajouter une couche au

millefeuille, travailler dans un cadre budgétaire tendu à dynamiser la coopération et la mise en commun de services et de formations d'universités différentes, en chassant les doublons et en mettant en valeur leurs complémentarités et leurs implantations dans des bassins d'activités régionaux.

C'est bien plus en comptant sur la liberté d'action, les compétences et l'imagination en formation et en recherche des universitaires que se bâtissent les visibilités internationales. Loin des 140 000 étudiants de la COMUE Bretagne, des 120 000 de Paris Cité, des 108 000 de l'Université fédérale de Toulouse, Harvard et ses 20 000 étudiants, Yale avec ses 11 000, Cambridge avec ses 16 500 se disputent les premières places des classements internationaux et en font la démonstration : « *Big is noisy and does not work ?* »



Jean-Claude Bernier,
Mars 2015

L'or, un métal paré de mille vertus thérapeutiques

Claude Monneret

L'or, métal précieux, a depuis longtemps été paré de mille vertus thérapeutiques. Dès le VIII^e siècle, Geber, de son vrai nom Jâbir ibn Hayyân, premier alchimiste musulman, lui octroyait le pouvoir d'éloigner la vieillesse, lorsqu'absorbé sous forme de teinture. Un peu plus tard, Avicenne, ou Ibn Sîna, connu pour son ouvrage médical principal, *Le canon de la médecine*, lui accordait le pouvoir de dissiper la tristesse mais aussi la faiblesse de la vue. D'une façon générale, l'or, également appelé Léo, sol et rex metallorum par les alchimistes, était considéré, au même titre que l'argent, comme métal parfait, à l'opposé des fer, cuivre, plomb et étain vif argent. De là le nom de solaire dont ils gratifièrent nombre de médicaments.

Pline l'ancien écrivait dans son *Histoire naturelle* : « Puisque l'or est inaltérable et éternel, il doit pouvoir apporter des grands bienfaits au corps humain. Il suffit de rendre l'or potable pour pouvoir le prendre sous forme de potion et ainsi guérir, voire prolonger la vie. »

L'or en feuilles a été indiqué en applications sur le visage pour prévenir les cicatrices des vérolés, sur le mamelon pour éviter les gergures et sur la saignée comme hémostatique. Les feuilles entraient également dans la composition de nombreuses poudres comme la poudre de joie et la poudre pannonique de Charas, généralement désignées comme cordiales. Ces mêmes feuilles servaient à préparer la poudre d'or qui fut expérimentée contre la syphilis [1].

Au XIII^e siècle, des alchimistes comme Michael Scot, Roger Bacon ou encore Arnould de Villeneuve préconisaient l'or potable afin de prolonger la vie. Selon eux, l'ingestion de cet or potable, un liquide obtenu en versant une huile dans une solution de chlorure d'or, était parée de mille vertus dont celle de demeurer jeune. Selon leur croyance, l'or potable était d'autant plus utile à des fins de rajeunissement qu'il avait été préparé sous les rayons du Soleil et des étoiles dont il peut capter le pouvoir merveilleux. C'est dans le même esprit que le président de la Cour des monnaies, Alexandre de la Tourette, dédia son *Bref discours des admirables vertus de l'or-potable* au roi Henri III [2].

L'une des victimes de l'absorption quotidienne d'une telle potion est, sans nul doute, Diane de Poitiers, la favorite d'Henri II. Selon Brantôme, six mois avant son décès, elle paraissait encore très jeune, comme si elle avait trente ans [3]. Décédée en 1566 à l'âge de 66 ans dans son château d'Anet après avoir été expulsée de la cour de France à la mort du roi en 1559, elle fut inhumée dans la chapelle sépulcrale du

château. Lors de la révolution, le 18 juin 1795, son sarcophage fut profané et son corps, ainsi que celui de ses deux filles mortes en bas-âge (5 et 2 ans), jeté dans une fosse creusée près de l'église. La chevelure de Diane se détacha lors du transfert du corps et les deux membres du comité révolutionnaire se partagèrent des mèches en souvenir, mais le reste de la chevelure fut conservé dans un médaillon dans le château.

En 2010, Philippe Charlier, dont la spécialité est d'établir les circonstances du décès de personnages du passé, a pu établir sans ambiguïté, grâce au taux d'or retrouvé non seulement dans cette chevelure mais également à la surface des os de son squelette exhumé, puis identifié de façon formelle, que Diane était bien décédée d'une intoxication chronique à l'or [4].

Au XVI^e siècle, on portait l'or en amulettes pour chasser la mélancolie et pour se préserver de la lèpre [5].

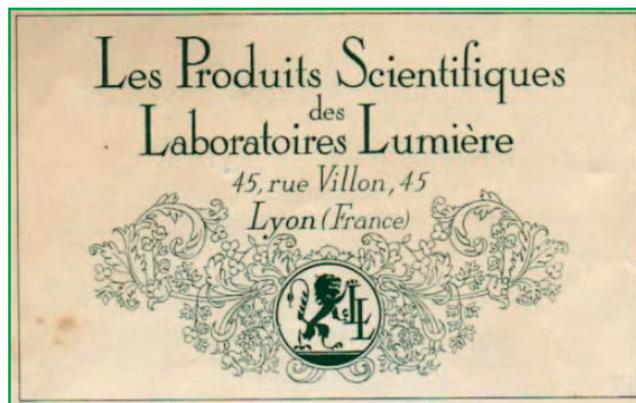
Au XIX^e siècle, le sel d'or(III), $\text{Na}(\text{AuCl}_4)$, était utilisé pour traiter la syphilis, tandis qu'au début du XX^e, la tuberculose devient la cible des sels d'or. Ainsi les Laboratoires Lumière, créés en 1902 à Montplaisir, produisaient entre autres les sels d'or, sous forme d'ampoules injectables fabriquées majoritairement à

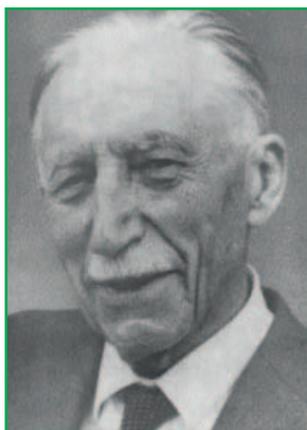
Lyon (60 % du total, 800 000 ampoules par an).

C'est en 1929 que Jacques Forestier, qui s'était déjà illustré avec le Dr Sicard en découvrant les vertus de l'huile d'œillette iodée préparée par Marcel Guerbet et Laurent Lafay, le lipiodol, comme opacifiant [6], découvrit par hasard que les sels d'or étaient efficaces vis-à-vis de la polyarthrite rhumatoïde de l'adulte. En effet, Forestier avait faussement formulé que la polyarthrite rhumatoïde est, dans la plupart des



Diane de Poitiers, victime de l'or potable...





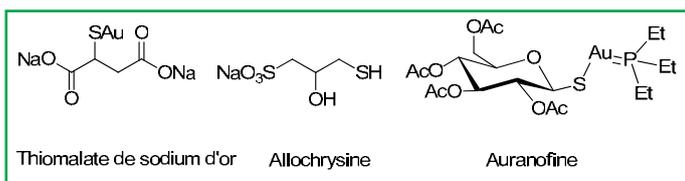
Jacques Forestier (1890-1978).

cas, due à un organisme infectieux, donc susceptible d'être traitée par les sels d'or, comme la tuberculose et la syphilis.

Ainsi, le 1^{er} mars 1929, il rapportait le traitement de la polyarthrite rhumatoïde par l'injection intramusculaire d'un sel d'or, l'allochrysin (un aurothiopropionatesulfonate de sodium à 30 % d'or), à partir de quinze premiers malades, à la tribune de la Société Médicale des Hôpitaux de Paris, résultat qu'il publiait en 1932 dans *The Lancet* [7].

C'est la première fois qu'un traitement se montrait efficace pour améliorer nettement les signes et l'évolution de cette maladie particulièrement invalidante. La méthode se généralisa en Europe, plus difficilement aux États-Unis en raison des accidents cutanés et rénaux possibles.

Une seconde génération de dérivés de l'or apparue en 1975, sous forme d'un sel d'or oral, un dérivé aurothioglyucose, le thio-β-D-(glucopyranosyl)triéthylphosphine-auro-tétracétate, connu sous le nom d'auranofine et dénommé Ridauran® après approbation par la FDA (US Food and Drug Administration).



Dérivés de l'or en thérapeutique.

Les deux composés, allochrysin et auranofine, se disputèrent la vedette pour le traitement de l'arthrite rhumatoïde, avec quelques autres sels comme le thiomalate de sodium. Selon les conclusions de spécialistes, la plus grande efficacité des préparations injectables (thiomalate, allochrysin), associée au fait qu'elles provoquaient des effets secondaires mineurs, les fit préférer à l'auranofine, inductrice d'effets immunosuppresseurs [8].

Ces dérivés de l'or, dont l'efficacité n'apparaissait qu'après quatre à six mois et dont le principal mécanisme d'action reposait sur l'inhibition d'enzymes essentiels pour maintenir le niveau intracellulaire d'espèces oxygénées réactives, provoquant ainsi stress oxydatif et apoptose, virent leur déclin à la fin des années 1980. Jusque-là largement utilisés dans le monde, ils ont été supplantés peu à peu par le méthotrexate. Cet abandon a été renforcé par l'arrivée des anticorps monoclonaux médicaments (MabThéra®, Remicade®, Oencia®, Cimzia®...), utilisés comme traitement de fond de la polyarthrite rhumatoïde, associés à d'autres médicaments plus symptomatiques.

À partir des années 1980, l'auranofine a trouvé un nouvel intérêt dans le domaine du cancer en tant qu'inhibiteur de la thiorédoxine réductase, une enzyme particulièrement indispensable à la croissance cellulaire, et souvent surexprimée dans les cancers [9-10].

Par ailleurs, c'est dans un tout autre domaine qu'est récemment réapparue l'auranofine. Lors d'un criblage de molécules inhibant *in vitro* la croissance d'*Entamoeba histolytica*, des chercheurs californiens ont identifié onze molécules actives, dont l'auranofine [11-12]. Elle exerce une activité amœbicide remarquable, dix fois supérieure à celle du métronidazole, qui est le seul traitement actuel, non dénué d'effets secondaires. Rappelons que ce protozoaire intestinal est l'agent responsable de la dysenterie amibienne qui est très répandue dans les pays en voie de développement dont l'Amérique du Sud, mais aussi d'abcès amibiens du foie.

L'efficacité de l'auranofine a enfin été confirmée *in vivo* dans deux modèles animaux différents. Dans un modèle murin de colite amibienne, l'administration orale d'auranofine pendant une semaine, initiée 24 heures après l'infection, se montre plus efficace qu'un traitement par le métronidazole utilisé à la même dose. Dans un modèle d'abcès amibien du foie sur le hamster, un traitement débuté quatre jours après l'infection se montre également plus efficace que le traitement de référence, tant sur la cinétique de croissance parasitaire que sur l'inflammation délétère développée par l'hôte, ainsi que sur la sévérité des lésions hépatiques.

L'auranofine est également active contre le *Giardia intestinalis* [13], responsable d'une parasitose intestinale, la giardiose ou lambliaïse, dont le taux de fréquence augmente en France, surtout chez l'enfant.

Au vu des résultats encourageants apportés par l'auranofine, en particulier vis-à-vis de l'amibiase, la FDA lui a accordé le statut de médicament orphelin.

Références

- [1] Méral F.V., de Lens A.J., *Dictionnaire universel de matière médicale et de thérapeutique*, vol. 5, 1923.
- [2] de La Tourette A., *Bref discours des admirables vertus de l'or-potable*, P. Roussin, 1575.
- [3] Brantôme, *Vie des dames illustres, françaises et étrangères*, L. Moland (ed.), Garnier Frères, 1868.
- [4] Charlier P. et al., A gold elixir of youth in the XVIth century French court, *Brit. J. Med.*, 2009, 339, p. 5311.
- [5] Androuard A., *Nouveaux éléments de pharmacie*, 5^e éd., Librairie J.-B. Baillière et fils, Paris, 1898.
- [6] Bonnemain B., *Guerbet, une aventure de plus d'un siècle au service de la santé*, Pharmathèmes, 2014.
- [7] Forestier J., The treatment of rheumatoid arthritis with gold salt injection, *The Lancet*, 1932, 220(5705), p. 441.
- [8] Kean W.F., Kean I.R.L., Clinical pharmacology of gold, *Inflammopharmacol.*, 2008, 16, p. 112.
- [9] Simon T.M. et al., Screening trial with the coordinated gold compound auranofin using mouse lymphocytic leukemia P388, *Cancer Res.*, 1981, 41, p. 94.
- [10] Park SH et al., Auranofin displays anticancer activity against ovarian cancer cells through FOXO3 activation independent of p53, *Int. J. Oncol.*, 2014, 45(4), p. 1691.
- [11] Roder C., Thomson M.J., Auranofin: repurposing an old drug for a golden new age, *Drugs in R & D*, 2015, 15(1), p. 13.
- [12] Debnath A. et al., A high-throughput drug screen for *Entamoeba histolytica* identifies a new lead and target, *Nat. Med.*, 2012, 18(6), p. 956.
- [13] Teijman-Yarden N. et al., A reprofiled drug, auranofin, is effective against metronidazole-resistant *Giardia lamblia*, *Antimicrob. Agents Chemother.*, 2013, 57(5), p. 2029.



Claude Monneret

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

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

Histoire d'un laboratoire

Grenoble : du LEDSS au DCM

Agnès Jacquesy

Un parcours de chimistes n'est pas nécessairement un parcours individuel. Il peut aussi refléter la volonté d'un collectif qui s'engage dans une aventure en recherchant hors de ses frontières les apports intellectuels qui l'enrichissent, le font évoluer et lui donnent une reconnaissance nationale et internationale. On voit comment un environnement local investi dans la stratégie scientifique (d'abord en physique et mathématique, puis en chimie, actuellement en santé) a favorisé cet épanouissement, et fait de Grenoble un pôle d'enseignement et de recherche incontournable. En 2014, Grenoble est classée cinquième ville au monde pour l'innovation (classement Forbes).

Au début...

Attiré à Grenoble en 1961 par le physicien Michel Soutif, professeur à l'université, André Rassat, jeune normalien, est accueilli sur un poste de professeur au Département de recherche fondamentale (DRF) du CENG (site CEA de Grenoble). Il le quittera au moment de sa restructuration pour entamer sur le campus universitaire une action fédératrice des équipes locales de chimie organique, et quelques autres, trop petites et dispersées pour être vraiment efficaces (1979). Avec le professeur Jeanne Bonnier, il a été l'initiateur et l'artisan d'un nouveau pôle de chimie français, qui sera rapidement reconnu pour ses performances. Créer une dynamique, construire un projet, penser et organiser une vie scientifique dans un laboratoire créé *ex nihilo* n'est pas chose facile. Un mot a permis de réaliser ce miracle : sélectivité ! Car il s'agissait de marier catalyse hétérogène (Bonnier), marquage nucléaire (Vidal), synthèse(s) et mécanismes, complexations sélectives (Pierre), et jusqu'à chimie théorique. Et ça marchera ! Quelques péripéties, puis le soutien du CNRS est acquis et celui du Conseil scientifique de l'Université Joseph Fourier (UJF), et le LEDSS (Laboratoire d'Études Dynamiques et Structurales de la Sélectivité) est créé. Le regroupement des équipes constitutives sur un site unique, libéré par d'autres laboratoires, s'accompagne de l'emménagement des équipes Luche (sonochimie) et Greene (synthèse organique), puis de l'installation des équipes Rassat (chimie organique physique) et Subra (chimie théorique). Cette unité de lieu, une gageure, sera acquise le 1^{er} avril 1981, et permettra la réussite de l'opération. Et l'on dit que l'Administration ne sait pas prendre de décisions !

Et ensuite

Ayant, grâce à son imagination scientifique, son enthousiasme et sa ténacité, réalisé une performance hors du commun dans un milieu où chacun-chacune défend plutôt son territoire, André Rassat quittera Grenoble en 1985 pour retourner rue d'Ulm. La question de sa succession devient alors un enjeu crucial pour les deux partenaires, université et CNRS, et également pour une Région très impliquée dans le soutien à la recherche. Une composante « biologie » manquait au LEDSS, et après quelques nouvelles péripéties,

la venue de l'équipe de Jean Lhomme (chimie bio-organique, UA CNRS 351, Université de Lille) aurait représenté une opportunité à saisir.

L'UJF menait de longue date une politique de « gel temporaire » des postes vacants de manière à les pourvoir en fonction d'une stratégie scientifique elle-même liée à l'évolution des sciences et des techniques (en 1983, le Ministère généralisait le principe d'une politique de recherche contractualisée, qui exigeait des universités une réflexion stratégique, une évaluation et une programmation). Ainsi put être réalisée une opération exemplaire.

Jean Lhomme et son équipe

L'équipe était constituée d'un professeur (Jean Lhomme), de trois chercheurs CNRS et huit étudiants. Le CNRS, très intéressé par l'opération, a autorisé ses personnels à rejoindre le LEDSS. Un des postes de professeur mis en réserve a été échangé avec l'Université de Lille ; l'UJF a dégagé les locaux nécessaires et payé le déménagement de tous les volontaires pour rejoindre Grenoble. Le plus important, peut-être, a été l'action concertée des autorités pour permettre le déplacement des étudiants de Lille à Grenoble : le Ministère (Joussot-Dubien) a su dégager des compléments de bourse pour chaque thésard et une bourse de thèse pour l'étudiant en DEA. C'est ainsi qu'en septembre 1987, toute l'équipe lilloise de Jean Lhomme (13 personnes et du matériel) s'installe à Grenoble, rapidement complétée par un chercheur recruté sur un poste affiché à cette fin, une pratique originale du Département chimie dans le cadre de sa politique de développement ciblé.

Ce second miracle est lié bien évidemment à la personnalité des acteurs, les membres de l'équipe elle-même et ceux de l'équipe qu'André Rassat laissait au LEDSS, mais aussi au fait que tous les interlocuteurs institutionnels ont pris des engagements et les ont tenus.

C'est à Jean Lhomme lui-même, son charisme, son respect des autres, sa capacité d'écoute et son altruisme que l'on doit, de fait, la convergence de tous ces efforts, sans lesquels il eut été vain d'espérer « réorganiser l'esprit » de chacun, comme le dit la philosophe Claudine Tiercelin, pour fonder une véritable société et pouvoir ainsi fabriquer l'avenir.

Le LEDSS et sa vie scientifique

La réussite du LEDSS, son rayonnement national et international acquis relativement rapidement, tiennent, comme on l'oublie souvent, à la qualité des hommes, à la manière dont ceux qui sont là accueillent ceux qui arrivent et à la manière dont ces derniers se comportent vis-à-vis des premiers. Comme pour le verre à moitié vide ou à moitié plein, les six équipes du LEDSS pouvaient être vues et se voir comme un ensemble artificiel et hétéroclite. Bien au contraire, l'équipe Rassat (RPE, RMN, etc.) a adapté ses techniques et sa pratique à la thématique « biologie » de l'équipe lilloise – éventuellement en allant acquérir une formation complémentaire dans un autre laboratoire français ou étranger. Jeanne Bonnier, devenue directrice par intérim au départ d'André Rassat, a été un élément moteur dans cette approche de partage des compétences dans lequel chacun est gagnant. « *Tous pour un, un pour tous.* »

Le développement du LEDSS s'est poursuivi sur la base des principes posés à sa fondation, avec des équipes et des chercheurs disponibles, stimulés par l'enrichissement mutuel dû aux échanges et leurs retombées mesurables en termes de publications dans des revues internationales de rang A, de notoriété tant individuelle que collective. Dans ce contexte, entretenu par une politique claire avec des objectifs définis en commun, des séminaires, des conférences stimulantes hebdomadaires, une gestion transparente, l'accueil de nouveaux partenaires, de nouvelles thématiques, devenait possible, car la redistribution et la mobilisation de moyens (humains, financiers, locaux...) favorisant l'installation de nouvelles équipes étaient crédibles car déjà réalisées à plusieurs reprises.

Quelques nouveaux qui ont fait carrière

Mais pour que chaque équipe ayant chacune sa thématique particulière mais s'insérant dans la stratégie d'un laboratoire partage des compétences sans arrières-pensées, il faut des personnels intelligents, ouverts au changement et à l'intérêt général... Il faut aussi une pensée attentive aux progrès de la science dans le monde, et la volonté individuelle et collective d'y participer, voire de l'impulser. La réflexion politique sur l'évolution du laboratoire à moyen et long termes devient une priorité et conditionne les recrutements. Et le laboratoire s'y attachera et y mettra de gros moyens – tant en personnels qu'en matériels ! – pour assurer aux nouveaux recrutés la possibilité d'un développement rapide. Ce qui s'avéra justifié et efficace : trois jeunes professeurs recrutés de l'extérieur, tous trois rapidement nommés membres juniors de l'Institut universitaire de France (IUF) !

Le premier à avoir bénéficié de ces possibilités a été un jeune chercheur tout juste revenu de post-doc au Karolinska (Suède), formé à l'étude des métalloprotéines, enzymes ubiquistes dans les processus du vivant. Il deviendra très rapidement membre junior de l'Institut de France. Sollicité, il rejoindra avec son équipe le CENG. Il sera élu membre de l'Académie des sciences, section chimie, puis professeur au Collège de France. Tout le monde aura reconnu Marc Fontecave.

La question suivante posée au laboratoire, et donc à l'UJF et au CNRS, était l'avenir de la catalyse au départ à la retraite de Jeanne Bonnier, et par conséquent du poste libéré. Le maintien de la thématique est retenu, avec passage de la catalyse hétérogène à la catalyse homogène



supportée, en y associant la notion de chiralité. Un jeune Médaille de bronze du CNRS, Yannick Vallée, est tenté par l'expérience et accepte de quitter Caen et de mener une équipe bicéphale avec Jean Court du noyau initial. La greffe prend car les termes de l'accord sont clairs et chacun les respecte. Ce sera un tremplin pour Yannick, comme ce le fut pour Marc. Il sera membre junior de l'IUF, prendra en 1999 la succession de Jean Lhomme à la direction du LEDSS, puis deviendra président de l'UJF avant d'être celui de la Conférence des présidents d'université (CPU). Il prendra à la fin de son mandat la direction d'une nouvelle UFR associant chimie et biologie, dont la création avait été souhaitée par l'UJF.

Durant toute cette période, le LEDSS avait pour « parrain », de même que l'université, le professeur Jacques Reisse de l'Université Libre de Bruxelles (ULB). Il avait été et était toujours membre d'instances d'évaluation et de prospective à Grenoble (laboratoire, « pôle européen » rassemblant universités grenobloises, établissements de recherche, écoles d'ingénieurs, c'est-à-dire toute la force de frappe de la recherche locale, et précurseur ainsi des COMUE – Communautés d'universités et d'établissements – actuelles). Sa notoriété internationale et celle grandissante du LEDSS, jointes à l'amitié liant les deux directeurs, se devaient de se conjuguer pour créer, en 1996, un des premiers LEA (Laboratoire européen associé) du secteur chimie. Créé par le CNRS et le FNRS belge en partenariat avec les universités, il sera dirigé d'abord par ses pères, puis par Fanny Kirsch de l'ULB.

Dans le même esprit d'ouverture à l'international, le laboratoire a joué un rôle pionnier dans l'établissement de relations avec l'Inde. En partenariat avec R. Gree, directeur de recherches CNRS à Rennes, et G. Mehta, alors directeur de l'Indian Institute of Science de Bangalore et président de l'Indian National Science Academy, il a été à l'origine de la création du CEFISO (Centre Franco-Indien de Synthèse Organique) visant à établir un réseau de collaborations entre laboratoires et à favoriser les échanges de chercheurs.

Peu après, en 1998, Pascal Dumy, spécialiste des peptides, formé à Montpellier (il est actuellement directeur de son école de chimie), à l'époque en poste à Lausanne, sera recruté pour une nouvelle ouverture vers la chimie bio-organique, avec la même philosophie, la recherche d'approches scientifiques complémentaires. Sa carrière sera aussi rapide que celle de ses prédécesseurs et il sera rapidement nommé membre junior de l'IUF (2000-2005). En 2007, à son instigation

et à celle d'Alain Deronzier alors directeur du Laboratoire d'Électrochimie Organique et de Photochimie Redox (LEOPR, UMR 5630), les deux laboratoires fusionnent, conduisant à une nouvelle entité prenant la dénomination de Département de chimie moléculaire (DCM, UMR 5250). Il en deviendra le directeur et le restera jusqu'en 2011, lorsque Serge Cosnier, du même laboratoire, lui succédera. Originalité ! La nouvelle équipe était grenobloise, mais d'une thématique *a priori* éloignée, quoique l'évolution du groupe tendait déjà fortement vers l'interface chimie et sciences de la vie et de la santé. La collaboration de Serge Cosnier, membre de l'Academia Europaea, avec le médecin et mathématicien, professeur des universités-praticien hospitalier (PUPH), Philippe Cinquin (robotique chirurgicale) a été célébrée par nombre de journaux l'été 2014. *Le Monde* consacrera une page entière aux biopiles miniaturisables à base de glucose et d'oxygène.

Et l'industrie aussi...

Parmi les nombreuses interactions avec le monde de l'industrie nouées tout au long de la vie du laboratoire, quelques points émergent.

La contribution de l'équipe de synthèse de produits naturels d'Andrew Greene (Médaille d'argent du CNRS), collaborant avec celle de Pierre Potier de l'Institut de Chimie des Substances Naturelles (ICSN, CNRS, Gif-sur-Yvette), à la synthèse – industrialisée par Rhône Poulenc – du Taxotère®, anticancéreux majeur toujours très utilisé, a permis de faire bénéficier aussi bien le laboratoire que l'université et le CNRS de royalties conséquentes durant une quinzaine d'années.

Michel Vidal, responsable d'une des équipes fondatrices du LEDDS, spécialiste des marqueurs biomédicaux et de médecine nucléaire, était fréquemment sollicité pour faire bénéficier de ses compétences de nombreux laboratoires, notamment du secteur hospitalier. Soutenu par l'UJF, il avait créé un premier groupement d'enseignement et de recherche, le GERMAB, qui s'élargira sous l'égide du CNRS pour devenir le Club français des radiopharmaceutiques, toujours actif et organisant des séminaires pour les CHU, les laboratoires de chimie et de pharmacie et les cyclotrons médicaux. Une option sur le sujet a été créée dans le DEA national porté par l'Université Paris XI. En 1991, il crée avec son fils la

société ERAS Labo (Expertise, recherche, analyse, synthèse). Forte de dix permanents, accueillant de nombreux stagiaires, elle prépare des molécules organiques, précurseurs de radiopharmaceutiques utilisés en scintigraphie, pour le diagnostic et en thérapeutique. Elle se diversifie actuellement.

Conclusion

La volonté des établissements universitaires et organismes de recherche, aidés par la Région Rhône-Alpes, a eu un rôle majeur dans le développement du laboratoire et de son environnement. Les créations de plates-formes techniques et scientifiques se sont multipliées au fur et mesure des apports intellectuels, qu'il s'agisse spécifiquement de celles du laboratoire (chimiothèque, RPE, microanalyse organique...) ouvertes aux autres laboratoires ou de celles relevant des consortia mis en place avec d'autres laboratoires du site (RMN, RX, moyens de calcul, spectrométrie de masse...). À noter que le Centre d'études nucléaires de Grenoble (CENG) a été un partenaire essentiel dans cette politique active de mise en place de moyens communs lourds. Ces réalisations ont conforté le sens de l'intérêt de l'individu au service de sa communauté.

En termes de gouvernance, de capacité à se renouveler sur le plan des organisations au service du développement d'une stratégie scientifique, elles peuvent, pour certaines, paraître aller de soi. Elles le sont parfois devenues, et c'est tant mieux. Les atouts du laboratoire et sa trajectoire au cours de trois décennies, ainsi que celles de ses personnels, résultent d'une connivence, classique à Grenoble, entre tous les acteurs locaux et nationaux. Les personnalités, notamment à la présidence de l'UJF, comme Alain Nemoz, toujours actif, ont été déterminantes dans cette réussite, et ont souvent servi d'exemple à d'autres niveaux de responsabilité.

Les derniers succès du laboratoire, obtenus dans des domaines aussi différents que la synthèse organique (la doctorante Pauline Rullière, lauréate de la bourse l'Oréal-UNESCO « Pour les femmes et la science ») et l'électrochimie organique (les biopiles à glucose), reflètent à la fois l'histoire du laboratoire et ses perspectives d'avenir.

Quant au pôle grenoblois d'innovation nanobiotechnologique « Nanobio », qui doit tant au DCM, c'est encore une autre histoire...



La couleur, un enseignement transdisciplinaire

Nathalie Blanc, Geneviève Canicave, Edith Amadéi-Giuseppi,
Danielle Cachau-Herreillat, Maurice Comtat, Katia Fajerweg et Florence Boulc'h



Les 30^e JIREC se sont déroulées au bord de la Méditerranée à Carry-le-Rouet. Photo : G. Canicave, DR.



Ces journées ont regroupé 130 enseignants de l'enseignement secondaire et supérieur. Photo : G. Canicave, DR.

Les 30^e JIREC

Les 30^e Journées de l'innovation et de la recherche pour l'enseignement de la chimie (JIREC) se sont déroulées à Carry-le-Rouet, entre Marseille et la Camargue, du 25 au 28 mars 2014. Elles ont réuni 130 personnes dont 50 enseignants du secondaire présents grâce aux plans académique et national de formation. La journée de mercredi a été de plus retransmise, grâce au Comité Ambition Chimie et à l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie (UdPPC), dans douze académies, permettant ainsi à 140 personnes de participer à distance à ces journées.

Le thème de la couleur Recherche pour un nouvel enseignement de la chimie

Les cours de chimie constituent au lycée et à l'université une source de difficultés pour de nombreux élèves et



Jean-Marc Pons (directeur de l'UFR Sciences de l'Université d'Aix-Marseille), Pierre Rigat (IA-IPR de l'Académie d'Aix-Marseille), Marie-Blanche Mauhourat (inspectrice générale de l'Éducation nationale), Jean-Charles Mouguel (président de la division SCF Enseignement-Formation) et Philippe Knauth (président de la section régionale de la SCF) ont ouvert ces 30^e JIREC. Photo : G. Canicave, DR.

étudiants. Lors des JIREC organisées en 2009 à Mulhouse, Mireille Houart nous avait exposé le fait que l'une de ces difficultés est transversale [1]; il s'agit des passages omniprésents entre les trois niveaux de savoir : macroscopique, microscopique et symbolique. Établir les liens entre les trois niveaux de savoir n'est ni évident ni automatique pour les étudiants, alors que cette démarche constituerait une condition pour une compréhension en profondeur des concepts clés en chimie. Au cours des années 1990, Gabel et Johnstone avaient vivement interpellé la communauté des enseignants de chimie à ce sujet en développant le triangle des niveaux de savoir [2-3] (figure 1). Les recherches en didactique encourageaient ainsi vivement les enseignants de chimie à équilibrer leurs cours entre le niveau macroscopique et le niveau symbolique, à savoir entre une approche descriptive et un développement théorique. Cependant, le triangle développé par Johnstone et Gabel souligne-t-il suffisamment les changements que nous devons apporter à notre enseignement pour aider les étudiants à comprendre les cours de chimie et pour ainsi les motiver à nouveau à s'orienter vers des études scientifiques ? Mahaffy affirme le contraire et soutient que les enseignants de chimie doivent mettre l'accent sur une nouvelle dimension au sein de leurs cours [4]. Il a proposé d'étendre le triangle des niveaux de savoir à un tétraèdre, où le quatrième sommet, nommé l'*élément humain*, représente l'ensemble des contextes humains nécessaires pour apprendre la chimie (figure 1).

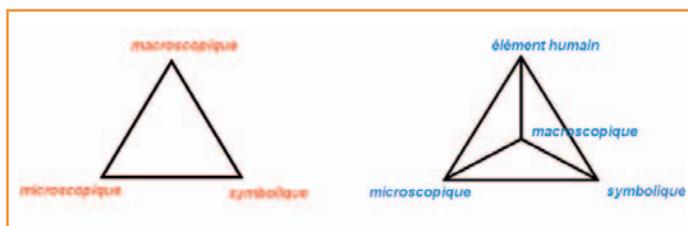


Figure 1 - Au cours des années 1990, Johnstone et Gabel ont développé ce triangle (à gauche) afin de mettre en évidence les trois niveaux de savoir présents au sein d'un enseignement de chimie. En 2006, Mahaffy ajoute au triangle de Johnstone et Gabel une quatrième dimension qu'il nomme *élément humain* (à droite).

À travers cet *élément humain*, Mahaffy souhaite mettre l'accent sur deux nouvelles dimensions de l'enseignement de la chimie. Il s'agit d'une part des changements fondamentaux des contours de la chimie définis maintenant par de nouvelles interfaces et de nouveaux domaines de recherche, d'autre part des changements dans notre compréhension de la façon dont les élèves apprennent. Ainsi, il souhaite sensibiliser les enseignants aux connaissances sociales, historiques, philosophiques et artistiques qui sont liées à notre compréhension des concepts chimiques que nous enseignons aux étudiants. Au sein de son article, Mahaffy illustre l'enseignement tétraédrique de la chimie à partir de différents exemples : la chimie moteur de la vie moderne ; la chimie de notre écosystème planétaire ; les chimistes créateurs ; la chimie de la vie. Dans ce contexte, nous avons choisi de centrer ces JIREC sur l'enseignement de la chimie de la couleur. En effet, la couleur est par essence une notion transdisciplinaire. Enseigner la couleur implique donc de permettre le dialogue entre différentes disciplines et de mettre en évidence l'apport mutuel de la physique, de l'histoire, de la philosophie et des arts à la compréhension de la nature chimique de la couleur.

30^e JIREC : programme des conférences et des échanges pédagogiques

Les conférences suivies d'un astérisque* font l'objet d'une contribution dans ce numéro. Plusieurs d'entre elles sont disponibles sur le site de la Société Chimique de France (www.societechimiquedefrance.fr/1/enseignement-formation.html).

Conférences thématiques

*La genèse des couleurs : dialogue lumière matière**, par Bernard Valeur (Conservatoire des Arts et Métiers, Paris).

*Comprendre le geste du peintre dans son atelier : approches croisées entre chimie et histoire de l'art**, par Philippe Walter (Université Pierre et Marie Curie).

*La couleur des verres et des céramiques : comment jouer avec le feu et la lumière pour colorer les verres et les céramiques**, par Jacques Livage (Collège de France).

Bleu(s), blue(s), chimie, art et société, par Michel Verdaguer (Université Pierre et Marie Curie) (article à venir).

La couleur des pierres, par Bertrand Devouard (Université d'Aix-Marseille).

Innovations et échanges pédagogiques

*Le recours à l'histoire dans l'enseignement des sciences : exemple des couleurs de l'arc-en-ciel**, par Olivier Morizot et Philippe Abgrall (Université d'Aix-Marseille).

*Introduction à la chimie inorganique : théorie du champ cristallin ou théorie des orbitales moléculaires ?**, par François Volatron (Université Pierre et Marie Curie).

L'apprentissage par problèmes : sensibilisation et partage d'expériences, par Aurélien Maurel-Pantel et Juliette Payan (Université d'Aix-Marseille).

*Des environnements numériques pour encadrer la résolution de problèmes expérimentaux et la conception d'expérimentations**, par Isabelle Girault (Université Joseph Fourier Grenoble).

*Enseigner la chimie organique : pour qui, pourquoi et comment ?**, par Xavier Bataille (ENCBP, Paris).

*Les dispositifs de promotion de la réussite en 1^{ère} année à l'Université de Namur**, par Valérie Wathélet (Université de Namur).

*Chimie et couleurs de l'huile d'olive**, par Nathalie Blanc et Geneviève Canicave (Lycée Jean Perrin Marseille).

*Les orbitales moléculaires avec OrbiMol**, par François Volatron, Bénédicte de Bonneval et Patrick Chaquin (Université Pierre et Marie Curie/Université Toulouse III-Paul Sabatier).

Conférences nocturnes

*Les scientifiques provençaux**, par Maurice Comtat (Université Toulouse III-Paul Sabatier).

Couleur et musique : de la synesthésie à l'expression artistique, par Bernard Valeur (Conservatoire des Arts et Métiers, Paris).

• www.jirec.fr

De plus, à travers la notion d'*élément humain*, Mahaffy interroge les enseignants à propos de leurs approches pédagogiques. Fort des recherches récentes en didactique de la chimie, il met ici l'accent sur les apprentissages actifs tels que les études de cas, les apprentissages par projets et les résolutions de problèmes. Ainsi, ce tétraèdre symbolise un enseignement qui situe les substances chimiques, les concepts microscopiques et les représentations symboliques dans le contexte authentique des êtres humains qui créent ces substances, de la culture qui les utilise et de l'étudiant qui tente de les comprendre. Cette nouvelle représentation à quatre dimensions nous aide à concevoir un enseignement intégrant le contenu et le contexte, au lieu de mettre l'accent sur l'un au détriment de l'autre.



L'ensemble des conférences a retenu l'attention des participants.
Photo : G. Canicave, DR.

Les conférences thématiques

Bernard Valeur a introduit ces journées en présentant des éléments essentiels du dialogue qui existe entre la lumière et la matière afin de distinguer les couleurs qui sont intimement liées à la nature chimique des objets (pigments, colorants, matériaux luminescents) et celles qui résultent de phénomènes physiques (couleurs par dispersion, par diffusion, par interférences et par diffraction) [5]. Philippe Walter nous a ensuite démontré à quel point associer sciences et histoire de l'art ouvrait des horizons nouveaux quant à la compréhension des œuvres et des artistes [6]. En effet, l'étude physico-chimique de la Joconde a permis d'analyser la manière singulière dont Léonard de Vinci utilisait la technique de *sfumato* [7]. Enfin, Jacques Livage nous a exposé le parallèle qui existe entre l'histoire du verre et de la céramique et l'évolution de la société. Sa démonstration s'étendait depuis le Paléolithique par l'étude des couleurs des fresques de Lascaux jusqu'au XXI^e siècle en référence aux verres dits intelligents. Nous souhaitons ici, à travers ces conférences et en écho à l'*élément humain* développé par Mahaffy, souligner l'apport de disciplines telles que la physique, l'histoire de l'art et la sociologie à la compréhension de notions propres à notre discipline.

Les innovations et les échanges pédagogiques

Parallèlement à ces conférences thématiques et en écho aux propos de Mahaffy, nous avons donné une large place aux innovations pédagogiques au sein de ces journées en tentant de répondre aux questions suivantes :

- L'introduction à la chimie inorganique : théorie du champ cristallin ou théorie des orbitales moléculaires ?
- Pourquoi recourir à l'histoire dans l'enseignement des sciences ?
- Pouvons-nous résoudre des problèmes expérimentaux par des environnements numériques ?
- Comment promouvoir la réussite en première année universitaire ?

Ces conférences ont été suivies d'ateliers d'échanges pédagogiques afin de mettre en évidence les difficultés rencontrées lors de la mise en place de ces enseignements et de présenter des ressources sur ces sujets. Vous trouverez dans les pages suivantes une description succincte des idées développées au sein de ces ateliers.

Les ateliers expérimentaux

Nous avons fait de ces journées un temps fort de partage d'activités expérimentales centrées sur la couleur. À cet effet, une salle était dédiée aux participants désireux de présenter des démonstrations expérimentales, de manipuler et d'assister à des manipulations destinées aux travaux

Le prix de la division SCF Enseignement-Formation

Le prix 2014 a été attribué à **Jacques Livage**, un pionnier dans le domaine de la chimie douce. Ses travaux ont notamment pour but de s'inspirer des procédés de biominéralisation afin d'obtenir des matériaux de type verre dans des conditions particulièrement douces par rapport aux procédés classiques d'obtention. Ses contributions à l'enseignement sont également importantes. À la fin des années 1970, il fonde, avec Jean Rouxel, l'École d'été Galerne consacrée à la chimie douce, puis crée la filière Matériaux à Jussieu. En 2001, nommé professeur au Collège de France sur la chaire de la matière condensée, Jacques Livage présente de nombreuses conférences, dont une série sur le thème de la couleur.



Le prix de la division SCF Enseignement-Formation 2014 remis à Jacques Livage par Patrick Chaquin et Jean-Charles Mougengel (photo : G. Canicave, DR).

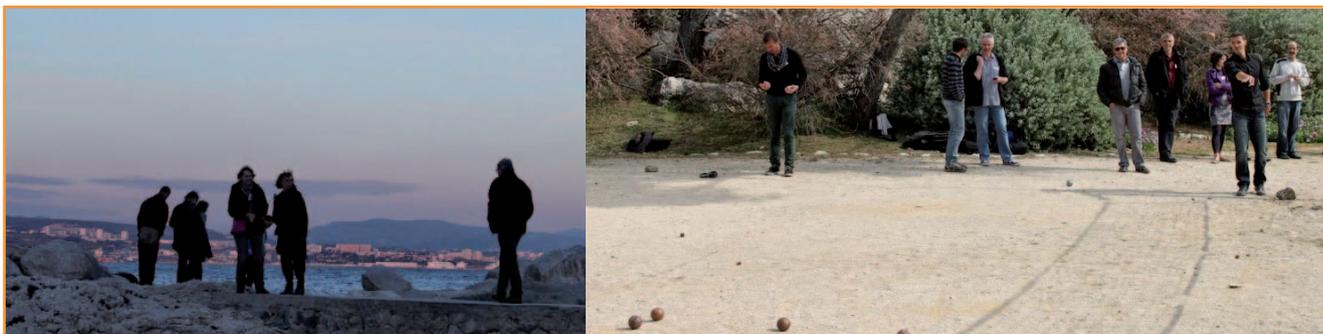
pratiques. Chacune de ces expériences est brièvement décrite dans les pages suivantes. Les fiches détaillées de ces ateliers seront prochainement publiées dans le *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie (Le Bup)*.

La table ronde

Enfin, les journées se sont conclues par une table ronde centrée sur les MOOC (« massive open online course », ou cours en ligne ouvert à tous). En effet, le développement des réseaux de communication offre aujourd'hui des formations ouvertes au plus grand nombre. Ainsi, des formations en ligne basées sur des vidéos, des recommandations de lecture et des tests de positionnement permettent aux apprenants, outre l'accès à ces ressources, de partager et

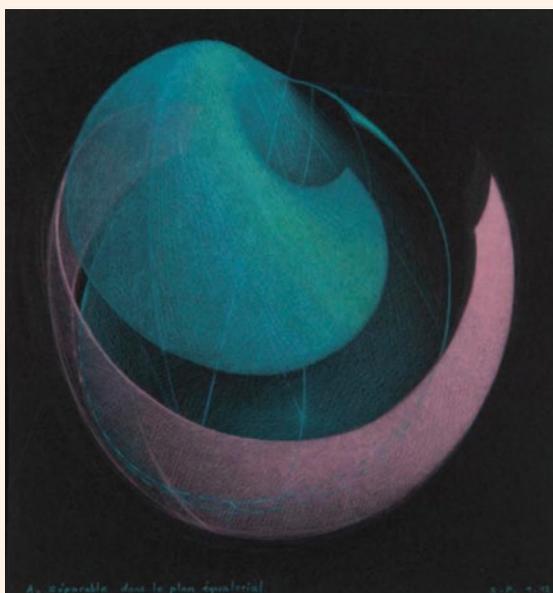


Tout au long de ces journées, une salle était dédiée aux participants désireux de présenter des démonstrations expérimentales et d'assister à des manipulations. Photo : G. Canicave, DR.



Les JIREC sont depuis leur création caractérisées par des moments de convivialité et d'animation qui permettent aussi de nombreuses discussions relatives à l'enseignement entre les participants. Photo : G. Canicave, DR.

L'affiche des JIREC



Série *The Myth of Interiority (A)/Séparable (1)*.
Crayons de couleurs sur papier noir, 28 x 29 cm, 2012.
Collection Galerie Sintitulo, Mougins (photo : Claude Almodovar, DR).

L'affiche des JIREC a été réalisée à partir d'un tableau de Sylvie Pic à propos duquel l'artiste écrit ces quelques lignes : « *Dans mon travail, à part des bleus profonds et des bruns denses, j'utilise très peu la couleur, mon souci fondamental étant la forme. Celle qui apparaît sur ce dessin, que j'ai baptisée Möbius' shell, n'est qu'une extension du célèbre anneau de Möbius et topologiquement identique à lui. La fonction de la couleur est ici analytique : vert et rose presque complémentaires servent à faire ressortir la bande de Möbius qui structure la forme. Enlever cette bande (rose) ne sépare pas le reste de la forme (verte) en deux morceaux. Parce qu'elle est unilatère, elle reste continue.* »

d'échanger au sein d'une communauté pour construire leur savoir. Cependant, cette approche pédagogique soulève de nombreuses questions. Nous vous invitons à lire dans les pages suivantes les propos de Patrice Thiriet à ce sujet en tant que responsable du MOOC FOVEA de l'Université Claude Bernard de Lyon.

La présentation de ces journées ne serait pas complète sans l'évocation de leur convivialité, à l'image de l'apéritif

Le thème de la couleur et la licence « Sciences et Humanités »

Nous avons choisi le thème de la couleur en écho à l'unité d'enseignement *Optique, Vision, Couleurs* développée au sein de la licence Sciences et Humanités mise en place à l'Université d'Aix-Marseille en septembre 2012 [8-11].



Ce tableau a été réalisé par Lucie Muller dans le cadre de ce cours qui se déroule en trois temps avec :

- une approche historico-sociologique de la couleur bleue qui a pour objectif de mettre en lumière comment une couleur est une construction sociale et culturelle ;
- une approche historico-chimique des pigments bleus à l'issue de laquelle les étudiants conçoivent un protocole expérimental destiné à préparer un pigment ;
- une approche artistique dans l'idée d'utiliser ces pigments et d'expérimenter la matérialité de la couleur.

Le tableau de Laura Beullier a été choisi pour réaliser la couverture de ce numéro.

provençal, du concours de pétanque et de la soirée dans la calanque de Niolon.

À l'heure où nous mettons ce numéro en page, les JIREC 2015 « Parler, écrire, communiquer, formuler sa pensée en chimie » viennent de se terminer et donneront lieu à un nouveau numéro.

Les prochaines Journées pour l'Innovation et la Recherche dans l'Enseignement de la Chimie (JIREC 2016)

se dérouleront à Lyon **du lundi 11 janvier à 19 h au jeudi 14 janvier 2016 à 13 h.**

Le fil conducteur de ces **JIREC 2016** est centré sur la thématique « **Chimies et vérités** ». Seront ainsi abordées les problématiques pédagogiques liées à l'incertitude de mesure, la notion de modèle en chimie, la vulgarisation scientifique, la simulation, rassemblant des réflexions allant des sciences dures aux sciences humaines.

Remerciements

Florence Boulc'h remercie très chaleureusement Geneviève Canicave, Nathalie Blanc et Edith Amadéi pour leur aide précieuse à l'organisation de ces JIREC. De même, elle remercie très amicalement Danielle Cachau-Herreillat et Maurice Comtat pour la touche personnelle qu'ils ont su apporter à ces journées. Elle dédie cet article à Françoise Rouquerol qui l'amenait, voilà déjà dix ans, à ces premières journées.

Les auteurs remercient la division SCF Enseignement-Formation pour son engagement dans la réussite de ces journées et tout particulièrement Bénédicte de Bonneval, Patrick Chaquin, Jérôme Randon, Marie Guitou et Gilberte Chambaud. Ils remercient également l'Université d'Aix-Marseille et les sociétés Bruker, De Boeck et Dunod pour leur soutien financier, ainsi que les rapporteurs des différents articles pour leurs commentaires et suggestions, et enfin l'ensemble des participants et des conférenciers pour leur contribution à la réussite de ces journées.

Références

- [1] Houart M., La communication pédagogique en cours magistral de chimie : peut-on améliorer son efficacité ?, *L'Act. Chim.*, **2010**, 341, p. 29.
- [2] Johnstone A.H., Thinking about thinking, *Intl. J. Chem. Educ.*, **1991**, 36, p. 7.
- [3] Gabel D., Use of the particle nature of matter in developing conceptual understanding, *J. Chem. Educ.*, **1993**, 70, p. 193.
- [4] Mahaffy P., Moving chemistry education into 3D: a tetrahedral metaphor for understanding chemistry. Union Carbide Award for chemical Education, *J. Chem. Educ.*, **2006**, 83, p. 49.
- [5] Valeur B., *La couleur dans tous ses éclats*, Belin, **2011**.
- [6] *La chimie et l'art. Le génie au service de l'homme*, M.-T. Dinh-Audouin, R.A. Jacquesy, D. Olivier, P. Rigny (coord.), EDP Sciences, Collection L'Actualité Chimique-Livres, **2010**.

- [7] Walter P., Cardinali F., *L'Art-Chimie, Enquête dans le laboratoire des artistes*, Éditions Michel de Maule/Fondation de la Maison de la Chimie, Paris, **2013**.
- [8] <http://licencesh.hypotheses.org>
- [9] Boulc'h F., Andrieux M., Morizot O., Audureau E., Anglade M., Hagel G., La transdisciplinarité ou l'art d'enseigner la chimie du bleu, *L'Act. Chim.*, **2013**, 374, p. 30.
- [10] Boulc'h F., Briend J.Y., Enseigner la chimie de manière créative, *L'Act. Chim.*, **2014**, 385, p. 18.
- [11] Morizot O., Audureau E., Briend J.Y., Hagel G., Boulc'h F., Introducing the *human element* in chemistry by synthesizing blue pigments and creating cyanotypes in a first-year chemistry course, *J. Chem. Educ.*, **2015**, 92(1), p. 74.



N. Blanc



G. Canicave



E. Amadéi-Giuseppi



D. Cachau-Herreillat



M. Comtat



K. Fajerweg



F. Boulc'h

Nathalie Blanc et **Geneviève Canicave** sont enseignantes, **Edith Amadéi-Giuseppi**, agrégée de chimie (BTS chimie), au lycée Jean Perrin de Marseille¹.

Danielle Cachau-Herreillat est maître de conférences retraitée de l'Université de Montpellier II².

Maurice Comtat est professeur émérite, Laboratoire de Génie chimique, Université Toulouse III-Paul Sabatier³.

Katia Fajerweg est maître de conférences au Laboratoire de Chimie de Coordination (LCC), Université Toulouse III-Paul Sabatier⁴. 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 ».

Florence Boulc'h (*auteur correspondant*) est maître de conférences au Laboratoire MaDiREL, Université d'Aix-Marseille⁵. Elle était responsable de l'organisation des JIREC 2014.

¹ Lycée Jean Perrin, 74 rue Verdillon, F-13010 Marseille.

Courriels : nathalie.blanc@ac-aix-marseille.fr ; canicavegenevieve@yahoo.fr ; edithamadei@gmail.com

² Courriel : d.cachau@aliceadsl.fr

³ Laboratoire de Génie chimique, Université Paul Sabatier, 118 route de Narbonne, F-31062 Toulouse.

Courriel : comtat@chimie.ups-tlse.fr

⁴ LCC CNRS, 205 route de Narbonne, F-31077 Toulouse.

Courriel : katia.fajerweg@lcc-toulouse.fr

⁵ Université d'Aix-Marseille, Laboratoire MaDiREL, UMR 7246, Avenue Escadrille Normandie Niemen, F-13397 Marseille.

Courriel : florence.boulch@univ-amu.fr

Échanges pédagogiques

Comment enseigner la chimie organique ?

Atelier animé par **Xavier Bataille**

Compte-rendu rédigé par *Émilie Ramel, Marie Guitou et Xavier Bataille*

L'atelier a été réalisé à la suite de la conférence de Xavier Bataille « Enseigner la chimie organique : pour qui, pour()quoi et comment ? ». Il s'inscrit dans la continuité de la réflexion amorcée par David Lafarge au cours des JIREC 2013 proposant une nouvelle approche de cet enseignement souvent mal perçu par les étudiants [1-2]. Lors de cet atelier, Xavier Bataille a présenté notamment les grandes lignes d'une progression sur deux ans, qui résulte d'un travail d'équipe mis en place en BTS-chimiste à l'ENCPB (Paris).

En accord avec l'idée de proposer des chapitres courts, introduisant en quantité limitée des concepts et du vocabulaire nouveaux, la première année se découpe en 18 chapitres axés autour des thèmes suivants :

- Identification d'espèces chimiques et représentation des molécules ; relation entre la structure et les propriétés physiques et spectroscopiques.
- La synthèse organique : découverte et stratégie.
- La synthèse organique : modélisation des transformations.
- La stéréochimie.

Dans la partie synthèse organique, sont introduits les mécanismes réactionnels sur des exemples de réactions simples à partir de l'exploitation de documents historiques traitant du marquage isotopique par exemple. Le lien est aussi fait avec l'aspect expérimental en proposant aux étudiants une réflexion sur de vrais extraits de protocole, issus de publications ou de travaux pratiques et illustrant chaque réaction. La stéréochimie, plus algorithmique que chimique, est traditionnellement présentée aux élèves beaucoup plus tôt dans le cursus. Le positionnement choisi ici permet de revenir sur certaines notions et de les compléter pour faciliter leur assimilation et illustre bien l'apprentissage *en spirale*.

La deuxième année, une progression plus classique est suivie :

- contrôle de la réactivité des espèces à liaisons C-C multiples,
- contrôle de la réactivité du groupe carbonyle,
- contrôle de la réactivité des amines,
- découverte de la chimie du vivant.

Cette progression est complétée par un outil proposé par David Lafarge, la *réactionthèque* [2], qui récapitule chronologiquement les réactions vues tout au long de la formation en précisant leur nom, l'équation ou le schéma de la synthèse, la catégorie, le mécanisme, ainsi que différentes informations importantes du point de vue expérimental ou de la stéréochimie. Construite par les élèves (avec l'aide du professeur dans un premier temps) et complétée au fur et à mesure de l'avancement du programme, elle peut être autorisée comme document lors de certaines évaluations et constitue un véritable repère pour les étudiants.

La conclusion nous incite à oser revoir nos pratiques, accepter de voir disparaître la chimie organique que l'on a connue au profit d'une formation modernisée adaptée aux compétences dont auront besoin les chimistes que nous formons pour s'adapter au mieux aux changements et construire la recherche et l'industrie de demain.

• Contact : xavierbataille@free.fr

Références

- [1] Lafarge D., L'actuel défi de la chimie organique : son enseignement, *L'Act. Chim.*, **2014**, 385, p. 21.
- [2] Lafarge D., Morge L., Méheut L., A new higher education curriculum in organic chemistry: what questions should be asked?, *J. Chem. Educ.*, **2014**, 91(2), p. 173.

Les dispositifs de promotion de la réussite en 1^{ère} année à l'Université de Namur

Atelier animé par **Valérie Wathelet**

Compte-rendu rédigé par *Bénédicte de Bonneval et Valérie Wathelet*

De nombreux facteurs influent sur la réussite de l'étudiant :

- les variables d'entrée de chacun (caractéristiques sociodémographiques, psychologiques ou pré-acquis de connaissances) ;
- son parcours universitaire (conditions de vie, représentation et conception de ses études, de son métier d'étudiant ou de ses expériences pédagogiques) [1].

À l'Université de Namur, la promotion de la réussite passe par la mise en place de dispositifs jouant sur trois

facteurs clés de la réussite au moment de la transition entre l'enseignement secondaire et l'enseignement supérieur.

Questions d'orientation : la formation Rebond

La formation Rebond, initiée depuis plus de dix ans, est mise en place de février à juin et s'adresse à des étudiants volontaires ayant interrompu leurs études tôt dans l'année [2]. Elle consiste en des activités collectives et l'accompagnement individuel autour de trois axes :

- le développement de nouveaux projets de formation et/ou professionnels,
- le renforcement des compétences du métier d'étudiant,
- l'étude de contenus de niveau supérieur.

Pour aider à l'orientation en tant qu'enseignant, il est important de toujours être facteur d'espoir, être témoin de son parcours, de donner des informations aux jeunes sur leurs compétences en contexte scolaire, d'inviter les jeunes à être curieux sur le monde qui les entoure, et d'éviter de notre part de se projeter dans leur projet. L'enseignant a auprès des étudiants un rôle déterminant tant sur les informations que sur l'aspect humain, leur permettant alors de prendre conscience de leur potentiel.

Méthodes de travail

Le service de pédagogie propose aux étudiants d'approfondir/affiner leurs méthodes de travail *via* des séminaires de méthodologie du travail universitaire, de l'accompagnement à distance et de l'accompagnement individuel [3]. Sont par exemple abordés :

- la découverte des outils (les avantages d'un plan, tableau, fiche, schéma, carte conceptuelle pour la compréhension et la mémorisation) ;
- la prise efficace de notes (elles doivent être complètes, correctes, compactes, structurées, comprises) ;
- la gestion de son temps ;
- la mémorisation et pièges à éviter.

Prérequis : le projet Passeports pour le bac

La maîtrise des connaissances et des compétences de base influe sur la réussite académique. Le projet *Passeports pour le bac*⁽¹⁾ permet aux étudiants de mesurer leur maîtrise des prérequis et d'y remédier très tôt dans l'année académique [4-5]. Il consiste en une triple action : tout d'abord l'identification des prérequis, la mesure de leur maîtrise par les étudiants, et enfin la mise en place d'adaptations et de remédiations. Les enseignants reçoivent les résultats globaux de leurs étudiants leur permettant de connaître le niveau des connaissances et des compétences et éventuellement d'adapter leur enseignement.

- Contact : valerie.wathelet@unamur.be

Note et références

- (1) Le projet est mené au sein de trois universités (UNamur, USL à Bruxelles et UCL à Louvain-la-Neuve).
- [1] Romainville M., *Réussite, échec et abandon dans l'enseignement supérieur*, De Boeck, 2012.
- [2] Formation Rebond (projet interétablissement du pôle académique de Namur) : www.poledenamur.be/aide-reussite/rebond
- [3] Méthodes d'études : www.unamur.be/det/spu/aides-etudiants
- [4] Passeports pour le bac : www.passeportspourlebac.be
- [5] Wathelet V., Dontaine M., Que savent et savent faire les élèves à la sortie du secondaire en regard de ce qui est attendu à l'entrée de l'université ? *L'Act. Chim.*, 2014, 385, p. 30.

Les orbitales moléculaires avec OrbiMol

Atelier animé par **François Volatron**, **Bénédicte de Bonneval** et **Patrick Chaquin**
Compte-rendu rédigé par *Patrick Chaquin*

Les nouveaux programmes des classes préparatoires prévoient l'utilisation des orbitales dans l'enseignement de la chimie, sans se préoccuper des méthodes de leur calcul. De même, dans l'enseignement universitaire, on préconise de plus en plus souvent une utilisation pragmatique précoce des orbitales, avant d'aborder la chimie quantique proprement dite. Il est donc utile de disposer d'une base d'orbitales, lesquelles deviennent une donnée moléculaire parmi d'autres.

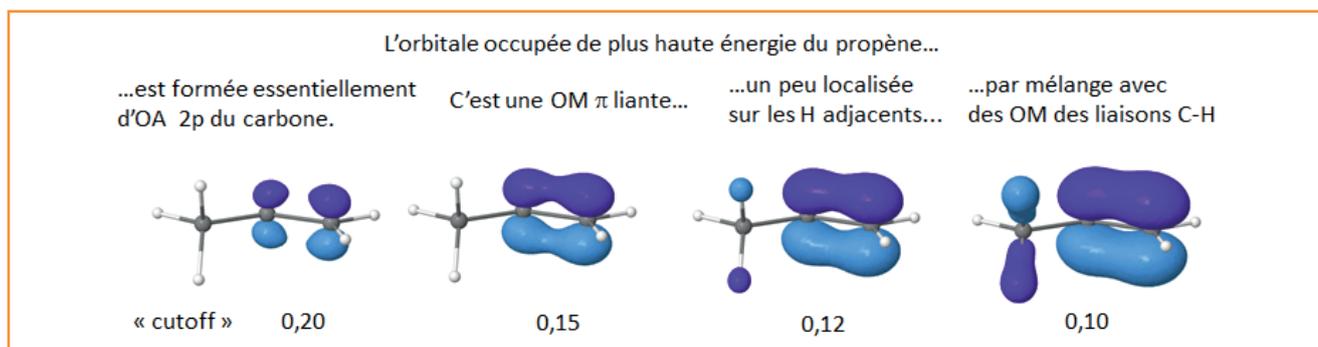
C'est pour répondre à cette attente que la base *OrbiMol* a été conçue par Patrick Chaquin et Franck Fuster⁽¹⁾. Cette base de données est libre de droits et disponible en ligne⁽²⁾. Ce logiciel permet de connaître l'énergie et la forme des

orbitales moléculaires liantes, antiliantes et non liantes de plus de 600 molécules et de les mettre en correspondance avec les notions de paires libres et de sites vacants. *OrbiMol* a été élaboré comme un outil pédagogique d'exploration de la structure électronique et de la réactivité moléculaire.

- Contact : patrick.chaquin@lct.jussieu.fr

Notes

- (1) Laboratoire de Chimie théorique, UPMC Université Paris 6, UMR CNRS 7616.
- (2) www.lct.jussieu.fr/pagesperso/orbimol/fr/index-fr.shtml



Exemple d'utilisation de la base *OrbiMol* dans le cas du propène.

Chimie et couleur de l'huile d'olive

Atelier animé par **Nathalie Blanc** et **Geneviève Canicave**

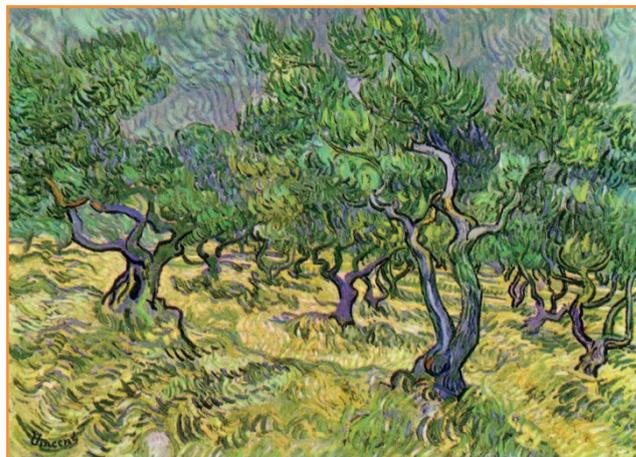
Compte-rendu rédigé par *Thierry Hamaide* et *Bénédicte de Bonneval*

Cette thématique transdisciplinaire allie :

- la philosophie, l'olive étant l'huile des philosophes ;
- la littérature : nous pensons aux mots de Giono dans *Le poème de l'olive* ;
- les sciences de la vie et de la Terre, par l'étude de l'olivier et de ses modes de traitement ;
- les sciences humaines et sociales : nous nous penchons sur la relation existant entre les plantations d'oliviers et le développement du territoire ;
- et naturellement la chimie, avec le développement des techniques d'extraction, d'analyse et de dosage.

Il est donc possible d'organiser un programme de cours thématique qui illustre simultanément plusieurs tranches de savoir, avec toujours comme point de départ la composition de l'huile d'olive :

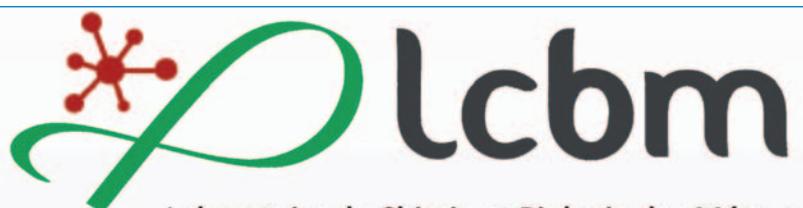
- le positionnement de l'huile d'olive par rapport aux autres huiles végétales (colza, tournesol, palme) : on comparera les huiles saturées par rapport aux huiles insaturées (définition des oméga 3 et autres oméga) en termes de chimie, de santé et de société ;
- l'influence du terroir sur les composants, grâce à l'étude spectroscopique par infrarouge ;
- l'influence du chauffage et du vieillissement sur le goût et les couleurs.



Champ d'oliviers à Saint-Rémy peint par Vincent Van Gogh en 1889.

Naturellement, toute analyse impliquera une discussion sur l'évaluation des mesures en termes d'incertitude et de sources d'erreurs.

• Contact : nathalie.blanc@ac-aix-marseille.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-dsv.cea.fr/irtsv/lcbm>

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

Les ateliers expérimentaux



Photos : G. Canicave, DR.

Synthèse et réduction d'une imine

Edith Amadei (Lycée Jean Perrin, Marseille)

Cette synthèse met en jeu la réaction entre le 2-hydroxy-benzaldéhyde, $C_7H_6O_2$, et la 4-méthylaniline, C_7H_9N , dans l'éthanol, C_2H_6O . En quelques minutes, on aperçoit un solide jaune poussin qui précipite facilement. Une filtration sous vide permet l'obtention du solide. La seconde synthèse consiste en la réduction du produit obtenu précédemment par le borohydrure de sodium, $NaBH_4$. En quelques minutes, on aperçoit le mélange réactionnel qui vire du jaune au blanc. Après filtration du milieu réactionnel et recristallisation, on obtient un solide blanc brillant.

Le permanganate de potassium soluble dans un solvant organique ?

Edith Amadei (Lycée Jean Perrin, Marseille)

On montre par une manipulation très simple que le chlorure de benzyltributylammonium, $C_{19}H_{34}NCl$, permet au dichlorométhane, CH_2Cl_2 , de dissoudre le permanganate de potassium, $KMnO_4$. Ainsi, l'oxydation de l'acétate d'isoeugénol, $C_{12}H_{14}O_3$, par le permanganate de potassium dans le dichlorométhane permet d'obtenir l'acétate de vanilline, $C_{10}H_{10}O_4$, grâce à l'action d'un agent de transfert de phase.

Recyclage et couleur

Kevin Bernot, Guillaume Calvez, Carole Daignebonne, Philippe Gall, Olivier Guillou, Laurence Lohézic et Christine Paul (INSA Rennes)

Nous avons imaginé un TP au cours duquel les étudiants recyclent un polymère organique commercial, le PET (polyéthylène téréphtalate, $(C_{10}H_8O_4)_n$). La dégradation conduit à

de l'éthylène glycol, $C_2H_6O_2$, et du téréphtalate de sodium, $C_8H_4Na_2O_4$, récupéré sélectivement. En présence de chlorure de terbium, $TbCl_3$, se forme un précipité blanc de téréphtalate de terbium, $C_{24}H_{12}O_{12}Tb_2$, caractérisé par les propriétés optiques des polymères de coordination à base de terres rares : une irradiation UV de l'échantillon conduit à une luminescence intense dans le vert.

Synthèse d'un pigment jaune, l'iodure de plomb

Danielle Cachau-Herreillat et Olivier Cambon (Univ. Montpellier 2)

La manipulation proposée montre que la synthèse de l'iodure de plomb, PbI_2 , est possible, en mettant simplement en présence, à température ambiante, les solides de nitrate de plomb, $Pb(NO_3)_2$, et d'iodure de potassium, KI . L'iodure de plomb est un pigment jaune : il est insoluble dans l'eau ($pK_s = 8,2$) mais utilisé en dispersion en poudre très fine au sein d'un liant.

Étude par spectroscopie UV-visible de complexes de cuivre et de cobalt

Olivier Cambon et Danielle Cachau-Herreillat (Univ. Montpellier 2)

Le remplacement du ligand H_2O par le ligand NH_3 dans le complexe du cuivre(II) fait passer du bleu pâle au « bleu céleste » sans changement de géométrie. Cette diminution de la valeur de Δ_o implique une augmentation de λ_o par augmentation de la force des ligands. Le remplacement du ligand H_2O par le ligand Cl^- dans le complexe du cobalt(II) fait passer la couleur de rose pâle à bleu : cette augmentation de la valeur de λ_o est dans ce cas liée au changement de géométrie autour du cobalt(II).

Synthèse d'un colorant diazoïque en continu à micro-échelle

Odile Dechy-Cabaret et Laurent Prat (INP-ENSIACET)

La réaction de la synthèse d'un colorant, le 4-diméthylaminoazobenzène, $C_{14}H_{15}N_3$, en microréacteur est aisément suivie de manière visuelle (passage du jaune au rouge) ; différents temps de séjour, températures et tailles de microréacteur (longueur et diamètre) peuvent être étudiés. Cette activité expérimentale présente un double objectif pédagogique : (i) elle permet d'appréhender la notion de synthèse en continu et de suivi cinétique le long du réacteur, et (ii) elle met en évidence l'intérêt de travailler à micro-échelle pour une meilleure maîtrise de la température et donc de la sélectivité dans le cas de réactions compétitives.

Synthèse additive et qualités de la sensation colorée

Laurence Kay et Isabelle Pernin-Wetzel
(Univ. Joseph Fourier Grenoble)

Le but de cette activité expérimentale sur ordinateur est de se familiariser avec la synthèse additive et la théorie trichromatique. Cet outil comporte une partie théorique présentant les trois qualités d'une sensation colorée (tonalité, saturation, luminance) et une partie expérimentale basée sur le principe de l'écran couleur qui permet de recréer les sensations colorées, à partir de mélanges en proportions variables des trois primaires et de les visualiser en partie dans le triangle des couleurs de Maxwell.

Pigment minéral et maquillage : la galène

Laurence Kay et Isabelle Pernin-Wetzel
(Univ. Joseph Fourier Grenoble)

Le but de cette activité expérimentale est de faire découvrir un pigment minéral : le sulfure de plomb ou galène, PbS . Ce pigment, mentionné dans des recettes traditionnelles de préparation de khôl, est encore utilisé aujourd'hui au Moyen-Orient et en Inde. La manipulation consiste à observer un gros cristal de minerai de galène à l'état brut puis de comparer, à l'œil nu puis au microscope optique, les poudres présentant différentes granulométries.

Autour du photochromisme

Laura Nodin, Jean Pierre Placial et Jonathan Piard
(ENS Cachan)

Cette activité propose des manipulations illustrant le photochromisme et pouvant se décliner à différents niveaux d'enseignement du lycée à la licence : 1) Synthèse et étude des propriétés photochromes d'une molécule de salicylidène-aniline, $C_{13}H_{11}NO$ (aussi appelés « anils ») ; 2) Étude cinétique d'une réaction photochrome du 6- NO_2 -BIPS (benzo indolino pyrano spiran), $C_{19}H_{18}N_2O_3$, tant qualitativement par une

approche visuelle que quantitativement par un suivi de l'absorbance par spectrophotométrie, afin de déterminer l'ordre de la réaction et ses caractéristiques cinétiques (k , E_a). Ces manipulations permettent également d'aborder l'influence du solvant et de la température sur la cinétique d'une réaction.

La couleur nanostructurée

Christophe Paulhac et Katia Fajerweg
(Univ. Toulouse III-Paul Sabatier)

Lors de cette activité pédagogique, nous avons proposé d'étudier deux types de nanoparticules : les premières, métalliques, d'or ; les deuxièmes de chalcogénures (quantums dots de sélénure de cadmium, $CdSe$). Nous nous sommes intéressés à leur différence de propriétés physiques en relation avec des phénomènes de résonance de plasmon de surface et de quantification d'énergie. Cette activité a permis d'échanger autour de plusieurs notions (cristallographie, oxydoréduction, ondes électromagnétiques, physique quantique, spectrométrie d'absorption et d'émission), mais aussi d'aborder le thème des nanoparticules.

Génie des procédés et pigment

Sabine Perino, Carole Martinez et Sébastien Maupin
(Lycée Jean Perrin, Marseille)

Nous avons mis en œuvre en TP de génie chimique une évaporation double effet pour concentrer du jus de tomate (dont la couleur rouge est due au lycopène, $C_{40}H_{56}$). L'étude proposée aux étudiants de BTS chimiste 1^{ère} année permet de juger de l'influence de la pression (fonctionnement sous vide) du 2^e effet sur la qualité du concentrât obtenu, tout en vérifiant les bilans matières et thermiques de l'installation.

Situation problème : deux couleurs dans une fiole jaugée

Jérôme Randon (Univ. Claude Bernard Lyon 1)

Une fiole d'un litre, remplie d'une solution, est posée sur une source de lumière blanche. On constate que dans le col de la fiole, la solution semble verte, alors que dans le bas de la fiole, elle semble rouge. Quelles hypothèses pouvez-vous formuler pour développer une interprétation de la situation ?

Bleu(s), blue(s), chimie, art et société

Michel Verdaguer, Françoise Villain, Véronique Gadet
(Univ. Pierre et Marie Curie) et **Katia Fajerweg**
(Univ. Toulouse III-Paul Sabatier)

Les nombreuses expériences proposées, très simples, visaient à montrer à travers l'exemple du bleu quelques aspects fondamentaux de la chimie : réactions acide-base, redox, de précipitation, de complexation. Elles s'articulaient autour de quelques grands pigments naturels ou synthétiques (indigo, bleu de Prusse, bleu de cobalt, bleu Guimet, phtalocyanines).

Rencontre avec Patrice Thiriet, créateur du MOOC « FOVEA »

Existe-t-il réellement un nombre massif d'inscrits aux MOOC comme l'indique son acronyme ?

Beaucoup de MOOC (« massive open online course ») se vantent d'être massifs ; la réalité est plus nuancée. En effet, seulement 5 à 10 % d'inscrits vont jusqu'au terme de leur formation. Par exemple, FOVEA (« formation ouverte par le virtuel en e-learning en anatomie ») compte aujourd'hui 3 600 inscrits. Cependant, de nombreux inscrits ne viennent pas chercher une formation mais uniquement quelques idées et ressources. Certains professionnels du secteur de la santé se sont ainsi inscrits à FOVEA pour faire évoluer leur discours auprès de leurs patients.

Quelle est la clé d'un MOOC de qualité ?

L'interactivité. Interagir implique de répondre régulièrement aux questions des inscrits ; questions parfois surprenantes par leur diversité, toujours passionnantes mais nécessitant beaucoup de temps pour les réponses à moins d'attendre, comme le veulent les règles de l'interactivité, que vos inscrits ne créent leur communauté et se répondent. Réussir à créer une communauté active, vivante, est le graal de tout créateur de MOOC. Et si vos inscrits sont nombreux, vous pourrez envisager le recrutement de tuteurs, ce qui vous permettra également de répondre à ceux qui vous accuseront de déshumaniser l'enseignement. Vous pourrez alors proposer un service payant de qualité, mais il faudra recruter, administrer, former, payer des salaires et gérer des ressources humaines. Vous avez compris, « massive » exige une organisation solide nécessitant des moyens adaptés. Il vous faudra aussi maîtriser les contraintes de la plate-forme que vous allez choisir ou qui vous sera imposée. Enfin, il vous faudra réfléchir aux questions juridiques relatives aux droits d'auteur par exemple. Mais mes propos ne doivent surtout pas vous conduire à reporter votre énergie sur vos cours magistraux !

Doit-on craindre que les MOOC vident nos amphithéâtres ?

Nous confirmons l'avis des spécialistes : cette crainte n'est pas fondée ; 67 % des inscrits à FOVEA sont âgés de 35 à 65 ans, et seulement 12 % sont des étudiants.

Encouragez-vous nos lecteurs à créer un MOOC ?

Malgré certaines exigences qu'impliquent la création et le suivi d'un MOOC, les débats actuels tournent davantage autour de questions de fond (modèles économiques, impacts sur l'université) qu'autour des questions pratiques de conception des cours. Dans ce contexte, je vous fais part de mon expérience personnelle. Commencez par une prise de risque minimum : un MOOC de quelques sessions sur une question que vous aimez traiter, susceptible d'intéresser une petite communauté. Entrer en contact avec des internautes inconnus, tous différents mais intéressés – sinon passionnés – par votre discipline, prêts à s'engager et à partager des connaissances, est une expérience unique, un vent d'air frais sur vos habitudes qui peut offrir un regard différent sur vos manières d'enseigner. Peut-être, comme moi, tenterez-vous d'utiliser votre MOOC pour préparer un cours en « classe inversée », un autre concept à la mode. Vous risquez de ne pas créer le MOOC parfait au premier essai. L'essentiel sera d'avoir envie d'organiser le suivant et de pouvoir parler des MOOC – et de leur inévitable évolution – en toute connaissance de cause.

NDLR : *Aujourd'hui, un ensemble d'universités et de grandes écoles se sont lancées dans la création de MOOC. Nombre d'entre eux sont rassemblés sur la plate-forme nationale France Université Numérique (www.france-universite-numerique.fr/moocs.html).*

Pour en savoir plus

- Site Anatomie 3D Lyon 1-ISTR : <http://anatomie3d.univ-lyon1.fr>
- Page Facebook Anatomie 3D Lyon 1 : <https://www.facebook.com/anatomy3d>
- FOVEA : <http://claco.univ-lyon1.fr/login> (nom d'utilisateur : cdemo ; mot de passe : cdemo123).



Patrice Thiriet*

est enseignant-chercheur à l'Université Lyon 1 et responsable du projet Anatomie 3D Lyon 1.

* Courriel : patrice.thiriet@univ-lyon1.fr



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

<https://www.facebook.com/SocieteChimiquedeFrance>



Rencontre avec quelques scientifiques provençaux

Maurice Comtat

- Résumé** La Provence est une terre riche d'histoire, de tradition et de découvertes scientifiques. Au travers du portrait rapide de Henri Pitot, Paulin Talabot, Henri Merle et Paul Rivals sont évoqués les mutations de la société et du paysage provençal, l'histoire de la soude, du savon, de l'aluminium et les débuts de la Faculté des sciences de Marseille.
- Mots-clés** **Histoire, scientifiques, Provence, JIREC 2014.**
- Abstract** **Meeting with some scientists in Provence**
With Henri Pitot, Paulin Talabot, Henri Merle and Paul Rivals are evocated some mutations of the society in Provence, the beginning of industrialisation, the history of soap and aluminium and the construction of the Faculty of Sciences in Marseille.
- Keywords** **History, scientists, Provence, JIREC 2014.**

La Provence est une terre riche d'histoire et de légendes, gardant le souvenir de l'époque romaine, aimée par Dante et Pétrarque, patrie des troubadours, avec ses rois et ses reines. Elle est une région de clichés avec la lavande, les oliviers, la vigne, les cyprès et les platanes, mais aussi l'accent, la pétanque, le pastis et le chant des cigales dans les pins. Elle est un creuset de culture littéraire avec Mirabeau, Mistral, Daudet, Zola, Mérimée, Giono et Pagnol, et de culture picturale avec Van Gogh, Cézanne, Chabaud et Seyssaud. La Provence est aussi, depuis presque trois mille ans, un lieu de découvertes scientifiques dans tous les domaines de la connaissance [1]. Quelques scientifiques ont permis de moduler le paysage, comme les architectes de l'eau [2], les ingénieurs du rail, les agronomes qui surent adapter les cultures aux spécificités du sol. D'autres furent des observateurs avisés de la nature (géologues, botanistes, entomologistes), des métrologues (astronomes, physiciens et chimistes). La brève rencontre avec quatre d'entre eux est le prétexte pour évoquer quelques pages de l'histoire industrielle et scientifique de la Provence.

Henri Pitot (1695-1771), l'autodidacte d'Aramon [3]

Fils du notaire d'Aramon, Henri Pitot ne montre pas d'enthousiasme pour les études classiques. Son père le fait alors s'engager dans un régiment de l'armée stationné à Grenoble dans lequel l'un de ses frères est officier. L'histoire raconte qu'il découvre un livre de géométrie dans une librairie de la ville, et ainsi le goût des sciences. De retour à Aramon, Pitot va lire une multitude d'ouvrages scientifiques, construire mappemondes et cadrans solaires et transformer la tour de la maison familiale en observatoire. En 1718, il est accueilli par Réaumur auprès duquel il va se perfectionner en hydraulique. En 1722, il dépose un mémoire à l'Académie des sciences sur la durée d'une éclipse de Soleil qui doit avoir lieu deux ans plus tard ; l'exactitude des calculs fait que

l'institution le nomme adjoint mécanicien, poste qu'il occupera pendant dix-huit ans. En 1732, disposant de tubes capillaires avec lesquels Réaumur met au point le thermomètre, il propose un dispositif qui permet de mesurer la vitesse de l'eau courante. Transposé à la détermination de la vitesse de l'air, le célèbre *tube de Pitot* est présent actuellement en plusieurs exemplaires sur tous les avions et engins volants.

Lassé de la vie parisienne, nostalgique de son Midi natal, il revient au pays et devient directeur des travaux de la sénéschaussée de Nîmes. Dès lors, il va conduire une grande diversité de travaux relatifs à la lutte contre les crues à Roquemaure, Aramon, Pont-Saint-Esprit, Vallabrègues et Toulouse, à l'entretien des routes, à l'entretien et à la construction de ponts. Il va en particulier doubler le Pont du Gard d'un pont routier sur le Verdon accolé à l'édifice romain sans en détruire ni l'élégance ni l'environnement. Mais son œuvre la plus spectaculaire est sans doute l'aqueduc des Arceaux qui permet d'alimenter en eau potable Montpellier avec la source de Saint-Clément. Cette dernière activité le place parmi les architectes de l'eau⁽¹⁾ qui ont permis de modeler la Provence avec l'irrigation et la fourniture d'eau potable aux grandes villes, des facteurs importants pour améliorer l'hygiène et les conditions de vie et limiter les épidémies.

Paulin Talabot (1799-1885), un visionnaire à Beaucaire

Fils d'un faïencier de Limoges, Paulin Talabot sort de l'École polytechnique en 1821. Il est nommé ingénieur à Brest où il aménage des routes et nettoie le port. Avidé de soleil, il quitte l'administration et rejoint Beaucaire où Sout de Dalmatie lui confie la réalisation du canal reliant Beaucaire à la mer à Aigues-Mortes. Le visionnaire élabore ensuite le projet qui consiste à transporter les produits des mines de la Grand-Combe par rail entre Alès et Beaucaire. Puis vint la

réalisation de la voie ferrée entre Nîmes et Beaucaire inaugurée en 1839. En interdisant l'accès à la gare cinq minutes avant le départ du train, il apprendra l'exactitude aux Beaucairois ! Cependant, le chantier le plus important est l'équipement ferroviaire de la vallée du Rhône : construction d'un pont ferroviaire entre Beaucaire et Tarascon, connexion de Tarascon à Avignon et à Marseille par Arles contre l'avis de Montricher mais avec le soutien éloquent de Lamartine ! Le scientifique, technicien, financier, administratif, deviendra bientôt le directeur de la Compagnie des chemins de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée qui va favoriser les relations entre le Sud et la capitale. Cet adepte de la philosophie des cercles saint-simoniens a également permis l'essor de la chimie en Provence par la circulation des minerais, des matières premières et des produits finis.

Henri Merle (1825-1877), le pionnier de Salindres

Henri Merle est ingénieur de l'École centrale des arts et manufactures. D'après Jean-Baptiste Dumas (1800-1884), natif d'Alès, il est indiscipliné mais excellent en chimie. Le professeur persuade l'élève de la richesse du bassin d'Alès où voisinent la houille, la lignite, le calcaire et la pyrite, et l'élève comprendra vite l'intérêt du passage futur à Salindres de la ligne de la voie ferrée Alès-Bessèges. Balard, pharmacien de Montpellier, auquel on doit la découverte du brome, successeur de Dumas à la Sorbonne et qui a comme préparateur Pasteur à l'École normale supérieure, arrive à convaincre Merle de la nécessité de la préparation de la soude Leblanc à partir du sel de Camargue. Ajoutons l'apport financier de Guimet, créateur du bleu outremer artificiel, et c'est ainsi que le 3 juin 1855 est posée la première pierre d'une usine de produits chimiques dans le petit village de Salindres, qui vit alors de la sériciculture et de l'agriculture. Suite à la rencontre de Merle et de Sainte-Claire Deville, cette usine sera pendant trente ans la seule au monde où sera produit régulièrement de l'aluminium. À Salindres, en 1886, le successeur de Merle, Pechiney, éconduit le jeune Héroult venu lui proposer le procédé électrochimique de fabrication de l'aluminium par électrolyse, sous prétexte que l'aluminium n'a pas d'avenir et qu'il ne croit pas à l'électrochimie !

Dans cette usine, seront accomplis de grands projets technologiques sur la fabrication du sulfate de cuivre, du chlore, du chlorure de calcium et des chlorates. La fabrication de la soude par le procédé Leblanc permettra le développement industriel de la préparation du savon de Marseille. Par voie de conséquence, pendant 130 ans, la côte marseillaise portera le nom de littoral de la soude. Les rejets d'acide chlorhydrique liés à ce procédé et les besoins de plus en plus importants de soude pour cette industrie sont aussi à l'origine de la mise au point par Ernest Solvay de la fabrication de la soude dite à l'ammoniaque. C'est ainsi que voit le jour en pleine Camargue la cité industrielle de Salin-de-Giraud avec son architecture typique du Nord et son organisation sociale.



Figure 1 - Le concours pour l'établissement des plans d'une nouvelle faculté sur les terrains de l'ancien cimetière de Saint-Charles est ouvert de décembre 1895 à mars 1896. Victor-Auguste Blavette le remporte : il prévoyait de construire trois instituts (mathématiques et physique, chimie et sciences naturelles) et un bâtiment destiné aux services généraux qui devait fermer la cour centrale. Son emplacement resta de longues années à l'état de terrain vague comme le montre cette photographie de 1922. Le quatrième bâtiment de la faculté des sciences ne fut inauguré qu'en novembre 1956.

Paul Rivals (1864-1939), un « tribun » à Marseille

La Faculté des sciences de Marseille fut créée en 1854 par Napoléon III. Il a fallu toute la ténacité des doyens Charve, mécanicien, et Perdrix, chimiste, pour faire front aux oppositions et conflits politiques et universitaires afin d'aboutir à la construction d'une nouvelle faculté sur le site de Saint-Charles. C'est leur successeur Rivals, ancien élève de l'École normale supérieure, collaborateur de Berthelot au Collège de France, qui, poursuivant leur œuvre, terminera le nouvel ensemble scientifique marseillais au début des années 1920 (figure 1). Doté de talents de tribun à la Jaurès, ce scientifique originaire du Sud-Ouest avait convaincu, en 1922, le ministre Sarraut de la pertinence de ce site : « *Les Méridionaux, et plus particulièrement les Marseillais, sont de grands calomniés [...]. En réalité, on travaille beaucoup ici [...]. Lorsque vous entendrez dire à l'Etranger et, plus encore en France, spécialement à Paris, et plus particulièrement dans certains milieux de la rive gauche, qu'on ne travaille guère à Marseille, vous pourrez répondre et vous répondrez : j'en viens, cela n'est pas vrai !* »

Dès lors qu'il existait des laboratoires de recherche et des étudiants bien formés, quelques talents scientifiques avaient pu s'épanouir. Ainsi, Tian (1880-1972) (figure 2) et Calvet (1895-1966) seront à l'origine du microcalorimètre différentiel qui a permis et permet encore de fournir grand nombre de données thermodynamiques sur des produits et des réactions chimiques et biochimiques.

Conclusion

La rencontre rapide avec Henri Pitot, Paulin Talabot, Henri Merle et Paul Rivals a été le prétexte pour montrer

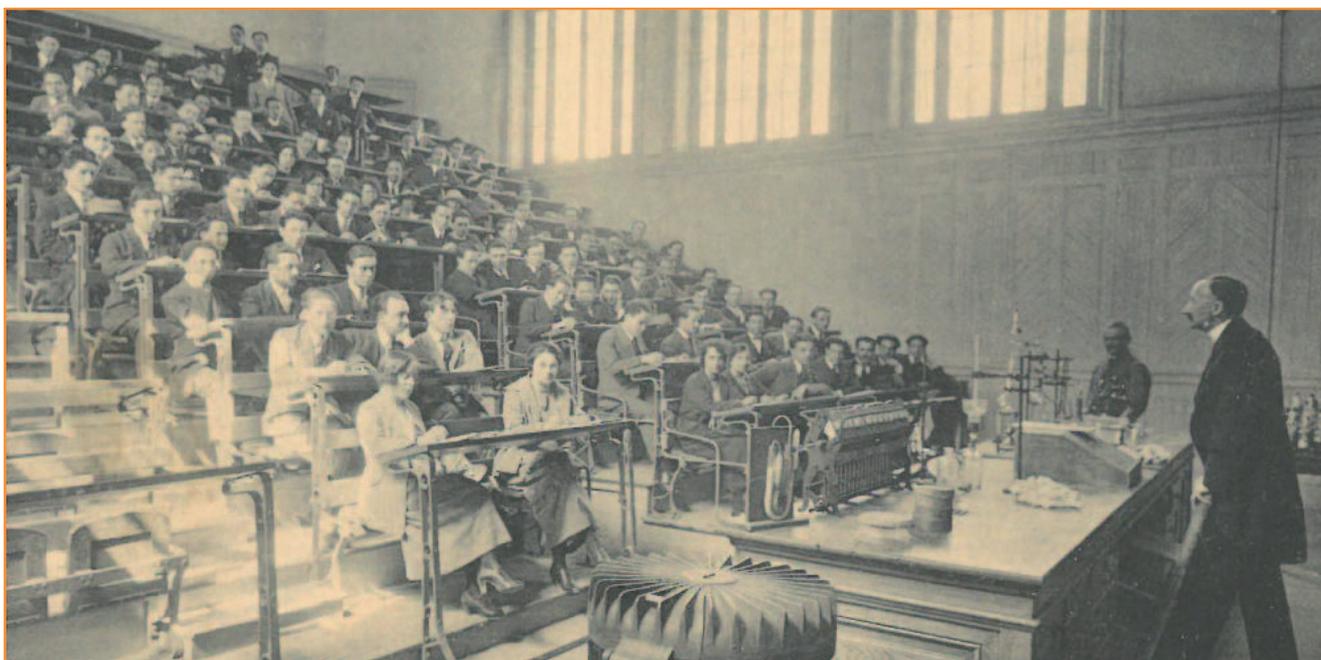


Figure 2 - Les cours de chimie étaient alors illustrés par de nombreuses expériences. Albert Tian tenait à montrer aux étudiants toutes les substances qu'il citait : les collections de chimie – dispersées à la fin des années 1960 – étaient riches de plusieurs milliers d'échantillons.

comment des hommes de science peuvent marquer les paysages et les modes de vie d'une région. En Provence, en effet, se sont écrites des pages importantes de l'irrigation et de la distribution de l'eau, du développement des transports ferroviaires et de l'histoire de la soude, du savon et de l'aluminium. Des instruments comme le tube de Pitot, l'interféromètre de Fabry-Perot et le microcalorimètre de Tian et Calvet y ont ainsi vu le jour. Notons enfin la richesse des thématiques développées actuellement en Provence et illustrées au sein du dossier « La chimie en région PACA » récemment publié dans *L'Actualité Chimique* [4].

L'auteur remercie Florence Boulc'h et Katia Fajerweg pour leur incitation à produire cet article et pour l'avoir corrigé.

Les illustrations de cet article ont été offertes par Francis Gires, président de l'ASEISTE (Association de Sauvegarde et d'Étude des Instruments Scientifiques et Techniques de l'Enseignement), et Nicolas Claire, maître de conférences de l'Université d'Aix Marseille. DR.

Note et références

- (1) Les architectes de l'eau sont : Adam de Craponne (1526-1576), pour l'eau à Salon ; Jean de Dieu-Raymond de Boisgelin de Cussé (1732-1804), pour les canaux d'irrigation des Alpes, entre Durance et Rhône ; François Zola (1796-1847), pour l'eau des fontaines d'Aix-en-Provence ; Franz Mayor de Montricher (1810-1858), pour l'eau de la Durance à Marseille par l'aqueduc de Roquefavour ; Henri Mayor de Montricher (1845-1916), pour les épandages des gadoues du port de Marseille, la fertilisation de la Crau et les stations d'épuration d'Avignon.
- [1] Aillaud G.-J., Tachoire H., Georgelin Y., *Marseille : 2 600 ans de découvertes scientifiques*, Publications de l'Université de Provence, **2002**.
- [2] Jean M., *Les architectes de l'eau en Provence*, Actes Sud, Arles, **2011**.
- [3] Humbert P., *Éléments sur la vie et l'œuvre d'Henri Pitot*, Société languedocienne de géographie, Montpellier, **1953**.
- [4] Dossier « La chimie en région : focus sur la section régionale SCF-PACA », *L'Act. Chim.*, **2013**, 377.



Maurice Comtat

est professeur émérite, Laboratoire de Génie chimique, Université Toulouse III-Paul Sabatier*.

* Laboratoire de Génie chimique, Faculté des sciences et ingénierie, 118 route de Narbonne, F-31062 Toulouse Cedex 4.
Courriel : comtat@chimie.ups-tlse.fr

depuis 1988,
l'expérience
au service
de l'édition.

nous organisons
votre communication

- éditeur conseil
- régie publicitaire
- événements professionnels

RÉGISSEUR
DE
L'ACTUALITÉ
CHIMIQUE

edif
les services d'ile de france

la gratuité de
vos ouvrages

un studio de
design intégré

maquette, mise en pages,
fabrication, impression,
édition, routage...

edif 102 av Georges Clemenceau 94700 Maisons-Alfort
TEL : 01 43 53 44 00 - FAX : 01 43 53 48 00
edif@edif.fr - www.edif.fr

Comment jouer avec le feu et la lumière pour colorer les verres et les céramiques

Jacques Livage

Résumé	Depuis la plus haute Antiquité, les verres et les céramiques sont élaborés par fusion du sable ou chauffage de l'argile à haute température et sont ainsi souvent appelés « les arts du feu ». C'est en jouant avec le feu et la lumière que l'artisan donne à ces matériaux la couleur ou le brillant qui font toute leur beauté. L'histoire du verre et de la céramique témoigne de l'évolution de la société, depuis les fresques de Lascaux en Dordogne jusqu'aux verres intelligents !
Mots-clés	Couleur, lumière, pigments, verres, céramiques, lustre, glaçure, JIREC 2014.
Abstract	The color of glasses and ceramics For centuries glasses and ceramics have been made <i>via</i> the high temperature processing of clays or sand and so-called "arts of fire". Therefore, one has to play with light and fire in order to get colored and glazed materials. The story of glasses and ceramics then depends on our ability to control the behaviour of inorganic pigments upon heating at high temperatures.
Keywords	Color, light, pigments, glasses, ceramics, glaze, JIREC 2014.

La couleur naît du dialogue entre lumière et matière : c'est au moment où elle entre en contact avec la matière que la lumière blanche se transforme en couleurs. L'interaction entre ces deux partenaires donne naissance à toute la palette des couleurs que nous connaissons, le bleu du ciel, le rouge du rubis, le vert de l'émeraude ou l'iridescence des opales. Selon la nature de l'interaction, on observe des couleurs physiques liées à la diffusion et à la dispersion de la lumière (bleu du ciel, opalescence, arc-en-ciel, iridescence...) ou chimiques dues à l'absorption du rayonnement électromagnétique par des pigments ou des teintures. Un troisième partenaire, le feu, intervient lorsqu'il s'agit de colorer des verres ou des céramiques. Ces matériaux, issus de « l'art du feu », sont obtenus par cuisson de l'argile ou fusion du sable à haute température. Un tel chauffage, à plusieurs centaines de degrés, modifie les propriétés des pigments utilisés pour la coloration. Les teintures organiques ne résistent pas à un tel traitement et seuls les pigments minéraux peuvent être utilisés. Le mode de cuisson (durée, température, atmosphère...) joue un rôle fondamental dans la qualité de l'effet visuel obtenu, qui dépendra d'un jeu subtil entre ces trois partenaires, la matière, le feu et la lumière.

Le rouge et le noir

Les peintures pariétales qui ornaient les grottes de nos ancêtres ne présentaient pratiquement que deux couleurs, le rouge et le noir. Elles étaient obtenues grâce à des pigments naturels tels que le charbon de bois ou l'oxyde de manganèse MnO_2 pour le noir et l'ocre pour le rouge. L'ocre naturelle est une argile colorée par la présence d'oxydes de fer(III) plus ou moins hydratés, goethite $\alpha\text{-FeO(OH)}$ ou hématite $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. C'est sans aucun doute le premier

pigment utilisé par l'homme. On le retrouve dans les peintures pariétales les plus anciennes. Les empreintes négatives de mains qui ornent la grotte de Chauvet (Ardèche) par exemple ont été obtenues par la méthode du pochoir en projetant une suspension d'ocre sur une main posée sur la paroi rocheuse. Ce pigment est encore largement utilisé de nos jours dans la peinture, la poterie et le bâtiment (briques, tuiles...). Ce sont les ocres qui confèrent leurs couleurs flamboyantes aux paysages du Luberon.

La couleur des ocres dépend de l'état d'hydratation de l'oxyde de fer. La goethite jaune se déshydrate vers 300 °C pour donner de l'hématite rouge, ce qui permet, en jouant avec le feu, d'obtenir toute une palette de couleurs allant du jaune au rouge sombre. En analysant les peintures pariétales, on a pu déterminer la température à laquelle les pigments avaient été chauffés. Cette information constitue un indice important pour déterminer l'état d'avancement technologique des hommes qui avaient décoré la paroi de leur grotte.

L'ocre a aussi été utilisée pour orner les poteries de motifs variés. Comme pour les peintures pariétales, les couleurs obtenues vont du jaune au rouge brun. Cependant, une autre possibilité est offerte en chauffant la poterie en atmosphère réductrice. La poterie est élaborée à partir d'une pâte formée d'un mélange d'argile et d'eau que l'on met en forme à l'aide d'un tour de potier. Cette ébauche est ensuite chauffée à plusieurs centaines de degrés de façon à éliminer l'eau et durcir la pièce par frittage. Un simple chauffage à l'air conduit à des teintes rouges plus ou moins foncées selon la température. Un progrès important a été obtenu en réalisant le chauffage sous atmosphère réductrice. On obtient alors des couleurs noires dues à la formation de magnétite Fe_3O_4 (figure 1). La couleur noire de cet oxyde de fer est liée à des transferts électroniques d'intervalence entre ions ferreux Fe^{2+} et ferriques Fe^{3+} . Elle est caractéristique des composés à



Figure 1 - En jouant sur la température et le mode de chauffage, l'ocre conduit à des couleurs allant du jaune au rouge puis au noir. La goéthite α -FeO(OH) jaune se déshydrate vers 300 °C pour donner l'hématite α -Fe₂O₃ rouge qui, par réduction au-dessus de 800 °C, donne la magnétite noire Fe₃O₄.

valence mixte dans lesquels un ion se trouve à deux états d'oxydation différents. Un exemple typique est celui du bleu de Prusse Fe₄[Fe(CN)₆]₃. De nos jours, ce processus est utilisé pour élaborer des vitrages électrochromes, dans lesquels la couche sensible est formée d'un film d'oxyde de tungstène WO₃ intercalé entre deux électrodes transparentes d'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO, « indium tin oxide »). Incolore à l'état oxydé, ce composé devient bleu lorsque l'on injecte des électrons de façon à réduire une partie des ions W⁶⁺ en W⁵⁺. Le phénomène est réversible et la coloration disparaît lorsque l'on inverse la polarité des électrodes.

Selon les manuscrits anciens, la réduction des ocres rouges était réalisée en ajoutant du bois vert et en fermant le four. Cet art, parfaitement maîtrisé par les Grecs anciens, a fait la beauté de leurs poteries. Le traitement s'effectue en trois étapes. Une première cuisson oxydante à l'air libre à 900 °C conduit à une céramique rouge dans laquelle tout le fer est sous forme ferrique Fe³⁺. La poterie étant séchée, on applique une barbotine d'argile sur les parties destinées à être noires. On effectue alors un deuxième chauffage en atmosphère réductrice (tirage réduit avec ajout de bois vert) et toute la céramique devient alors noire. Une dernière cuisson en tirage ouvert entraîne l'oxydation des zones poreuses de la céramique qui redeviennent rouges, tandis que les zones recouvertes de barbotine fine, vitrifiée et non perméable à l'air, restent noires.

La réduction complète des ions ferriques en Fe²⁺ conduit à des colorations bleu-vert qui font la beauté des céladons. Ces porcelaines coréennes sont obtenues en déposant une couche de cendres et d'argile sur la poterie. Un chauffage vers 1 200 °C entraîne la réduction du fer par la cendre et la vitrification du dépôt. Selon la légende, les premiers céladons furent obtenus par hasard, lorsqu'un four de potier s'emballa jusqu'à atteindre des températures de 1 200 °C. Les cendres de bois incandescentes retombèrent alors sur la poterie en lui donnant cet aspect vert translucide !

Du bleu égyptien au bleu des chimistes du XIX^e siècle

Le rouge et le noir étaient obtenus en utilisant des terres naturelles abondantes, mais tel n'était pas le cas du bleu que l'on extrayait du lapis-lazuli, pierre semi-précieuse qui était relativement rare et de ce fait coûteuse. Le principal gisement se trouvait en Afghanistan, d'où le nom de « bleu outremer » souvent donné au pigment que l'on en extrait. Pourtant, le bleu jouait un rôle important dans les anciennes civilisations. Pour les Égyptiens par exemple, il symbolisait le souffle divin ! Cela explique sans doute pourquoi le premier

pigment synthétique a été le bleu égyptien, élaboré par les constructeurs de pyramides il y a plus de 5 000 ans. Ce pigment, à base de cuivre, était obtenu par cuisson oxydante d'un mélange de sable (silice), de calcaire (calcium) et d'un fondant à base de sodium (natron). Après refroidissement lent, on obtenait une pâte de verre de couleur bleue. Cette couleur était due à l'addition de sels de cuivre qui, après cuisson, donnaient un silicate de cuivre, la cuprorivaïte (CaCuSi₄O₁₀). Destiné à remplacer le lapis-lazuli, le bleu égyptien s'est répandu dans tout le bassin méditerranéen, où il a été utilisé jusqu'au VII^e siècle. Au Moyen Âge, il fut remplacé par des teintures (pastel, indigo) extraites de plantes dont la culture a fait la richesse du Languedoc. Malheureusement, ces teintures organiques ne pouvaient résister aux températures mises en jeu lors de l'élaboration des verres et des céramiques ! C'est pourquoi les chimistes du XIX^e siècle ont cherché à synthétiser d'autres pigments minéraux tels que le « bleu Thénard » (aluminate de cobalt Al₂CoO₄) et le « bleu Guimet » obtenu par chauffage d'un mélange de sulfate de sodium et de silicate d'alumine.

La couleur bleue des sels de cuivre est due à des transitions d-d au sein de la configuration 3d⁹ de l'ion cuivrique Cu²⁺. De faibles variations du champ cristallin entourant les ions Cu²⁺ conduisent à des colorations vertes que l'on retrouve dans de nombreux pigments. Le vert malachite par exemple est un hydroxy-carbonate de cuivre 3Cu(AsO₂).Cu(CH₃COO)₂.

Le cuivre (Cu²⁺, 3d⁹) en coordination octaédrique déformée (D_{4h}) donne des colorations relativement faibles. Des bleus plus intenses sont obtenus avec le cobalt (Co²⁺, 3d⁷) en symétrie tétraédrique, dans laquelle l'absence de centre d'inversion autorise les transitions d-d. On obtient un bleu profond qui a fait la renommée des verreries vénitienes. On retrouve des pigments à base de cobalt dans les vitraux de nos cathédrales ainsi que sur les faïences de Nevers. Dans ces faïences de « grand feu », les décors bleus sont réalisés à partir d'un silicate double de potassium et de cobalt obtenu par chauffage à plus de 1 000 °C d'un mélange de sable (SiO₂) avec un fondant (K₂CO₃) et de l'oxyde de cobalt (CoO). Le tesson, formé d'argile rouge et de marne blanche, est tout d'abord chauffé vers 900 °C pour donner un biscuit poreux. On dépose ensuite, par émaillage au trempé, une fritte bleue broyée finement. Une dernière cuisson à haute température, vers 1 000 °C, donne à la faïence son aspect particulier (figure 2).

Lustre et transparence

Deux types de comportement se produisent lorsqu'un rayon lumineux vient frapper un objet : une partie de la lumière est réfléchiée par la surface tandis que l'autre traverse



Figure 2 - Les faïences de Nevers présentent des décors bleus obtenus par dépôt d'une fritte contenant des sels de cobalt.

la matière. L'effet optique perçu par l'œil est la résultante de ces deux processus.

La principale caractéristique des verres est leur transparence, qui est liée aux chocs élastiques (sans échange d'énergie) se produisant lorsqu'un rayonnement traverse un milieu condensé. Ces chocs entraînent une diminution de la vitesse de propagation de la lumière qui se traduit par l'indice optique $n = c/v$ du milieu. Ils ont aussi pour effet de dévier les rayons lumineux, entraînant une diffusion plus ou moins importante selon la dimension des hétérogénéités au sein du matériau. Le verre, matériau homogène, est transparent et il le reste tant que la taille des hétérogénéités est inférieure à la longueur d'onde du visible. Une opalescence apparaît lorsque l'on ajoute des phosphates ou des composés fluorés. Ces composés, solubles dans le verre en fusion, recristallisent au cours d'un traitement thermique. Le verre transparent avant recuit devient opalescent lorsque le diamètre des cristaux atteint le micron. Un grossissement plus important bloque la transmission du rayonnement et l'objet devient opaque. C'est ce que l'on observe lors de l'élaboration des vitrocéramiques.

La transparence d'un verre nécessite une grande qualité des produits et du traitement thermique. À l'origine, le verre élaboré par la technique du noyau, dans un moule de sable et d'argile, était relativement grossier. La pâte de verre obtenue était trop hétérogène pour être transparente. Il fallut attendre le développement du soufflage, l'utilisation de fondants et la possibilité d'atteindre des températures plus élevées pour que l'on parvienne à produire un verre homogène transparent.

Les verres « rubis »

Un phénomène particulier intéressant est observé en présence de nanoparticules métalliques (Au, Ag, Cu) : une teinte rouge intense apparaît, donnant naissance aux verres « rubis » que l'on trouve dans les vitraux ou la verrerie d'art. La transparence du verre n'est pas affectée par la présence des nanoparticules, mais l'excitation des électrons de conduction entraîne la formation d'oscillations collectives (effet plasmon) qui confèrent au verre sa couleur rouge caractéristique.

Les verres rubis ont été utilisés depuis longtemps pour réaliser les vitraux de nos cathédrales. Ils étaient obtenus par réduction de sels d'or par l'étain au sein du bain fondu. Le verre fondu puis trempé est incolore. Les atomes d'or sont trop petits pour engendrer un effet plasmon. La coloration rouge apparaît au cours d'un recuit au-dessus de 500 °C lorsque les atomes d'or diffusent dans le verre et s'associent pour former des nanoparticules. La couleur devient de plus en plus sombre au cours du recuit et la transparence du verre disparaît lorsque le diamètre des particules métalliques devient trop important.

La coupe de Lycurgue élaborée par les Romains au IV^e siècle est un remarquable exemple des possibilités qu'offrent les nanoparticules métalliques. Elle change de couleur selon l'éclairage (figure 3) : éclairée de l'extérieur (lumière réfléchie), elle paraît verte et opaque, tandis que lorsque la source lumineuse est placée à l'intérieur de la coupe (lumière transmise), elle paraît rouge et translucide. Ce phénomène est dû à la présence de nanoparticules métalliques (or, argent) de quelques dizaines de nanomètres de diamètre qui réfléchissent la lumière verte. Éclairée de l'extérieur, on ne voit que la lumière réfléchie et la coupe paraît verte. Par contre, elle paraît rouge lorsque la source



Figure 3 - La coupe de Lycurgue paraît verte ou rouge selon qu'elle est éclairée de l'extérieur (lumière réfléchie) ou de l'intérieur (lumière transmise).

lumineuse est placée à l'intérieur de la coupe, car la composante verte est réfléchie vers l'intérieur de la coupe et on ne voit que la lumière transmise rouge qui traverse la paroi de verre.

Lustre, glaçure et émail

L'aspect d'un objet non transparent est essentiellement dû à la lumière réfléchie par sa surface. Le coefficient de réflexion d'une surface est d'autant plus important que l'indice est grand, d'où le pouvoir couvrant élevé du blanc de titane TiO_2 ($n = 2,55$) et du blanc de plomb $2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$ ($n = 1,97$). Une surface lisse engendre une réflexion spéculaire qui confère à l'objet un aspect brillant, tandis qu'un aspect mat est obtenu par réflexion diffuse sur une surface rugueuse. Les terres cuites sont en général mates et poreuses. Pour obtenir une poterie vernissée, on dépose un enduit vitrifiable à sa surface de façon à la rendre étanche et à lui conférer un aspect brillant. Dans l'Antiquité, les Égyptiens réalisaient des glaçures céramiques en ajoutant simplement de l'eau salée à l'argile des poteries. En séchant, le sel remontait à la surface de la poterie et se vitrifiait lors de la cuisson. La température était cependant trop basse pour conduire à un émail de bonne qualité. Aujourd'hui, on dépose un enduit contenant un fondant (bore, plomb) que l'on vitrifie par chauffage à haute température. On obtient ainsi une couche lisse (glaçure, émail) qui confère un aspect brillant à la céramique.

Une variante de ce procédé mettant en jeu des nanoparticules métalliques permet d'obtenir un effet particulier que l'on appelle « lustre ». Après glaçure, on dépose une fine couche d'enduit contenant un mélange de sels d'or et d'argent. Une dernière cuisson réductrice entraîne la formation d'une couche vitreuse au sein de laquelle sont dispersées des nanoparticules métalliques. Réflexion spéculaire et résonance plasmon se conjuguent alors pour donner ce brillant à reflets métalliques que l'on appelle « lustre » !

Iridescence

Une diffusion incohérente est observée lorsque la lumière traverse un objet homogène transparent tel que le verre. Cela

n'est plus le cas lorsque la matière présente une microstructure régulière. Des phénomènes de diffusion cohérente apparaissent lorsque la périodicité de la microstructure est comparable à la longueur d'onde de la lumière. En lumière monochromatique, on observe un phénomène de diffraction qui obéit à la relation de Bragg $n\lambda = 2d\sin\theta$. C'est la diffraction bien connue des rayons X, où d correspond à des distances interatomiques. En lumière blanche polychromatique, la relation n'est valable que pour certaines longueurs d'onde, ce qui conduit à des phénomènes d'iridescence.

La nature nous offre de nombreux exemples de telles structures avec les nacres formées de feuillettes d'aragonite séparées par des couches de protéines d'environ $0,1 \mu\text{m}$. Les opales sont constituées de nanobilles de silice de quelques dixièmes de microns, noyées dans une matrice de silice hydratée amorphe. Les ailes de papillons enfin offrent une incroyable variété de couleurs physiques.

Les pigments nacrés sont largement utilisés en cosmétique ou dans la peinture. Ils sont obtenus par addition de plaquettes de mica recouvertes d'oxyde de titane. Déposés à la surface d'un objet (flacon de verre ou

carrosserie métallique), ces pigments lui confèrent un aspect iridescent.

Bibliographie

- Valeur B., *La couleur dans tous ses éclats*, Belin, 2011.
- Delamare F., Guineau B., *Les matériaux de la couleur*, Collection *Découvertes Gallimard*, 1999.
- Bouquillon A., Turrell S., Robinet L., Charbonneau C., Des glaçures Renaissance au cristal moderne : comportement du plomb dans les verres altérés, *L'Act. Chim.*, 2007, 312-313, p. 40.
- Lehman J.-C., L'art du verrier : des nanotechnologies depuis l'Antiquité !, dans *La chimie et l'art : le génie au service de l'homme*, M.-T. Dinh-Audouin, R.A. Jacquesy, D. Olivier, P. Rigny (coord.), EDP Sciences, Collection *L'Actualité Chimique-Livres*, 2010.
- Colomban P., Secrets retrouvés du lustre abbaside, *Revue de la Céramique et du Verre*, 2004, 139, p. 13.



Jacques Livage

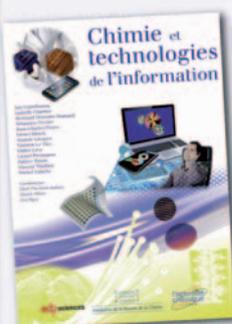
est professeur honoraire au Collège de France*. Il a reçu le **prix de la division Enseignement-Formation de la Société Chimique de France en 2014**.

* Chimie de la matière condensée, Collège de France, place Marcelin Berthelot, F-75231 Paris Cedex 05. Courriel : Jacques.livage@upmc.fr

Collection L'Actualité Chimique-Livres



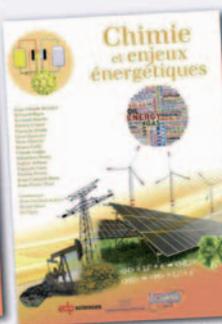
Janvier 2015 - 292 p. - 25 €



Sept. 2014 - 234 p. - 25 €



Janvier 2014 - 272 p. - 24 €



Sept. 2013 - 274 p. - 24 €



Octobre 2012 - 300 p. - 24 €



Octobre 2011 - 292 p. - 24 €



Janvier 2011 - 264 p. - 24 €



Octobre 2010 - 292 p. - 24 €



Juin 2010 - 244 p. - 24 €



Janvier 2010 - 182 p. - 19 €



Août 2009 - 208 p. - 24 €

Commandez-les sur edition-sciences.com

La genèse des couleurs, un dialogue entre lumière et matière

Bernard Valeur

Résumé Les phénomènes à l'origine des couleurs que nous percevons sont très variés. Les couleurs résultent de divers types d'interaction de la lumière avec la matière ; dans certains cas, la matière elle-même se fait source de lumières colorées. Après un rappel sur la perception des couleurs, l'objectif de cet article est de dégager les éléments essentiels de ce dialogue entre lumière et matière en distinguant les couleurs qui sont intimement liées à la nature chimique des objets (pigments, colorants, matériaux luminescents) et celles qui ne le sont pas (couleurs par dispersion, diffusion, interférences, diffraction).

Mots-clés **Couleur, vision, pigments, colorants, luminescence, enseignement, JIREC 2014.**

Abstract **The genesis of colours: a dialogue between light and matter**
The phenomena responsible for the colours we perceive are very diverse. Colours arise from various types of interaction between light and matter; in some cases, matter itself is a source of coloured light. After recalling the basis of colour vision, the aim of the present paper is to identify the salient features of this dialogue between light and matter, distinguishing between the colours that are closely related to the chemical nature of the objects (pigments, dyes, luminescent materials) and those that are not (colours by dispersion, scattering, interferences, diffraction).

Keywords **Colour, vision, pigments, dyes, luminescence, teaching, JIREC 2014.**

Nous vivons dans un monde en couleurs [1]. Minéraux, végétaux, animaux sont d'une extraordinaire diversité de teintes et de nuances qui ne cessent de nous émerveiller. Arc-en-ciel et aurores polaires sont des spectacles hauts en couleurs que nous offre la Nature. Bien d'autres couleurs que nous côtoyons dans notre vie quotidienne sont intimement liées à l'essor des développements technologiques. Elles en sont au moins un outil quand ce n'est pas l'objet même. Prenons quelques exemples : les écrans couleurs (téléviseurs, ordinateurs, téléphones portables et tablettes), l'impression par quadrichromie de photos, de magazines et de livres, la photographie (argentique ou numérique), l'éclairage et la signalisation, les colorants et les procédés de teinture, les pigments et les techniques de peinture, les cosmétiques, etc. Les couleurs jouent également un rôle essentiel dans les arts.

Toutes ces couleurs, nous les percevons, nous les utilisons sans que nous connaissions toujours d'emblée la façon dont elles sont produites. Les phénomènes à l'origine des couleurs sont très variés [1-4] et l'objet de cet article est de les classer et de les expliciter en gardant à l'esprit qu'il n'y a pas de couleur sans lumière et que les couleurs n'existeraient pas non plus sans la matière : ces dernières résultent en effet de l'interaction des ondes lumineuses avec les objets, quand ce n'est pas la matière elle-même qui se fait source de lumière colorée.

Les couleurs naissent dans notre cerveau

Il est important de souligner que les couleurs n'existent que dans notre cerveau [5]. De fait, elles n'ont pas de réalité matérielle car la couleur est une sensation. Il n'y a pas de couleur sans lumière et il faut rappeler que la lumière visible par notre œil n'est qu'une toute petite partie des ondes

électromagnétiques, celles dont la longueur d'onde est comprise entre 400 et 700 nm environ. Que se passe-t-il lorsqu'un photon d'énergie correspondant à la longueur d'onde de 530 nm, par exemple, frappe la rétine de notre œil ? Le premier acte de la vision est photochimique. L'absorption de ce photon par un photorécepteur de la rétine provoque un changement de configuration du rétinale, molécule située dans une protéine appelée opsine, et cette photoisomérisation déclenche toute une série de réactions biochimiques dont le résultat final est la création d'une impulsion électrique, appelée potentiel d'action, qui est transmise au cerveau *via* le nerf optique. L'interprétation par le cerveau de la succession d'impulsions provenant des photorécepteurs de la rétine *via* les cellules ganglionnaires et bipolaires est une sensation de vert pour 530 nm. Aux diverses longueurs d'ondes du domaine visible correspondent différentes couleurs, celles que l'on perçoit lorsqu'on décompose la lumière blanche par un prisme (communément appelées couleurs de l'arc-en-ciel). Précisons que les sensations colorées que nous éprouvons sont propres à l'espèce humaine. Certains animaux voient dans l'ultraviolet ou dans l'infrarouge, contrairement à nous.

Les photorécepteurs de la rétine humaine sont d'une part les bâtonnets qui fonctionnent à faible luminosité mais ne produisent aucune sensation colorée, et les cônes qui sont de trois types et dont les domaines de sensibilité sont larges et se chevauchent (voir *figure 1*). Le cerveau procède donc par comparaison des signaux provenant des trois types de cônes pour reconstruire une image en couleur de ce qui se trouve dans le champ visuel. Les cônes ne fonctionnent qu'à luminosité suffisamment élevée, à la lumière du jour typiquement. Dans la pénombre, les bâtonnets prennent le relais mais ne donnent qu'une image en niveaux de gris, d'où l'expression « *La nuit, tous les chats sont gris* ». Preuve que les couleurs ne sont pas des propriétés des objets. Pas

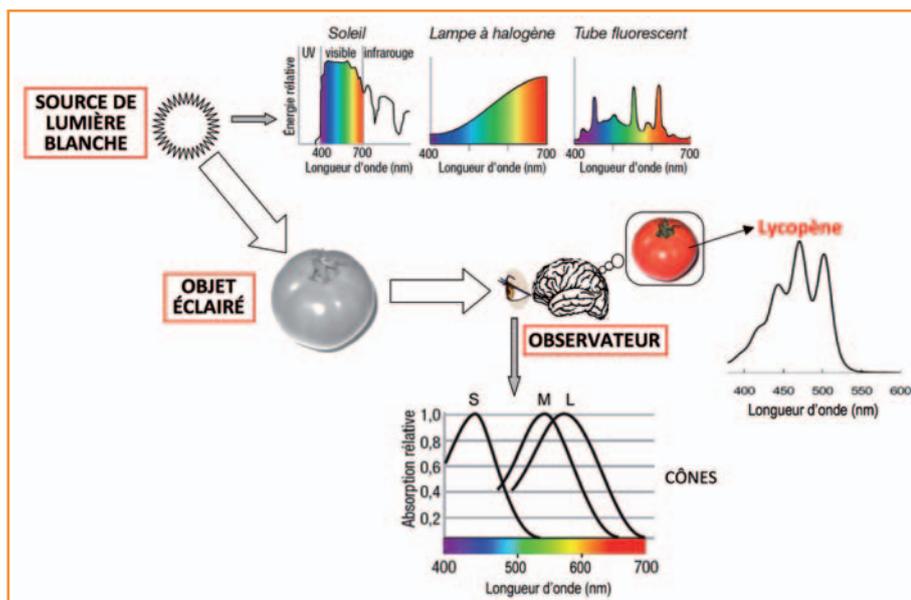


Figure 1 - La perception de la couleur d'un objet fait intervenir trois éléments : la source de lumière, l'objet, et l'observateur. La rétine de l'œil possède trois types de cônes S, M et L responsables de la sensation colorée. La vision humaine est donc trichromatique.

plus que les couleurs ne sont des propriétés des ondes électromagnétiques.

À une longueur d'onde donnée, correspond une couleur, mais cette relation n'est pas biunivoque. Prenons l'exemple de la sensation de jaune. Elle peut provenir d'une lumière aux environs de 580 nm, mais elle peut également résulter de la perception simultanée d'une lumière à 700 nm et d'une lumière à 530 nm qui donneraient séparément des sensations de rouge et de vert. C'est ainsi que le jaune est produit sur un écran couleur, par exemple. Nous avons également une sensation de jaune quand le spectre de la lumière visible est amputé des longueurs d'onde correspondant au violet et au bleu. Lorsque toutes les longueurs d'onde du spectre visible sont présentes (c'est le cas de la lumière du Soleil par exemple), nous avons une sensation de blanc. Mais il ne faut pas s'y tromper, en regardant à travers un prisme, on voit toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. L'œil est donc la palette qui mélange les couleurs, comme l'avaient déjà compris les Égyptiens.

Les couleurs résultant des interactions lumière-matière

La trilogie de la couleur des objets

Si un objet éclairé en lumière blanche nous apparaît coloré, c'est parce que certaines longueurs d'onde de la lumière incidente ne sont plus présentes dans la lumière renvoyée par l'objet du fait des interactions de la lumière avec la matière de cet objet. C'est le cas d'un objet qui contient des molécules (colorants ou pigments) absorbant la lumière dans un certain domaine de longueurs d'onde, ou bien d'un objet qui possède une structure telle que des phénomènes physiques renforcent l'intensité lumineuse à certaines longueurs d'onde au détriment d'autres (comme dans le phénomène d'interférences).

Trois éléments entrent en jeu dans la perception de la couleur d'un objet : la source de lumière, l'objet et l'observateur (figure 1). Toute source de lumière est caractérisée par son spectre qui représente les variations de l'intensité

lumineuse en fonction de la longueur d'onde. Ce spectre est différent selon qu'il s'agit du Soleil, d'une lampe à halogène ou d'un tube fluorescent. C'est pourquoi les couleurs des objets n'apparaissent pas exactement les mêmes selon la lumière blanche qui l'éclaire. L'objet renvoie cette lumière incidente en modifiant le spectre de celle-ci. La lumière renvoyée est caractérisée par le spectre de réflectance. Le troisième élément est l'observateur (son œil et son cerveau).

Les couleurs liées à la nature chimique

Prenons par exemple une tomate. Elle apparaît rouge à un observateur parce qu'elle absorbe toutes les longueurs d'onde de la lumière incidente sauf celles qui correspondent au rouge. C'est un pigment, le lycopène, qui est responsable de cette absorption (voir son spectre sur la figure 1). Et ce sont les chlorophylles qui sont responsables de la couleur verte des feuilles

car elles absorbent très peu la lumière dans un domaine de longueurs d'onde correspondant au vert. Comme ce sont des composés chimiques qui sont ici à l'origine de la couleur, on parle de *couleur chimique*, dénomination qu'il faut considérer comme un raccourci de *couleur liée à la nature chimique*. Nous reviendrons plus loin sur cette question de dénomination.

Les composés organiques qui apparaissent colorés comportent des doubles liaisons conjuguées ou des cycles aromatiques, ou encore des hétérocycles. La délocalisation des électrons π est à l'origine de transitions électroniques se situant dans le domaine du visible (transitions $\pi-\pi^*$). Les électrons n de paires non liantes (sur des atomes d'azote en particulier) peuvent être également impliqués (transitions $n-\pi^*$). Ces transitions sont mises en jeu dans l'absorption de la lumière à certaines longueurs d'onde, ce qui confère des couleurs. Ainsi, les spectroscopistes donnent à ces composés le nom de *chromophore* (du grec *chroma*, « la

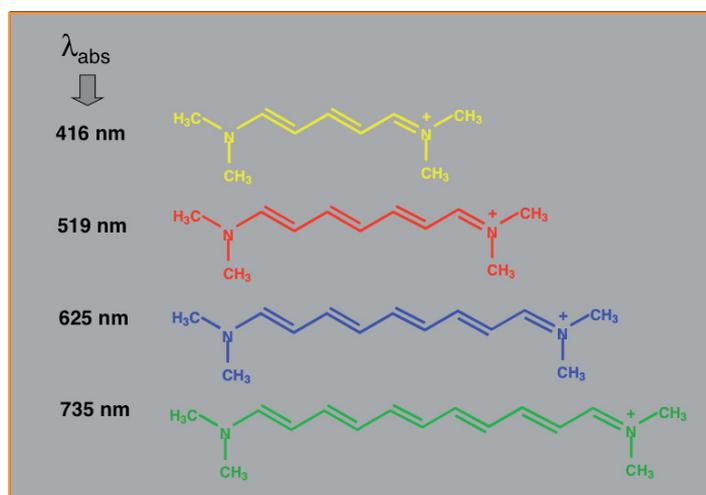


Figure 2 - Formules chimiques et couleurs des cyanines. La longueur d'onde du maximum d'absorption (indiquée à gauche) augmente avec le nombre de doubles liaisons conjuguées, d'où une variation importante de la couleur du composé.

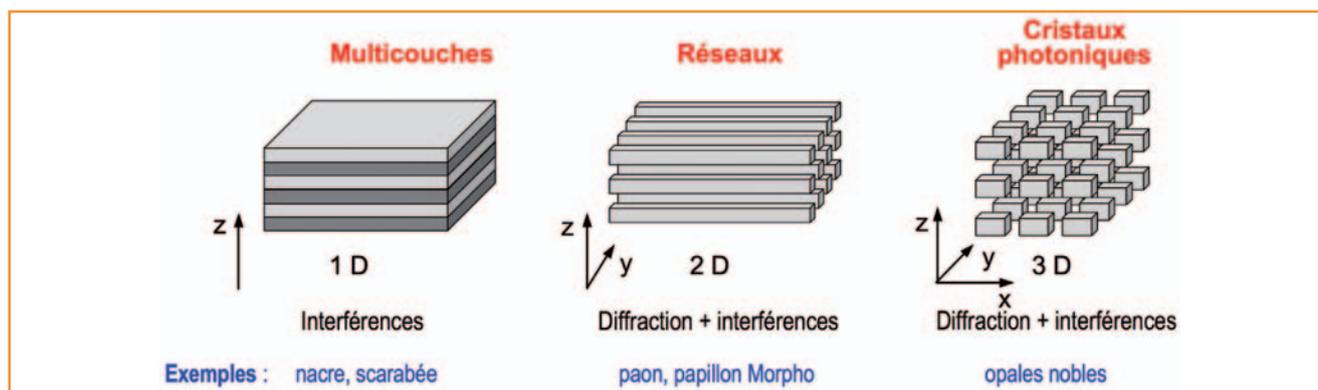


Figure 3 - Structures périodiques à une dimension (multicouches), deux dimensions (réseaux) et trois dimensions (cristaux photoniques) donnant lieu à des couleurs interférentielles. Dans le cas des structures périodiques à deux et trois dimensions, il y a diffraction de la lumière.

couleur », et *phorein*, « porter »). La famille des cyanines illustre bien le fait que plus la conjugaison est importante, plus le spectre d'absorption est déplacé vers les grandes longueurs d'onde (figure 2).

Les composés inorganiques offrent également des couleurs très variées [6]. On peut les classer en quatre catégories selon les phénomènes mis en jeu : l'absorption par des ions métalliques (principalement les métaux de transition), les transferts de charge (oxygène – ion métallique et ion métallique – ion métallique), les centres colorés (anomalies de l'arrangement cristallin) et l'absorption de la lumière par le cristal dans son ensemble (théorie des bandes).

Parmi les matières colorantes [7-11], on distingue les colorants et les pigments. Les colorants sont des composés organiques qui présentent une affinité pour le substrat sur lequel ils sont appliqués. Souvent solubles dans l'eau, ils sont employés sous forme de solution aqueuse. Les pigments sont, quant à eux, des composés minéraux ou organiques insolubles dans le milieu où ils sont dispersés. Ils ne sont pas affectés physiquement ou chimiquement par ce milieu.

Les couleurs dites « physiques »

Lorsque les couleurs d'un objet ne sont pas dues à l'absorption de la lumière par des pigments ou des colorants, mais résultent de phénomènes physiques, elles sont généralement qualifiées de *couleurs physiques*. Ces phénomènes [2] sont les suivants :

- la *dispersion* de la lumière par réfraction (ex. : dispersion par un prisme, arc-en-ciel) ;
- la *diffusion* de la lumière par un ensemble de particules de petite taille : diffusion Rayleigh si la taille des particules est inférieure au dixième de la longueur d'onde (ex. : couleur bleue du ciel), et diffusion de Mie pour des particules plus grosses (ex. : couleur blanche du lait et des nuages) ;
- les *interférences* (avec ou sans *diffraction*) lorsqu'un objet présente une structure dont au moins une dimension est de l'ordre de grandeur des longueurs d'onde de la lumière.

La Nature foisonne de ce dernier type de couleurs appelées *couleurs interférentielles* ou *couleurs structurales* [2, 12], dont la caractéristique importante est de dépendre de l'angle d'incidence de la lumière et de l'angle d'observation : on parle dans ce cas d'iridescence. Il convient de distinguer les couches minces (ex. : bulle de savon, film d'huile sur l'eau) et les objets qui possèdent une périodicité structurale

à une, deux ou trois dimensions à l'échelle de la longueur d'onde (figure 3).

Les verres dopés avec des nanoparticules métalliques : couleur physique et/ou chimique ?

Examinons maintenant un cas particulier très intéressant : le verre rubis qui doit son nom à sa couleur rouge due à l'inclusion de nanoparticules d'or qui absorbent la lumière sauf dans le rouge [13]. Le phénomène responsable de l'absorption est physique : les ondes électromagnétiques qui constituent la lumière provoquent une oscillation collective des électrons à la surface du métal ; il s'agit de *plasmons de surface*. Il est toutefois difficile de parler ici strictement de couleur physique car la couleur observée dépend de la nature chimique du métal. En effet, elle n'est pas la même pour des nanoparticules d'or, d'argent ou de cuivre. Peut-on dire alors qu'il s'agit à la fois d'une couleur physique et d'une couleur chimique ? Ce vocabulaire n'est guère satisfaisant. Comment résoudre cette difficulté ?

Il convient de remarquer que l'absorption de la lumière par un pigment ou un colorant n'est pas un phénomène chimique : il s'agit de l'absorption d'un photon qui fait passer une molécule de l'état fondamental à un état excité par promotion d'un électron dans une orbitale d'énergie supérieure [14]. Ce phénomène relève de la physique quantique. Aussi est-il préférable de parler de *couleurs par absorption* (figure 4). De même que, au lieu de parler de couleurs physiques, il serait préférable d'employer les termes de *couleurs par dispersion*, *couleurs par diffusion* et *couleurs interférentielles*.

Les émissions de lumières colorées : l'incandescence et la luminescence

L'autre grande classe de couleurs concerne les émissions de lumières que nous percevons colorées. Deux types de phénomènes en sont responsables : l'*incandescence* et la *luminescence* [15]. L'incandescence est l'émission de lumière par les corps portés à haute température. Les couleurs observées dépendent très peu de la nature du corps, mais essentiellement de la température. Au contraire, les divers types de luminescence sont des émissions de lumière qui ne résultent pas d'une augmentation de température, d'où l'appellation fréquente de *lumière froide* par opposition à l'incandescence, qualifiée de *lumière chaude*. Contrairement à l'incandescence, la luminescence dépend de la nature de la substance émettrice.



Figure 4 - Les couleurs proviennent soit d'une interaction de la lumière avec la matière (couleurs par absorption, couleurs physiques), soit d'une émission de lumière colorée (incandescence, luminescence). Certaines couleurs sont liées à la nature chimique (partie droite), d'autres non (partie gauche).

Les couleurs de l'incandescence

Les couleurs des corps incandescents vont du rouge au bleu en passant par l'orangé, le jaune et le blanc selon la température (voir les photos d'illustrations sur la figure 4) : vers 700 °C, la couleur est rouge, puis devient jaune-orangé vers 1 500 °C ; à partir de 2 000 °C, le corps produit une lumière presque blanche, et au-delà de 7 000 °C, la couleur est d'un blanc de plus en plus bleuté (figure 5).

Cette évolution de la couleur avec la température s'explique grâce au concept de « corps noir » dont les lois de l'émission ont été établies à la fin du XIX^e siècle. Quand la température augmente, le maximum du spectre de la lumière émise – qui est continu – se déplace vers le bleu et l'intensité lumineuse croît. La relation entre la couleur perçue et la température a conduit à la notion de *température de couleur* qui caractérise la *chromaticité* du rayonnement émis par une source. La température de couleur est importante dans le domaine de l'éclairage car elle permet de distinguer les diverses sources de lumière blanche. Attention, un blanc dit « chaud » (lampe à incandescence par exemple) correspond à une température de couleur inférieure à celle d'un blanc dit « froid » ! Rien à voir avec les couleurs chaudes et les couleurs froides qui sont des notions purement subjectives non quantifiables !

Les couleurs de la luminescence

Quand les atomes ou les molécules constitutives d'une substance ont absorbé de l'énergie (on dit qu'ils sont portés

dans un état « excité »), le surplus d'énergie ainsi acquis est dans certains cas rétrocedé sous forme de lumière appelée *luminescence*. Il existe divers types de luminescence qui se distinguent par la façon dont l'énergie est fournie aux atomes ou aux molécules [15] : photoluminescence, électroluminescence, chimiluminescence, bioluminescence, cathodoluminescence, etc. Nous nous limiterons aux deux premières qui sont les formes de luminescence les plus importantes au plan pratique.

La photoluminescence est une émission de lumière consécutive à une absorption de lumière. On distingue deux types : la *fluorescence* et la *phosphorescence* [16-17]. Dans le cas de la fluorescence, les espèces excitées reviennent très rapidement à leur état d'énergie original, tandis que dans celui de la phosphorescence, les espèces excitées transitent par un état d'énergie intermédiaire (état triplet pour les molécules organiques), où elles restent un certain temps avant de retourner à leur état fondamental.

La très grande majorité des substances fluorescentes employées dans la pratique sont des composés organiques dont les plus connus sont la fluorescéine, les rhodamines, les coumarines et les acridines. Une substance fluorescente éclairée par une lumière blanche apparaît d'une couleur particulièrement lumineuse car la couleur de la lumière émise par fluorescence se superpose à la couleur par absorption. On parle couramment de « couleurs fluo ». La fluorescence intervient bien souvent dans la vie quotidienne : les surligneurs, les vêtements fluo, les gilets de sécurité, les peintures fluorescentes pour la décoration, les cosmétiques fluo et divers objets [1, 15].

En biologie, une des applications importantes de la fluorescence est l'imagerie multicolore du vivant qui a



Figure 6 - Photoluminescence de nanocristaux semi-conducteurs (quantum dots) éclairés par une lampe ultraviolette. Ils sont constitués de sélénure de cadmium de différentes tailles allant de 1 nm (violet) à 4 nm (rouge) avec une coque protectrice en sulfure de zinc (Aldrich).



Figure 5 - La couleur d'un corps incandescent est directement liée à la température, que l'on dénomme, de ce fait, *température de couleur*. Il s'agit d'une température absolue exprimée en kelvins (K).

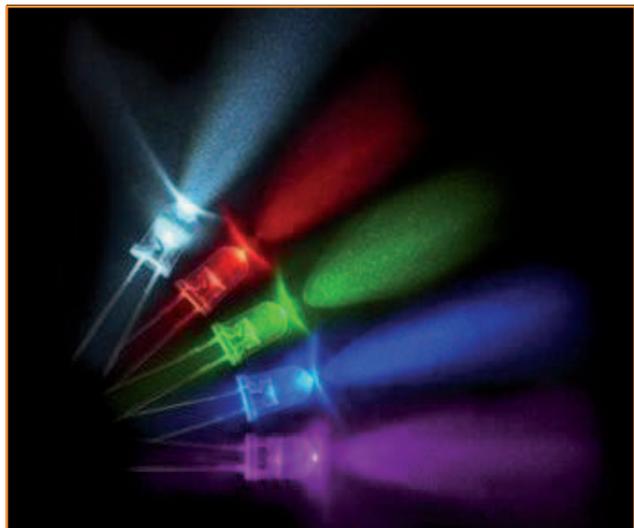


Figure 7 - Les LED produisent des lumières colorées qui dépendent de la nature du semi-conducteur (www.minineon.com).

connu deux révolutions vers la fin du XX^e siècle avec l'avènement des protéines fluorescentes [18] et des nanocristaux semi-conducteurs [19] (figure 6).

Quant à l'électroluminescence, ce phénomène est une émission de lumière résultant de l'application d'un champ électrique à un gaz ou un solide [20]. Cette émission est mise en œuvre dans la pratique pour créer des sources lumineuses, à des fins d'éclairage ou de visualisation. En particulier, les LED (diodes électroluminescentes) ont envahi notre quotidien. La couleur de la lumière émise dépend de la nature du semi-conducteur employé (figure 7).

Certains composés organiques peuvent avoir également un comportement de semi-conducteur et donner ainsi lieu au phénomène d'électroluminescence. Ils entrent dans la constitution des OLED (« organic light emitting diodes ») qui offrent notamment la possibilité de fabriquer des écrans très lumineux car émissifs par eux-mêmes, tandis que les écrans à cristaux liquides (LCD) nécessitent, quant à eux, un éclairage par l'arrière.

En résumé, la figure 4 rassemble tous les phénomènes à l'origine des couleurs en distinguant d'une part les couleurs qui résultent d'une interaction lumière-matière et les

émissions de lumières colorées, et d'autre part les couleurs qui sont liées à la nature chimique et celles qui ne le sont pas.

Références

- [1] Valeur B., *La couleur dans tous ses éclats*, Belin, 2011.
- [2] Elias M., Lafait J. (dir.), *La Couleur. Lumière, vision et matériaux*, Belin, 2006.
- [3] Zuppiroli L., Bussac M.-N., *Traité des couleurs*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2011 (nouvelle éd.).
- [4] Nassau K., *The physics and chemistry of color. The fifteen causes of color*, John Wiley & Sons, 2001.
- [5] Imbert M., *ibid* [2], p. 18-34.
- [6] Macaudière P., Demourgues A., La couleur dans les solides minéraux, *L'Act. Chim.*, 2002, 251, p. 91.
- [7] Wyart D., Colorants et pigments, *Techniques de l'Ingénieur*, 2010, AM 3 234v2.
- [8] Delamare F., Guineau B., *Les matériaux de la couleur*, Découvertes Gallimard, Sciences et Techniques, Gallimard, 1999.
- [9] Cardon D., *Le monde des teintures naturelles*, Belin, 2003.
- [10] Perego F., *Dictionnaire des matériaux du peintre*, Belin, 2005.
- [11] Valeur B., La chimie crée sa couleur... sur la palette du peintre, dans *La chimie et l'art : le génie au service de l'homme*, M.-T. Dinh-Audouin, R.A. Jacquesy, D. Olivier, P. Rigny (coord.), EDP Sciences, Collection L'Actualité Chimique-Livres, 2010, p. 129-167.
- [12] Berthier S., *Iridescences*, Springer, 2003.
- [13] Terrien C., Approche théorique de la coloration du verre rubis à l'or, *Le Bup*, 2008, 902, p. 317.
- [14] Jacquemin D., Daniel C., Molécules et lumière : une histoire d'électrons, *L'Act. Chim.*, 2014, 382-383, p. 93.
- [15] Valeur B., *Lumière et luminescence*, Belin, 2005.
- [16] Valeur B., *Invitation à la fluorescence moléculaire*, De Boeck, 2004.
- [17] Valeur B., Berberan-Santos M.N., *Molecular Fluorescence. Principles and Applications*, Wiley-VCH, 2012 (2nd ed.).
- [18] Tsien R.Y., Constructing and exploiting the fluorescent protein paintbox (Nobel Lecture), *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2009, 48, p. 5612.
- [19] Resch-Genger U., Grabolle M., Cavaliere-Jaricot S., Nitschke R., Nann T., Quantum dots versus organic dyes as fluorescent labels, *Nat. Methods*, 2008, 5, p. 763.
- [20] Le Barny P., L'électroluminescence, *L'Act. Chim.*, 2002, 251, p. 102.

Bibliographie complémentaire

- La couleur, *Dossier Pour la Science* n° 27, avril 2000.
- La science des couleurs, *TDC* n° 922, oct. 2006.
- *Lumière sur la couleur* (collectif), Éditions de Monza, 2010.



Bernard Valeur

est professeur émérite au Conservatoire national des arts et métiers*.

* Département CASER, CNAM, 292 rue Saint-Martin, F-75141 Paris Cedex 03.

Courriel : bernard.valeur@cnam.fr

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

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

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

Alors vite à vos souris !

Comprendre le geste du peintre dans son atelier

Approches croisées entre chimie et histoire de l'art

Philippe Walter

Résumé Nombreux sont les peintres qui ont éprouvé le désir de connaître la nature et les propriétés des couleurs qu'ils employaient, préparaient ou faisaient préparer. Depuis plus d'une vingtaine d'années, un usage croissant de nouvelles technologies d'analyse physico-chimique a permis de fournir aux spécialistes du patrimoine culturel de nombreuses informations nouvelles sur la datation, la conservation et la nature des œuvres d'art. Aujourd'hui, la miniaturisation des technologies d'analyse chimique non invasive conduit à de nouvelles formes de recherche interdisciplinaire, face aux œuvres, dans le musée ou le monument. La précision des données et la facilité de leur acquisition modifient notre manière de comprendre l'évolution des pratiques artistiques. L'intérêt de ces mesures est illustré dans cet article par quelques exemples où nous verrons comment certains artistes ont réussi à transformer et mélanger des matières pour réaliser des effets nouveaux.

Mots-clés Analyse chimique, peinture, pigment, couleur, JIREC 2014.

Abstract **Understanding the gesture of the painter in his workshop by combining approaches in chemistry and art history**

Many painters have felt the desire to know the nature and properties of the colors they used, prepared or have asked to be prepared. For over twenty years, a growing use of new methods for physico-chemical characterization of artistic materials has provided substantive new information on dating, conservation and the nature of artworks. Today the miniaturization of non-invasive technologies allows at working in museums or monuments and led to new forms of interdisciplinary research. The data accuracy and the easiness of their acquisition change our way of understanding the evolution of artistic practices. The interest of these measurements is illustrated by some examples showing how some artists have managed to turn and mix materials to achieve new effects.

Keywords Chemical analysis, painting, pigment, colour, JIREC 2014.

L'art de la peinture était uniformément défini durant l'Antiquité comme visant à la *mimesis*, c'est-à-dire à la représentation ou à l'imitation de la nature. La peinture artistique se devait d'atteindre une perfection dans la beauté de sa composition, de ses sujets et de ses modèles, tout en étant leur reproduction la plus exacte possible, au point que l'objet et sa représentation peinte pouvaient se confondre. La qualité de cette réalisation était un véritable critère d'appréciation des performances picturales pour les Grecs de l'Antiquité – et par la suite – et elle conférait à l'auteur d'une œuvre un statut particulier.

De nombreuses anecdotes illustrent cette quête de représentations naturalistes, telle celle rapportée par Pline l'Ancien dans le livre 35 de son *Histoire naturelle* au sujet de Parrhasius, reconnu en particulier pour sa capacité à peindre les contours des corps [1] : « Il entra en compétition avec Zeuxis : celui-ci avait présenté des raisins si heureusement reproduits que les oiseaux vinrent voler auprès d'eux sur la scène ; mais Parrhasius présenta un rideau peint avec une telle perfection que Zeuxis, tout gonflé d'orgueil à cause du jugement des oiseaux, demanda qu'on se décidât à enlever

le rideau pour montrer la peinture, puis, ayant compris son erreur, il céda la palme à son rival avec une modestie pleine de franchise car, s'il avait personnellement, disait-il, trompé les oiseaux, Parrhasius l'avait trompé, lui, un artiste. »

Mais comment était-il possible de réaliser cette imitation de la nature ? L'artiste n'avait à sa disposition qu'une palette de pigments naturels relativement restreinte ainsi que quelques techniques picturales particulières. Ainsi, pour réussir cette démarche, les artistes ont dû élargir la liste des couleurs à leur disposition grâce à la recherche de minéraux nouveaux et à la synthèse de matières comme le blanc de plomb, appelé aussi céruse, les pigments laqués et le bleu égyptien. La richesse des pigments, leur éclat, les subtiles transitions chromatiques obtenues par des mélanges, la superposition de couches de peinture, la présence de réseaux de hachures furent autant d'éléments qui ont alors conduit à la réalisation d'une peinture plus réaliste et harmonieuse. Pline l'Ancien expliquait encore dans le même ouvrage [1] : « Les couleurs sont ou sombres ou vives. Elles le sont ou par leur nature ou par leur mélange. Les couleurs vives, fournies au peintre par le maître, sont le minium,

l'arménium, le cinabre, la chrysocolle, l'indigo, le pourpre. Les autres couleurs sont sombres. À quelque catégorie qu'elles appartiennent, les unes sont naturelles, les autres artificielles : la sinopis, la rubrique, le paraetonium, le mélinum, l'érétrie, l'orpiment, sont naturelles ; les autres sont artificielles, et d'abord celles dont nous avons parlé à propos des métaux (azur, cinabre, orpiment, orobitis, sil), puis, parmi les couleurs communes, l'ocre, la céruse brûlée, la sandaraque, la sandyx, le syrique, l'atramentum. »

Dès lors, les matériaux naturels ou synthétiques ainsi que leurs transformations jouaient un rôle fondamental dans le processus de création artistique. Le peintre et chimiste Léonor Mérimée insistait encore sur ce point en 1830 dans son ouvrage *De la peinture à l'huile* [2] : « Tous les peintres, en étudiant leur art, éprouvent plus ou moins le désir de connaître la nature et les propriétés des couleurs qu'ils emploient. » Nous allons dans cet article décrire quelques exemples qui montrent comment ces matières et ces techniques ont été adoptées au cours de l'histoire, en nous focalisant sur des cas qui mettaient en jeu une chimie douce, à température ambiante et en phase aqueuse. Ces recherches sont effectuées en croisant trois démarches qui conduisent à entrer dans l'atelier de l'artiste pour comprendre son activité créative :

- L'étude de manuels anciens, de commentaires sur le travail des artistes, de règles de corporation, de contrats, de comptes, d'inventaires, etc. permet des reconstitutions de procédés de synthèses et de comprendre le choix des matières.

- L'observation des œuvres et parfois leur reconstitution fournissent des détails sur la manière d'appliquer la couleur : matière pâteuse ou fluide, en couches épaisses ou très fines, avec des superpositions pour créer des effets particuliers par transparence.

- L'analyse chimique, sur des prélèvements ou directement sur les œuvres, permet de décrire la nature et la qualité des pigments ainsi que de préciser les techniques employées. Dans ce cadre, toutes les techniques de caractérisation des matériaux peuvent être mises en œuvre. On peut en particulier citer l'utilisation des grands instruments (rayonnement synchrotron, sources de neutrons, accélérateurs de particules chargées) ou à l'inverse d'outils légers et transportables permettant les mesures par spectrométrie de fluorescence des rayons X, diffraction des rayons X, spectroscopies UV-visible, de fluorescence UV, Raman, infrarouge, etc.

Les pigments laqués

Depuis l'époque gréco-romaine, de nombreux pigments rouges et roses ont été employés sous la forme de pigments laqués, c'est-à-dire des produits synthétiques élaborés le plus souvent à partir de minéraux riches en aluminium et de colorants. La recette de fabrication de ces couleurs consistait à extraire des molécules colorantes issues de plantes (racine de la garance notamment) ou d'animaux (insectes comme le kermès et la cochenille), puis à les précipiter par l'action d'un alcali (lessive de cendres ou natron) sur un sel d'aluminium soluble dans l'eau, comme l'alun, ou bien sur des argiles ou de la craie. Le procédé était simple et rapide à mettre en œuvre et ne nécessitait que de l'eau chauffée pour solubiliser davantage les sels d'aluminium. Cependant, les matières obtenues présentaient une plus ou moins grande stabilité en fonction de la nature des molécules colorantes et des substrats inorganiques. L'étude de textes anciens et l'analyse

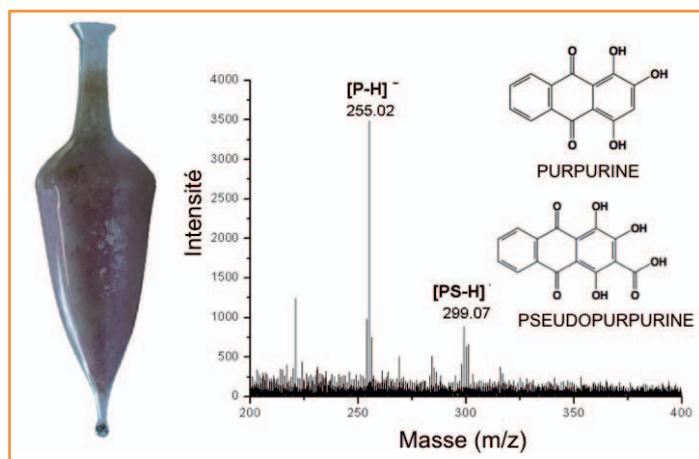


Figure 1 - Analyse par spectrométrie de masse utilisant la technique d'ionisation par désorption laser (LDI-MS, mode négatif) d'un fard rose conservé dans un flacon de verre blanc en forme d'amphorisque (Wederath, Allemagne). Les ions caractéristiques de la purpurine $[M-H]^-$ $m/z = 255$ et de la pseudopurpurine $[M-H]^-$ $m/z = 299$ sont clairement identifiés (d'après [6]), ainsi que d'autres molécules mineures comme la munjistine $[M-H]^-$ $m/z = 285$.

de tels pigments permettent aujourd'hui de mieux préciser ces pratiques, lorsque les couleurs ont été conservées.

C'est par l'intermédiaire d'analyses chimiques que l'on arrive à mieux comprendre la nature des molécules colorantes qui ont été employées. La chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse permet d'identifier des marqueurs moléculaires, notamment dérivés de l'anthraquinone, qui sont caractéristiques de substances végétales à l'origine de la couleur [3]. Il s'agit notamment des extraits des plantes de la famille des Rubiacées, comme la garance des teinturiers (*Rubia tinctorum* L.) ou la garance sauvage (*Rubia perigrina* L.). L'acide carminique et l'acide kermésique sont caractéristiques de l'usage de petits insectes de la famille de la cochenille (*Dactylopius coccus* qui provient du Nouveau Monde et *Kermes vermilio* en Europe). Cependant, l'identification précise de la nature de la plante d'où étaient extraites les molécules colorantes n'est pas toujours aisée car des différences de concentration de colorants sont observées suivant la partie de la plante utilisée (partie ligneuse de la racine ou écorce), son âge et son environnement, ou encore le mode de préparation du pigment laqué (composition, alcalinité et température des bains d'extraction, temps de macération).

Nous avons eu l'occasion d'étudier des pigments laqués roses employés durant la période gréco-romaine comme fards ou comme pigments [4-5]. La faible concentration de molécules colorantes présentes dans les échantillons de couleur pâle ainsi que la petite quantité de matière à notre disposition n'ont pas permis d'appliquer les techniques classiques d'analyses chromatographiques : les mesures ont été réalisées sur des petits grains de matière de quelques micromètres de côté grâce au développement de méthodologies analytiques nouvelles telles que le MALDI-ToF (« matrix-assisted laser desorption/ionisation-time of flight ») et SERS (« surface-enhanced Raman spectroscopy »). La présence de pseudopurpurine, de purpurine et de munjistine (figure 1) a ainsi été révélée dans plusieurs échantillons de produits cosmétiques grecs datés du IV^e siècle avant notre ère et provenant de flacons en céramique découverts dans le cimetière de Démétrias (Volos, Grèce), et aussi dans d'autres matières de l'époque romaine à Trèves, à Pompéi et à

Cologne [6]. Cette association de molécules dérivées de l'antraquinone et l'absence d'alizarine conduisent à penser que la garance sauvage fut utilisée pour la synthèse de ces pigments. La phase minérale a pu dans certains de ces cas être identifiée par diffraction de rayons X. Il s'agit de basaluminite, un hydroxysulfate d'aluminium hydraté de formule chimique $(Al_4(SO_4)(OH)_{10}, 5H_2O)$.

Une pratique de Rembrandt

Le second exemple concerne la formulation d'une peinture pour obtenir une couche avec une transparence contrôlée. La pratique de nombreux peintres consiste à superposer des couches colorées de natures différentes pour créer des effets particuliers : une couche sous-jacente rouge, jaune ou brune modifie la perception des autres couleurs déposées au-dessus d'elle, dans la mesure où elles ne sont pas trop opaques. Dans le cas contraire, cette pratique employée par des artistes comme Nicolas Poussin ou Rembrandt perd de son intérêt. Il leur a donc été nécessaire de trouver les moyens techniques pour contrôler leur transparence par l'ajout de différents ingrédients et/ou le dépôt de couches picturales très fines.

Pour illustrer cette pratique, partons de l'analyse d'un échantillon du tableau de Rembrandt van Rijn, le *Portrait de Nicolaes van Bambeeck* (1641), exposé aux Musées royaux des Beaux-Arts de Belgique. L'étude de cette œuvre, coordonnée par Jana Sanyova (Institut royal du Patrimoine artistique, Bruxelles) a mis en évidence une superposition complexe de couches de peintures (figure 2 à droite). L'une des caractéristiques de l'œuvre de Rembrandt est l'utilisation de la technique du clair-obscur qui attire le regard par l'intermédiaire de forts contrastes entre zones lumineuses et sombres. Pour ce faire, le travail des couches sous-jacentes aux figures ou aux paysages avait une grande importance. Le Maître a, au cours de sa vie, employé principalement deux types de préparation du support de la peinture avant de réaliser ses figures [7] : une préparation double, qui consistait à superposer une première couche rouge ou orangée à une seconde couche grise ou gris-jaune, ou la préparation simple, composée principalement de sable et de kaolinite liés à de l'huile. L'analyse récente d'un large corpus d'œuvres a permis de montrer que la seconde pratique ne semble avoir été mise en œuvre par Rembrandt qu'à partir de 1640.

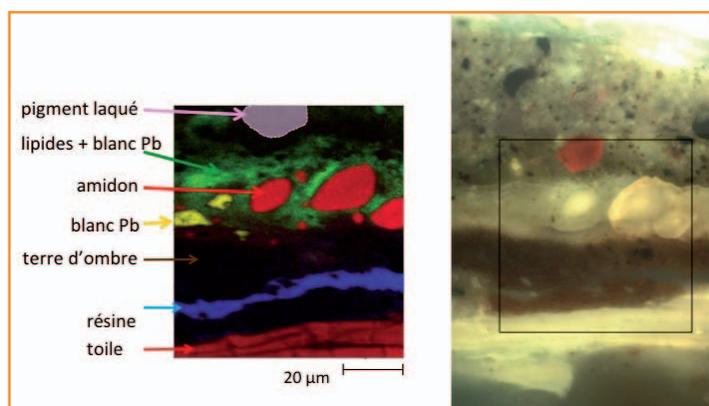


Figure 2 - Analyse par ToF-SIMS d'un échantillon de peinture de Rembrandt van Rijn, le *Portrait de Nicolaes van Bambeeck* (1641, Musées royaux des Beaux-Arts, Bruxelles). À gauche : identification des principaux composés à partir des spectres de masses mesurés. À droite : section du prélèvement observée en microscopie optique (d'après [15]).

L'imagerie chimique par spectrométrie de masse par ions secondaires ToF-SIMS (« time of flight secondary ion mass spectrometry ») de la section d'un échantillon prélevé sur l'œuvre citée précédemment révèle la nature des différents matériaux (figure 2 à gauche). Cette méthode est un moyen particulièrement efficace pour mesurer localement la variation de la composition chimique dans un échantillon. Elle suscite un intérêt croissant dans le domaine de la caractérisation des matériaux artistiques car sa sensibilité et sa résolution se sont grandement améliorées. Il est important en effet que la résolution spatiale de l'analyse puisse être bien inférieure à l'épaisseur d'une couche déposée par le peintre, c'est-à-dire usuellement une dizaine de micromètres pour l'art ancien. Depuis l'avènement des sources d'ions polyatomiques, comme les agrégats d'or, de bismuth ou les fullerènes, le ToF-SIMS permet l'observation de composés moléculaires complexes à l'échelle du micromètre, offrant en particulier des informations importantes aux biologistes et aux médecins [8]. Sous l'action du bombardement des ions primaires, des atomes, des fragments moléculaires et des molécules sont directement désorbés de la surface d'un échantillon sous forme chargée avant d'être analysés par spectrométrie de masse. Cette méthode d'analyse est donc une analyse de surface et les ions secondaires produits proviennent d'une profondeur inférieure à 10 nm. Il s'en suit la nécessité d'une préparation complexe des échantillons pour éliminer les contaminations de leurs surfaces [9].

On distingue ainsi aisément par spectrométrie de masse les différentes couches qui ont été superposées par l'artiste [10]. Des pigments comme le blanc de plomb, une terre colorée et un pigment laqué ont été identifiés ainsi que certains acides gras qui sont caractéristiques de l'huile utilisée comme liant. On note également la présence de grains d'amidon de 10 µm de diamètre environ, dont l'usage était jusqu'à présent inconnu chez cet artiste. D'autres études complémentaires permettent de montrer qu'il s'agit de farine de blé [7].

Les grains d'amidon, qui ont un indice optique très proche de celui de l'huile du liant une fois sec (respectivement 1,54 et 1,52), ont très certainement été intégrés dans la formulation d'une des couches de peinture pour la rendre plus transparente et laisser ainsi la lumière pénétrer jusqu'aux couches colorées sous-jacentes pour créer une sensation particulière lors de l'observation de l'œuvre. En remplaçant une partie du blanc de plomb utilisé habituellement par de la farine de blé, Rembrandt aurait donc utilisé un moyen pour que la couche de préparation rouge-brun sous-jacente soit mieux visible.

La finesse des couches des glacis de Léonard de Vinci

L'observation minutieuse de *La Joconde* ne permet pas de discerner visuellement les traces de pinceau de l'artiste, ni les contours et les limites entre les différents éléments du tableau. Tout semble complètement fondu d'une couleur à l'autre. L'œil ou le nez de Mona Lisa ne sont ainsi pas dessinés avec un contour, mais grâce aux ombres qui modèlent sa surface. Ces couches ont été réalisées par la technique des glacis : il ne s'agit pas d'une peinture opaque comme la peinture à l'huile traditionnelle à cette époque, mais d'une matière presque transparente, teintée par un peu de pigment noir dispersé dans beaucoup de matière organique [11]. En superposant des couches de cette matière, Léonard de Vinci a obtenu des teintes qui peuvent

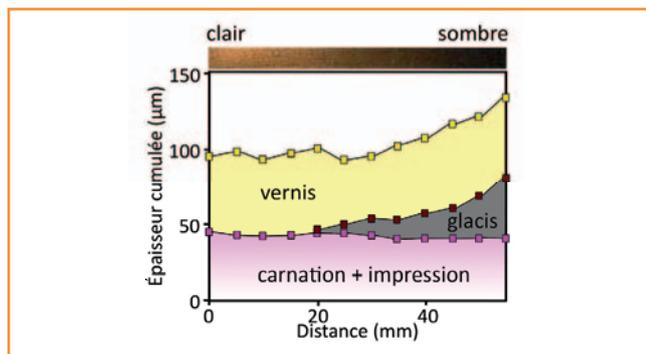


Figure 3 - Évolution de l'épaisseur des couches de peintures et de vernis déposées pour réaliser le tableau *La Joconde*, le long d'une ligne traversant la joue, allant du bord du nez à l'oreille gauche. Ces données sont obtenues par modélisation de mesures effectuées par fluorescence des rayons X (d'après [13]).

devenir très sombres et qui donnent une impression de volume différente de celle permise par une matière picturale conventionnelle. Cette réalisation est d'autant plus délicate que le glacis n'est pas une matière facile à utiliser car il ne peut être modelé en couches d'épaisseur variable. Il est impossible de placer en une fois une couche fine à un endroit et plus épaisse à l'autre car cette matière picturale est longue à sécher, ce qui lui laisse le temps pour niveler les irrégularités en s'écoulant naturellement. Pour passer d'une couche fine à une plus épaisse, il faut donc jouer de superpositions en faisant attention aux étapes de séchage.

Impalpable, impossible à mesurer, la pratique du *sfumato* a conduit à bien des commentaires. Certains ont cependant réussi à obtenir des effets comparables en tentant de reproduire expérimentalement les œuvres. Jacques Franck, expert au Centre d'études léonardiennes de l'Université de Los Angeles, a proposé de déposer en très grand nombre de très fines couches de peinture, selon une technique qu'il appelle le micro-divisionnisme [12] : sur la couche préparatoire, il marque les zones les plus sombres par de fines hachures, recouvertes ensuite d'une couche translucide afin d'estomper les ruptures de couleurs. Les vides sont alors comblés avec des hachures de plus en plus petites, puis avec des points microscopiques plus ou moins espacés, en intercalant toujours des voiles de matière translucide entre chaque opération.

Les analyses non invasives et réalisées *in situ* par spectrométrie de fluorescence des rayons X [13] permettent de calculer l'épaisseur et la composition en éléments inorganiques de chacune des couches déposées. La figure 3 montre l'évolution de l'épaisseur des couches le long du visage de la Joconde, en allant du bord du nez jusqu'à l'oreille. On remarque la faible épaisseur de la matière picturale : Léonard de Vinci a déposé une couche d'impression blanche puis une couche de couleur rose teintée notamment par du vermillon (cinabre HgS) qui au total ne mesurent qu'un peu moins de 50 micromètres. Nous pouvons estimer que l'artiste a employé à peine 800 grammes de pigment blanc de plomb pour l'ensemble de son tableau, ainsi que quelques grammes de vermillon pour les carnations... Au-dessus, les glacis sont aussi ténus et atteignent une trentaine de micromètres d'épaisseur dans les zones les plus sombres. Des films aussi fins que deux micromètres environ sont mesurés au début du dépôt du glacis. L'artiste a donc dû multiplier les dépôts de cette matière pour arriver à l'état final du tableau, répéter son geste sans doute une quinzaine de fois, jusqu'à obtenir les

ombres les plus profondes. Ces mesures vont dans le même sens que les expérimentations de Jacques Franck, déjà décrites plus haut. La méthode employée par Léonard de Vinci a nécessité une extraordinaire patience car il lui fallait attendre le temps du séchage de la couche de glacis déposée avant d'en appliquer une nouvelle. Les textes anciens nous indiquent que la matière organique employée devait être un mélange de résine et d'huile. Les reconstitutions en laboratoire de tels mélanges montrent que le temps nécessaire à leur séchage devait être de quelques semaines. Ces éléments permettent de mieux comprendre un commentaire de Giorgio Vasari qui s'étonnait du fait que Léonard de Vinci avait eu besoin de quatre années pour réaliser son œuvre [14]. La délicatesse du résultat ne pouvait être obtenue qu'à ce prix.

Conclusion

Ces trois exemples illustrent de différentes manières l'utilisation de l'analyse chimique et des concepts de la chimie physique pour mieux comprendre certaines pratiques artistiques. Rarement formalisées par des théories et décrites par des textes, les pratiques artistiques peuvent ainsi être redécouvertes et lever un voile sur les activités techniques menées dans les ateliers des peintres. D'autres illustrations peuvent être trouvées dans l'ouvrage *L'Art-Chimie, Enquête dans le laboratoire des artistes* [15].

Références

- [1] Croisille J.-M., Traduction de Pliny l'Ancien, *Histoire Naturelle, Livre XXXV*, Les Belles Lettres, Paris, 1983.
- [2] Mèrimée J.-F.-L., *De la peinture à l'huile, ou Des procédés matériels employés dans ce genre de peinture, depuis Hubert et Jean Van-Eyck jusqu'à nos jours*, Ed. Mme Huzard, Paris, 1830.
- [3] Sanyova J., Étude des pigments organiques préparés à partir des racines de rubiacées européennes, *Art et chimie, la couleur : Actes du congrès*, J. Goupy, J.-P. Mohen (dir.), CNRS Éditions, 2000, p. 14-17.
- [4] Van Elslande E., Guérineau V., Thirion V., Richard G., Richardin P., Laprèvote O., Hussler G., Walter P., Analysis of ancient Greco-Roman cosmetic materials using laser desorption ionization and electrospray ionization mass spectrometry, *Anal. Bioanal. Chem.*, 2008, 390(7), p. 1873.
- [5] Van Elslande E., Lecomte S., Le Hô A.-S., Micro-Raman spectroscopy (MRS) and surface-enhanced Raman scattering (SERS) on organic colourants in archaeological pigments, *J. Raman Spectrosc.*, 2008, 39(8), p. 1001.
- [6] Walter P., Van Elslande E., L'analyse des fards, dans *Le bain et le miroir : soins du corps et cosmétiques de l'Antiquité à la Renaissance*, I. Bardies, P. Walter, M. Bimbenet-Privat (dir.), coll. Livres d'art, Gallimard, 2009, p. 126-141.
- [7] Sanyova J., Postec M., Groen K., Fonction de la farine de blé dans la préparation du *Portrait de Nicolaes van Bambeek* de Rembrandt (Musées royaux des Beaux-arts de Belgique, Bruxelles) : approche expérimentale, *Techné*, 2012, 35, p. 14.
- [8] Bich C., Touboul C., Brunelle A., Cluster TOF-SIMS imaging as a tool for micrometric histology of lipids in tissue, *Mass Spectrom. Rev.*, 2014, 33(6), p. 442.
- [9] Mazel V., Richardin P., Debois D., Touboul D., Cotte M., Brunelle A., Walter P., Laprèvote O., Identification of ritual blood in African artifacts using TOF-SIMS and synchrotron radiation microspectroscopies, *Anal. Chem.*, 2007, 79, p. 9253.
- [10] Sanyova J., Cersoy S., Richardin P., Laprèvote O., Walter P., Brunelle A., Unexpected materials in a Rembrandt painting characterized by high spatial resolution cluster-TOF-SIMS imaging, *Anal. Chem.*, 2011, 83, p. 753.
- [11] Walter P., Chemical analysis and painted colours: the mystery of Leonardo's *sfumato*, *Eur. Review*, 2013, 21(2), p. 175.
- [12] Franck J., La pratique du « micro-divisionnisme » dans l'atelier de Léonard de Vinci, *ArtItaliae. La revue de l'AHAI*, 2014, 20, p. 5.
- [13] de Viguier L., Walter P., Laval E., Mottin B., Sole V.A., Revealing the *sfumato* technique of Leonardo da Vinci by X-ray fluorescence spectroscopy, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2010, 49(35), p. 6125.
- [14] Vasari G., *Les vies des meilleurs peintres, sculpteurs et architectes*, traduit par A. Chastel, Éditions Actes Sud, 2005.
- [15] Walter P., Cardinali F., *L'Art-Chimie, Enquête dans le laboratoire des artistes*, Éditions Michel de Maule/Fondation de la Maison de la Chimie, 2013.



Philippe Walter

est directeur du Laboratoire d'Archéologie moléculaire et structurale (LAMS), Université Pierre et Marie Curie/CNRS*.

* Sorbonne Universités, Université Paris 6, LAMS, UMR 8220 CNRS/UPMC, 4 place Jussieu, F-75005 Paris.
Courriel : philippe.walter@upmc.fr

Le recours à l'histoire dans l'enseignement des sciences

Exemple des couleurs de l'arc-en-ciel

Olivier Morizot et Philippe Abgrall

- Résumé** S'inspirant des travaux de Gaston Bachelard sur le rôle de l'histoire des sciences dans l'enseignement des sciences, cet article présente les raisons pour lesquelles un physicien et un historien des mathématiques ont décidé d'écrire ensemble un cours de physique visant à expliquer l'arc-en-ciel à partir de son histoire, cours dont la partie relative aux couleurs sera ensuite présentée en exemple.
- Mots-clés** Enseignement, histoire des sciences, arc-en-ciel, couleur, JIREC 2014.
- Abstract** **The use of history in science education: example of rainbow colours**
This article presents the potentially fundamental intake of history of sciences to the teaching of sciences. After a short reflexion on that question, this approach is illustrated with the example of a course of physics explaining the rainbow through its history.
- Keywords** Teaching, history of sciences, rainbow, colour, JIREC 2014.



En préparation à ce cours, les étudiants doivent réaliser et commenter une photographie ou un dessin d'arc-en-ciel en s'inspirant du texte d'Aristote sur l'arc. Le cours commence par une projection commentée de ces images. Ici sont présentés les travaux de A. Poindron, E. Franchi, M. Allenbach et M. Motte (de gauche à droite), reproduits avec leur aimable autorisation, DR.

Par nature, l'arc-en-ciel est complexe et insaisissable. Son analyse par le strict biais de la physique contemporaine, comme on la trouve dans les manuels, n'est pas suffisante pour permettre aux étudiants d'en construire une compréhension complète et sensée [1]. Ceci provient notamment du fait que le rôle central de l'observateur dans l'apparition de l'arc est souvent négligé, aussi bien que le sont les éléments de biologie, psychologie, poésie, peinture, linguistique, philosophie et mythologie impliqués dans l'appréhension du phénomène. Or l'histoire des sciences peut justement nous amener à examiner des travaux produits dans des contextes culturel, linguistique, religieux, politique, philosophique et scientifique radicalement différents des nôtres. Ainsi une étude fine de l'évolution des théories de l'arc à travers l'histoire permettrait certainement d'aider les étudiants à comprendre l'importance de la langue, de la psyché, de la culture ou de l'acuité visuelle de l'observateur (ancien ou contemporain) lors de son étude de l'arc-en-ciel – et par extension, dans tout processus de recherche scientifique –, mais aussi de dépasser les obstacles pédagogiques et épistémologiques [2] que peut poser l'enseignement de ce phénomène. Et gageons que ce constat pourrait être extrapolé à tout l'enseignement des sciences.

Recourir à l'histoire des sciences : pourquoi, comment ?

Prendre en compte l'histoire d'une science pour enseigner cette science ne sert ni à orner cet enseignement d'atours plaisants, ni à

mettre en évidence un progrès régulier des connaissances. Cette tendance des manuels à proposer une histoire hagiographique des grands savants ne peut qu'enfermer les étudiants dans une croyance positiviste d'une science victorieuse, sans erreurs, et les éloigner de leur propre capacité à remettre en question leurs certitudes et à cerner les difficultés qui demeurent dans l'état actuel de la science.

La recherche en histoire des sciences nous révèle que le travail des savants ne s'est pas fait de manière continue et déterminée, mais qu'ils ont bien souvent commis des écarts considérables par rapport à ce que nous qualifierions de juste et conforme au corpus actuel des sciences. Et que les connaissances se sont constituées au prix d'une succession de tentatives, de réussites et d'échecs, qui a donné forme à leur complexité et parfois ouvert de nouvelles voies révolutionnaires. Ainsi l'histoire des sciences, en reconsidérant les cheminements parcourus par les savoirs, permet de mettre en évidence les questions qui se sont réellement posées devant un phénomène incompris, et de mieux comprendre les mécanismes qui ont mené successivement à des conclusions justes ou erronées. Ce travail d'historien a un rôle essentiel à jouer dans l'enseignement des sciences pour deux raisons principalement.

Premièrement, les véritables difficultés à interpréter les phénomènes qui sont révélées par l'histoire font échos aux difficultés réelles que les étudiants ne manquent pas de rencontrer à leur tour, mais qui sont la plupart du temps négligées par les enseignants, car masquées par la présentation logique des contenus proposée dans les manuels [2]. Dans les questions que se sont véritablement posées

les savants anciens confrontés aux mêmes problèmes, l'étudiant peut retrouver ses propres questions. Elles ont pour point commun d'être posées par des personnes qui ne connaissent pas les réponses *a priori*. De là, certainement l'étudiant peut-il mieux cerner la nature du problème résolu par l'enseignant et accéder ainsi à une meilleure compréhension de l'interprétation moderne qui en est donnée.

Deuxièmement, la présentation de la diversité d'interprétations d'un même phénomène au cours de l'histoire aura l'effet salutaire de révéler l'influence du contexte scientifique, certes, mais aussi religieux, politique, culturel et social dans lequel évolue le scientifique sur sa façon d'interpréter le monde et de recevoir des théories nouvelles, et ce y compris dans notre monde contemporain.

Application à l'étude de l'arc-en-ciel

Nous n'aurons pas la place ici de présenter toute la théorie de l'arc et limiterons donc la question au nombre de ses couleurs, telle que nous l'avons traitée ces deux dernières années dans un cours sur l'arc-en-ciel développé dans la licence Sciences et Humanités de l'Université d'Aix-Marseille. Cette observation de la variation du nombre des couleurs de l'arc au fil des époques devait permettre aux étudiants de s'interroger sur ce que cette variation nous dit de la couleur, de la complexité de ce concept, mais aussi de la difficulté à obtenir une réponse univoque et complète à une question scientifique apparemment simple.

Il est étonnant, et donc instructif, de voir Aristote attribuer trois couleurs seulement à l'arc : le rouge, le vert et le bleu [3], et ce quand bien même il affirme en percevoir parfois une quatrième, le jaune. Mais celle-ci ne serait qu'une illusion créée par le contraste et le mélange du rouge et du vert. En effet, selon lui « *au-delà* [du bleu], les couleurs n'apparaissent plus, et c'est avec le nombre trois qu'elles ont leur terme, de même que la plupart des choses. » Il semble clair à certains historiens des sciences [4] que ce trois réponde à la ternarité fondamentale du monde selon Aristote, et qu'il soit la conséquence d'une symbolique numérique affectant l'observation du scientifique, trop souvent considérée comme absolument objective. Un extrait du *De Caelo* renforce cette hypothèse : « *En effet, comme l'affirmation aussi les Pythagoriciens, le tout et toutes les choses sont limités par le nombre trois* » [5]. On observe, ailleurs, qu'Empédocle et Démocrite, réputés pour leur conception du monde quaternaire, où la place des quatre éléments est prépondérante, voient pour leur part quatre couleurs à l'arc. On pourra s'étonner de l'importance du symbolisme dans le système philosophique et physique de ces auteurs anciens, mais on s'attendra à voir cette tendance à introduire la symbolique des nombres dans la science diminuer au cours de l'histoire.

Al-Fārisī, héritier d'une longue tradition de savants de langue arabe tels Ibn Sīnā (Avicenne), Ibn al-Haytham (Alhazen) ou Ibn Rushd (Averroès) qui se sont intéressés à l'arc-en-ciel et à ses couleurs, est le premier à expliquer ce phénomène par l'étude simultanée de la réfraction et de la réflexion de la lumière dans les gouttes d'eau. Quant aux couleurs de l'arc, il en considère cinq : « *Les irisations sont des couleurs différentes, rapprochées, entre le bleu, le vert, le jaune, le rouge noirâtre et le blanc* » [6].

Mais Dietrich de Freiberg, proposant à la même époque une explication fort similaire de la formation de l'arc, ne lui attribue que quatre couleurs [7] ; ce malgré l'omniprésence des nombres trois et sept dans la représentation des couleurs de l'arc au Moyen Âge chrétien : trois pour l'arc-en-ciel de la fin du déluge – renforçant ainsi le symbole de la Trinité – et sept pour l'arc de l'Apocalypse de Jean (4:3) – texte regorgeant de références au nombre sept.

Descartes y voit six couleurs, dues à la rotation plus ou moins vive des corpuscules qui constituent la lumière [8]. Mais c'est à Newton certainement que l'on doit d'entendre parler si souvent aujourd'hui des sept couleurs de l'arc-en-ciel, intimement liées à ses expériences de dispersion de la lumière blanche par un prisme. Dans son *Opticks*, il décrit d'abord les conditions expérimentales d'apparition des cinq couleurs qu'il dit primaires (le rouge, le jaune, le vert, le bleu et le violet), de leurs mélanges que sont l'orange et l'indigo, et de l'infinité de teintes intermédiaires. Mais au moment de théoriser le phénomène, il projette le spectre sur un mur, et charge « *une personne dont la vue était pénétrante et qui pouvait mieux que*

moi discerner les couleurs, [de tirer] à travers le spectre les droites [marquant] les confins des couleurs » [9]. Il trouve que ces droites délimitant les couleurs sont au nombre de six, et que les longueurs des sept segments colorés ainsi définis sont « *entre elles comme les nombres 1, 8/9, 5/6, 3/4, 2/3, 3/5, 9/16, 1/2, qui représentent une tierce mineure, une quarte, une quinte, une sixte majeure, une septième et une octave* » [9], soit les sept tons du mode mineur. On sait aujourd'hui que les travaux de Newton en alchimie et en théologie furent bien plus nombreux et réguliers que ses travaux en dynamique, en mathématiques ou en optique [10]. Aussi ne sommes-nous pas surpris d'observer dans ses travaux scientifiques l'apparition subreptice de schémas, signes et symboles qu'il recherchait par ailleurs. Ici il s'agit du nombre sept, que l'on retrouve dans tant de traditions hermétiques. Et par ce parallèle entre couleurs et notes de la gamme musicale, Newton cherche à demi-mot à souligner l'harmonie sous-tendant l'organisation du monde. Conviction d'une Harmonie Universelle dont il est loin d'être le seul père de la science à avoir fait le thème central de sa recherche [11] et qu'il sera intéressant de mettre en parallèle avec les principes affichés ou inconscients de la science contemporaine, sur lesquels historiens et épistémologues interpellent à juste titre les scientifiques.

Mais arrêtons là notre historique du nombre de couleurs attribuées à l'arc-en-ciel, puisqu'il serait même insuffisant d'évoquer l'infinité des longueurs d'onde du spectre de la lumière blanche pour résoudre la question. D'autant que les couleurs de l'arc-en-ciel ne sont pas celles du spectre de la lumière blanche [4], fait trop rarement exposé dans les manuels et entretenant la confusion. De plus, un travail complet sur la question nécessiterait d'introduire les facteurs physiologiques et psychologiques liés à la perception des couleurs, mais aussi de désencombrer ce thème de sa charge symbolique, linguistique et culturelle. Problème non résolu ici, mais dont un détour par l'histoire des sciences a révélé l'importance dans les théories du passé, éveillant notre vigilance à sa probable présence dans nos théories contemporaines.

Références

- [1] Young H., Freedman R., *University Physics*, 13th ed., Pearson Educ., 2012, p. 1205-1207.
- [2] Bachelard G., *La formation de l'esprit scientifique*, J. Vrin, Paris, 1993, p. 13-22.
- [3] Aristote, *Les Météorologiques*, trad. Groisard J., Gallimard, 2008, p. 33-34.
- [4] Lévy-Leblond J.-M., *La vitesse de l'ombre*, Seuil, coll. Science Ouverte, 2006, p. 49-65.
- [5] Aristote, *Traité du Ciel*, trad. Dalimier C. et Pellegrin P., Gallimard, 2004, p. 10-11.
- [6] Al-Fārisī, *La Révision de l'optique* (entre 1291 et 1302), trad. Megri K. dans sa thèse de doctorat : *L'optique de Kamāl al-Dīn al-Fārisī*, Lille, ANRT, 1994. t. II, p. 100.
- [7] Maitte B., *Histoire de l'arc-en-ciel*, Seuil, coll. Science ouverte, 2005, p. 101-104.
- [8] Descartes R., *Les Météores*, in *Œuvres*, VI, publiées par Adam C. et Tannery P., Vrin-CNRS, 1982, p. 329-334.
- [9] Newton I., *L'Optique*, Leroy Libraire, Paris, 1787, t. I, p. 124-125.
- [10] Verlet L., *La Malle de Newton*, Gallimard, 1993.
- [11] Yates F.A., *Science et tradition hermétique*, trad. Doré B., Ed. Allia, Paris, 2009.



O. Morizot

Olivier Morizot

est maître de conférences, Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires (PIIM), Aix Marseille Université*.

Philippe Abgrall

est chargé de recherche au CNRS, Centre d'Épistémologie et d'Ergologie Comparatives (CEPERC), Aix Marseille Université**.



P. Abgrall

* Aix Marseille Université, PIIM UMR 7345, Campus de Saint-Jérôme, Avenue Escadrille Normandie-Niemen, F-13397 Marseille Cedex 20. Courriel : olivier.morizot@univ-amu.fr

** Aix Marseille Université, CNRS, CEPERC UMR 7304, Maison de la Recherche, 29 avenue Robert Schuman, F-13621 Aix en Provence Cedex 1. Courriel : philippe.abgrall@univ-amu.fr

Introduction à la chimie inorganique

Théorie du champ cristallin ou théorie des orbitales moléculaires ?

François Volatron et Patrick Chaquin

Résumé La levée de dégénérescence du bloc d d'un complexe octaédrique d'un métal de transition est généralement présentée à l'aide de la théorie du champ cristallin. Il est également possible d'établir ce résultat à l'aide de la théorie des orbitales moléculaires. La différence essentielle entre ces deux approches concerne la nature des orbitales les plus hautes du bloc d : elles sont simplement déstabilisées dans le cadre de la théorie du champ cristallin alors qu'en théorie des orbitales moléculaires, elles se trouvent, en plus, être antiliantes entre le métal et les ligands. Ce sont les conséquences de cette propriété, notamment sur les distances de liaison entre le métal et les ligands, qui sont discutées dans cet article.

Mots-clés Orbitales moléculaires, complexe de métal de transition, théorie du champ cristallin, orbitale antiliante, distance de liaison, JIREC 2014.

Abstract **Introducing inorganic chemistry : crystal-field formalism or molecular orbital theory ?** d-orbital splitting in a transition metal octahedral complex is generally taught within the crystal-field formalism. Molecular orbital theory also allows to find such orbital splitting. The major difference between these two approaches lies in the nature of the highest-energy orbitals in the d-block: in crystal field theory they are only destabilized whereas within molecular orbital theory they are found to be destabilized and metal-ligand antibonding. In this paper, we discuss the consequences of this antibonding nature, essentially on the metal-ligand bond distances.

Keywords **Molecular orbitals, transition metal complex, crystal field theory, antibonding orbital, bond distance, JIREC 2014.**

La caractéristique principale d'un complexe de métal de transition est ce qu'on appelle son « bloc d » constitué de ses cinq orbitales d perturbées en forme et en énergie par la présence des ligands. C'est du bloc d que provient l'essentiel des propriétés chimiques et physico-chimiques de ces complexes. Dans un champ octaédrique parfait (où tous les ligands sont identiques), le bloc d se présente sous la forme de trois orbitales d relativement basses et de deux orbitales situées plus haut en énergie.

Lorsque le bloc d contient de quatre (d^4) à sept (d^7) électrons, deux remplissages sont possibles selon la valeur du terme Δ_O , écart énergétique entre les deux groupes d'orbitales. Si Δ_O est grand (situation dite à champ fort), les électrons viennent occuper les orbitales de plus basse énergie, comme c'est pratiquement toujours le cas en chimie organique. En revanche, si Δ_O est relativement petit (champ faible), les électrons viennent occuper aussi les orbitales de plus haute énergie de façon à maximiser la stabilisation due au terme d'échange qui, rappelons-le, n'existe qu'entre électrons de même spin⁽¹⁾. On parlera alors de configuration « à haut spin », la situation à champ fort étant appelée « à bas spin ». À partir du remplissage d^6 , les deux situations conduisent au même remplissage ; évidemment, la force du champ ne joue pas de rôle pour les configurations de d^1 à d^3 où les électrons viennent occuper chacun une orbitale basse.

Les propriétés magnétiques (induites par le nombre d'électrons à spin parallèles) et optiques (transition d'un

électron entre les deux groupes d'orbitales) dépendent de la répartition des électrons dans le bloc d, c'est-à-dire de leur nombre et du mode de remplissage, donc de la valeur de Δ_O . De nombreux facteurs influent sur la valeur de Δ_O , tels que la nature du métal, son degré d'oxydation et, bien sûr, la nature des ligands. Ce dernier point a été particulièrement étudié et une « série spectrochimique » où les ligands sont classés selon la force du champ qu'ils créent a été établie sur des bases expérimentales [1] :

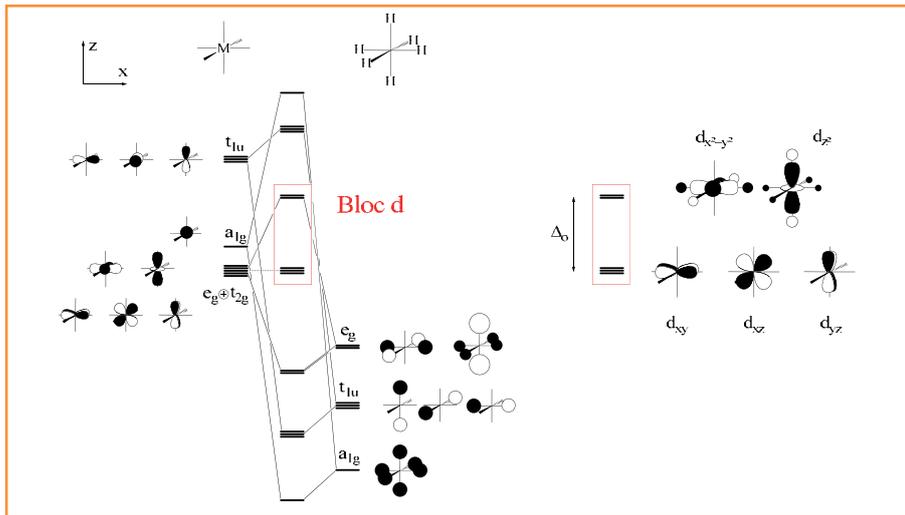
$CO > CN^- > NO_2^- > phen > bipy > en > NH_3 > py > CH_3CN > ONO^- > NCS^- > OH_2 > C_2O_4^{2-} > ONO^{2-} > OCHO^- > OH^- > OCO_2^{2-} > OCOR^- > F^- > Cl^- > SCN^- > Br^- > I^-$

D'un point de vue pédagogique, établir la levée de dégénérescence des orbitales du bloc d peut être effectué à l'aide de deux méthodes : la théorie du champ cristallin et celle des orbitales moléculaires (généralement présentée à l'aide de la théorie des groupes⁽²⁾).

La théorie des orbitales moléculaires

Pour le complexe modèle MH_6 , les orbitales atomiques (OA) d'un métal de transition de la première série sont les orbitales 4p, 4s et 3d ; leurs interactions avec les orbitales du fragment H_6 sont décrites dans la *figure 1* (partie gauche).

Dans ce diagramme, les six orbitales moléculaires (OM) les plus basses sont liantes entre le métal et le fragment H_6



La théorie du champ cristallin

Dans ce cadre, on s'intéresse à la seule interaction entre les OA d du métal avec les ligands qui sont modélisés par des charges ponctuelles δ^- . Cette interaction est déstabilisante car les OA d décrivent des électrons (réels ou virtuels) qui sont repoussés par les charges négatives. La déstabilisation n'est cependant pas la même pour les cinq OA d puisque certaines pointent vers les ligands alors que d'autres (d_{xz} , d_{yz} et d_{xy}) se développent entre les ligands et donc les « évitent ». La déstabilisation dans le premier cas sera ainsi plus importante que dans le second ; cette différence de comportement est illustrée dans la *figure 2a* pour les orbitales $d_{x^2-y^2}$ et d_{xy} . Généralement, on présente les résultats en tenant compte du fait qu'il existe une déstabilisation globale et identique des cinq OA d dans une situation hypothétique où le métal serait entouré d'une sphère chargée en surface de $6 \delta^-$ (*figure 2b*).

Dans les deux approches (OM et champ cristallin), on trouve la même levée de dégénérescence des OA d dans un champ octaédrique, les orbitales du groupe t_{2g} étant plus basses que celles du groupe e_g . Quelques différences apparaissent cependant entre ces deux approches ; la théorie des OM s'avère être plus fructueuse que celle du champ cristallin, ce que nous illustrerons par la suite sur quelques exemples.

Quelle liaison entre le métal et les ligands ?

Dans le cadre de la théorie des OM, la cohésion de l'édifice est assurée par l'occupation par douze électrons des six OM liantes entre le métal et les ligands. On retrouve la même description de la liaison que celle couramment rencontrée en chimie générale ou organique.

Dans la théorie du champ cristallin, la stabilité du complexe est assurée par l'interaction électrostatique entre le métal (supposé cationique) et les ligands modélisés par les charges ponctuelles. Cela paraît très raisonnable dans le cas de complexes tels que $Mn(H_2O)_6^{2+}$ où le dication Mn^{2+} est entouré des paires libres de l'eau ; cette

vision est cependant nettement plus discutable dans le cas de $Cr(CO)_6$ où l'atome central est neutre.

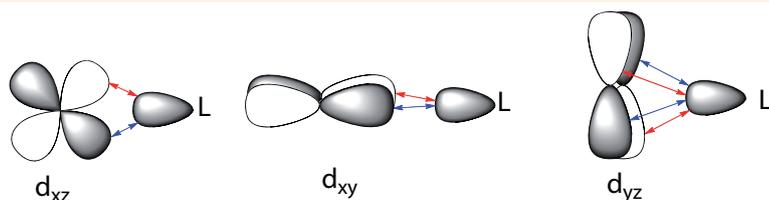
Comment rationaliser la série spectrochimique ?

Dans la théorie du champ cristallin, on peut (naïvement) penser que plus la charge d'un ligand est importante, plus la répulsion qu'il exercera sur les électrons sera forte et donc plus le ligand sera à champ fort. Dans la série spectroscopique, on trouve cependant des ligands anioniques à champ

Figure 1 - Diagramme des orbitales moléculaires de MH_6 et représentation du bloc d.

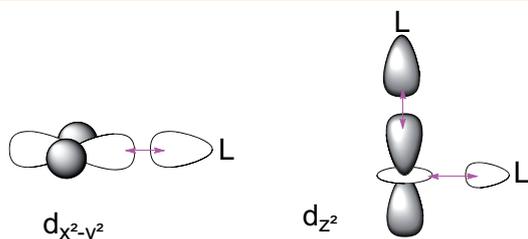
Une interprétation élémentaire de la levée de dégénérescence des orbitales d dans un complexe octaédrique modèle ML_6

Chaque ligand L interagit avec le métal M par une orbitale de type non liant (de symétrie σ). Le recouvrement de l'orbitale de chaque ligand avec les orbitales atomiques d_{xy} , d_{xz} et d_{yz} est nul. On voit en effet, dans chaque cas, qu'une partie positive de ce recouvrement (fonctions de même signe, flèches bleues) est exactement compensée par une partie négative (fonctions de signe contraire, flèches rouges). Ces trois orbitales d ne sont pas perturbées par les ligands et forment le bloc t_{2g} .



Les quatre orbitales des ligands du plan xy ont le même recouvrement, non nul (flèche mauve), avec $d_{x^2-y^2}$: elles interagissent avec celle-ci, avec des poids égaux, pour donner une combinaison liante en phase et une combinaison antiliante en opposition de phase qui fait passer $d_{x^2-y^2}$ au-dessus des t_{2g} .

Les six orbitales des ligands se recouvrent avec d_{z^2} , fortement selon l'axe z, plus faiblement selon x et y. Elles participent toutes aux orbitales du complexe, mais avec des poids différents selon l'importance du recouvrement, et donnent comme la précédente une combinaison liante et une combinaison antiliante. Il faut admettre ici que la déstabilisation de d_{z^2} est égale à celle de $d_{x^2-y^2}$, donnant avec elle le bloc e_g .



et, du fait de la différence d'énergie entre les deux partenaires, principalement localisées sur H_6 . À l'inverse, les OM antiliantes se développent principalement sur le métal ; les deux OM antiliantes e_g sont donc essentiellement les OA d_{z^2} et $d_{x^2-y^2}$. Le bloc d est ainsi constitué de ces deux OM antiliantes et des trois OM non liantes du groupe t_{2g} (d_{xz} , d_{yz} et d_{xy}) (*figure 1*, partie droite, et *encadré*).

Ce diagramme d'OM de MH_6 rend très raisonnablement compte de la structure électronique des complexes ML_6 où chaque ligand L interagit avec le métal par l'intermédiaire d'une seule orbitale.

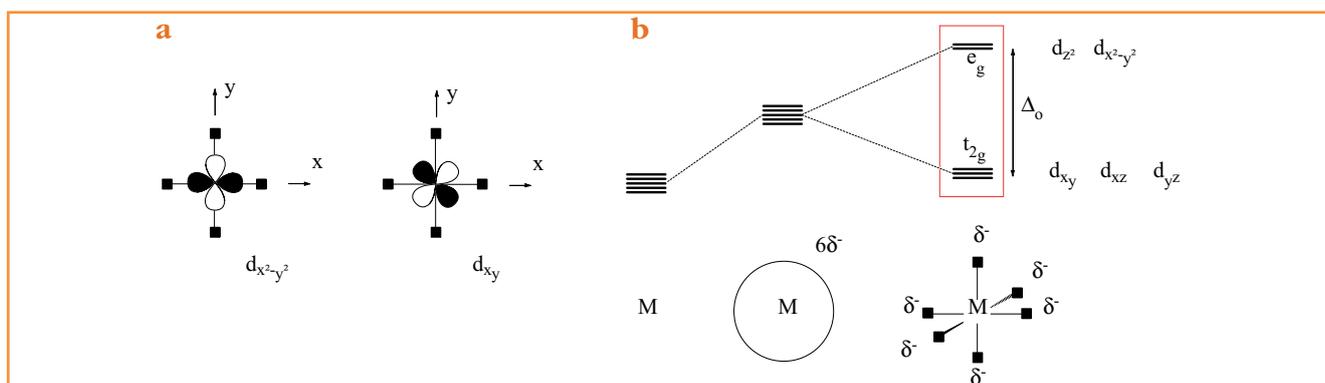
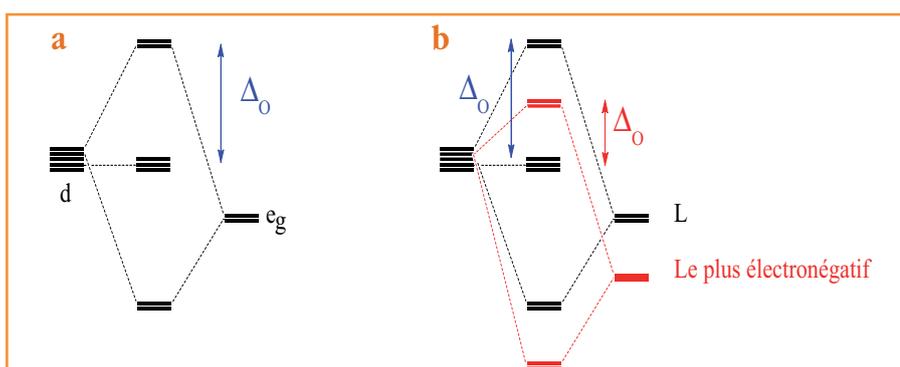


Figure 2 - Origine de l'éclatement du bloc d dans la théorie du champ cristallin.

Figure 3 - Origine de Δ_o et évolution avec l'électronégativité du ligand.

fort (CN^- , NO_2^-) ou à champ faible (F^- , I^-). On ne peut donc pas relier simplement la charge d'un ligand à la force du champ qu'il crée.

La théorie des orbitales moléculaires permet une première rationalisation de la série spectrochimique. Si l'on se limite à l'origine de l'éclatement du bloc d, il apparaît que le terme Δ_o dépend directement de l'interaction entre les OA d de symétrie e_g et des OM de H_6 de même symétrie (figure 3a). Rappelons ici que la déstabilisation (donc Δ_o) des orbitales antiliantes formées est proportionnelle à $S^2/\Delta\epsilon$, où S est le recouvrement des orbitales qui interagissent et $\Delta\epsilon$ leur écart d'énergie. Pour des ligands présentant des recouvrements voisins avec les orbitales $d^{(3)}$, l'interaction dépendra principalement de $\Delta\epsilon$. Or plus un ligand est électronégatif, plus ses orbitales sont basses en énergie, ce qui accroît l'écart $\Delta\epsilon$ et donc diminue Δ_o (figure 3b). En conséquence, un ligand très électronégatif créera un champ faible alors qu'un ligand peu électronégatif créera un champ fort. On trouve effectivement que les ligands carbonés (CO , CN^-) sont plus forts que les ligands azotés (NH_3 , NO_2^-), eux-mêmes plus forts, à de rares exceptions près, que les ligands oxygénés (OH^- , H_2O), l'ion fluorure étant le ligand le plus faible dans cette série des

atomes de la deuxième période. On remarquera ici que cette première rationalisation doit être affinée dans le cas de ligands interagissant avec le métal par l'intermédiaire de plusieurs orbitales, ce qui permettra par exemple de distinguer CH_3 de CO ou NH_3 de NO_2^- .

L'évolution des distances métal-ligand

Un apport important de la théorie des OM est d'établir que les orbitales e_g du bloc d sont antiliantes entre le métal et les ligands. Peupler ces orbitales affaiblit donc

la liaison, ce qui se traduit par une augmentation de la distance entre le métal et les ligands. Un premier exemple est le complexe $\text{Fe}(\text{phen})_2(\text{NCS})_2$ qui est un complexe d^6 de $\text{Fe}(\text{II})$. Il est dit à « transition de spin » car les deux remplissages du bloc sont observés [2] : à basse température, le remplissage est à bas spin et le complexe est diamagnétique, alors qu'à température plus élevée, le remplissage est à haut spin et le complexe est paramagnétique (figure 4).

À haute température, les deux OM antiliantes sont occupées, ce qui se traduit par une nette augmentation des différentes distances Fe-N par rapport à la situation à bas spin où ces OM sont vacantes : approximativement de 200 à 220 pm pour les ligands phénantroline et de 196 à 206 pm pour les thiocyanates. Cet exemple confirme la nature antiliante des orbitales e_g .

Un autre exemple est celui de la série des complexes trans $\text{MCl}_2(\text{dmpe})_2$ (le ligand dmpe est le bis(diméthyle phosphino)éthane qui établit deux liaisons métal-phosphore) avec $\text{M} = \text{Ti}$, V , Cr , Mn et Fe [3]. Dans cette série, les distances M-Cl et M-P diminuent régulièrement comme le laisse prévoir l'évolution des rayons atomiques des atomes de métal : ceux-ci décroissent lorsqu'on se déplace de la gauche vers

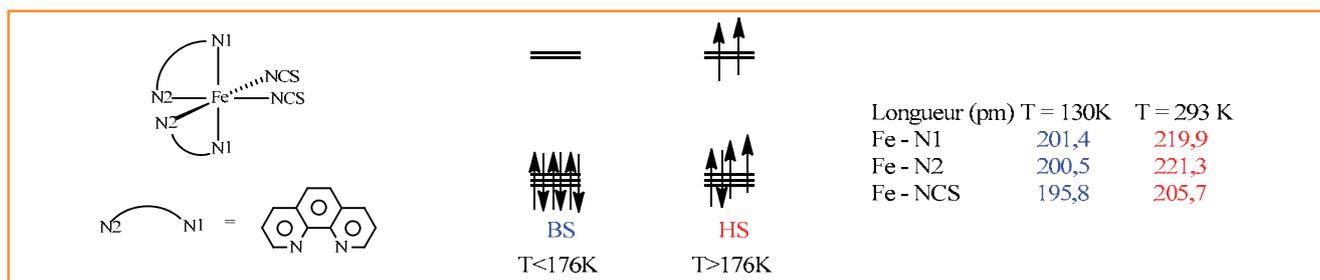


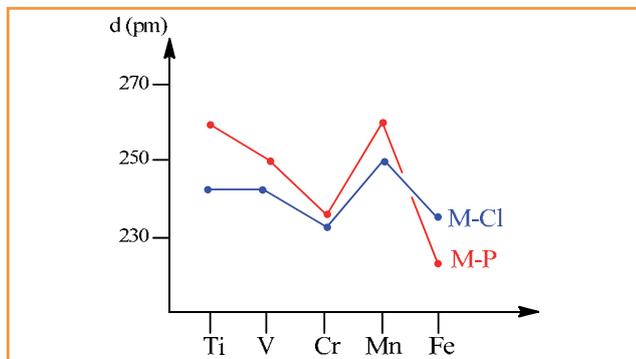
Figure 4 - Principales caractéristiques du complexe à transition de spin.

Tableau I - Évolution des rayons (pm) des dications des métaux de la première série de transition (CF : champ fort, Cf : champ faible).

		Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
d^n	n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$r(M^{2+})$ (pm)	CF	/	100	93	87	81	75	79	83	87	88
	Cf	/	100	93	94	97	92	89	83	87	88

Augmentation de Z_{eff}

Peuplement des OM antiliantes

Figure 5 - Évolution des distances métal-ligand dans la série $MCl_2(dmpe)_2$.

la droite dans la classification périodique. Une brusque discontinuité apparaît cependant dans le cas du manganèse pour les distances M-Cl et M-P (figure 5).

L'étude des propriétés magnétiques de ces complexes permet de comprendre cette évolution : le paramagnétisme des complexes diminue régulièrement de V à Fe, ce qui indique un remplissage à bas spin, à l'exception du manganèse où le magnétisme s'accroît brutalement, caractéristique d'un remplissage à haut spin. Dans le seul cas du manganèse, on a donc peuplement des OM antiliantes du bloc d, ce qui se traduit à nouveau par l'accroissement net des distances de liaisons constaté expérimentalement. Cette évolution des distances ne peut évidemment pas être rationalisée dans le cadre de la théorie du champ cristallin où le caractère antiliant des orbitales n'apparaît pas.

Le dernier exemple est l'évolution du rayon ionique des dications des métaux de transition de la première série dont les valeurs sont données dans le tableau I [4] ; la première série correspond aux complexes à champ fort (CF) et la seconde à ceux à champ faible (Cf). Dans les deux cas, le rayon ionique est déduit de la distance M-O dans les oxydes des métaux, le rayon de l'ion O^{2-} étant pris égal à 126 pm. Dans le cas du champ fort, le rayon décroît du titane jusqu'au fer, en accord avec l'évolution des rayons atomiques dans la classification périodique. Pour tous ces métaux, le remplissage à champ fort impose l'occupation des orbitales d non liantes du groupe t_{2g} . À partir du cobalt, les orbitales t_{2g} étant pleines, les électrons viennent occuper les orbitales e_g antiliantes ; la distance entre le métal et le ligand augmente donc. Cependant, le rayon du ligand étant le même dans toute la série, cette augmentation de la distance de liaison apparaît comme une augmentation du rayon ionique et annihile ainsi l'augmentation de la charge effective. Cette tendance se poursuit pour les remplissages à deux, trois ou quatre électrons des orbitales antiliantes.

Les valeurs obtenues pour les complexes à champ faible se rationalisent exactement de la même façon : le rayon diminue lorsque les électrons viennent peupler les orbitales non liantes (configurations d^2 , d^3 puis d^6 , d^7 et d^8) et augmente lorsqu'ils viennent occuper les orbitales antiliantes (d^4 , d^5 puis d^9 , d^{10}).

Conclusion

Établir la structure électronique des complexes des métaux de transition à l'aide de la théorie des orbitales moléculaires semble plus approprié qu'avec celle du champ cristallin pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les raisonnements sont les mêmes que ceux qui ont été acquis par les étudiants dans l'étude de la structure électronique des petites molécules et il n'est pas nécessaire d'introduire de nouvelles notions pour décrire ces complexes. Ensuite, comme cela a été montré dans cet article, la théorie des OM permet de comprendre des résultats expérimentaux qui seraient nettement plus difficiles voire impossibles à rationaliser dans le cadre de la théorie du champ cristallin. Enfin, il est possible d'étendre les raisonnements présentés aux cas des ligands interagissant avec le métal par l'intermédiaire de plusieurs orbitales ; il est assez simple de comprendre ainsi les phénomènes de donation π ou de rétrodonation dans le même cadre formel.

Notes et références

- (1) Dans le cas d'orbitales atomiques (OA) dégénérées partiellement peuplées, c'est le terme d'échange qui justifie la règle de Hund selon laquelle, dans l'état fondamental, les électrons viennent occuper chacun une OA avec des spins parallèles.
- (2) L'utilisation de la théorie des groupes, si elle en permet un traitement particulièrement élégant, n'est cependant pas indispensable à l'établissement des orbitales moléculaires d'un complexe octaédrique.
- (3) Cela est généralement vérifié lorsque les atomes liés au métal appartiennent à la même ligne de la classification périodique.
- [1] Ishii T., Tsuboli T., Yukinari S., Sakane G., Yamashita M., Breedlove B.K., 2D spectrochemical series of ML_6 metal complexes for controlling the ligand field splitting, *Int. J. Quant. Chem.*, **2009**, 109, p. 2734. La série spectrochimique peut être retrouvée dans des livres plus classiques pour l'enseignement tels que : Huheey J.E., *Inorganic Chemistry: Principles of Structure and Reactivity*, 2nd ed., Harper International Edition, **1978**, p. 361.
- [2] Granier T., Gallois B., Gaultier J., Real J.-A., Zarembovitch J., High-pressure single-crystal X-ray diffraction study of two spin-crossover iron(II) complexes: $Fe(Phen)_2(NCS)_2$ and $Fe(Btz)_2(NCS)_2$, *Inorg. Chem.*, **1993**, 32, p. 5305.
- [3] Girolami G.S., Wilkinson G., Galas A.M.R., Thornton-Pett M., Husthouse M.B., Synthesis and properties of the divalent 1,2-bis(dimethylphosphino)ethane (dmpe) complexes $MCl_2(dmpe)_2$ ($M = Ti, V, \text{ or } Cr$), $MnBr_2(dmpe)_2$, $TiMe_{1.3}Cl_{0.7}(dmpe)_2$ and $CrMe_2(dmpe)_2$, *J. Chem. Soc. Dalton Trans.*, **1985**, p. 1339.
- [4] Shannon R.D., Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides, *Act. Cryst.*, **1976**, A32, p. 751 ; Cotton F.A., Wilkinson G., Murillo C.A., Bochmann M., *Advanced Inorganic Chemistry*, 6th ed., John Wiley, **1999**, p. 1301.



F. Volatron

François Volatron est directeur de recherche au CNRS et **Patrick Chaquin**, professeur émérite, au Laboratoire de Chimie Théorique, Université Pierre et Marie Curie, Sorbonne Universités, Paris*.



P. Chaquin

* Laboratoire de Chimie Théorique, UMR CNRS 7616, UPMC, LabEx MiChem, Sorbonne Universités, 4 place Jussieu, CC 137, F-75005 Paris.
Courriels : francois.volatron@lct.jussieu.fr ; patrick.chaquin@lct.jussieu.fr

Copex-chimie, un environnement numérique pour aider les élèves à concevoir une expérimentation de dosage spectrophotométrique

Isabelle Girault et Cédric d'Ham

Résumé	Cet article montre l'intérêt et les difficultés d'une activité de conception expérimentale pour des élèves de lycée ou de formations post-bac travaillant avec l'environnement informatique Copex-chimie. Il présente les différentes stratégies mises en place dans le logiciel pour apprendre aux élèves à concevoir une expérimentation de dosage du colorant E124 dans un sirop de grenadine et s'attache à comprendre l'influence de ces stratégies sur la réussite à la tâche et sur les apprentissages des élèves.
Mots-clés	Conception expérimentale, démarche d'investigation, étayage, tuteur artificiel, Copex-chimie, JIREC 2014.
Abstract	Copex-chimie, a computer environment for scaffolding scientific inquiry and experimental design This paper depicts the interest but also the difficulties encountered by students facing an experimental design, at high school or university level. Copex-chimie is a computer environment dedicated to the titration of a red dye in grenadine syrup. This paper presents the three types of experimental design's scaffolding embedded in Copex-chimie (including an intelligent tutoring system) and depicts the impact of such scaffoldings on experimental design and learning.
Keywords	Experimental design, scientific inquiry, scaffolding, intelligent tutoring system, Copex-chimie, JIREC 2014.

Apprendre en concevant des expérimentations

Les élèves apprennent les sciences de plus en plus fréquemment au cours de séquences d'investigation ou de conduite de projets scientifiques. Dans ce type d'activités, ils peuvent être amenés à concevoir leurs expérimentations. Une étude a montré que des élèves qui conçoivent leurs expériences réussissent aux examens traditionnels de façon similaire à des élèves engagés dans un cursus similaire sans conception expérimentale ; en revanche, ils acquièrent de nouvelles méthodes, proches de celles que les scientifiques utilisent en laboratoire [1]. La tâche de conception expérimentale impose aux élèves de mettre en œuvre des processus cognitifs élevés [2-3], entraînant des activités pédagogiques complexes sur de multiples aspects [4-5]. Ceci explique probablement pourquoi la conception des expérimentations n'est généralement pas dévolue aux élèves [6].

Nos recherches ont pour objectif d'aider à mettre en place des activités de conception expérimentale en classe. Nous cherchons à produire des étayages pour que les élèves parviennent à concevoir leur expérimentation, tout en préservant l'intérêt pédagogique de cette activité. Par étayage, nous entendons toute stratégie mise en place pour permettre à l'élève d'apprendre à réaliser une tâche qui serait trop complexe à résoudre sans assistance. Dans ce cadre, une de nos premières études a proposé un outil d'évaluation des protocoles expérimentaux sous la forme d'une grille de critères [6]. Actuellement, nous concevons des outils informatiques pour étayer la conception expérimentale. Un grand nombre d'environnements informatiques ont déjà été proposés et évalués pour accompagner des élèves dans leur démarche d'investigation, le grand défi résidant dans le fait que ces environnements doivent apporter une aide individualisée aux élèves en fonction de leurs besoins [7]. Nous cherchons à relever ce défi pour la conception

expérimentale : dans cet article, nous décrivons Copex-chimie, un environnement informatique pour le lycée ou l'université, qui aide les apprenants à concevoir le dosage d'une substance par spectrophotométrie.

Les étayages pour la conception expérimentale développés dans Copex-chimie

Copex-chimie est une application web [8] dans laquelle les élèves doivent produire un protocole de dosage spectrophotométrique du colorant E124 dans un sirop de grenadine (voir *figure 1*).

Dans Copex-chimie, nous proposons trois types d'étayage aux élèves [9] :

- **Un étayage par structuration préalable du protocole** : l'élève doit écrire son protocole en respectant la structure qui lui est imposée dans le logiciel. Cette structure guide l'activité en contraignant son déroulement. La structuration du protocole est faite à deux niveaux : trois étapes sont imposées pour organiser le protocole (*figure 1*, cadre de droite) ; à l'intérieur de chacune de ces étapes, l'élève détaille le protocole à partir de huit actions prédéfinies dont il doit choisir les valeurs des paramètres (*figure 1*, cadre de gauche).
- **Un étayage par rétroactions personnalisées sur la base d'une simulation scientifique** : à tout moment, l'élève peut faire appel à une simulation qui calcule les spectres et les valeurs d'absorbance correspondant aux actions spécifiées dans le protocole (*figure 1*, cadre flottant).
- **Un étayage par rétroactions personnalisées sur la base des erreurs détectées dans le protocole par un « tuteur artificiel »** : à la demande de l'élève, le tuteur artificiel affiche des informations selon trois niveaux de détail : (1) des jauges indiquent l'avancement étape par étape ; (2) la liste des erreurs détectées est affichée pour chaque étape ; (3) pour chaque erreur, l'élève peut accéder

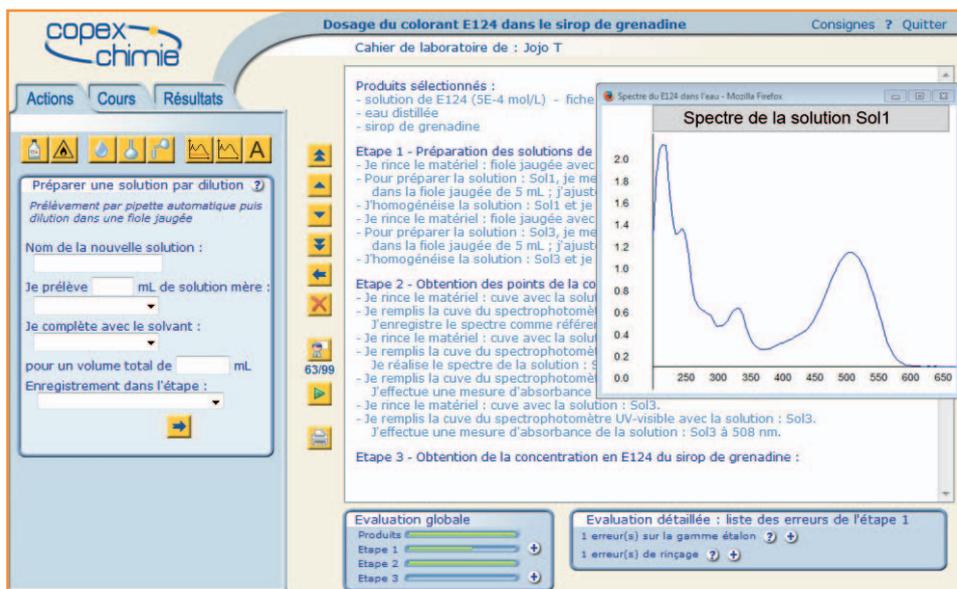


Figure 1 - Interface de Copex-chimie avec ses trois types d'étayage : structuration en étapes (cadre de droite) et actions prédéfinies (cadre de gauche); rétroactions par simulation (cadre flottant); rétroactions sur les erreurs détectées (jauges et détail des erreurs dans les cadres du bas).

à un message de description. Les deux premiers niveaux de rétroaction sont affichés sur la figure 1 (cadres du bas). Les messages décrivant les erreurs sont souvent formulés pour provoquer une réflexion de l'élève sur son erreur. Par exemple, si l'élève rince la fiole jaugée avec un liquide non approprié, il obtient le message : « Évaluez l'influence de votre solution de rinçage sur la solution préparée par dilution. » Copex-chimie peut être configuré pour limiter le nombre d'accès au tuteur et les niveaux de rétroaction fournis à l'étudiant.

Impact des étayages du logiciel sur la conception expérimentale et les apprentissages

Au cours des neuf dernières années, Copex-chimie a été utilisé par environ 1 700 étudiants de l'Université de Grenoble, en licence 1 et en IUT. Plusieurs études ont été menées sur l'activité de conception expérimentale, que ce soit avec le logiciel, configuré de différentes façons, ou sans logiciel. Les apprentissages des étudiants ont été évalués par un traitement pré-test/post-test. Dans le cas du travail sur logiciel, toutes les traces d'activités des étudiants ont été enregistrées. Les principaux résultats obtenus sont décrits ci-après.

Tout d'abord, nous avons montré que la conception d'un protocole de dosage spectrophotométrique ne peut pas être envisagée pour des étudiants de première année sans un étayage serré [9] : les étudiants engagés dans une activité « papier-crayon », sans l'aide du logiciel, produisent des protocoles très succincts, composés de quelques actions et dont les paramètres sont rarement spécifiés. Les productions s'apparentent plus à un principe de manipulation qu'à un protocole utilisable en laboratoire. L'étayage par structuration (étapes et actions paramétrées) force les étudiants à rentrer dans la complexité de la tâche. Cependant, les résultats obtenus ne sont pas probants : cette complexité n'est pas gérable par les étudiants qui abandonnent, pour la plupart, leur travail avant de parvenir à un protocole satisfaisant. Seul le logiciel avec un tuteur artificiel disponible permet à la majorité des étudiants de produire un protocole satisfaisant au cours d'une séance de 1 h 30. Le dispositif le plus efficace est lorsqu'un enseignant est présent en classe

lors du travail sur Copex-chimie. Le tuteur artificiel agit alors comme une aide pour l'enseignant en le déchargeant du traitement des erreurs sur les problèmes les plus courants.

Concernant les apprentissages (résultats à publier), nous avons montré que le travail sur Copex-chimie entraîne bien une augmentation significative du score d'évaluation au post-test par rapport au pré-test. L'étude des stratégies mises en œuvre par les étudiants nous amène à penser qu'il est préférable de limiter le nombre d'accès au tuteur sur une séance (10 à 20 accès maximum) afin d'éviter la mise en place de stratégies essai-erreur, possible-ment préjudiciables à l'apprentissage.

Conclusion et perspectives

Copex-chimie est une application web (en accès libre) qui permet aux étudiants de s'initier à la conception expérimentale sur le thème des dosages spectrophotométriques. Nous avons montré l'intérêt des étayages proposés dans Copex-chimie pour l'activité complexe que représente la conception d'une expérimentation. Nous souhaitons transposer ces principes à un environnement plus ouvert qui puisse être utilisé pour tout type de travail expérimental, aussi bien au lycée qu'à l'université. Ce nouvel environnement, intitulé LabBook [10], permet aux élèves de produire collaborativement des rapports expérimentaux. Il inclut un module de conception expérimentale qui peut être adapté par l'enseignant à toute expérimentation. Nous travaillons actuellement à la possibilité de faire spécifier par l'enseignant le comportement du tuteur artificiel en fonction du travail expérimental envisagé.

Références

- [1] Etkina E., Karelina A., Ruibal-Villasenor M., Design and reflection help students develop scientific abilities: learning in introductory physics laboratories, *J. Learn. Sci.*, **2010**, 19, p. 54.
- [2] Neber H., Anton M., Promoting pre-experimental activities in high-school chemistry: focusing on the role of students' epistemic questions, *Int. J. Sci. Educ.*, **2008**, 30(13), p. 1801.
- [3] Karelina A., Etkina E., Acting like a physicist: student approach study to experimental design, *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, **2007**, 3, p. 020106.
- [4] Girault I., Cross D., d'Ham C., Students' adaptation to a new situation: the design of an experimental procedure, Actes du congrès *ESERA Conference*, Malmö, Suède, **2007**, p. 21.
- [5] Laugier A., Dumon A., Résolution de problème et pratique expérimentale : analyse du comportement des élèves en début de seconde, *Chem. Educ. Res. Pract.*, **2003**, 4(3), p. 335.
- [6] Girault I., d'Ham C., Ney M., Sanchez E., Wajeman C., Characterizing the experimental procedure in science laboratories: a preliminary step towards students experimental design, *Int. J. Sci. Educ.*, **2012**, 34(6), p. 825.
- [7] Quintana C. et al., A scaffolding design framework for software to support science inquiry, *J. Learn. Sci.*, **2004**, 13(3), p. 337.
- [8] <http://copex-chimie.imag.fr>
- [9] Girault I., d'Ham C., Scaffolding a complex task of experimental design in chemistry with a computer environment, *J. Sci. Educ. Technol.*, **2014**, 23(4), p. 514.
- [10] <http://labbook.imag.fr>



I. Girault

Isabelle Girault et Cédric d'Ham sont maîtres de conférence à l'Université Grenoble Alpes, Laboratoire d'Informatique de Grenoble, équipe MeTAH*.

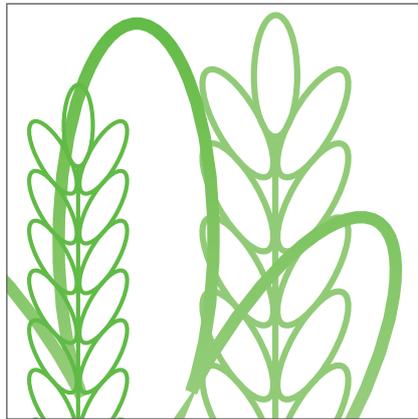
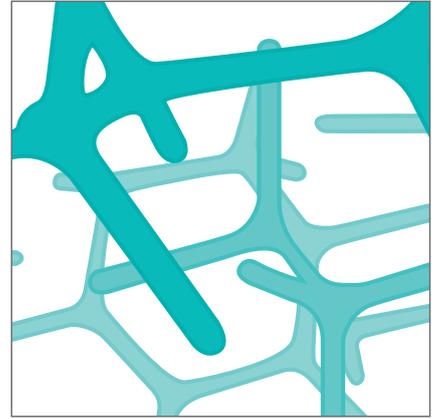
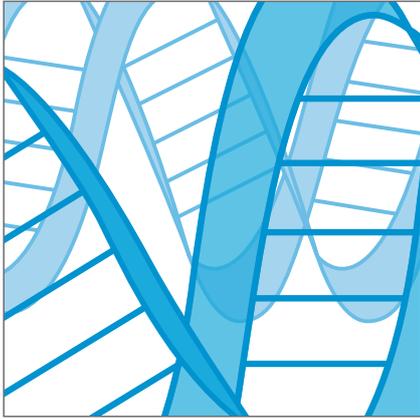


C. d'Ham

* LIG-MeTAH, ENSE3, Bât. B, 11 rue des Mathématiques, Domaine universitaire, F-38000 Grenoble. Courriel : Isabelle.girault@imag.fr



Science For A Better Life*



Bayer est un groupe international dont les cœurs de métiers se situent dans les secteurs de la **santé**, de l'**agriculture** et des **matériaux hautes performances**.

A la confluence de la chimie et de la biologie, nos chercheurs travaillent à des solutions pour répondre aux grands défis mondiaux : croissance démographique, vieillissement de la population, nouvelles maladies, ressources énergétiques et réchauffement climatique.

Notre moteur est l'innovation. Elle est le fruit de nos investissements conséquents en recherche et développement ainsi que de la patience, des efforts sans relâche de nos collaborateurs, femmes et hommes, du laboratoire jusque sur le terrain.

Cette innovation raisonnée intégrant les enjeux environnementaux et au service du bien-être de tous les hommes permet à Bayer de proposer, aujourd'hui et pour demain, des solutions en ligne avec notre mission : **Bayer, Science For A Better Life**, la science pour une vie meilleure.

* La science pour une vie meilleure

Les Rencontres Chimie & Terroir, une passerelle entre chimie et grand public

Armelle Ouali

Présente à Albi en mai dernier, je me suis prêtée à l'expérience des Rencontres Chimie & Terroir. Voici donc un panorama général de ces journées restitué à partir de témoignages recueillis auprès d'animateurs comme de visiteurs. En intégrant les données des précédentes éditions, j'ai essayé d'appréhender de manière aussi objective que possible les tenants et aboutissants de ces Rencontres. De manière plus subjective, j'ai également tenté de retranscrire l'ambiance et l'impression générale qui s'en dégagent.



Après Brive-la-Gaillarde en 2008, Guichen en 2010, Beauce en 2011, Gardanne en 2012 et Lens en 2013, la 6^e édition des Rencontres Chimie & Terroir s'est déroulée à Albi du 15 au 17 mai 2014. De nombreux chimistes ayant à cœur de faire partager leur passion ont une fois de plus donné rendez-vous au public, jeune et moins jeune, et lui ont proposé, à partir des ressources locales, de montrer à quel point la chimie est omniprésente au quotidien. Ainsi, pour l'édition 2014, les produits régionaux du Tarn et plus largement de Midi-Pyrénées ont été la source d'inspiration de nombreux ateliers et animations en rapport avec le charbon, le pastel, le verre, les peaux et cuirs, la brique, le foie gras, le vin, le fromage, la truffe... et également l'industrie aéronautique, spatiale, pharmaceutique et cosmétique. Au programme : démonstrations (dont certaines par des artisans locaux), ateliers, spectacle ludique, « dîner avec un chimiste »...

Ces Rencontres sont organisées par la commission Chimie et Société de la Fondation de la Maison de la chimie, qui a pour vocation de promouvoir la chimie et de mener une réflexion permanente sur la manière de la présenter au public [1]. Comme le soulignait Andrée Marquet, professeur émérite à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris), fondatrice de la commission, l'opinion de ce dernier par rapport à la science en général dépend d'une relation de confiance complexe dont les composantes sont multiples [2]. Force est de constater que pour ce qui est des sciences chimiques, la relation n'est pas au beau fixe, les catastrophes passées (Seveso, Bhopal...) suscitant toujours l'inquiétude, voire l'angoisse (le rejet ?) de nos concitoyens [3]. À charge pour nous, chimistes, de proposer des formes de dialogue avec les non-chimistes afin de restaurer (ou d'instaurer auprès des plus jeunes) cette confiance. C'est dans ce contexte que le concept des Rencontres Chimie & Terroir a été lancé sur une idée de Lydie Valade, directrice de recherche au CNRS (LCC, Toulouse),

actuelle présidente de la commission. Après six éditions, le bilan est plutôt positif et à bien des égards, ces colloques ont ouvert des pistes pour établir une relation plus harmonieuse entre chimie et grand public, et surtout entre chimie et jeunes générations.

Visite au cœur des Rencontres à travers les différentes éditions

Constantes et particularités

Les Rencontres ont toutes été hébergées dans des villes moyennes relativement éloignées des métropoles universitaires. Il y a, de la part des organisateurs, une volonté d'aller à la rencontre de ces personnes qui ne bénéficient pas de la Fête de la science et autres activités scientifiques dédiées aux scolaires et au grand public dans les plus grandes villes. Le contexte historique des sites a également été pris en compte, la chimie y ayant joué un rôle important à un moment ou à un autre. Ces critères satisfaits, le choix est souvent guidé *in fine* par des considérations pratiques. Ainsi, bien que des liens préexistants entre le comité organisateur en région et les collectivités territoriales ne constituent pas un prérequis, ils facilitent l'organisation en offrant par exemple un accès privilégié à un lieu public. L'organisation de l'inscription des classes par l'inspection académique peut également orienter le choix des organisateurs. En outre, à l'exception d'Albi qui a accueilli les Rencontres dans une salle excentrée, les autres éditions se sont tenues sur des sites proches du centre-ville, marchés, halles ou salles publiques.

Le déroulement est le suivant : les deux premières journées sont principalement dédiées à la diffusion auprès des scolaires (primaire, collège et lycée, 500 à 1 000 jeunes visiteurs suivant les éditions), tandis que le 3^e jour, le site ouvre ses portes au grand public. Entre 25 et 50 chercheurs, enseignants-chercheurs, étudiants, ingénieurs, techniciens, industriels, artisans locaux ou venus de toute la France accueillent le public, organisent et animent les différentes activités, et veillent globalement au bon déroulement des journées. Se mobilisent également des représentants du CNRS, de la Société Chimique de France (SCF) nationale et locale, notamment les clubs des jeunes SCF régionaux qui jouent un rôle important dans l'animation. Des associations scientifiques, les Petits Débrouillards notamment, sont

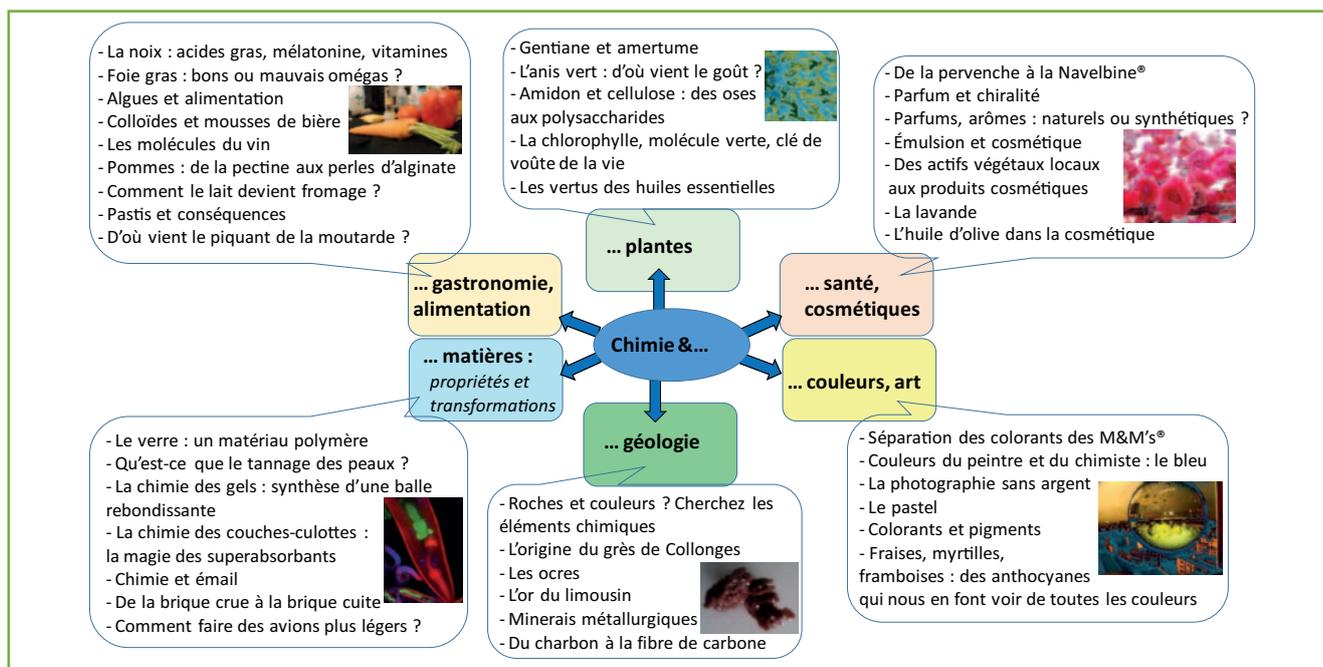


Figure 1 - Exemples de domaines dans lesquels la chimie est impliquée et d'ateliers proposés aux Rencontres Chimie & Terroir.

Photos : Forêt d'algues, Anna Hofmann (LCPO), 2014, © HOFMANN Anna/SCF, 2014 ; © SCF/S. Bléneau-Serdel, 2011 ; Au labo (230), © Xavier Bataille ; Anatomie d'un ver exposé aux nanoparticules de TiO_2 , Quentin Le Trequesser (ICMCB), 2013, © LE TREQUESSER Quentin/SCF, 2013.

également venues à deux reprises illustrer des concepts de la chimie par le biais d'ateliers spécifiques et en utilisant leur propre approche.

Un autre point commun à toutes ces Rencontres est la diversité des actions menées : stands de démonstrations et ateliers, spectacles, pièces de théâtre, expositions, conférences, et plus récemment dîners sont autant de supports visant à faire connaître la chimie et à montrer à quel point elle est présente dans le quotidien des visiteurs.

Chaque édition est en outre ancrée dans son propre terroir dans la mesure où une grande partie des animations proposées est organisée autour de produits locaux. Cette dernière caractéristique confère finalement à chaque « Chimie & Terroir » son identité propre. Ainsi, le grès de Collonges-la-Rouge fut à l'honneur à Brive, les algues à Guichen, le vin à Beaune, l'huile d'olive à Gardanne, le charbon à Lens, ou encore le pastel à Albi. Cette volonté des organisateurs d'amener les visiteurs sur un terrain qui leur est familier permet de capter leur intérêt et d'optimiser la qualité du message. Le public découvre, parfois avec surprise, que la chimie est présente dans des domaines aussi variés que les plantes, la santé, les parfums et la cosmétique, l'art et les couleurs, la géologie, les propriétés et transformations de la matière ou encore l'alimentation et la gastronomie (figure 1). Dans la plupart des cas, les Rencontres offrent également l'opportunité de valoriser le tissu industriel local.

Les supports de communication choisis pour diffuser le message

Compte tenu de la richesse et de la variété des actions proposées au fil des six éditions des « Chimie & Terroir », et même si chacune d'entre elles mériterait d'être racontée et illustrée, une évocation exhaustive n'est pas réalisable, ni sûrement souhaitable [4]. Les encadrés 1 à 3 vous proposent une petite « visite guidée » de quelques animations phares.

Dans quelle mesure chaque édition a-t-elle permis d'enrichir la suivante ?

L'édition de Brive, qui a mobilisé un public large et nombreux, a permis de valider le mode de fonctionnement des « Chimie & Terroir » en montrant que les types d'actions choisies et le lien avec le terroir étaient pertinents. Les retours particulièrement positifs des participants concernant ce dernier point ont incité les organisateurs à placer le terroir encore davantage au centre des animations proposées lors des trois éditions suivantes (Guichen, Beaune, Gardanne). Ce qui a significativement fait évoluer les Rencontres, c'est l'introduction d'enquêtes de perception à partir de l'édition de Gardanne en 2012 sous forme de questionnaires distribués à tous les visiteurs [5]. La principale critique formulée concernait le regret des participants, en particulier des élèves et des enseignants, d'être trop spectateurs et pas assez acteurs. Les éditions de Lens et Albi ont donc fait la part belle à la pratique avec de nombreux ateliers leur offrant de « mettre la main à la pâte » et de réaliser eux-mêmes des expériences. Bien que cela soit parfois oublié, la chimie est avant tout une science expérimentale et cette approche concrète, particulièrement appréciée des enfants, pourrait être efficace pour susciter de l'intérêt envers notre discipline. Il s'agit donc là d'une évolution majeure, peut-être même d'un tournant dans l'histoire des Rencontres. Ces premières enquêtes ont de plus conduit à améliorer l'adéquation entre le niveau des ateliers et l'âge des enfants.

Plus généralement, les organisateurs mènent une réflexion permanente pour faire évoluer les Rencontres en diversifiant la nature et en améliorant la qualité des supports. Par exemple, les conférences grand public, remportant un succès mitigé, ont été progressivement délaissées au profit de médias plus ludiques comme les spectacles. Dans le même ordre d'idée, de nouvelles animations telles que les « dîners avec un chimiste » ont été récemment introduites. Pour la prochaine édition (Avignon, 27-30 mai 2015), l'accent

sera mis sur la découverte de diverses techniques d'analyse auxquelles les visiteurs seront initiés.

Enfin, si l'on s'intéresse plus globalement à l'évolution des ateliers au fil des éditions, il apparaît que leur nombre est globalement croissant. Il arrive en effet que certains ateliers conçus spécifiquement pour des Rencontres antérieures (donc en lien direct avec un autre terroir) soient proposés de nouveau. Ces expériences gagneraient certainement à être renouvelées et amplifiées, cette évolution pouvant être perçue comme un enrichissement plutôt que comme une répétition. En effet, le fait de raconter la chimie autour de produits plus exotiques aux yeux du visiteur ne permettrait-il pas de piquer tout autant voire davantage sa curiosité ? Par exemple, la dégustation et les explications autour d'une madeleine aux algues, atelier mis en place en 2010 en Bretagne, n'auraient-elles séduit tout autant les publics beauinois, lensois ou albigeois ? Prendre des éléments issus « des terroirs » comme supports pour expliquer la chimie est certainement crucial pour faire passer le message, mais l'importance du « terroir local » est peut-être à relativiser.

Les retombées des Rencontres : les objectifs sont-ils atteints ?

Des retombées dans la presse régionale ont chaque fois attesté de l'intérêt suscité localement par les Rencontres Chimie & Terroir. Pour certaines éditions, des diffusions au niveau de la presse nationale sont également venues mettre

la chimie à l'honneur dans un contexte plus large. Pour autant, le succès est-il au rendez-vous ? Les visiteurs, jeunes et moins jeunes, ont-ils appris quelque chose, mieux saisi l'omniprésence de la chimie ? Repartent-ils avec une représentation plus positive de la chimie ? C'est à toutes ces questions que les enquêtes mises en place par la commission Chimie et Société (coordinatrice : Marie-Claude Vitorge, chargée de mission à la SCF) à partir de 2012 ont eu la vocation de répondre.

Enquêtes de perception : le point de vue des visiteurs

Les informations présentées résultent de l'analyse des réponses des quelques 600 visiteurs ayant accepté de compléter les questionnaires aux Rencontres de Gardanne, Lens et Albi [5]. Deux questions m'ont plus particulièrement intéressée : i) le bénéfice tiré des journées par le public en termes de connaissances ; ii) l'opinion des visiteurs par rapport à la chimie avant et après leur participation aux Rencontres.

Concernant le premier point, un sentiment général d'avoir appris de « nombreuses choses » sur la chimie prime, une majorité de répondants disant même avoir appris « beaucoup de choses » plutôt « qu'un peu ». Il est à noter que les connaissances diminuent les craintes chez les plus jeunes qui précisent de plus avoir appris « en s'amusant ». Les journées sont jugées clairement « intéressantes, amusantes et surprenantes » par l'ensemble du public (élèves, enseignants du primaire, des collèges et des lycées, tout public), et en

Encadré 1

Les démonstrations et ateliers

La plupart des stands, principalement expérimentaux, visent à illustrer comment la chimie intervient dans un phénomène donné qui a trait aux domaines mentionnés précédemment (figure 1).

Ces démonstrations et ateliers sont animés par un ou deux chimistes qui assurent aux visiteurs, scolaires ou non, un accueil en comité restreint, voire personnalisé. Ils constituent un lieu privilégié de découverte et d'explications permettant d'aiguiser puis de satisfaire la curiosité des petits comme des plus grands. Particulièrement adaptés pour décliner le terroir, ils proposent autant d'opportunités de comprendre les origines de la saveur, de la couleur, de la valeur nutritive ou encore des propriétés thérapeutiques des produits du terroir (fruits, céréales, plantes, foie gras, truffe, vin...), ou d'aborder la composition des roches locales. Ils permettent également de découvrir le rôle clé de la chimie dans la conception de nouveaux matériaux exploités dans l'industrie locale (ex : matériaux légers pour l'industrie aéronautique), ou encore dans la transformation des matières premières locales nécessaire à la fabrication de produits spécifiques (brique, tannage des peaux, pastel, beurre...). Un poster illustrant la thématique abordée et rassemblant les informations essentielles est disponible à chaque stand, si bien que le visiteur peut choisir d'en savoir plus sur le sujet ou continuer son exploration vers le stand suivant [4].

La plupart des stands proposent en outre la possibilité de « mettre la main à la pâte » et c'est, ravi, que les apprentis chimistes gonflent un ballon sans souffler, fabriquent du beurre, séparent les colorants des M&M's[®], construisent des piles ou un congélateur qui fonctionne sans électricité, décolorent la grenadine... La chimie par ordinateur s'était également invitée à l'édition albigeoise et les visiteurs ont pu visualiser des molécules et simuler des réactions chimiques.

Des stands animés par la SCF et le CNRS se tiennent également à la disposition du public pour répondre à des questions plus générales sur la chimie et ses métiers. Affiches, films, dossiers portant sur des thématiques diverses telles que « chimie et beauté », « chimie et sciences », « nanotechnologies et santé » y sont également présentés.



De gauche à droite : Atelier « Parfum et chiralité » : animation interactive et jeux sur les parfums et arômes ; les enfants construisent des molécules chirales et découvrent leur lien avec l'olfaction. Atelier « Je sépare les colorants des M&M's[®] » : les enfants découvrent la chromatographie sur couche mince. Atelier de l'Artisan Pastelier (Albi 2014) : les visiteurs découvrent le rôle clé de la chimie dans la mise en œuvre d'un procédé efficace pour la fabrication du bleu de Pastel. Formules chimiques et travaux pratiques proposés par Didier Boinnard, titulaire d'un doctorat de chimie et gérant de l'Artisan Pastelier, étaient au programme.

Encadré 2

Les spectacles et pièces de théâtre



Le défi Miam (Catherine Bied, maître de conférences à l'Institut Charles Gerhardt de Montpellier, et Nathalie Corlay, Cie Miss Titanic & Co).

Que ce soit à Brive avec *Patachou et Tartiflette* ou à Albi avec *Le défi Miam*, des personnages ont préparé un repas où le bizarre et l'inattendu ont interpellé les spectateurs. À l'issue du spectacle, la parole est donnée au public qui peut alors poser toutes les questions, des plus naïves aux plus techniques, ce qui permet aux plus âgés d'aller plus loin dans la compréhension des phénomènes chimiques mis en jeu.

Ces spectacles scientifiques constituent des vecteurs particulièrement efficaces : en effet, quels que soient leur âge et leur degré de maturité, les enfants repartent en ayant compris que la cuisine et la chimie sont intimement liées. Ils associent donc cette dernière à une image positive, d'autant que les acteurs font le choix judicieux de travailler à partir de produits particulièrement appréciés comme les bonbons ou les sorbets ! Les adultes sortent quant à eux avec matière à réflexion, éventuellement incités à porter un autre regard sur la chimie.

Des spectacles conçus pour sensibiliser un public plus averti trouvent également leur place dans les Rencontres. C'est par exemple le cas de la pièce de théâtre *Les lueurs de la rue Cuvier* (Cie Théâtre Extensible), qui relate le parcours hors du commun de Pierre et Marie Curie, créée dans le cadre de l'Année internationale de la chimie et qui a été proposée à Beaune en 2011.

particulier par les jeunes générations. Le seul regret exprimé concerne le manque de temps pour tout voir, ce qui illustre joliment l'enthousiasme suscité par ces journées !

Pour le second point, les tendances qui se dégagent sont encourageantes. En effet, les visiteurs qui disaient avoir une bonne image de la chimie avant de venir se disent confortés dans leur impression. Ceux qui n'avaient pas d'opinion construite, voire une mauvaise image avant de venir, disent avoir découvert des facettes de la chimie qu'ils ignoraient (domaines dans lesquels elle intervient). L'image de la chimie est dite améliorée par la médiation scientifique et les démonstrations. Le public est également invité à choisir les mots auxquels il associe la chimie parmi : progrès, manque de transparence, danger, amélioration du quotidien, secteur économique performant, pollution, amélioration de la santé. Quels que soient l'édition et le type des répondants (enseignants, scolaires, grand public), « progrès » arrive en tête, loin devant les notions de danger et de pollution [6].

Les Rencontres Chimie & Terroir peuvent-elles apporter les informations et les réponses concrètes qui influenceraient l'image que les visiteurs associent à la chimie et relativiser

leurs inquiétudes ? Pour chercher des éléments de réponse, revenons sur quelques verrous à l'origine d'une piètre relation de confiance entre le public et la chimie (ou les chimistes). Certains de ces verrous avaient été identifiés lors d'une « consultation participative » initiée par la commission Chimie et Société en 2011 [2].

L'un d'entre eux résidait dans la difficulté à cerner le véritable rôle de la chimie, notamment du fait de son omniprésence. Les Rencontres permettent visiblement d'aider les visiteurs à contourner cette difficulté, puisque ces derniers affirment y avoir découvert à quel point la chimie est impliquée et essentielle dans leur quotidien.

Une autre source de méfiance vis-à-vis de la chimie avait été attribuée à l'opposition systématique que font les gens entre ce qui est chimique (« pas bon ») et ce qui est naturel (« bon »), comportement classique, confirmé par la récente étude initiée par l'Union des Industries Chimiques (UIC) et portant sur l'impact des mots liés à la chimie [3]. Le fait que le public admette porter un nouveau regard sur l'équation nature et chimie à l'issue des Rencontres tend à montrer que les diverses animations ont convaincu et permis une clarification d'une relation souvent ambiguë.

Un troisième verrou concernait ses interrogations sur la science chimique et le métier de chimiste, et ce, bien avant toute autre considération comme la pollution [2]. Les Rencontres apportent, là encore, une réponse concrète puisqu'elles constituent des lieux d'échanges privilégiés lors desquels les visiteurs peuvent interroger directement et librement les acteurs des sciences chimiques.

Cette « consultation participative » avait également montré que la chimie faisait moins rêver que d'autres sciences, particulièrement auprès du jeune public. Au-delà des objectifs visés, les journées Chimie & Terroir permettraient-elles de réanimer le rêve ? Dans certaines éditions plus que dans d'autres, cet aspect pourrait avoir été déterminant dans le succès en apportant une touche d'espoir dans un contexte économique austère.

Le bilan des enquêtes, globalement très positif, tend à montrer que l'objectif est atteint puisque « Chimie & Terroir » permet d'améliorer l'image de la chimie aux yeux des visiteurs. Devant un tel succès, il apparaît même dommage de ne pas en faire profiter les métropoles universitaires où un nombre encore plus significatif de personnes pourrait être sensibilisé. Notons qu'une évolution en ce sens est prévue puisqu'à l'occasion du congrès SCF'15 à Lille, Chimie et Société s'associe au Réseau des Jeunes chimistes de la SFC pour proposer au tout public lillois, deux jours durant en centre-ville, des démonstrations et des ateliers en rapport avec l'énergie, thématique du colloque.

Le point de vue des organisateurs et animateurs

Même si la joie palpable des enfants ainsi que celle des professeurs et du public au sens large constituent une récompense immédiate, il existe d'autres motifs de satisfaction pour les organisateurs. Ils disent particulièrement apprécier les échanges et partages d'idées qu'ils peuvent avoir entre eux, notamment lors de la préparation et de l'animation des ateliers. Ils soulignent également le fait que les Rencontres donnent aux chercheurs et enseignants-chercheurs une occasion privilégiée d'engager des réflexions sur d'autres manières d'enseigner et de transmettre, la diffusion de la culture scientifique faisant partie des missions des agents du CNRS et des universitaires.

Tous soulignent en outre le fait que ces journées offrent un contexte d'enrichissement personnel. En effet, expliquer notre discipline en utilisant des termes simples à un public non averti nécessite, pour chacun, un effort d'analyse différent de celui que l'on peut avoir dans sa profession de chercheur ou d'enseignant. Dans le même ordre d'idée, l'animation d'un atelier joue un rôle important dans la formation des étudiants quel que soit leur niveau d'étude (BTS, master, thèse...). En effet, apprendre à adapter leur langage à un auditoire non spécialiste est un atout indéniable dans la carrière scientifique à laquelle ils se destinent. Certains d'entre eux relatent les difficultés qu'ils ont éprouvées au début, puis le plaisir qu'ils ont pu ressentir à transmettre par la suite.

Trois journées d'intenses échanges, et après ? Des retombées, plus inattendues peut-être

Même s'il est fréquent que des enseignants sollicitent les organisateurs locaux pendant l'année pour animer des ateliers dans leur classe, il reste malheureusement rare que ces derniers puissent répondre aux appels. En effet, dans la grande majorité des cas, les acteurs de Chimie et Société sont avant tout des chercheurs et enseignants-chercheurs dont les responsabilités ne permettent pas de satisfaire à toutes les requêtes.

Un exemple pourtant, même s'il fait pour l'instant figure d'exception, vient illustrer le propos d'une belle manière. Un professeur du collège Jean-Zay de Lens, Philippe Bejma, n'a en effet pas hésité à recontacter deux animateurs rencontrés lors de « Chimie & Terroir » de Lens : Michel Verdaguer, professeur émérite à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris), et Marie-Hélène Chambrier, maître de conférences à l'Université d'Artois, et à les solliciter dans le cadre de projets pédagogiques portant sur les couleurs. Grâce au financement départemental qu'il a obtenu, M. Verdaguer a pu être invité à délivrer une conférence sur le bleu de Prusse. Les élèves se sont aussi rendus dans un laboratoire universitaire où M.-H. Chabrier leur a proposé une « manip » ludique pour séparer les couleurs des M&M's® (atelier proposé aux Rencontres). Les apprentis chimistes ont réalisé eux-mêmes les expériences et mis en application des techniques couramment utilisées dans les laboratoires, comme la chromatographie sur couche mince ou la spectroscopie UV. Ils ont semblé particulièrement réceptifs à cette initiation à la démarche expérimentale dans un lieu inhabituel. D'après les enseignants, cette visite leur a en outre permis de démythifier l'université puisqu'ils ont pu se rendre compte que les équipements qui s'y trouvaient n'étaient pas si différents de ceux de leurs salles de travaux pratiques.

De manière plus générale, le fait que les Rencontres Chimie & Terroir offrent aux enseignants du secondaire et aux universitaires une occasion de se rencontrer et de communiquer dans un contexte particulièrement détendu ne peut être que bénéfique. En effet, « jeter un pont » entre les enseignants et renforcer ainsi le lien entre le lycée et l'université constituent des leviers d'action pour attirer les jeunes vers la chimie et, au-delà, assurer le renouvellement des cadres.

Un autre aspect concerne les retombées des Rencontres sur la manière d'enseigner la chimie aux scolaires. De nombreux enseignants expliquent en effet qu'introduire des expériences découvertes dans les ateliers et en rapport avec le programme leur permettait de rendre les cours plus attrayants et de capter davantage l'intérêt de leurs élèves.

Encadré 3

Les expositions



Exposition « De la cave aux arômes », Beaune 2011.

Plusieurs expositions ayant trait aux minéraux régionaux ou encore aux plantes locales et à leurs vertus thérapeutiques ont constitué autant d'outils pour illustrer l'omniprésence de la chimie dans l'environnement proche du public.

À titre d'exemple, l'exposition « De la cave aux arômes » à Beaune a permis aux visiteurs de découvrir les vins de Bourgogne de manière ludique et multimédia. Tous retiennent une agréable impression de la ballade olfactive proposée, réelle ou virtuelle, associant la vue et les arômes du vin. Un éventail d'ateliers complémentaires sur le vin, ses couleurs et ses arômes, venait compléter l'exposition : des expérimentations y étaient proposées et les phénomènes chimiques sous-jacents expliqués. D'autres expositions, moins ancrées dans le terroir, ont également permis de présenter la chimie, comme l'exposition dédiée à l'œuvre de Marie Curie qui a suscité nombre d'interrogations de la part des visiteurs.

Multiplier et amplifier de telles démarches permettrait-il également de rallier plus de jeunes aux sciences chimiques ?

Les ingrédients de la recette des Rencontres ?

Un facteur contribuant probablement à optimiser l'impact du message tient au fait que les chimistes vont faire « découvrir la science » à la population dans des lieux publics et familiers (marché, halles...). En cela, les journées Chimie & Terroir se distinguent d'autres actions, comme la Fête de la science par exemple, lors de laquelle le tout public doit généralement faire lui-même la démarche d'aller à la rencontre des chercheurs dans leurs laboratoires. En outre, dès la première édition, les organisateurs ont opté pour une large palette d'actions sur un même site, afin de toucher des sensibilités très variées. La diversité des animateurs contribue probablement elle aussi au succès des Rencontres. En effet, les chercheurs ou enseignants-chercheurs à tous stades de carrière, les membres des clubs des jeunes régionaux de la SCF, les étudiants, les techniciens et industriels, les artisans locaux et même les acteurs des pièces et spectacles offrent autant d'approches et d'éclairages différents pour atteindre le même objectif : raconter la chimie au public. Cette diversité optimise statistiquement les chances de toucher chaque visiteur dans son individualité. Par ailleurs, les animateurs, quel que soit leur métier ou leur statut, se retrouvent loin de leur cadre habituel de travail. Certains expliquent que les liens hiérarchiques s'effacent le temps des Rencontres au profit d'échanges « d'égal à égal », loin des conventions

habituelles. La communication entre chimistes s'en trouverait, selon eux, facilitée. Il est légitime de penser que l'atmosphère positive et chaleureuse qui en résulte, constante des colloques, favorise la réceptivité du public.

Enfin, quels sont les points communs à ces animateurs de tous horizons, partie prenante des Rencontres Chimie & Terroir depuis leurs débuts ou qui ont choisi de rejoindre la caravane itinérante en cours de route ? Les réponses sont unanimes : de la passion et du temps, pris parfois au détriment d'autres activités. Certains ajoutent qu'une dose d'humilité peut se révéler nécessaire pour faire face à un public, souvent jeune et très curieux, qui pose des questions parfois déroutantes et auxquelles on n'a pas toujours la réponse !

Il est important de noter que, même si la diffusion de la culture scientifique fait partie des missions des agents du CNRS et des universitaires, le nombre de chercheurs et enseignants-chercheurs qui s'investissent dans des opérations de vulgarisation auprès du tout public ou du jeune public reste faible. Il est dommage que, pour l'instant, ce genre d'activités ne soit pas encore reconnu à sa juste valeur dans les évolutions de carrière.

Conclusion

Même si les Rencontres Chimie & Terroir ne peuvent prétendre restaurer à elles seules une relation de confiance entre le grand public et la chimie, elles proposent incontestablement des leviers d'actions. L'enthousiasme suscité auprès des jeunes, et en particulier des scolaires qui n'hésitent pas à revenir avec leurs parents pour leur faire découvrir les animations, est un point très fort. En effet, l'intérêt majeur de ces journées réside surtout dans leur impact auprès des jeunes générations, dont on peut espérer qu'elles dissocieront chimie et mal absolu. Pour aller plus loin, même si les instigateurs des Rencontres n'ont pas non plus la prétention d'inciter l'ensemble des jeunes visiteurs à s'orienter vers des carrières scientifiques, il paraît très plausible que quelques vocations de chimistes y soient suscitées. La question que l'on peut alors se poser est : comment passer à l'échelle supérieure et toucher un public à la fois plus nombreux et peut-être moins conciliant ?

Les ingrédients de la recette ? Il s'agit certainement d'un cocktail complexe de facteurs parmi lesquels on pourrait citer l'omniprésence du « terroir » qui offre une entrée en matière séduisante pour le visiteur, la large palette d'animations et leur aspect ludique, la diversité des animateurs, et également le fait que les Rencontres Chimie & Terroir sont l'œuvre d'un collectif. En effet, les premières Rencontres de Brive ont joué un rôle important au sein de la communauté Chimie et Société : si chaque bureau régional menait auparavant des actions indépendamment, il s'agissait de la première action commune. Celle-ci a permis de fédérer les correspondants qui n'ont par la suite pas hésité à renouveler l'expérience. Le collectif de passionnés s'est progressivement organisé pour faire évoluer les Rencontres et en amplifier l'impact auprès de la communauté des non-chimistes. La constitution d'un collectif qui profite à un autre collectif, phénomène sociologique rencontré dans bien d'autres contextes, constituerait-il un prérequis pour apprivoiser la chimie et la raconter aux autres ? Ces quelques pistes de réflexion et leur

éventuelle concrétisation permettront peut-être de concevoir d'autres actions, si possible plus pérennes, visant à familiariser le grand public, et tout particulièrement les jeunes, à la chimie et aux sciences en général.

Et pour la septième édition de « Chimie & Terroir » ? Rendez-vous à Avignon en mai 2015 où les organisateurs s'attacheront une fois encore à piquer et satisfaire la curiosité du public autour de nouvelles animations et avec, nous n'en doutons pas, une passion intacte !

Notes et références

- [1] La *commission Chimie et Société* (www.maisondelachimie.asso.fr/chimiesociete) a été créée en 2001 par Andrée Marquet (professeur émérite, UPMC, Paris) et est actuellement présidée par Lydie Valade (directrice de recherche CNRS, LCC, Toulouse). Elle fonctionne avec un bureau national et s'appuie sur des comités régionaux pour une meilleure couverture du territoire. Les correspondants régionaux interagissent avec les représentants du Centre national de la recherche scientifique (CNRS), de la Société Chimique de France (SCF), de l'Union des Industries Chimiques (UIC), des structures associatives régionales... Les principaux objectifs de la commission consistent notamment à : i) faire connaître les applications de la chimie, en montrant le rôle qu'elle joue dans de nombreux aspects de la vie quotidienne et dans les différentes technologies couramment utilisées ; ii) contribuer aux efforts entrepris pour attirer un plus grand nombre de jeunes vers les études scientifiques ; et iii) mener une réflexion sur les modes de communication de la chimie et les conditions d'un dialogue constructif avec les citoyens.
- [2] Marquet A., Chimie et société : quel dialogue ? Une consultation participative initiée par la commission Chimie et Société, *L'Act. Chim.*, 2011, 355, p. 33 (numéro dédié aux relations entre chimie et société, en téléchargement libre sur le site de *L'Actualité Chimique*).
- [3] Jacquesy R.A., Éditorial : les mots de la chimie, *L'Act. Chim.*, 2014, 387-388-389, p. 1.
- [4] Les posters correspondant aux différents ateliers ainsi qu'un guide d'expériences partagées sont disponibles en ligne sur le site de Chimie et Société [1].
- [5] Le questionnaire proposé aux visiteurs permet de recueillir : i) des informations générales concernant le support de communication qui les a conduits à participer aux Rencontres (choix parmi : presse écrite, télévision ou radio locale, affiche, site Internet, amis ou connaissances, dans le cadre du travail ou des études), ainsi que leur rapport à la chimie (choix parmi : métier, étude, intérêt régulier ou simple curiosité) ; ii) ce qu'ils ont découvert, ce qui les a marqués et surpris dans les démonstrations et les ateliers (appréciation individuelle souhaitée pour chaque atelier), ainsi que leur opinion générale sur les rencontres (choix parmi : intéressant, amusant, surprenant, adapté aux enfants, adapté à tous les publics) ; iii) les mots auxquels ils associent la chimie (choix parmi : progrès, manque de transparence, danger, amélioration du quotidien, secteur économique performant, pollution, amélioration de la santé). Un champ est en outre réservé à d'éventuelles suggestions d'amélioration.
- [6] Classement des mots associés à la chimie en fonction du type de visiteurs : *Scolaires* : 1. progrès, 2. amélioration du quotidien, 3. amélioration de la santé, 4. danger ; *Enseignants* : 1. progrès, 2. amélioration de la santé, 3. amélioration du quotidien, 4. pollution ; *Tout public* : 1. Progrès, 2. amélioration du quotidien, 3. amélioration de la santé, 4. danger (< 30 %).



Armelle Ouali

est chargée de recherche au CNRS au Laboratoire de Chimie de Coordination, Toulouse*.

* Équipe Dendrimères et Hétérochimie, LCC, BP 44099, 205 route de Narbonne, F-31077 Toulouse Cedex 4. Courriel : armelle.ouali@lcc-toulouse.fr

Redlove® et SmartFresh™, ou « peut-on encore manger des pommes ? »

Rose Agnès Jacquesy

Un jeune pomiculteur de Manosque était la vedette d'un reportage diffusé dans « Envoyé spécial » (France 2) le 5 mars dernier pour une nouvelle variété de pomme, rouge dedans et dehors et un cœur blanc, joliment appelée Redlove®. Sélectionnée par un agronome suisse, il a l'exclusivité de sa culture en France. On l'imagine heureux d'en parler à la télévision publique, d'autant que, résistante à la tavelure, elle nécessite l'emploi de moins de produits phytosanitaires, objectif européen, qui n'était pas l'objet du reportage.

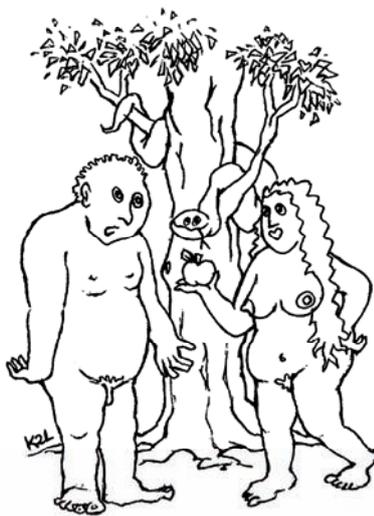
Voilà une propriété intéressante certes, mais qui ne mène pas loin. « Esprit » curieux et en alerte, la caméra repère deux tout petits sachets contenant un produit de conservation, le SmartFresh™, déposés à l'intérieur d'une chambre froide. De quoi s'agit-il ? D'un produit chimique évidemment ! Comment ça marche ? Comme vous le savez probablement, les fruits et légumes produisent naturellement de l'éthylène (C₂H₄), qui déclenche le processus de maturation puis de vieillissement. Ce processus s'accélère après la récolte, durant le stockage, le transport et chez le commerçant. Pour ralentir le vieillissement, les fruits sont conservés dans des chambres froides dont l'atmosphère contrôlée est pauvre en oxygène et riche en gaz carbonique. Pour améliorer la conservation, des chercheurs de l'Université de Caroline du Nord ont découvert, dans les années 1990, une substance inhibitrice des récepteurs de l'éthylène, le 1-méthylcyclopropène (1-MCP), encore un « monstre » mis sur le marché par Dow Chemical Company. La réaction est réversible et rapidement, hors des conditions de conservation, le fruit recommence à vieillir.

Pour déclencher l'inhibition, une cuillère à soupe de 1-MCP dans dix litres d'eau suffira à protéger pendant des mois deux millions de pommes fraîchement récoltées, et le stockage se poursuit dans la chambre froide en atmosphère contrôlée sans ajout supplémentaire. Quant aux vapeurs inquiétantes photographiées dans la dite chambre, elles proviennent des pulvérisateurs d'eau pure, installés au plafond pour maintenir un degré hydrométrique optimal. Le panneau rouge « Défense d'ouvrir, danger de mort » n'a rien à voir avec un poison chimique nouveau : il est simplement obligatoire, rappelant que l'atmosphère y est dangereusement pauvre en oxygène (moins de 2 %).

La seule étude évoquée dans l'émission est celle d'un chercheur australien, qui déclare qu'après un mois de stockage avec du SmartFresh™, la pomme aurait perdu 25 % de sa valeur nutritive, et n'en aurait plus du tout après un an. Ne sont pas citées d'autres études qui, au contraire, concluent à un effet positif du SmartFresh™. C'est le cas de l'une d'entre elles montrant que les pommes traitées contiennent 10 % de plus de vitamine C que les pommes témoins issues du même verger et également conservées en chambre froide, mais sans SmartFresh™ [1]. Ce qui veut dire que les pommes non traitées perdent encore plus rapidement leur valeur nutritionnelle ! Selon une autre étude, des pommes Fuji conservées jusqu'à 30 semaines avec un traitement 1-MCP ont des niveaux plus élevés

de flavonoïdes et une activité antioxydante plus importante que les fruits conservés sans 1-MCP et quand ils ont été stockés à maturité [2]. Enfin, il apparaît que les composés phénoliques des pommes ne sont pas affectés par le traitement au 1-MCP [3]. De façon plus générale, l'impact positif du SmartFresh™ sur la conservation des fruits et légumes est démontré [3-4].

Quant aux études de toxicité du SmartFresh™, elles ont été nombreuses, et toutes ont conclu qu'il doit être exempté de toute classification toxicologique, sanitaire ou environnementale : 46 pays, dont ceux de l'Union européenne, commercialisent le produit. Son utilisation ne présente aucun danger pour l'opérateur, ni pour le consommateur.



- Tu es sûre qu'elle est bio ?

Rappelons à nouveau (voir l'éditorial de décembre 2014) que la filière fruits souffre en particulier de notre modèle économique où les pratiques de consommation, liées à la grande distribution, ont abouti à des exigences en termes d'apparence et de disponibilité. Les producteurs « industriels » n'ont guère d'autres choix que l'utilisation de pesticides et agents de conservation (lesquels garantissent une certaine qualité gustative et sanitaire, en limitant le développement de moisissures ou le vieillissement). On peut s'en attrister, mais fournir des pommes de qualité à la masse des citoyens exige des traitements ad hoc, même si vraisemblablement une diminution de l'utilisation de pesticides devrait pouvoir être mise en œuvre. Tout le monde ne peut malheureusement pas vivre à Saint-Just-le-Martel, commune de la Limousin, « petit village d'irréductibles... qui défend la pomme originelle » où l'on assiste, à la fin du reportage, à une dégustation de « pommes cabossées, tâchées, qui portent les marques de fruits non traités » provenant de « variétés qui poussent à l'état naturel » (pommiers qualifiés de « sauvages », mais que l'on reproduit tout de même *via* des porte-greffes)...

D'après S. Baesen et coll., AFIS 13, Culture et conservation des pommes : quand on prend les téléspectateurs pour des poires (www.pseudo-sciences-13.org/smartfresh-pommes.html).

Références

- [1] <http://lesvergersdusud.fr/lesvergers/52> ; http://www.actahort.org/books/877/877_39.htm ; https://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2010/402/pdf/PhD_Thesis_2009_Heyn.pdf.
- [2] X.G. Lu *et al.*, Effects of maturity and 1-MCP treatment on postharvest quality and antioxidant properties of 'Fuji' apples during long-term cold storage, *Horticulture, Environment and Biotechnology*, **2012** ; Defilippi B.G., Dandekar A.M., Kader A.A., Impact of suppression of ethylene action or biosynthesis on flavormetabolites in apple (*Malus domestica* Borkh) fruits, *J. Agric. Food Chem.*, **2004**, 52(5694), p. 701.
- [3] The use of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruits and vegetables, C.B. Watkins, Department of Horticulture, Cornell University, Ithaca, NY 14853 (E.-U.), 10 mars **2006**.
- [4] Martínez-Romero D. *et al.*, Tools to maintain postharvest fruit and vegetable quality through the inhibition of ethylene action: a review, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, **2007**.

Nominations et distinctions

Prix L'Oréal-UNESCO Pour les Femmes et la Science 2015



De gauche à droite : Molly Shoichet, Christian Amatore (président du jury 2015), Rajaâ Cherkaoui El Moursli, Jean-Paul Agon (PDG de L'Oréal), Yi Xie, Thaisa Storchi Bergmann, Irina Bokova (directrice générale de l'UNESCO), Dame Carol Robinson. © Stéphane Cardinal.

Le 18 mars dernier, dans le Grand Amphithéâtre de la Sorbonne à Paris, cinq femmes scientifiques d'exception issues des cinq régions du monde (Afrique et États arabes, Asie-Pacifique, Europe, Amérique latine, Amérique du Nord) et quinze jeunes chercheuses ont été mises à l'honneur lors de la 17^e cérémonie L'Oréal-UNESCO Pour les Femmes et la Science.

Aux côtés de Rajaâ Cherkaoui El Moursli, professeur à l'Université de Rabat (Maroc), récompensée pour sa contribution décisive dans la détection de la particule responsable de la création de la masse dans l'Univers : le boson de Higgs, et de Thaisa Storchi Bergmann, professeur à l'Université de Porto Alegre (Brésil), pour ses travaux exceptionnels sur la compréhension des mécanismes de formation des trous noirs super-massifs au cœur des galaxies, leur évolution et leur interaction avec leur environnement, trois chimistes ont été distinguées :

- Lauréate pour l'Asie-Pacifique : **Yi Xie**, chimie inorganique. Professeur à l'Université de Sciences et Technologie de Chine (Hefei), elle a mené des travaux novateurs sur la création de nouveaux matériaux de l'épaisseur d'un atome ayant d'importantes applications dans la conversion de la chaleur et de l'énergie solaire en électricité.

- Lauréate pour l'Europe : **Dame Carol Robinson**, chimie physique et spectrométrie de masse. Professeur de chimie, Université d'Oxford (Royaume-Uni), elle a créé une méthode révolutionnaire d'étude de la fonction des protéines, plus particulièrement les protéines membranaires qui jouent un rôle critique dans plusieurs processus vitaux.

- Lauréate pour l'Amérique du Nord : **Molly S. Shoichet**, chimie des polymères. Professeur de génie chimique et chimie appliquée à l'Université de Toronto (Canada), elle est récompensée pour ses approches uniques et pionnières dans la création de biomatériaux pour la régénération du tissu nerveux et pour le développement de nouvelles méthodes de diffusion de produits bio-thérapeutiques dans le système nerveux central.

• Pour en savoir plus sur les lauréates et les quinze boursières : www.loreal.fr/foundation/Article.aspx?topcode=Foundation_AccessibleScience_WomenExcellence_U

Les lauréats du Prix Pierre Potier 2014



Le Prix Pierre Potier a été créé en 2006 par le Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, en partenariat avec la Fédération Française pour les sciences de la Chimie (FFC) et

l'Union des Industries Chimiques (UIC), pour mettre en lumière les initiatives de l'industrie chimique en faveur du développement durable et favoriser le développement de démarches écoresponsables.

Les 29 dossiers examinés par le jury traduisent tous l'ambition de la filière de répondre aux défis énergétiques, environnementaux et sociétaux, que ce soit par la conception de produits et procédés permettant de réduire leur impact sur la santé et l'environnement, l'utilisation de matières premières et d'énergies renouvelables, ou l'efficacité énergétique des procédés.

Le 19 mars dernier, Trophées et Médailles de cette 9^e édition ont été remis aux lauréats par le ministre Emmanuel Macron lors d'une cérémonie au Ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique. Lutte contre les insectes et parasites, matériaux d'isolation, peintures « dépollueuses », et procédé œnologique « vert », les quatre applications primées démontrent que la chimie, au cœur de notre vie quotidienne, est source d'innovation et de solutions.

• **Trophée à Solvay pour BiFor-SafE, une solution à base de bicarbonate de sodium et de sels minéraux, pour lutter efficacement contre certains parasites et améliorer l'hygiène des bâtiments agricoles.** Cette formulation minérale est déclinée sous différentes formes ou dosages pour répondre aux divers besoins du marché. Lancée cette année, PROCrop™, principale formulation de BiFor-SafE, est

utilisée en mode préventif contre le développement des insectes dans le stockage de céréales. L'association de bicarbonate de sodium et d'additifs alimentaires a l'avantage d'être totalement inoffensive pour l'homme, les animaux et l'environnement. La formulation est dépourvue de neurotoxiques et d'inhibiteurs de croissance pouvant induire une résistance des parasites, et il n'y a pas de résidu après traitement. Protégée par six brevets et agréée pour une utilisation en agriculture biologique, cette formulation représente une alternative aux insecticides conventionnels et répond aux exigences du plan Ecophyto 2018 proposé dans le cadre du Grenelle de l'environnement qui vise à réduire de moitié les quantités de produits phytosanitaires utilisés en France d'ici 2018.

• **Trophée à Saint-Gobain pour un liant à base de ressources renouvelables pour laine minérale d'isolation.**

La résine développée ici est constituée de deux types de composants majoritaires renouvelables : un sucre ou mélange de sucres produits à partir de l'hydrolyse d'amidons de maïs ou de blé, et de l'acide citrique, essentiellement produit par fermentation de carbohydrates. Le liant est ainsi constitué à plus de 85 % de ressources renouvelables. La formulation, qui garantit des performances thermiques et mécaniques équivalentes aux produits d'isolation commercialisés par le groupe, a été optimisée pour donner récemment naissance à une nouvelle génération aux performances améliorées (Isover 4+).

• **Médaille aux Peintures ONIP pour son procédé Clean'R, qui réduit de 60 % la teneur en formaldéhyde,**

composant classé cancérigène, irritant pour les yeux, le nez et la gorge et présent dans l'air intérieur. Cette gamme de peintures assainit l'air grâce à un polymère portant au moins une fonction fixatrice de formaldéhyde pour le fixer de manière covalente. Cette innovation trouve son application dans toutes peintures ou vernis pouvant être appliqués sur divers supports. Unique en France et en Europe, ce procédé développé par une PME normande n'utilise aucune matière première nocive ou dangereuse pour l'environnement ou la santé humaine. Une fois sèche, la peinture capte et détruit naturellement le formaldéhyde présent dans l'air. Dans la phase de désorption, aucun composé de type COV n'est relargué, exceptées des molécules d'eau en quantité infinitésimale. Cette technologie présente l'avantage de fixer de manière permanente le formaldéhyde de l'air pendant sept à vingt ans selon la finition.

Chimie & Terroir, 7^e édition

Avignon, 27-30 mai 2015

Osez l'expérience ! Les Rencontres Chimie & Terroir proposent de faire découvrir à tous la chimie et la place qu'elle occupe dans notre quotidien. Des scientifiques vous accueilleront dans le péristyle et la salle des fêtes de l'hôtel de ville d'Avignon autour de démonstrations et ateliers sur les thèmes « chimie et plantes », « chimie et gastronomie », « chimie et cosmétologie », « chimie et géologie »... Des stands vous permettront de vous informer sur la chimie et les métiers qu'elle recouvre.

En ouverture de ces Rencontres, le mercredi 27 mai à 20 h 30 au Restaurant Françoise, vous pourrez participer à un **café des sciences autour de la gastronomie et de la cosmétologie moléculaires**. Le jeudi soir, vous pourrez prolonger cette initiation par une **conférence avec Raphaël Haumont** à l'Université d'Avignon. Et ne ratez pas **Le défi Miam**, spectacle de Gamelle et Molécule, samedi 30 mai à 14 h, hôtel de ville.

Les **classes** seront **accueillies sur inscription** les jeudi 28 et vendredi 29 mai pour participer à des ateliers.

Accès libre tout public aux ateliers et démonstrations le **samedi 30 de 9 h à 18 h**.

• Plus d'informations : www.maisondelachimie.asso.fr/chimiesociete



Rappelons que la Fédération réunit les compétences de 90 laboratoires de recherche et regroupe depuis janvier (après l'intégration de l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers) 20 écoles d'ingénieurs en chimie et génie chimique français.

• www.19ecolesdechimie.com

Didier Houssin, président d'IFP Énergies nouvelles



© AIE.

Didier Houssin a été nommé par décret en conseil des ministres du 8 avril dernier à la présidence d'IFPEN, acteur public de la recherche et de la formation dans les domaines de l'énergie, du transport et de l'environnement. Il succède à Olivier Appert dont le mandat arrivait à échéance après douze années passées à la tête de l'organisme.

Diplômé de l'Institut d'Études Politiques de Paris et de l'ENA, il débute sa carrière au Ministère de l'Industrie en 1983. Directeur des ressources énergétiques et minérales de 2001 à 2004, il devient directeur général délégué du BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) de 2004 à 2007. Cette même année, il rejoint l'Agence internationale de l'énergie (AIE) comme directeur des marchés et de la sécurité énergétique – en particulier des marchés du pétrole, du gaz et de l'électricité, des énergies renouvelables et de la sécurité d'approvisionnement –, avant de diriger les politiques et les technologies énergétiques durables fin 2012 – à ce titre, il était responsable du développement des technologies à bas carbone et de la transition énergétique.

• www.ifpen.fr

Recherche et développement

Des routes à base de microalgues ?



© Algoroute.



© Sofralab.

• **Médaille à Sofralab pour Bio DKS, une alternative écologique au monopropylène glycol (MPG)**. Développé au cœur du vignoble champenois, Bio DKS est un fluide caloporteur 100 % biosourcé et 100 % biodégradable destiné à la congélation des cols de bouteilles de vins effervescents, procédé permettant d'éliminer les dépôts pour obtenir un champagne limpide après dégorgement. Cette solution pure, prête à l'emploi, ne contient ni ne nécessite l'ajout d'anticorrosif. Elle possède des caractéristiques mécaniques et thermiques supérieures à celles du MPG, et une viscosité trois fois plus basse. Du point de vue environnemental, Bio DKS est particulièrement novateur. La fermentation du sucre de betterave produisant l'acide succinique (matière première du Bio DKS) fixe 180 g de CO₂ par kg d'acide produit (la production de MPG à partir du pétrole en dégage plus de 4 kg) et la quantité de rejet après dégorgement est divisée par trois. Ce produit, proposé en œnologie, a été récompensé

en 2013 par des maîtres viticoles (prix spécial du jury de la Foire aux vins d'Alsace, prix du public de l'Innovation au Viteff).

Roselyne Messal

Pierre Le Cloirec, président de la FGL



© Collection ENSCR /S. Godefroy.

Spécialiste des systèmes mettant en jeu des interactions solides-fluides dans les milieux complexes, avec des applications dans le domaine général des procédés de traitement de l'eau, de l'air ou de la valorisation matière des déchets, Pierre Le Cloirec, professeur des universités et directeur de l'École Nationale Supérieure de Chimie de Rennes (ENSCR), a été nommé le 20 mars dernier président de la Fédération Gay-Lussac (FGL). Il succède à Jacques Mercadier, directeur de l'École Nationale Supérieure en Génie des Technologies Industrielles (ENSGTI, Pau), arrivé en fin de mandat.

Le nouveau président articulera sa stratégie autour d'axes majeurs tels le développement et la coordination des actions communes pour les écoles (évolution des cycles préparatoires intégrés), une ouverture plus large à l'international (poursuite des programmes engagés avec la Chine) et la communication.

Dans le cadre du projet scientifique de bio-bitume Algoroute⁽¹⁾, cofinancé par la Région Pays de la Loire, des chercheurs de laboratoires nantais et orléanais⁽²⁾, en collaboration avec l'entreprise AlgoSource Technologies, expert mondial reconnu dans les microalgues, ont produit du bio-bitume en valorisant des résidus de microalgues⁽³⁾, issus par exemple de l'extraction de protéines hydrosolubles des algues pour l'industrie cosmétique. Ils ont utilisé un procédé de liquéfaction hydrothermale (de l'eau sous pression à l'état sous-critique) qui transforme ces déchets en une phase visqueuse noire hydrophobe ayant un aspect proche de celui d'un bitume pétrolier. Ce procédé est réalisé avec un rendement de conversion de 55 % [1].

Si la composition chimique du bio-bitume est différente de celle du bitume issu du pétrole, ils ont la même couleur noire et les mêmes propriétés rhéologiques. Liquide au-dessus de 100 °C, le bio-bitume permet d'enrober les agrégats minéraux ; viscoélastique de -20 à 60 °C, il assure la cohésion de la structure granulaire, supporte les charges et relaxe les contraintes mécaniques. Des analyses de tenue dans le temps ont débuté, ainsi que des études pour évaluer la rentabilité du procédé dans la perspective d'une production à grande échelle.

* Source : CNRS, 08/04/15.

[1] Audo M., Paraschiv M., Queffélec C., Louvet I., Hémez J., Fayon F., Lépine O., Legrand J., Tazerout M., Chailleux E., Bujoli B., Subcritical hydrothermal liquefaction of microalgae residues as a green route to alternative road binders, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2015, 3(4), p. 583.

(1) www.algoroute.fr/FR

(2) L'Ifsttar (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux), le GEPEA (Génie des procédés – environnement – agroalimentaire, Saint-Nazaire, CNRS/Univ. de Nantes/ONIRIS/École des Mines de Nantes) et le CEISAM (Chimie et Interdisciplinarité, Synthèse, Analyse, Modélisation, Nantes, CNRS/Univ. de Nantes).

(3) Pour en savoir plus, deux vidéos : <https://www.youtube.com/watch?v=XQc1SicxcVU> et <http://webtv.univ-nantes.fr/fiche/6232/algoroute-du-bitume-avec-des-algues>

Enseignement et formation

31^e Olympiades nationales de la chimie

Élèves, enseignants, sponsors, représentants des institutions*, organisateurs, tous motivés et passionnés, se sont retrouvés à la Maison de la Chimie le 10 avril dernier pour la cérémonie de remise des prix de cette nouvelle édition des ONC, dans une ambiance toujours aussi sympathique. C'est

Paul Fraux, le lauréat 2014, aujourd'hui en MPSI, qui nous a rappelé en ouverture le plaisir d'y participer. Quand à Élise Duboué-Dijon, 3^e des ONC en 2007, médaille de bronze lors des Olympiades internationales de chimie à Moscou en 2007, puis médaille d'argent à Budapest en 2008, elle s'est vue attribuer en 2014 une bourse L'Oréal-UNESCO « Pour les femmes et la science » et est actuellement doctorante à l'ENS où elle étudie l'influence des propriétés des solvants sur la catalyse enzymatique. Un parcours prometteur ! La « génération C », comme chimie du futur, créativité, citoyenneté... est déjà en place.

Pendant la cérémonie, des films illustrant le travail et le ressenti des candidats lors des différentes épreuves⁽¹⁾ ou montrant les applications des industriels de la chimie autour du thème de cette année, « Chimie et énergie », ont été projetés.



Les lauréats 2015 de « Parlons Chimie », de gauche à droite : Tony, Yael, Sina et Mahisha. © UIC.

Dans le difficile contexte économique actuel, qui a entraîné une diminution notable des subventions des ONC, le concours de communication piloté par André Gilles (UdPPC) « **Parlons Chimie** »⁽²⁾, dont l'objectif est de faire une communication en chimie adaptée à un public ciblé, avait été remis en question. La belle progression du nombre de dossiers déposés (24 cette année) démontre de son attrait auprès des jeunes. Huit projets finalistes ont été présentés sur des sujets très divers allant de la cigarette électronique à l'huile d'olive, en passant par la gastronomie moléculaire, l'addiction, la « peur de la chimie », la potabilisation de l'eau, la colle pour réparer les tissus humains (voir photo) et les biocarburants⁽³⁾... Un bon cru dont les efforts de communication ont été appréciés par le jury. Le premier prix a été attribué à « **La chimie de l'addiction** » : des élèves de terminale STL du lycée Jean Perrin de Marseille, représentés par **Yael Arrighi** et **Tony Casa**, se sont donné notamment pour mission d'expliquer aux jeunes ados ce qu'il se passe dans notre cerveau lorsque l'on



Les élèves de première S du lycée La Bourdonnais de Curepipe (Île Maurice) se sont penchés sur une solution aqueuse de nanoparticules de silice née du travail de l'équipe du physico-chimiste Ludwig Leibler (ESPCI ParisTech), qui a suivi leur projet avec enthousiasme. Cette solution pourrait servir de « colle » pour tissus biologiques, remplaçant ainsi les points de suture. Roan Moonosamy et Michael Descombes, qui représentaient l'équipe, ont mis le jury à contribution : le foie entaillé s'est « ressoudé » une vingtaine de secondes après l'application au pinceau du produit. © UIC.

consomme du tabac, de l'alcool ou du cannabis à l'aide de quizz, de manipulations (tests d'identification, synthèses simples) et de diaporamas. Leur objectif : « informer sans moraliser », pour que chacun puisse agir en toute connaissance de cause. Quant au « **Chaudron de la chimie** », classé second, il a amené des élèves de première S du lycée Montalembert de Courbovois, représentés par **Sina Sobooti Iran** et **Mahisha Uruthirasigamani**, à réaliser un beau projet mêlant culture et gastronomie moléculaire et à faire notamment découvrir cette science à de jeunes malentendants en CAP pâtisserie à l'Institut Bager à travers un atelier de création culinaire/chimique.

Côté **concours scientifique**, 2 230 élèves en provenance de toute la France et de l'étranger au départ... et 36 finalistes à Paris. Deux épreuves cette année : une nouvelle épreuve « collaborative » pour laquelle des groupes composés de trois candidats ont travaillé autour d'un thème (« Faut-il encore brûler le charbon ? ») avant de présenter ensemble le résultat de leur équipe et de répondre aux questions du jury (les trois candidats reçoivent la même note) et l'épreuve de manipulation (3 h 30 pour séparer des cations manganèse et zinc d'un produit issu du recyclage de piles), avec la rédaction d'un cahier de laboratoire.

Le lauréat 2015 est **Pierre Monteiller** (lycée Louis le Grand, Paris). **Timothée Rio** (Ensemble scolaire Notre-Dame/Saint-Sigisbert de Nancy) arrive second, suivi de **Juliette Luiselli** (lycée Fabert de Metz). Comme chaque année, les deux premiers lauréats seront reçus sous la Coupole de l'Académie des sciences lors d'une séance solennelle cet automne. Notons



Les finalistes des 31^e ONC, avec au centre les trois lauréats 2015 de l'épreuve scientifique : de gauche à droite, Pierre (1^{er}), Juliette (3^e) et Timothée (2^e). © UIC.



que sur les onze jeunes femmes présentes en finale, six se sont classées dans les dix premières places.

L'épreuve de manipulation a été remportée par Irène Bacquet (lycée Mariette de Boulogne-sur-Mer) et l'épreuve en équipe par Charles Madeline-Dérou (Institut Sévigné de Grandville), Margaux Legaigoux (lycée Paul Langevin de La Seyne-sur-Mer) et Juliette Luiselli.

Passerelle entre le monde de l'enseignement et celui de l'industrie, ces Olympiades sont bien plus qu'un concours. Rendez-vous est déjà pris en 2016 pour la 32^e édition.

**Séverine Bléneau-Serdel et
Roselyne Messal**

* Académie des sciences, AEFÉ, Arkema, BASF, Belin/Pour la Science, Chimie ParisTech, CNRS, Dow, ENCPB, ExxonMobil, Fédération Gay-Lussac, Fondation de la Maison de la Chimie, Lycée Stanislas (Paris), Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, PlasticsEurope, SCF, Solvay, UdPPC, UIC, UIPP, Universcience, UPMC, Vuibert et bien sûr *L'Actualité Chimique* qui a offert des abonnements aux lauréats du concours scientifique et à leurs équipes pédagogiques comme chaque année !

(1) Palmarès complet, photos et films retraçant les deux jours d'épreuves : www.olympiades-chimie.fr

(2) <http://parlons-chimie.olympiades-chimie.fr>

(3) Alexis Murlin et Damien Motelay (en terminale S au lycée François 1^{er} du Havre) ont réalisé un site Internet très complet sur les biocarburants dédié aux lycéens, qui compte déjà plus de 6 200 visites à son compteur depuis son ouverture en janvier dernier : <http://biocarburants-parlons-chimie.e-monsite.com>

La main à la pâte a 20 ans !

Lancée en 1995 par l'Académie des sciences à l'initiative des académiciens Georges Charpak, Pierre Léna et Yves Quéré, La main à la pâte n'a eu de cesse de promouvoir une éducation à la science qui s'appuie sur la curiosité des jeunes. Pour célébrer ses 20 ans, La main à la pâte, devenue une Fondation en 2011, rend hommage à tous les acteurs – enseignants, parents d'élèves, pédagogues, scientifiques... – qui ont fait vivre ses actions dans les classes. De nombreuses initiatives célèbrent cet anniversaire, avec un temps fort les 9 et 10 juin : le 9 juin, une séance publique dédiée à l'Académie des sciences, et le 10 juin, un colloque international (à la Fondation Del Duca, Paris 8^e) suivi d'une cérémonie festive et d'un concert en hommage à Georges Charpak à la Sorbonne (Paris 5^e).

* www.fondation-lamap.org/20ans

Industrie

BASF lance un concours d'innovations pour le stockage de l'énergie

Dans le but de faire émerger de nouvelles idées pour stocker l'énergie provenant des sources d'énergie

renouvelable et de créer de nouveaux contacts, BASF, en partenariat avec la société américaine Nine Sigma, a lancé le **concours Open Innovation**. Il constitue un élément important du programme Creator Space™ de co-création que BASF a mis en place pour ses 150 ans* et qui se compose de formats innovants facilitant les discussions et inclut également trois colloques scientifiques. Les idées peuvent être soumises en ligne **jusqu'au 2 juin 2015****. Les cinq lauréats retenus seront connus en novembre 2015 et récompensés de 100 000 euros chacun. Les meilleurs concepts pourront devenir un projet de recherche en collaboration avec BASF.

* www.creator-space.basf.com, voir « En bref », février-mars 2015, p. 120.

** www.basf.com/energy-contest

Prochain numéro :
« **Chimie et lumière** »
numéro spécial double (juin-juillet)

à l'occasion de
L'Année internationale 2015

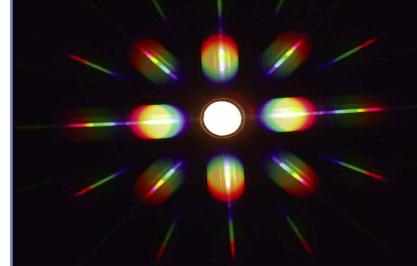


Photo : B. Valeur. DR

Retrouvez dès maintenant l'intégralité du Colloque Chimie & expertise en vidéo



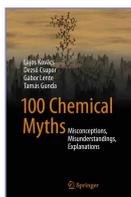
Le 11 février dernier, plus de 800 participants sont venus à la Maison de la chimie (Paris) pour suivre le colloque « Chimie & expertise - Santé et environnement ».

En attendant la publication du nouveau volume dédié de la collection « L'Actualité Chimique - Livres », retrouvez dès maintenant l'intégralité de cette journée en vidéo sur le site de la Fondation de la Maison de la chimie*.

À vos agendas pour le prochain colloque : « **Chimie & changements climatiques** » le 18 novembre 2015 !

* http://actions.maisondelachimie.com/index-p-colloque_videos-i-0.html

Livres



100 chemical myths Misconceptions, misunderstandings, explanations

L. Kovács, D. Csupor, G. Lente, T. Gunda
396 p., 52,74 €
Springer, 2014

Ce livre, introduit par le directeur du Bureau Science et Société de la fameuse Université McGill (Montréal), est destiné à ceux qui, fascinés par la chimie et ses merveilles, sont en butte aux attaques culpabilisantes et infondées... et aux risques, sur la base de « rumeurs urbaines », de faire de mauvais choix en matière de nourriture, de santé, etc.

La construction du livre est pédagogique ; il est organisé en une partie principale qui traite d'une centaine de substances chimiques, très variées, suivie d'un glossaire et d'un index. Entre les deux, et reprenant point par point les items de la partie principale, les sources et des lectures complémentaires sont suggérées. Chaque sujet, d'une longueur d'une à quatre pages, est traité selon le titre du livre : ce que l'on croit savoir et pourquoi, où est l'erreur, et la réalité expliquée.

La partie principale est elle-même organisée en trois grands thèmes, précédés d'une trentaine de pages sur les idées générales les plus courantes, et les plus convenues, avec le classique exemple de la pétition pour l'interdiction de l'oxyde d'hydrogène. On y parle aussi du trou de l'ozone et des raisons qui ont accompagné l'épidémie de choléra de 1991, et d'autres sujets comme le naturel vs le synthétique. De quoi faire réfléchir et donner des arguments sérieux face aux contradicteurs.

Les autres thèmes sont l'alimentation, les médicaments et enfin les catastrophes, poisons et produits chimiques. Tous sont traités avec une certaine dose d'humour dans les titres et sont bien illustrés, notamment de formules chimiques.

Alimentation évoque aussi bien les acides gras (la margarine vs le beurre, etc.), les additifs alimentaires (« le bon, le méchant et le vilain »), le syndrome du restaurant chinois avec les glutamates, la saccharine et l'aspartame. La mode des graines (soja, riz rouge, etc.) et des produits complets est examinée sous ses divers aspects et ses risques

– les alertes lancées par l'Union européenne (en 2006) n'étaient liées que pour 17 % à des produits chimiques, le reste étant le fait d'intoxications dues à des pathogènes. Les effets des polyphénols présents dans le vin rouge sur le « mauvais cholestérol », le cancer, etc. sont discutés à l'aide de nombreuses références ; la proximité structurale de l'estradiol (une hormone naturelle) et le *trans*-resveratrol (un de ces polyphénols) montrent l'inanité de certains rapprochements. La question de la fraude est rapidement traitée, alors que dans les domaines de l'alimentation et du médicament, elle constitue un danger majeur.

Les *médicaments* constituent un ensemble particulièrement riche. Les questions fondamentales sur la différence entre générique et médicament d'origine, ainsi que l'effet sur la santé des placebos ou des médicaments comme l'aromathérapie et l'homéopathie sont traités avec sérieux et très bien documentés. Des effets et inconvénients (souvent mal connus) des vitamines (CA : 25 milliards de dollars/an aux États-Unis), *i.e.* trop de vitamine A chez les enfants, sont décrits et expliqués. Les diverses cures à la mode (détoxification, aloès, huile de castor, tisanes diverses et leurs éventuels dangers, cures anti-acidité, eaux minérales, etc.) sont abondamment illustrées et de nombreux composés chimiques sont présentés dans un ensemble qui les rend accessibles. Mention est faite des antibiotiques et de leur utilisation abusive qui conduit à « se tirer une balle dans le pied » (traduction libre). Un sujet traite des drogues diverses, et la saga des anti-oxydants, effets positifs et négatifs, est largement développée. L'efficacité des médicaments est questionnée ainsi que leur sécurité.

Le chapitre sur les *catastrophes*, les *poisons*, etc. n'est pas le moins intéressant. Les auteurs rappellent, chiffres à l'appui, ce que beaucoup ne veulent pas savoir : que l'industrie chimique est la moins « tueuse » des grandes industries. Cyanure, mercure, arsenic, sels de baryum et de chrome forment la partie produits minéraux. On y rappelle que les diamants ne sont pas éternels, et pourquoi. L'eau et ses merveilles (et les notions d'acidité, de pH), le poison et la dose dans son acception la plus large, sont expliqués d'une manière originale avec nombre de références littéraires et pas seulement scientifiques.

Voilà un livre qui répond à de multiples curiosités, avec une gradation intelligente des difficultés, donc à la portée du plus grand nombre. À recommander.

Rose Agnès Jacquesy



Vous avez dit chimie ?

De la cuisine au salon, des molécules plein la maison

Y. Verchier, N. Gerber
Illustrations de R. Maraï
169 p., 14,90 €
Dunod, 2014

Joliment illustré, ce livre propose systématiquement un texte explicatif du principe étudié, un mémo science et un « faites-le à la maison », sans oublier les grandes découvertes. Une présentation de la chimie, les principes de l'électrochimie, la chimie en cuisine, dans la salle de bain, la chimie au jardin... chacun de ces chapitres analyse, explique et précise les phénomènes chimiques mis en jeu.

Pédagogique, ludique et documenté, ce fascicule est très utile pour initier les enfants à la chimie à partir du CP, pour redéfinir des notions pour les collégiens et les lycéens, et, pour les adultes, se replonger dans le plaisir de la manipulation. À avoir avec soi lors d'après-midi pluvieux de vacances...

Marie-Claude Vitorge



Tout-en-un-chimie

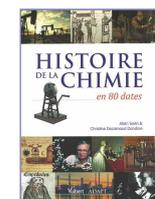
J. Mesplède, M. Dumoulin, S. Mathevet
791 p., 59,90 €
Bréal Éditions, 2013

Cet ouvrage traite de la chimie enseignée depuis la rentrée 2013 dans les nouveaux programmes de CPGE (classes préparatoires aux grandes écoles) en 1^{ère} année de MPSI, PCSI et PTSI. Il est divisé en sept grandes parties (contenant chacune plusieurs chapitres) dont les intitulés correspondent exactement à ceux donnés dans le *Bulletin Officiel* relatif aux nouveaux programmes. Chaque chapitre est divisé en trois parties complémentaires : cours, méthodes et exercices (et/ou QCM) de différents niveaux avec leurs corrections. La première partie, commune aux trois classes concernées et intitulée « Transformation de la matière », permet de faire le lien entre les connaissances vues dans le secondaire et quelques nouvelles notions telles qu'activité ou

constante d'équilibre. La deuxième, « Évolution temporelle d'un système et mécanismes réactionnels », permet à l'étudiant de se familiariser avec différents outils mathématiques et d'aborder la cinétique à travers la notion de vitesse (non vue au lycée). Dans la partie trois, « Architecture de la matière », les notions décrites, très peu enseignées au lycée, sont exposées de telle sorte qu'un étudiant ait un minimum de connaissances relatives à la caractérisation des atomes, la classification périodique ou la géométrie des molécules. La dernière partie, intitulée « Structure, réactivité et transformations en chimie organique 1 », est enseignée uniquement en PCSI. Rappelons que la chimie organique a pris une place importante dans les nouveaux programmes de lycée, accompagnée par des études spectroscopiques telles que l'UV-visible, la RMN ou l'infrarouge. Les parties 5 et 6, « Architecture de la matière condensée : solides cristallins » et « Transformations chimiques en solution aqueuse », répondent bien au cahier des charges donné en étant très bien illustrées et très explicites. Enfin, la dernière partie, réservée aux étudiants de PCSI, aborde la deuxième partie de l'enseignement de chimie organique sous le titre « Réactivité et transformations en chimie organique 2 ». Il est à souligner que certains chapitres se terminent par une approche documentaire fort instructive offrant aux étudiants une ouverture sur des sujets récents, soit de recherche, soit d'approfondissement.

Cet ouvrage, adapté aux nouvelles réformes, conviendra à tous les étudiants de CPGE comme de licence.

Bénédicte de Bonneval



Histoire de la chimie en 80 dates

A. Sevin, C. Dezarnaud Dandine

188 p., 25 €

Vuibert Adapt, 2014

Ce bel ouvrage propose un parcours initiatique à l'histoire de la chimie sous

forme de 80 fiches commentées autour d'une date considérée comme remarquable : une découverte, une publication, une théorie. Quarante-dix dates et presque autant de noms témoignent d'un choix par essence réducteur ; une chronologie est toujours subjective. Néanmoins, les auteurs livrent ici un panorama de l'évolution de la connaissance et de la maîtrise de la matière de la Préhistoire à la fin du XX^e siècle.

Les fiches sont groupées par périodes : Préhistoire et Antiquité, du Moyen Âge aux Lumières, Lumières et révolutions, la chimie à l'ère de la théorie atomique. Une dernière partie brosse le rôle de la chimie depuis le Big Bang, pour montrer qu'elle est partout et qu'elle constitue une science centrale. Chaque fiche couvre deux pages et se termine par un encart souvent anecdotique. Réduire à deux pages l'événement proposé est difficile, les auteurs vont donc à l'essentiel dans une langue claire et alerte et ne prétendent pas livrer un essai sur l'histoire de la chimie. L'analyse des faits est classique, les interrogations et les controverses à peine abordées.

Beaucoup d'interrogations demeurent cependant, notamment sur l'élaboration du fait scientifique, non abordée ici. Les savants apparaissent isolés, indépendants les uns des autres. C'est une chimie positive que nous présentent les auteurs. Par exemple, ils posent que Lémery et Rouelle sont les créateurs de la chimie moderne, sans discuter de leurs critères. Et comme la question du genre oblige à notre époque, Marie-Anne Lavoisier a droit à sa fiche de première femme chimiste autant que son mari, dont on retrace à peine les travaux. Berzélius est tout simplement oublié, or il nous a donné, entre autres, les symboles des éléments. Page 96, Marcellin Berthelot est considéré comme une figure dominante du siècle, mais rien n'est dit sur les atomistes français de la même époque, ne serait-ce que sur le rôle crucial des travaux d'Auguste Laurent et Charles Gerhardt. Rien n'est dit non plus sur la chimie quantique des années 1920. En quatre fiches, on va directement de Bohr (1913) à Hückel (1930) en passant par Lewis et Pauli. Dire que Woodward et Hoffmann créent la chimie quantique en 1968 paraît un raccourci un peu rapide. L'ouvrage conduit le lecteur à se poser la question suivante : peut-on vraiment dater un fait, une théorie, une découverte ?

L'iconographie est particulièrement attrayante et relie la chimie aux beaux-arts. Signalons toutefois une erreur : page 102, pour l'année 1874 (la stéréochimie), la légende de la photographie propose Le Bel et Van't Hoff au laboratoire de Wurtz, mort en 1884 ; or il s'agit d'une photographie de Jacobus Van't Hoff (à gauche) et de Wilhelm Ostwald (à droite) prise au laboratoire d'Ostwald à Leipzig en 1905.

Très didactique, l'ouvrage est agréable à lire et plaira aux élèves et au grand public.

Danielle Fauque



Cheminformatics for drug discovery

J. Bajorath (ed.)

415 p., 100,20 €

Wiley, 2014

Cet ouvrage est un recueil de quinze chapitres rédigés par une quarantaine d'auteurs, pour la plupart spécialistes internationaux reconnus dans le domaine. Il couvre pratiquement tous les aspects de la discipline avec de nombreuses recommandations pour le développement et la validation de modèles statistiques prédictifs, ou encore en donnant des exemples pour l'optimisation de petites molécules chimiques sous contraintes ADMET (absorption, distribution, métabolisme, excrétion et toxicité). L'accent est, comme le titre l'indique, essentiellement porté sur les approches chémoinformatiques utilisées pour le développement de nouveaux médicaments (la chémoinformatique peut s'appliquer à d'autres domaines que le médicament). On peut cependant regretter l'absence de discussions ou un balayage trop rapide de certains concepts actuels, notamment le criblage virtuel en arrimage flexible, l'exploration de l'espace chimique pour toucher des nouvelles cibles thérapeutiques particulièrement innovantes, ou encore les prédictions de « ligandabilité » des poches (capacité d'une macromolécule à lier une petite molécule chimique obéissant globalement aux règles de Lipinski). Néanmoins, étant donné le large spectre déjà couvert par les chapitres et la

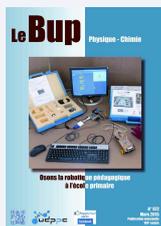
Bulletin de l'Union des professeurs de physique et de chimie (« Le Bup »)

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

N° 972 (mars 2015)

- Résultats de l'enquête sur l'impact des programmes de lycée en première année d'enseignement supérieur, par N. Lebrun, R. Barbet-Massin, S. Magnier et D. Dumora.
- Résultats de l'enquête sur la filière STL, par P. Goutverg.
- Quantité d'électricité et coulométrie, par J.-F. Le Maréchal, B. Albela et P. Fleurat-Lessard.
- Contribution en vue d'une rénovation des programmes de physique-chimie de la série scientifique, par V. Parbelle.

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

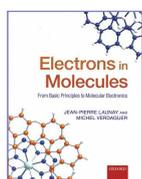


clarté des explications, il est évident que l'ouvrage devrait combler les attentes de la majorité des lecteurs, néophytes (attention, il y a quelques équations qui n'empêchent pas la lecture) ou spécialistes du domaine.

On y trouvera des chapitres analysant de manière critique le développement de modèles statistiques de type QSAR (« quantitative structure-activity relationship ») pour par exemple prédire certaines propriétés physicochimiques des molécules (par ex. le log P) ou l'inhibition de certaines cibles impliquées dans des processus ADMET (par ex. hERG pour la toxicité cardiaque). Une attention particulière est portée sur la qualité des jeux de données, les descripteurs moléculaires utilisés et la validation des résultats en considérant le domaine d'applicabilité des modèles statistiques. Certains auteurs rajoutent qu'en plus d'un manque de rigueur sur les trois points mentionnés ci-dessus, les modèles théoriques sont trop souvent hélas développés sans prendre suffisamment en compte les aspects biophysiques, biologiques et structuraux des mécanismes que l'on cherche à prédire. On notera aussi un chapitre intéressant rédigé par l'éditeur de l'ouvrage sur les forces et faiblesses des approches de criblage virtuel pour l'identification des touches, ou « hits » en anglais. Plusieurs sections sont dédiées à l'optimisation des touches vers le développement du candidat médicament. Les auteurs pointent notamment l'importance des optimisations multiparamétriques qui prennent en compte l'affinité des petites molécules pour la cible et les propriétés ADMET. L'optimisation à tout prix de l'affinité en ignorant les concepts ADMET n'a en effet pratiquement aucun intérêt, contrairement

à ce que l'on peut voir ou entendre dans de nombreux laboratoires académiques. Par la richesse de son contenu, cet ouvrage trouvera naturellement sa place dans les bibliothèques scientifiques et dans les laboratoires qui travaillent dans le domaine du médicament et de l'innovation thérapeutique.

Bruno Villoutreix



**Electrons in molecules
From basic principles to molecular electronics**

J.-P. Launay, M. Verdaguer
491 p., 55 £
Oxford University Press, 2014

Comme son titre le suggère, cet ouvrage écrit en langue anglaise mais très accessible à un lecteur français, traite de la structure électronique et des propriétés électroniques de molécules plus ou moins complexes, incluant notamment des atomes métalliques conférant aux édifices des propriétés spécifiques. Le découpage du livre est original avec des titres de chapitres qui s'articulent autour d'événements mettant en lumière le rôle des électrons et leur « mobilité » lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations extérieures.

Le premier chapitre est consacré aux principes de base de la chimie quantique, allant des molécules simples aux plus complexes et aux solides et utilisant les notions de symétrie qui sont supposées connues. Le lecteur déjà cultivé pourra y trouver le rappel des notions et concepts utilisés dans les chapitres suivants sur les structures électroniques, dans une présentation mettant en avant l'approche par les orbitales moléculaires qui permet souvent de donner des explications (relativement) simples des phénomènes.

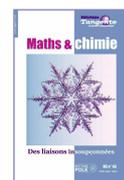
Chacun des chapitres suivants commence par une introduction sur les propriétés concernées qui sont ensuite développées et illustrées sur des exemples couvrant un large champ du domaine.

Le deuxième chapitre, intitulé « The localized electron », traite des propriétés magnétiques. Il aborde le formalisme et l'étude des molécules avec des centres métalliques magnétiques. Le troisième, « The moving electron », est dédié aux propriétés électriques et aux transferts d'électrons. On y voit la conductivité et les transferts inter et intramoléculaires. Le quatrième chapitre, « The excited electron », traite des propriétés photo-physiques. On y trouvera l'analyse de quelques processus dans des états électroniques excités. Le dernier chapitre est

l'aboutissement et l'exploitation des propriétés à l'échelle moléculaire, par le chimiste qui parvient à contrôler les électrons en leur imposant les contraintes de différents champs, magnétiques, électriques ou optiques. Il s'intitule fort justement « The mastered electron » et montre les applications que l'on peut envisager dans le domaine de l'électronique moléculaire. Ce chapitre fait état de la force et de l'ingéniosité du chimiste qui peut concevoir et construire de nouveaux édifices soit multifonctionnels au sein d'une molécule, soit composés d'éléments reliés par combinaison supramoléculaire.

Il s'agit ici d'un ouvrage riche et clair, largement illustré de schémas, qui couple les problèmes de construction moléculaire et les approches théoriques, sans alourdir exagérément le formalisme, mais toutefois à un niveau assez élevé pour intéresser un public averti ayant une bonne culture en chimie moléculaire et en langage orbitalaire.

Gilberte Chambaud



**Maths & chimie
Des liaisons insoupçonnées**

Collectif Tangente
Hors série Bib 43
160 p., 19,80 €
Éditions Pôle, 2012

Ce hors série de l'excellente Bibliothèque Tangente, illustre en 46 petits articles une sélection de liens étroits entre les mathématiques et la chimie. Quelques titres extraits du sommaire parlent d'eux-mêmes : « La société d'Arcueil, au service des jeunes savants » ; « Une petite histoire de la chimie mathématique » ; « Le calcul, indispensable à l'expérience » ; « La chimie mise en équation » ; « Newton et l'alchimie » ; « La naissance de la chimie quantique » ; « Une algèbre pour comprendre les structures électroniques des atomes et des molécules » ; « Les mystères de l'entropie » ; « Les urnes d'Ehrenfest » ; « La loi d'Arrhenius » ; « Pourquoi la glace flotte sur l'eau ? » ; « Équilibres et réactions » ; « Cayley et le calcul des isomères chimiques » ; « Le « démon » de Prigogine » ; « Cristallographie et polyèdres : de Haüy à Fedorov » ; « Le pH, les logarithmes et les cas limites » ; « Les secrets mathématiques de l'équation de la réaction » ; « Les fractales en génie chimique : de biologie en technologie et énergétique » ; « Traquer la structure d'une protéine jusque dans l'espace réciproque »...

Xavier Bataille

• www.poleditions.com/pole/publications.php?collection=Biblio%C3%A8que%20Tangente

En accès libre sur Internet

Le nouveau dictionnaire de l'Académie nationale de pharmacie

Plus de 10 000 entrées couvrant près de 22 000 définitions, en permanence revisitées et au besoin réactualisées... la nouvelle édition du *Dictionnaire des sciences pharmaceutiques et biologiques*, fruit de cinq années de travail bénévole, est dorénavant en ligne. Déjà publiée en 1997, puis en 2001, sa refonte complète a été entreprise en 2010 sous la coordination du Pr Francis Puisieux, président de la Commission du langage de l'Académie, avec la participation de plus d'une centaine de rédacteurs représentant toutes les disciplines scientifiques et professionnelles. Y sont traitées toutes les connaissances touchant le médicament et autres produits de santé, les sciences physico-chimiques en rapport avec ces domaines, la biologie, la santé publique, l'environnement et la santé, la diététique, la nutrition, la cosmétologie, ainsi que les symptômes majeurs des principales pathologies, en bref tout ce qui fait la richesse et la diversité du savoir pharmaceutique.

• <http://dictionnaire.acadpharm.org/w/Acadpharm:Accueil>

21 mai 2015

FFC

J'excel 4

4^e Journée de l'expertise chimique

Lyon

Thème : Techniques spectrométriques proche infrarouge et Raman. Applications et perspectives.

• <http://chimie-experts.org>

24-30 mai 2015

SECO 52

52^e Semaine d'études en chimie organique

Morzine

• www.congres-seco.fr

28 mai 2015

Forum « Science, recherche & société »

Paris

• www.forum-srs.com

1-4 juin 2015

ICTK-8

8^e Conférence internationale de chimie Toulouse-Kiev

Toulouse

• <http://tlse-kiev2015.sciencesconf.org>

1-6 juin 2015

Science & you 2015

Nancy

• www.science-and-you.com

4-5 juin 2015

GFP-Ouest 2015

36^e Journées du Groupe français des polymères (section Ouest)

Brest

• www.univ-brest.fr/limatb-er/menu/GFP-OUEST-2015

5 juin 2015

SCF

RCO 2015

Rencontres de chimie organique

Cergy-Pontoise

• <http://rco2015.societechimiquedefrance.fr>

11 juin 2015

SCF

Journée annuelle de la SCF

Rhône-Alpes

Villeurbanne

Inscription gratuite mais obligatoire

• scf.ra2015@ircelyon.univ-lyon1.fr

22-23 juin 2015

FFC

La qualité de l'air pour la santé

Romainville

• <http://adebiotech.org/air/index.php>

28 juin-3 juillet 2015

Ozone world congress

Barcelone (Espagne)

• www.ioa-ea3g.org/congress2015/nc/nocache.html

1-3 juillet 2015

CPP Paris 2015

Paris

Thème : From cell-penetrating peptides to nanoparticles or cellular delivery.

• www.labos.upmc.fr/lbm/CPPPARIS2015.html

1-3 juillet 2015

FFC

RICT 2015

51st International conference on medicinal chemistry

Avignon

• www.ldorganisation.com/v2/produits.php?langue=english&cle_menus=1238915913

1-4 juillet 2015

ICSP & AM4

4th International Caucasian symposium on polymers and advanced materials

Batumi (Georgie)

• www.icsp4.tsu.ge

2-3 juillet 2015

Forum de la plasturgie et des composites

Nantes

• www.forum-plasturgie-composites.com

4-9 juillet 2015

SCF

SCF'15

« Chimie et transition énergétique »

Lille

• www.societechimiquedefrance.fr/congres/scf-15

5-10 juillet 2015

SCF

IP'15

International symposium on ionic polymerization

Bordeaux

• <http://ip15.sciencesconf.org>

6-10 juillet 2015

Journées Electrochimie

Rome (Italie)

• www.je2015.it

12-26 juillet 2015

EuChemS

Summer school of the Euromaster measurement science in chemistry

Pulawy (Pologne)

• www.msc-euromaster.eu/webapp/website/website.html?id=252&pageId=547

13-16 juillet 2015

ACIN 2015

3rd International conference on advanced complex inorganic nanomaterials

Namur (Belgique)

• www.unamur.be/acin2015

14-17 juillet 2015

EuChemS

In vino analytica scientia 2015

Mezzocorona (Italie)

• <http://eventi.fmach.it/IVAS2015>

22-25 juillet 2015

Global biotechnology congress 2015

Boston (MA, États-Unis)

• www.globalbiotechcongress.com

9-14 août 2015



IUPAC 2015

45th World chemistry congress

Busan (Corée du Sud)

• www.iupac2015.org

23-26 août 2015

EuChemS

15th ECSSC

European conference on solid state chemistry

Vienne (Autriche)

• <http://ecss15.univie.ac.at>

12 septembre 2015

SCF

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

Paris

• colloqueER@societechimiquedefrance.fr

27-30 octobre 2015

63^e Congrès de l'Union des professeurs de physique et de chimie (UdPPC)

La Rochelle

• www.udppc.asso.fr

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

Remise des Prix SCF et des diplômes de « Membres distingués » 2014

La remise des Prix 2014 de la SCF, à savoir les Grands Prix Joseph-Achille Le Bel et Pierre Süe et les Prix binationaux franco-allemand, franco-chinois et franco-espagnol, aura lieu à **Paris le jeudi 21 mai 2015** (9 h-17 h). Cette cérémonie solennelle sera associée à la remise des diplômes de Membres distingués de la SCF aux quarante récipiendaires de la promotion 2014.

La cérémonie se déroulera à l'Université Pierre et Marie Curie (amphithéâtre H 25) avec le programme suivant :

- 08.30-09.00 Accueil
- 09.00-09.30 Messages de bienvenue
Présentation de la section régionale Île-de-France (E. Amouyal)
- 09.30-10.15 Conférence de Matthias Beller, Prix G. Wittig-V. Grignard (présenté par M. Taillefer)
- 10.15-10.45 Pause
- 10.45-11.30 Conférence de Michel Ephritikhine, Prix P. Süe (présenté par O. Renaud)
- 11.30-12.15 Conférence de Nazario Martin, Prix M. Catalan-P. Sabatier (présenté par N. Avarvari)
- 12.15-13.00 Remise des diplômes de Membres distingués (O. Homolle)
- 13.00-14.00 Buffet
- 14.00-14.30 Remise des diplômes de Membres distingués junior (O. Homolle)
- 14.30-15.15 Conférence de Claude Mirodatos, Prix P. Süe (présenté par H. Olivier-Bourbigou)
- 15.15-16.00 Conférence de Shi-Gang Sun, Prix France-Chine (présenté par M. Che)
- 16.00-16.45 Conférence de Max Malacria, Prix J.-A. Le Bel (présenté par M. Taillefer)
- 16.45-17.00 Conclusions

Vous êtes les bienvenus !

Assemblée générale ordinaire

Tout adhérent de la Société Chimique de France, à jour de sa cotisation, est invité à participer à l'Assemblée générale qui se tiendra au siège social (250 rue Saint-Jacques, Paris 5^e) le **lundi 22 juin 2015 (11 h-12 h)**.

Tous les documents – livret contenant les rapports statutaires et le budget prévisionnel, fiche réponse et pouvoir avec l'enveloppe-réponse – parviendront à chaque adhérent au début du mois de juin.

Le Bureau de la SCF

Rappel des manifestations de et avec la SCF

26-29 mai 2015

GEcat 2015

Réunion du Groupe d'étude en catalyse

Obernai

• www.gecat.fr/spip.php?rubrique47

26-29 mai 2015

Gecom-Concoord 2015

Groupe d'études en chimie organométallique-Concertation en chimie de coordination

Ste-Foy-lès-Lyon

• <http://gecom-concoord2015.univ-lyon1.fr>

27-30 mai 2015

Chimie & Terroir (7^e édition)

Avignon

Voir p. 57

• www.maisondelachimie.asso.fr/chimiesociete

31 mai-4 juin 2015

Magnétisme et résonances magnétiques : outils et applications

École thématique

Autrans

• <http://divchimiephysique.wix.com/sitedcp#!-magnetisme-resonance-magnetique/c1v8t>

3-5 juin 2015

RNJP 2015

Rencontres nationales des jeunes polyméristes

La Grande Motte

• <http://rnjp2015.enscm.fr>

14-19 juin 2015

ICHAC-11

11th International conference on heteroatom chemistry

Caen

• www.ichac-11.com

15-17 juin 2015

Journées de formulation

Mont-Saint-Aignan

Thème : Les polymères dans les formulations.

• www.gfp.asso.fr/events/stage-pedagogique-du-gfp-polymeres-dans-les-formulations

18-19 juin 2015

XIV ICSN symposium

Gif-sur-Yvette

• <http://symposium-icsn.sciencesconf.org>

4-9 juillet 2015

SCF'15

« Chimie et transition énergétique »

Lille

• www.societechimiquedefrance.fr/congres/scf-15

23-28 août 2015

GECO 2015

Groupe d'étude de chimie organique

Nant

• <http://geco56.sciencesconf.org>

Index des annonceurs

Bayer	p. 46	EDP Sciences	p. 28	LCBM	p. 18
Chemistry Views	p. 15	EuCheMS	encart	Pôle Chimie Balard	2 ^e de couv.
CultureSciences-Chimie	p. 33	IRDEP	4 ^e de couv.	Shimadzu	p. 5
EDIF	p. 24				



Régie publicitaire : EDIF, Le Clemenceau, 102 avenue Georges Clemenceau, 94700 Maisons-Alfort
Tél. : 01 43 53 64 00 - Fax : 01 43 53 48 00 - edition@edif.fr - <http://www.edif.fr>

Le charbon actif

Les premiers usages du charbon actif (ou « activated carbon ») remontent aux Égyptiens qui utilisaient ses propriétés adsorbantes à des fins médicinales et pour purifier les huiles. Mais en fait, il s'agissait de charbon de bois, le charbon actif au sens moderne du terme n'étant apparu qu'à la fin du XIX^e siècle. L'invention du produit est attribuée à un Russe, Raphael Ostrejko, qui cherchait à améliorer les propriétés absorbantes des charbons dans la décoloration des sucres dans les années 1900 [1].

Fabrication [2]

Le charbon actif est fabriqué à partir de différentes sources à haute teneur en carbone, principalement les charbons (anthracite, lignite, bitumineux) et les végétaux ligneux riches en fibres celluloseuses comme le bois et les coquilles de noix de coco. Il y a généralement deux étapes : la thermolyse des matériaux de départ à basse température, puis une activation du carbone à haute température.

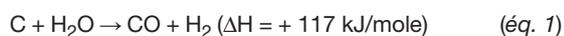
Le contenu volatil est brûlé, conduisant à un carbone présentant une structure cavernueuse avec des grands canaux à l'origine d'une forte porosité et une grande surface spécifique (figure 1). Les deux principales techniques d'activation utilisées sont l'activation chimique et l'activation à la vapeur.

Activation chimique

Cette technique est généralement utilisée pour l'activation des matériaux à base de tourbe ou de bois. Le matériau de départ est imprégné avec un agent fortement déshydratant, typiquement de l'acide phosphorique ou du chlorure de zinc, préparé sous forme de pâte et calciné à 500-800 °C pour activer le carbone. Le charbon actif résultant est lavé, séché, broyé en poudre, trié, tamisé et dépourssiéré. Il présente une structure très ouverte (macroporeuse), idéale pour l'adsorption de grandes molécules. De l'air est ajouté pour brûler les gaz sans brûler le carbone.

Activation à la vapeur [3]

Cette technique est généralement utilisée pour l'activation des charbons et des coquilles de noix de coco carbonisées. L'activation est menée à 800-1 100 °C en présence de vapeur selon les réactions suivantes :



Ces réactions endothermiques sont entretenues par combustion partielle de CO et H₂. Les charbons actifs produits selon cette méthode ont une structure de pores fine ou moyenne (faisant référence à une structure micro- ou mésoporeuse idéale pour adsorber des composés aussi bien en milieu liquide que gazeux).

Propriétés [4]

Charbon actif est un terme générique décrivant une famille d'adsorbants à base de carbone sous une forme cristallisée et possédant une porosité interne très développée. Il est important d'avoir une compréhension claire des caractéristiques physiques et d'adsorption de ces matériaux pour optimiser leurs performances.

Caractéristiques d'absorption

Elles sont sous-tendues par deux aspects : la surface spécifique et la porosité. Les matières premières de départ sont des produits où le carbone est organisé selon une structure graphitique. Les interstices entre les cristallites sont comblés par des formes désorganisées du carbone ou des goudrons qui sont éliminés lors de l'activation.

Les cristallites révélées lors de l'activation sont sous forme de petites plaquettes d'environ 1 à 2 nm d'épaisseur (trois à six mailles élémentaires !) et 2 à 60 nm de longueur.

Surface spécifique

La surface spécifique SS (en m²/g) est la surface S des cristallites élémentaires denses rapportée à la masse de produit :

$$\text{SS} = S/(V \cdot \rho) \quad (\text{éq. 3})$$

où V est le volume de matière (en cm³) et ρ la masse volumique (en g/cm³).

Elle est d'autant plus élevée que ces cristallites sont petits. La surface des cristaux lamellaires de carbone se calcule facilement sur la base de leurs données géométriques. Pour ces petites plaquettes, où e est l'épaisseur (en μm) :

$$\text{SS} (\text{m}^2/\text{g}) = 2/e \quad (\text{éq. 4})$$

Si e = 0,002 μm (soit 2 nm), SS est de 1 000 m²/g. Connaissant la valeur de SS et le nombre de sites actifs par nm², on peut en déduire la capacité d'adsorption statique (en mole/g).

La **méthode de mesure** la plus pertinente est l'adsorption d'azote en dessous de sa pression de vapeur saturante (méthode BET). On obtient ainsi la surface accessible développée dans la matrice du charbon actif. Une autre méthode est le nombre d'iode (« iodine number »), qui permet de mesurer SS par adsorption de l'iode (I₂) en solution aqueuse. Cette mesure est très proche de celle obtenue par BET, excluant cependant les très petits micropores.

Porosité et distribution des pores en fonction de leur taille [5]

Après activation, on obtient un empilement poreux de cristaux graphitiques de très petites tailles plus aux moins agrégés, avec des pores plus ou moins gros qui préexistaient dans le précurseur carboné (figure 1). Les cristaux graphitiques sont empilés soit sous forme de couches parallèles soit sous une forme plus aléatoire, créant ainsi une porosité plus ou moins grande.

On modélise la porosité créée par l'empilement des cristaux par des pores cylindriques dont la surface est égale à celle des objets qui constituent l'empilement. La relation qui permet de relier volume poreux (V_p) et SS s'écrit :

$$\text{diamètre du pore cylindrique } \phi = k \cdot V_p / \text{SS}^{(1)} \quad (\text{éq. 5})$$

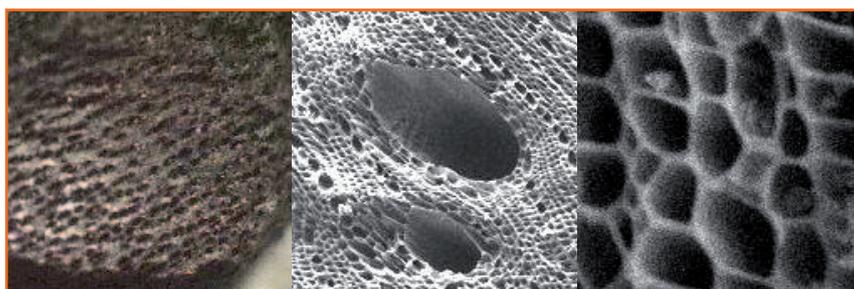


Figure 1 - Macropores suivant des grossissements croissant de gauche à droite (© Millenium Inorganic Chemicals).

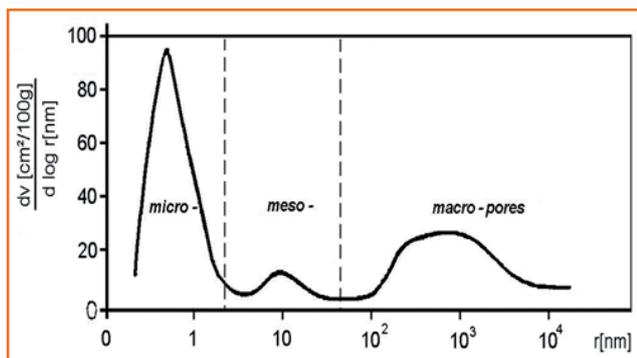


Figure 2 - Répartition différentielle du volume de pores en fonction du rayon des pores ($dv/d\log r = f(\log r)$).

L'IUPAC a fixé arbitrairement la valeur des micropores, qui sont le lieu de l'adsorption, en deçà de 2 nm, celle des mésopores, qui servent aux transports de molécules, en deçà de 50 nm, et celle des macropores, où il ne peut y avoir de condensation des molécules adsorbées, au-delà de 50 nm.

D'une manière générale (figure 2) [6], les micropores représentent l'essentiel de la surface spécifique SS, qui peut atteindre 1 000 m²/g, voire plus, mais contribuent aussi d'une façon très significative au volume poreux Vp, qui est de l'ordre de 0,15 à 0,5 cm³/g. Les mésopores représentent une part très faible du Vp – de l'ordre de 0,02 à 0,10 cm³/g – et une part très faible de la SS, qui ne dépasse pas 5 % de la surface totale. La contribution des macropores au Vp est importante – de l'ordre de 0,2 et 0,5 cm³.g⁻¹ – et leur SS est négligeable.

Caractéristiques physiques

Dureté : il s'agit en fait de la solidité mécanique des grains. Les différences de dureté des charbons actifs vont dépendre de la matière première et de leur macroporosité [7].

La **densité de remplissage tassée** (DRT) détermine la masse de charbon actif pour un volume donné, ce qui est essentiel dans les extrapolations⁽²⁾.

La **distribution de tailles de particule** est très importante à deux endroits. La taille de la particule fixe la vitesse d'adsorption des liquides et des gaz, et donc la « *capacité dynamique d'adsorption* », dans la mesure où les étapes lentes ne relèvent pas de la vitesse d'adsorption sur les sites actifs mais de la diffusion interne ou externe. La vitesse est inversement proportionnelle à la taille de la particule. *A contrario*, elle fixe la perte de charge dans le lit de grains. Selon la loi d'Ergun, la *perte de charge* est inversement proportionnelle à la taille des particules et à la porosité de leur empilement [8].

Applications, marchés et production

Les trois principaux types de charbons actifs sont les charbons en poudre ou PAC (55 %), en grain ou GAC (36 %) et en extrudés (9 %) [9]. Ils sont utilisés pour le traitement de l'eau (42 % : eaux potable 26 % et eaux usées 17 %), la purification de l'air ou des gaz (35 %, centrales thermiques, chaudières industrielles, incinérateur de déchets, ciments), les aliments et boissons (6 %), les produits pharmaceutiques 6 % et divers 11 % [10].

Les trois produits principaux sont issus : de **noix de coco**, qui disposent d'une très grande surface spécifique avec une proportion importante de micropores, ont une grande dureté et donc une faible génération de fines, sont d'une excellente pureté avec

moins de 3-5 % de cendre et sont faciles à régénérer ; de **charbons**, qui disposent d'une grande surface spécifique avec une grande proportion de méso et micropores, ont une densité consistante, donnent des matériaux d'une grande dureté avec une génération minimale de fines et sont bon marché ; de **bois**, qui ont des propriétés décolorantes excellentes, avec une grande surface spécifique caractérisée par une grande proportion de méso et macropores, de relativement faible densité, facilement régénérables [11].

C'est un marché en forte croissance [12]. En 2013, la demande mondiale était de l'ordre de 1,3 Mt et on prévoit 2,1 Mt pour 2018 [13]. Une des raisons vient du fait qu'en octobre 2013, plus de 90 pays ont signé un nouveau traité des Nations unies, la convention Minamata⁽³⁾, qui impose à chacun de prendre des mesures pour réduire les émissions de mercure dans l'air. Toutes les étapes des dispositions du traité doivent être mises en place en 2020, mais ceci ne devrait pas créer beaucoup de nouvelles installations car la capacité installée est déjà proche de 2 Mt.

Les acteurs sont très nombreux. Aux États-Unis, au Japon et en Europe de l'Ouest, l'industrie est dominée par un petit nombre d'acteurs comme Calgon Carbon Corporation, Cabot Norit, Osaka Gas Chemicals Co., Ltd. qui ont tous les trois des capacités supérieures à 60 000 t/an. En Europe, une dizaine d'acteurs sont regroupés au sein de l'Activated Carbon Producers Association (ACPA), dont la CECA⁽⁴⁾. La Chine, qui se prétend être le plus grand producteur avec une capacité estimée à 700 000 t/an, est aussi considérée comme le leader mondial de produits à base de bois à travers une myriade de petites installations de capacité inférieure à 10 000 t/an.

Notes et références

- (1) Avec ϕ en m, Vp en m³/g et SS en m²/g ou ϕ en μ m, Vp en cm³/g et SS en m²/g ; k varie de 2 à 4 selon le type de pores créés par l'empilement des particules (lamellaire, conique ou sphérique).
- (2) C'est par ailleurs un moyen de remonter à la masse volumique et au volume poreux total (VPT) d'un grain de charbon actif selon les formules $DRT = k^2 dg$ ($k = 0,5-0,6$), avec dg la masse volumique du grain. Et pour mémoire $VPT = 1/dg - 1/da$, où da est la masse volumique absolue du graphite (1,8 g/cm³).
- (3) En souvenir des milliers de Japonais victimes d'une pollution au mercure.
- (4) Le nom d'origine de la CECA du groupe Arkema est « Carbonisation Et Charbons Actifs ». Hors le charbon actif, elle possède aujourd'hui six secteurs d'activité : additifs bitumes, spécialités du phosphore, additifs de production pétrole et gaz, agents filtrants, tensioactifs de spécialités et zéolithes synthétiques.
- [1] Chemical activation of wood using CaCl₂, British patent 14,224, 1900 ; French patent 304,867, 1901 ; German patent 136,792, 1901 ; Thermal activation of wood with steam, USA patent 739,104, 1903.
- [2] Shabanzadeh A., Production of activated carbon within the indirect gasification process, Thèse, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Suède, 2012.
- [3] New process points way forward for activated carbon, *Filtration + Separation*, avril 2010, p. 39 ; McDougall G.J., The physical nature and manufacture of activated carbon, *J. S. Afr. Inst. Min., Metall.*, 1991, 91, p. 109.
- [4] Manocha S.M., Porous carbons, *Sādhanā*, 2003, 28, p. 335.
- [5] *Sciences et technologies des poudres*, 2008, http://nte.enstimac.fr/STP/co/STP_web.html
- [6] www.asseau.com/en/03-9.html
- [7] Bessa-Badreddine A., Étude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers, Thèse de doctorat, Univ. Cergy-Pontoise, 2004, p. 130.
- [8] Herrmann H.J., Komiwes V., Mege P., Meimon Y., Sur le volume élémentaire représentatif de la loi de perte de charge d'Ergun, *Oil & Gas Science and Technology*, 1999, 54, p. 577.
- [9] www.grandviewresearch.com/industry-analysis/activated-carbon-market
- [10] [www.wikinvest.com/stock/Calgon_Carbon_\(CCC\)](http://www.wikinvest.com/stock/Calgon_Carbon_(CCC)) ; www.transparencymarketresearch.com/activated-carbon-market.html
- [11] www.activatedcarbon.com/products/coal
- [12] www.roskill.com/reports/industrial-minerals/activated-carbon
- [13] Schaeffer K., The activated carbon market 2012 supply and pricing update or The carbon continuum, *Water Conditioning & Purification*, 2012, www.wcponline.com/pdf/1206Schaeffer.pdf

Cette fiche a été réalisée par **Régis Poisson** (regis.poisson@aetv-balard.com), retraité, qui a consacré sa carrière à la R & D et à l'innovation dans l'industrie chimique. Membre de l'EIRMA (à titre individuel), il dirige la société de conseil en innovation AETV-Balard. 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 2015 (numéros spéciaux inclus)

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

	Abonnement papier + électronique*		Abonnement électronique seul*		Abonnement multiple**	
	France	Étranger	France / Étranger		France / Étranger	
Particuliers	<input type="checkbox"/> 102 €	<input type="checkbox"/> 107 €	<input type="checkbox"/> 55 €		(pour les lycées et les institutions)	
Lycées	<input type="checkbox"/> 115 €	<input type="checkbox"/> 135 €	<input type="checkbox"/> 70 €		<input type="checkbox"/> 410 €	
Institutions	<input type="checkbox"/> 202 €	<input type="checkbox"/> 215 €	<input type="checkbox"/> 155 €		<input type="checkbox"/> 410 €	

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

Complétez votre collection

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

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

- 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) : 32 €
- Chimie et société : construire un dialogue (sept. 2011) : 24 €
- La chimie prépare notre avenir, vol. 2 (juin-juil.-août 2011) : 32 €
- La chimie prépare notre avenir, vol. 1 (janv.-fév. 2011) : 32 €
- La chimie mène l'enquête (juin-juil.-août 2010) : 15 €
- Chimie et développement durable. L'engagement des écoles de la Fédération Gay-Lussac (fév.-mars 2010) : 15 €
- Electrochimie & Art, Environnement, Santé, Nanosciences... (fév.-mars 2009) : 15 €
- Les cosmétiques. La science au service de la beauté (oct.-nov. 2008) : 15 €
- Chimie et patrimoine culturel, vol. II (avril 2008) : 15 €
- La photochimie pour transformer la matière (mars 2008) : 15 €
- Chimie et patrimoine culturel, vol. I (oct.-nov. 2007) : 15 €
- La photochimie pour mieux vivre (mai-juin 2007) : 15 €
- Fluor et produits fluorés à l'aube du XXI^e siècle (oct.-nov. 2006) : 15 €
- Les matériaux carbonés (mars-avril 2006) : 15 €

Retrouvez tous les numéros thématiques sur www.lactualitechimique.org

Achat à l'unité hors numéros spéciaux

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

Numéro(s) souhaité(s) :

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

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

**À commander
chez votre libraire
ou directement sur
aboutique.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.
adhesion@societechimiquedefrance.fr - www.lactualitechimique.org



“La Chimie pour le Photovoltaïque”

Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque (IRDEP)

L'IRDEP (Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque) est un institut mixte entre EDF, le CNRS et Chimie ParisTech, créé en 2005. Son activité va de la recherche fondamentale en photovoltaïque à des projets finalisés et prototypes industriels, jusqu'à la création de startups.

L'IRDEP développe une R&D de niveau international sur les technologies photovoltaïques de 2^{ème} et 3^{ème} générations.

<http://www.irdep.cnrs-bellevue.fr>



L'Institut Photovoltaïque Ile-de-France (IPVF) :

L'IPVF est un institut pour la Transition Énergétique, lauréat du programme des investissements d'avenir. Il a pour partenaires fondateurs le CNRS, l'École Polytechnique, EDF, Total, Air Liquide, Horiba Jobin Yvon et Riber.

<http://www.ipvf.fr>



L'IRDEP et la Fédération Photovoltaïque participent à l'IPVF. Les programmes de recherche de l'IPVF couvrent les filières silicium, couches minces, nouveaux concepts ainsi que les méthodes de caractérisations avancées, la théorie et la modélisation et les analyses de cycle de vie dédiées au photovoltaïque.

Fédération de recherche photovoltaïque

Elle regroupe dix laboratoires : l'IRDEP, le Laboratoire de physique des interfaces et couches minces (LPICM), unité mixte Ecole Polytechnique-CNRS, le Groupe de Génie Électrique de Paris (GEEPS), unité mixte Supélec-CNRS UPSud-UPMC, l'Institut Lavoisier de Versailles (ILV), unité mixte UVSQ-CNRS, le Laboratoire de photonique et nanostructures (LPN), unité propre du CNRS, l'Institut des Matériaux de Nantes (IMN), le Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur de l'Informatique et de l'Imagerie (ICUBE) à Strasbourg, l'Institut Matériaux Microélectronique et Nanosciences de Provence (IM2NP) à Marseille, le Laboratoire FOTON à l'INSA de Rennes ainsi que l'Institut des Nanosciences de Lyon à l'INSA (INL).

La Fédération permet une augmentation importante du potentiel de R&D photovoltaïque en France. L'originalité du programme réside dans le couplage entre des axes définis par filières couches minces (Si, CIS, organiques, nouveaux concepts) et des axes méthodologiques transversaux (caractérisation, physicochimie, théorie et modélisation, nanophotonique).

<http://fedpv.cnrs.fr>

Elle organisera les 5^{ème} journées nationales photovoltaïques en décembre 2015 (JNPV 2015) à Dourdan

