

*la lettre
de l'Académie
des sciences*

n°29

Dossier

L'Année internationale de la chimie

ÉDITORIAL**Le progrès...**

Catherine Bréchnac

page 1

DOSSIER**L'Année internationale de la chimie****La chimie, au cœur des enjeux scientifiques de demain**

Marc Fontecave

page 2

Année internationale de la chimie

Jean-Marie Tarascon

page 6

Structures moléculaires et catalyse

Pierre Braunstein

page 10

Chimie et industrie : la chimie au cœur des enjeux énergétiques

Didier Roux

page 18

Chimie et médicament : un vieux couple solide

Bernard Meunier

page 22

QUESTION D'ACTUALITÉ**Hommage de l'Académie des sciences à Georges Charpak**

page 26

LA VIE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES**Pourrait-on ralentir (un peu) la course aux publications ? ou « Cent fois sur le métier... »**

Marc Yor

page 32

Rapport RST n° 32**Démographie, climat et alimentation mondiale**

page 40

Le Rapport d'étape du groupe de travail de l'Académie des sciences : Solidarité Japon

page 33

Le projet « Des Maisons pour la science et la technologie au service des professeurs »

page 34

Parution du numéro thématique « Chimie verte et chimie durable » dans la série Chimie de la revue *Les Comptes Rendus de l'Académie des sciences*

page 35

Une image

page 36-37

Le progrès . . .

Par **Catherine Bréchnignac**

Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences,
ambassadeur délégué à la Science,
la Technologie et l'Innovation.

L'Académie des sciences a deux missions : une mission liée aux donations provenant de mécènes, donations qui pour la plupart servent à distinguer des scientifiques en leur attribuant des prix, et une mission de réflexion collective, en vue de fournir des avis ou des recommandations. Elle a aussi pour rôle d'encourager la vie scientifique, de participer à la diffusion de la science en tant que composante de la culture, de soutenir l'enseignement des sciences et de rayonner dans le contexte international.

Par testament du 12 mars 1714, Jean-Baptiste Rouillé de Meslay, conseiller au Parlement, donne et lègue à l'Académie des sciences une rente afin de fonder deux prix l'un relevant de l'art de la mécanique céleste, l'autre de l'art de naviguer. Ce fut notre première « fondation ».

Les prix que nous distribuons, aujourd'hui, proviennent toujours, en très grande majorité, de fondations : des fondations de flux, abondées annuellement, pour la plupart par des entreprises, et des fondations ayant un capital constitué de dons ou de legs et dont les intérêts financent les prix. Il est émouvant de lire les testaments que nous ont laissés au fil du temps, tous ces mécènes qui nous ont fait confiance en nous léguant tout ou partie de leurs avoirs, parfois modestes, pour récompenser des savants qui, écrivent-ils, ont fait progresser la connaissance pour le mieux-être de l'Homme.

Cette mission de distribuer des prix à ceux qui ont contribué au progrès de la connaissance nous est confiée par des hommes et des femmes qui ont composé la société d'hier et nous avons envers eux un devoir de mémoire. C'est pourquoi nous nous attachons à faire vivre nos fondations. Comme ce fut le cas il y a une quinzaine d'années, nous regroupons les fondations les plus anciennes, qui se sont étioilées au cours des ans, dans le but d'attribuer des prix plus conséquents et plus visibles, et nous recapitalisons régulièrement l'ensemble des fondations afin de compenser l'érosion budgétaire.

Notre compagnie attache la plus grande importance au choix des lauréats. Des jurys, composés d'académiciens, se réunissent régulièrement. Pour éviter trop de dispersion, nous avons optimisé le nombre de réunions, et nous sommes adjoind des experts étrangers que nous consultons par voie électronique. Les prix décernés par l'Académie des sciences recouvrent toutes les disciplines scientifiques, ils récompensent de jeunes chercheurs audacieux, des scientifiques confirmés, dont les résultats de leur recherche ont fait progresser notablement la connaissance, des savants pour l'ensemble de leur œuvre scientifique.

Mais que feront les mécènes de demain ? À notre époque, le profit doit être immédiat, le progrès qui, par essence, est une amélioration de l'existant, est regardé avec suspicion, et la science fait moins rêver que par le passé. L'Académie des arts et des sciences du cinéma (Academy of motion Picture Arts and Sciences), organisation professionnelle créée en 1927 en Californie, engendre plus de rêves que toutes les Académies des sciences réunies. Elle est connue dans le monde entier pour organiser la cérémonie annuelle de remise des Oscars du Cinéma. Sans vouloir être aussi médiatique que la remise des Oscars, nos remises de prix seront plus personnalisées, tout en conservant le caractère solennel de la Coupole.

Si la société est, aujourd'hui, méfiante vis-à-vis de la science c'est parce que celle-ci reste insaisissable pour beaucoup, oubliant que faire progresser le front de la connaissance c'est mieux comprendre pour prévoir, et éviter les écueils qui ne manquent pas sur notre chemin.

Notre mission de réflexion collective en vue de fournir des avis ou des recommandations le plus souvent aux décideurs de notre pays se mène au travers de débats. Ces débats sont parfois des lieux de controverses animées mais enrichissantes permettant de préciser la pensée, comme ce fut le cas depuis des siècles à l'Académie des sciences. Les conclusions de ces débats, les avis, les rapports sont rendus publics. De



nos jours ils sont consultables sur le site de l'Académie et contribuent à rendre plus explicites les progrès de la science. C'est ainsi que le rapport sur la métallurgie, ouvrage synthétique commun à l'Académie des sciences et à l'Académie des technologies montre comment la métallurgie doit rester une discipline scientifique à part entière. Présente dans de nombreux champs de l'industrie, elle est source de progrès et réservoir d'emplois. Également, le rapport « Démographie, climat et alimentation mondiale » se projette en 2050 où l'Humanité devrait nourrir 9 milliards d'hommes. D'autre part, après le tsunami qui submergea la centrale nucléaire de Fukushima, l'Académie des sciences a réuni des groupes de travail pour analyser les événements survenus au Japon et donner un avis sur les conséquences sismiques et nucléaires d'un tel séisme, avis donné à la communauté scientifique internationale pour contribuer à la réflexion commune sur

la capacité à minimiser les risques. L'Académie a joué ici son rôle d'expert en toute indépendance. Elle éclaire ainsi les décideurs sur les actions à mener dans l'avenir.

Cette mission de conseil auprès « du pouvoir » était déjà présente dès la création de l'Académie des sciences en 1666, confirmée par le règlement du 26 janvier 1699. Si la forme change, le fond reste vrai, il consiste en la séparation de l'expertise et de l'action. À notre époque où la composante planétaire dans les processus décisionnels devient importante, nous avons repris la réflexion sur « expertise scientifique et relations internationales » au sein du Comité Académique des Relations Internationales Scientifiques et Techniques (CARIST).

Ainsi l'Académie des sciences qui prend racine dans son passé, s'en nourrit pour conjuguer l'avenir au futur ■

La chimie, au cœur des enjeux scientifiques de demain

Par **Marc Fontecave**

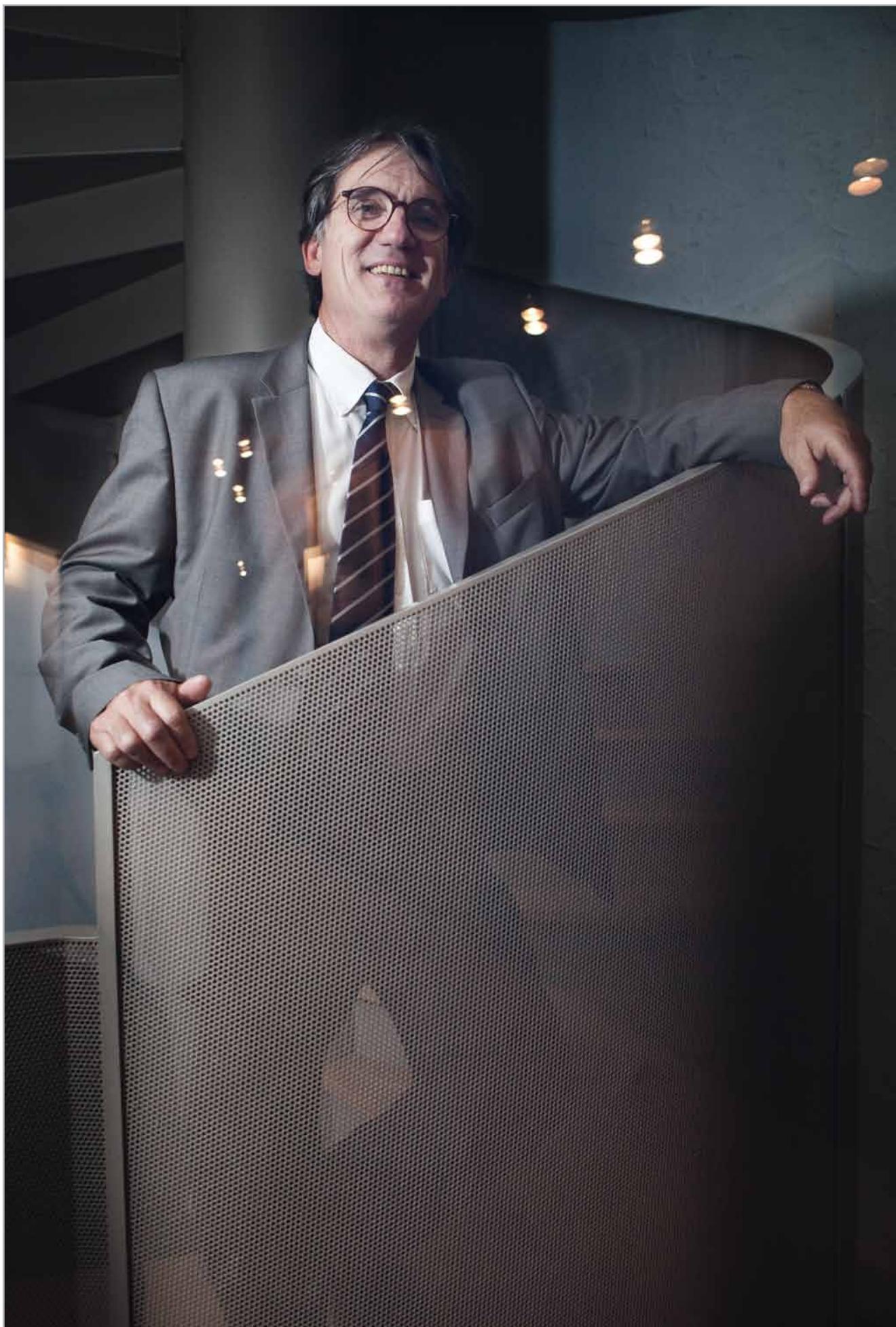
Membre de l'Académie des sciences, professeur au Collège de France, "Chaire de chimie des processus biologiques".

À l'occasion de l'Année internationale de la chimie, il est utile de rappeler plusieurs caractéristiques propres à cette discipline, trop souvent et trop injustement décriée par l'opinion et les médias et pourtant si centrale pour le développement économique et le bien-être de nos sociétés.

Tout d'abord la chimie est seule, peut être, à avoir autant de frontières avec l'ensemble des autres disciplines et cela lui donne la possibilité d'intervenir de façon pertinente et originale sur pratiquement tous les grands défis de l'humanité du XXI^e siècle (alimentation, énergie, santé, environnement,...). En effet, si aujourd'hui les disciplines sont devenues essentiellement interdépendantes, la chimie est probablement celle qui a le plus souvent et le plus profondément multiplié ses incursions chez les autres, sciences de la vie et de la santé, physique et matériaux, sciences pour l'ingénieur, sciences de la terre et de l'environnement, qui toutes la sollicitent en permanence. Le développement de ces interfaces constitue sans nul doute l'un des enjeux les plus importants de la science contemporaine. Malheureusement il n'est pas certain que la recherche française soit à la hauteur de cette ambition tant

les barrières culturelles et organisationnelles à la multidisciplinarité sont fortes, tant les formations sont cloisonnées, tant la compétition internationale et la limitation des moyens conduit les communautés scientifiques à se recroqueviller sur elles-mêmes. La chimie par sa position unique au croisement des disciplines peut jouer ce rôle de ferment de mixité.

Sollicitée, la chimie l'est parce qu'elle est avant tout la science de la création des molécules et des matériaux dont dépend tout le reste. C'est donc elle qui façonne le monde concret dans lequel nous vivons (médicaments, cosmétiques, polymères, plastiques, verres, pour ne citer que quelques composés chimiques de notre univers). Notre futur prendra forme autour des molécules et des matériaux inventés dans les laboratoires de chimie et ces mondes possibles sont infiniment nombreux tant le potentiel de transformation chimique de la matière et des sociétés est grand et tant les questions fondamentales que pose la chimie, science positive par excellence, sont marquées par leur utilité pratique potentielle. La chimie, c'est, ne l'oublions pas, aussi une industrie qui, en France, second secteur après l'automobile, représente une centaine de milliards d'euros de chiffre d'affaires pour plus d'un millier d'entreprises



et 250 000 salariés, ce qui nous situe au second rang en Europe et au cinquième dans le monde.

La chimie a, d'autre part, ceci d'unique qu'elle s'est donnée un langage universel et fraternel, pratiqué et compris à travers la planète, qui permet une lecture lumineuse de la matière dont nous sommes faits, de celle qui nous entoure, de celle enfin qui est possible. Ce langage s'appuie sur un alphabet original, celui de la classification périodique proposée en 1869 par le chimiste russe Mendeleïev et nous dit ce que nous sommes et vers où nous pouvons aller. Il unifie les sciences biologiques et les lie aux sciences physiques et si le vivant peut être compris en termes rationnels c'est en grande partie, on l'oublie trop souvent, parce qu'il est exprimé dans le langage de la chimie.

S'il s'agit désormais de construire une société durable, dans laquelle les hommes satisferont leurs besoins mais enfin sans compromettre l'avenir des générations futures, la science va être sollicitée pour trouver des stratégies totalement innovantes, propres, économiques, efficaces et surtout durables pour la production de carburants, d'électricité, de matériaux. Il est évident que la chimie, celle qu'on nomme désormais « verte », va jouer un rôle majeur dans le développement de cette nouvelle science. Elle traduira dans des procédés de synthèse nouveaux son souci de la toxicité potentielle des solvants, des produits et des réactifs, de l'utilisation de produits de départ renouvelables, enfin de la limitation des déchets et de la dépense énergétique associée.

C'est ce qui est illustré dans les articles qui composent ce numéro. Cette ambition d'une chimie verte pour demain va s'appuyer en particulier sur l'étude et le développement de nouveaux processus catalytiques. C'est ce que nous dit Pierre Braunstein, à travers une perspective historique du développement de la catalyse et quelques exemples de son laboratoire. La découverte de nouveaux catalyseurs va permettre à l'industrie chimique de mettre en œuvre des réactions encore plus efficaces, plus sélectives, plus propres. Un autre domaine dans lequel la chimie va jouer un rôle majeur est celui des nouvelles technologies pour l'énergie et de l'exploitation des sources d'énergie renouvelables, le soleil en particulier. Didier Roux nous indique que des solutions originales pour de véritables économies d'énergie notamment dans le bâtiment dépendront du développement de nouveaux isolants, en particulier nano-structurés. De même c'est grâce à la synthèse et à l'optimisation de nouveaux matériaux semi-conducteurs, élaborés dans les laboratoires de chimie, que les avancées technologiques nécessaires permettront une production de cellules photovoltaïques efficaces et peu coûteuses. Jean-Marie Tarascon a raison de redire que le grand problème des énergies renouvelables, diluées et intermittentes, est celui du stockage de ces énergies. Cela passe par leur conversion en carburants

mais aussi par la mise au point de batteries de plus en plus efficaces dans leur capacité de stockage d'énergie électrique.

Ces perspectives sont l'occasion, par ailleurs, de rappeler une réalité qu'on a tendance parfois à oublier. Tous ces composés chimiques que nous évoquons, électrolytes, matériaux, catalyseurs, isolants, etc... sont constitués d'atomes souvent en quantités limitées ou difficilement accessibles à la surface de la terre, et donc de plus en plus chers. On peut citer les métaux nobles, comme le platine, on peut citer certaines terres rares, on peut citer enfin, comme le fait Jean-Marie Tarascon, le lithium de plus en plus utilisé dans les batteries pour les véhicules électriques. Leur utilisation de plus en plus massive dans toutes ces nouvelles technologies peut déboucher à très court terme sur des situations graves de pénurie. Si la recherche de nouvelles réserves doit être stimulée, il est clair que là encore la chimie va jouer un rôle déterminant d'une part dans la mise au point de procédés efficaces de récupération de ces éléments et de leur recyclage et d'autre part dans l'invention de technologies où ces éléments rares et coûteux seront remplacés par des éléments plus abondants et bon marché, comme le fer et autres métaux de la première famille de transition en particulier. Ceci constitue un domaine nouveau d'innovation pour la chimie.

La chimie du vivant, à la fois chimie bio-organique et chimie bio-inorganique, a de façon évidente un rôle majeur à jouer dans ce nouveau contexte de développement de la chimie verte. Il reste encore beaucoup à faire pour comprendre la nature moléculaire du vivant. En particulier le répertoire immense des molécules du vivant, petites molécules (vitamines, neurotransmetteurs, hormones, cofacteurs,...) et macromolécules (protéines en particulier), n'est connu que très partiellement. Les organismes vivants, en particulier plantes et bactéries, constituent des mines moléculaires immenses et leur exploitation devrait ouvrir de nouveaux horizons, en particulier en matière de médicaments et de thérapies. Entre 1983 et 2005, le tiers du millier environ de nouvelles molécules approuvées par la FDA (Food and Drug Administration) était constitué de produits naturels ou des composés dérivés ou inspirés de produits naturels. Ce chiffre passe à près de 60 % quand on considère exclusivement les médicaments anticancéreux.

Pour terminer voici quelques domaines où la chimie, avec son approche moléculaire, permettra des avancées déterminantes. Par exemple, il y a urgence à développer le domaine de la toxicologie. La compréhension à l'échelle moléculaire de l'impact d'un produit chimique sur un organisme vivant complexe constitue un passionnant défi pour le chimiste qui doit s'attacher à établir cette relation structure chimique/toxicité qui permettra non seulement d'éviter l'introduction dans notre environnement de substances toxiques mais

également de valider, dans les cas favorables, l'exploitation de composés nouveaux, devenue de plus en plus difficile. Un second domaine est celui de la biocatalyse qui offre des moyens sans précédent pour accélérer, orienter et optimiser les réactions chimiques, y compris à l'échelle industrielle, pour les rendre plus propres et plus économes en matière, en énergie et en déchets. La découverte de nouvelles enzymes et la compréhension de leur fonctionnement nous apporteront donc des solutions originales et pratiques pour la transformation chimique de la matière, par exemple en permettant l'utilisation de microorganismes entiers ou d'enzymes comme catalyseurs dans des procédés industriels et biotechnologiques, pour la valorisation du méthane et des hydrocarbures, pour la dégradation des parois cellulaires végétales et la transformation de la cellulose en biocarburants, pour la récupération et l'utilisation du dioxyde de carbone, ou encore pour la production d'intermédiaires clés à forte valeur ajoutée dans la synthèse d'un médicament... Les procédés biotechnologiques de synthèse représentaient 5 % du marché de l'industrie chimique en 2003. Ils devraient concerner environ 30 % de la production en 2020 et devenir une technologie dominante dans le futur. Enfin la chimie biologique continuera à trouver des solutions originales dans le domaine de la santé. La biologie et ses applications en médecine ont constitué la grande aventure scientifique de la fin du XX^e siècle. Le résultat est extraordinaire comme le montre

l'accroissement fantastique et continu de l'espérance de vie, en particulier dans les pays développés. La chimie a joué dans ce progrès un rôle majeur, comme le montre Bernard Meunier dans ce numéro à l'aide de quelques exemples historiques de médicaments. Il ne fait aucun doute que la recherche de nouveaux médicaments restera une activité centrale de la chimie du vivant dans les domaines de l'infectiologie, des grandes maladies neuro-dégénératives ou cardio-vasculaires et du cancer. Malgré les progrès des technologies de thérapie génique et cellulaire qui constituent des perspectives passionnantes, le médicament sera, encore pour longtemps et très majoritairement, moléculaire, molécule de synthèse ou naturelle, petite molécule ou macromolécule biologique, et les progrès de la médecine et de la santé devront encore beaucoup à la chimie. C'est ce domaine que discute Bernard Meunier, notamment en soulevant les difficultés sérieuses que rencontrent les industries pharmaceutiques depuis quelques années pour poursuivre leur effort de découverte et de développement des médicaments.

Pour terminer, je ne peux m'empêcher d'évoquer cette grande question que les chimistes se posent depuis qu'ils ont pris conscience de la nature moléculaire du vivant : qu'est ce que la vie et comment est-elle apparue ? La chimie c'est en effet ce qui nous relie à nos ancêtres, les premiers êtres vivants apparus il y a 3,5 milliards d'années. Si la vie a pu exister c'est qu'elle a découvert des solutions chimiques pour démarrer la flamme et la

maintenir, et beaucoup de ces mécanismes primitifs, certes améliorés peu à peu, ont été étonnamment conservés avec le temps. C'est la chimie qui nous autorise donc à nous poser la question fondamentale : « comment tout a commencé ? ». Enfin c'est l'unité moléculaire du vivant depuis les origines qui nous autorise à nous penser éternels, à voir pour l'homme une destinée chimique et éternelle. C'est pour cette raison qu'il ne fait aucun doute que le chimiste continuera à poursuivre ce rêve d'une production artificielle de matière vivante, capable de se reproduire. En dépit des questions d'éthique importantes que ces recherches soulèvent, les chimistes doivent continuer dans la voie ouverte en 1953 par Stanley Miller pour une compréhension plus claire du scénario moléculaire de l'apparition de la vie sur la Terre ■



Année internationale de la chimie

Par **Jean-Marie Tarascon**

Membre de l'Académie des sciences, professeur et directeur du laboratoire de réactivité et chimie des solides à l'université de Picardie, Amiens.

La chimie requiert de la patience et autant de tentatives, que l'on nomme expériences, pour nous révéler les secrets et potentialités que recèle la matière. C'est toujours avec en tête plein d'idées et d'expériences nouvelles à réaliser que le chimiste se rend à la paillasse avec le pas de l'explorateur. Bien que sa démarche ait évolué avec le temps, délaissant l'alchimie puis hésitant ensuite entre les approches méthodiques de Descartes et de Bacon, elle reste toujours celle des aventuriers à la vie errante, prêts à changer de cap au rythme des découvertes de leurs comparses et du nouveau territoire qu'elles entrouvrent.

De simples faits quotidiens nous rappellent constamment la beauté de la chimie. Quoi de plus beau que des flocons remarquablement hexagonaux, munis d'extensions dendritiques symétriques venant se plaquer sur une vitre. Voilà comment on en vient à s'émerveiller pour la cristallographie. Il y a dans ce flocon arborescent de l'émerveillement et notre désir de pouvoir maîtriser l'esthétique des formes en perçant le mystère de ce phénomène pour pouvoir en contrôler la reproduction. Il n'en faut pas plus pour que naisse une vocation.

La chimie dans son ensemble se doit de toujours garder à l'esprit son origine qui est la chimie du vivant. D'ailleurs on ne peut être guère étonné de constater que c'est toujours par un examen minutieux de celle-ci que se tissent les plus grandes avancées de la chimie; du moins ce fut longtemps le cas. Les premiers chimistes dits « modernes », au premier rang desquels Antoine Laurent Lavoisier figure, étaient de ces pionniers qui façonnèrent leurs propres instruments afin de transposer, au sein de leur laboratoire, les réactions de la chimie du vivant, et ce dans le but de lever le voile sur les mystères de la matière.

Ces pionniers abordaient la chimie avec l'œil vif de l'artisan, c'est-à-dire qu'ils cherchaient à maîtriser des transformations de la matière pour pouvoir les expliquer, les comprendre et enfin les dupliquer. Prenons l'exemple de l'Aspirine pour illustrer cette approche. Historiquement, il y a d'abord eu une phase de recherche à partir de plantes pour reconnaître certaines molécules, en cela très probablement aussi inspirée par la théorie des signatures. C'est ainsi que Pierre-Joseph Leroux parvint - à partir de poudre d'écorce de saule - à isoler l'acide salicylique en 1829. Puis vint la phase de synthèse. En 1853 le chimiste Charles Frédéric



Gerhardt parvint à synthétiser l'acide acétylsalicylique de manière imparfaite. Comme souvent, beaucoup de chercheurs entrèrent dans la danse mais c'est Félix Hoffmann qui, en 1897, parviendra à synthétiser un composé pur en revisitant les travaux de Gerhardt. Notons que les procédés de synthèse ont encore évolué par la suite, mais il a fallu attendre près de soixante-dix ans pour acquérir une maîtrise « artisanale » de sa duplication. Qu'elle soit d'hier ou d'aujourd'hui, la chimie a toujours pris son temps. D'ailleurs, les médias sont souvent prompts à relayer la supposée lenteur de la recherche en chimie qui avancerait « à la vitesse d'un glacier ». Pourtant ne devraient-ils pas être émerveillés par les progrès réalisés dans le séquençage de l'ADN, par exemple ?

En chimie, le processus de découverte est fécondé par les travaux successifs ou simultanés de multiples chercheurs. La recherche est une recombinaison, une juxtaposition d'idées ou des travaux d'autres collègues car, soyons honnêtes, l'idée entièrement nouvelle est

très rare. Pour paraphraser la formule de Lavoisier et la transposer à la fécondation des idées en chimie on pourrait deviser : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Antoine Lavoisier est encore à l'honneur au moment de mettre en garde notre société contre une tentative de diabolisation de la chimie. Nous ne pouvons à l'heure actuelle, ne serait-ce que pour garder une avance technologique dans le cadre de la compétition économique internationale ou de la nouvelle économie verte se profilant à l'horizon, accepter d'entendre des propos semblables à ceux qui lui furent tenus au moment de son exécution « La République n'a pas besoin de savants ».

Réfuter cette phrase, par l'énumération des avancées technologiques et sociales directement liées à la chimie, ne serait qu'admettre qu'il peut y avoir une appréciation globalement négative du rôle de la chimie dans l'Histoire. De plus, pour reprendre la formule d'Henri Poincaré « une collection de faits et un amalgame de savoirs ne sont pas plus une science que des tas de moellons et de

bois une bâtisse ». Il n'en demeure pas moins que la chimie, est une science qui ne délivre pas seulement des analyses ou des théories mais crée des composés et des procédés utilisables par les sociétés. On rappellera brièvement que la chimie a permis de réaliser d'importants progrès dans l'industrie du médicament, de l'agriculture pour ne citer que ces deux secteurs mais aussi dans le domaine du stockage de l'énergie et de sa restitution, qui me concerne plus particulièrement. Le XXI^e siècle, nous le savons déjà, sera celui de l'énergie. Quelle société voudrait se mesurer à l'ampleur d'une telle tâche, dont dépend le futur de notre planète, sans le savoir de la chimie ?

Les changements de climat, la limitation des ressources fossiles, et les problèmes de santé publique liés à la pollution urbaine ne sont que quelques exemples qui attestent du besoin urgent de passer à une économie basée sur une énergie à faible teneur en carbone. Un tel scénario justifie un besoin croissant pour la conversion et stockage de l'énergie afin de faciliter l'utilisation des

énergies renouvelables et de favoriser le transport électrique. Différentes stratégies de recherche prometteuses sur la conversion de l'énergie solaire sont actuellement poursuivies mais leur temps de maturation restent très incertains. Elles consistent, entre autres, à transformer l'énergie solaire en différents vecteurs que sont I/ l'électricité par la conversion photovoltaïque II/ l'hydrogène par des réactions de photo-catalyse/électrolyse, mettant à profit les propriétés de jonctions semi-conducteur liquides pour dissocier l'eau en H₂ et O₂, et enfin III/ les bio-combustibles obtenus par la photosynthèse naturelle ou par la photosynthèse artificielle qui repose sur la mise au point de dispositifs mimant le rôle des hydrogénases. Pour ce qui est du stockage, nous avons recours à des dispositifs électrochimiques.

Force est de constater que quels que soient les systèmes actuels de stockage/conversion d'énergie (piles à combustible, batteries, cellules photovoltaïques), le dénominateur commun est qu'ils souffrent tous du manque de matériaux adéquats que ce soit au niveau des électrodes et des électrolytes. C'est-à-dire qu'ils sont tous tributaires des caprices de la chimie à ne pas fournir des matériaux performants sur demande. Le dicton de la DARPA, « Toute technologie est toujours limitée par la disponibilité de matériaux adéquats » ne cesse de se confirmer.

Les progrès dans ce secteur reposent également sur l'intuition du chimiste, son observation, sa curiosité, et son esprit critique. Les interprétations erronées de Luigi Galvani qui prétendait que les nerfs de grenouille produisaient de l'électricité n'ont-elles pas conduit Alexandro Volta à développer la première pile? Cette technologie a été suivie par les technologies de batteries acide-plomb, nickel cadmium, nickel métal-hydrure et à ions lithium qui nous sont aujourd'hui familières. La technologie à ions lithium, la dernière apparue, est elle-même le fruit du travail des chimistes inorganiciens qui dans les années 1970 mettaient à jour de nouveaux matériaux. On les décrit sous la forme d'éponges à lithium ou à protons, car capables de les insérer réversiblement tout en préservant leurs structures. Cependant, cette technologie à ions Li qui constitua

la plus grande avancée électrochimique du XX^e siècle, peut à la fois illustrer la noblesse de la recherche en chimie et les travers dans lesquels peuvent tomber les chimistes de par leur désir de vouloir établir des tendances générales susceptibles de brider la créativité des futurs chercheurs. La technologie à ions Li a souffert de cet endoctrinement jusqu'au début des années 2000, tant les critères établis pour la sélection du matériau d'électrode idéal devenaient nombreux qu'aucun candidat potentiel ne pouvait émerger. Le recours aux matériaux nanométriques bouleversa ces croyances bien établies et apporta un second souffle à cette technologie. Le passage à l'échelle nanométrique permit I/ de redonner une vie à des matériaux jadis délaissés, tel LiFePO₄ qui est maintenant l'un des matériaux les plus prisés pour applications aux véhicules électriques, II/ d'entrevoir l'utilisation du Si - jusque-là bannie pour des raisons d'expansion volumiques - comme matériau d'électrode dans les prochaines générations d'accumulateurs à ions Li et enfin III/ la mise à jour de nouveaux mécanismes réactionnels vis-à-vis du Li conduisant à des électrodes à fortes capacités.

La chimie a donc pu répondre à cette demande énergétique dictée par l'électronique portable. Après seulement 20 ans, la technologie LI ion alimente une industrie florissante. Elle a conquis le marché de l'électronique portable en s'affirmant comme le meilleur choix pour le véhicule électrique voire pour les applications réseaux. Cependant, de telles projections mettent en évidence les limites de son utilisation à très grande échelle. Dans le cas présent, il s'agit d'une limite de ressources. En effet, si l'on remplaçait tous les véhicules thermiques actuels par des véhicules équipés de batteries de 8 kWh (70 km d'autonomie), les ressources terrestres de lithium seraient épuisées en 20 ans. Ce qui peut sembler d'une importance moindre pour un minéral comme le lithium prend des allures de film catastrophe lorsque l'utilisation intensive d'une technologie peut confronter une société à un horizon incertain dans le cadre d'une pénurie annoncée de pétrole. Pour faire face à la possible pénurie de lithium, que de nombreux médias trop alarmistes ne cessent d'évoquer, les chimistes redonnent actuellement vie à la chimie du sodium reposant sur des matériaux d'insertion façonnés et adaptés.

Pour rester dans le domaine de l'énergie et de son stockage, le contexte du développement durable ajoute une autre contrainte, voire opportunité, aux chimistes. Des ruptures technologiques et non des améliorations incrémentales sont nécessaires. Pour cela il faut dévier des sentiers battus et inciter le chimiste à explorer de nouvelles voies, voire élaborer de nouveaux concepts. Ainsi, dans notre volonté de développer des synthèses éco-efficaces, nous explorons par exemple le domaine des réactions de bio-minéralisation pour la préparation

de LiFePO_4 , réactions réalisées par des organismes unicellulaires et donc mettant en jeu des systèmes catalytiques (enzymes) très efficaces. Un nouvel horizon s'ouvre également pour le développement de batteries reposant sur des électrodes nanométriques fabriquées à partir de virus génétiquement modifiés. Dans la même lignée, les travaux préliminaires sur des batteries à base d'électrodes organiques renouvelables préparés selon les concepts de la "chimie verte" pourraient révolutionner la façon dont on stocke l'énergie dans le futur. L'importance de l'enjeu abordé et du problème sociétal que le stockage de l'énergie constitue, n'appelle-t-il pas une telle prise de risques? Tous les processus énergétiques du vivant sont basés sur des couples redox impliquant des molécules organiques (e. g. cycle de Krebs). Pourquoi nous, chimistes, ne pourrions-nous pas faire en sorte qu'un jour elles servent aussi à l'alimentation de nos appareils domestiques ainsi qu'à celle de nos automobiles? Sans rêve, la vocation de chimiste ne peut exister.

Que sera la chimie de demain dans le domaine de l'énergie? Fort est à parier qu'elle continuera à s'inspirer de la chimie du vivant en intégrant plus fortement les approches bio-inspirées, biomimétiques voire bio-sourcées, dont nous avons évoqué l'émergence dans le domaine des batteries. Nous serons amenés à les retrouver également dans le domaine du photovoltaïque avec le développement des cellules organiques et plus encore des cellules de Graetzel dont le principe repose sur l'absorption de lumière par un colorant pigmenté (l'équivalent de la chlorophylle dans les plantes). De plus, la chimie sera bien sûr guidée par l'avancée des méthodes analytiques, voire prédictives; mais aussi *via* les progrès effectués dans les calculs théoriques qui laissent croire à la possibilité d'un génome des matériaux. Toutefois, il n'en demeurera pas moins que l'intuition du chercheur, sa curiosité et sa main verte resteront essentielles pour toute future aventure. Tout aussi certain est le fait que l'augmentation de la transdisciplinarité facilitera de nouvelles avancées. Isaac Newton disait déjà il y a plus de trois siècles: « Nous construisons trop de murs, et pas assez de ponts ». Il va donc de soi que les prochaines découvertes germeront vraisemblablement aux interfaces biologie-chimie-physique, d'où la nécessité de fédérer les communautés et de promouvoir des « melting pots » de la culture scientifique.

La chimie a définitivement révolutionné notre espérance de vie, nos moyens de vivre, de nous alimenter, de nous déplacer, de communiquer... Pour cela, elle a puisé dans les réserves minérales et végétales de notre planète. Sans matériaux fossiles et sans pétrochimie, notre chimie de synthèse des médicaments serait orpheline. Sans tous les minerais et la chimie associée des matériaux (e.g. association entre un composé chimique et son

procédé d'élaboration) pour les doter de propriétés magnétiques, électroniques et optiques spéciales, on n'aurait pas aujourd'hui le foisonnement de dispositifs performants dont nous sommes dépendants.

Nous dépendons et avons consommé ainsi en quelques décennies/siècles, les ingrédients que notre planète a mis des millions/milliards d'années à produire. Il est essentiel que l'on utilise le présent pour améliorer le futur plutôt que d'hypothéquer le futur pour suffire au présent. Chimistes, unissons-nous pour divulguer ce message et faire en sorte que cette année de la chimie nous fasse prendre conscience de ce fait et, par là-même, proclamer le début d'une autre chimie que l'on pourrait appeler chimie de la réincarnation. Une chimie centrée sur le recyclage et visant à redonner une seconde vie à des matériaux en voie d'épuisement. Recyclage n'est certes pas un mot « chic » pour notre communauté qui trop souvent repose sur des effets de mode ou d'annonce, il n'en demeure pas moins qu'elle sera essentielle dans le futur, et le traitement des déchets nucléaires n'en est qu'un exemple. Les alchimistes ont échoué dans la transformation du plomb en or, puissent les chimistes transformer les déchets en avenir.

Qu'attendons-nous des chimistes? Qu'ils soient à même de peser à leurs paillasses et avec la même précision qu'ils mettent dans le dosage de leurs composés, les bienfaits et les dangers de leurs découvertes. Bien que cela soit une tâche très délicate, voire impossible, il n'en demeure pas moins que les chimistes se doivent d'être les gardiens de la déontologie et de l'éthique lorsque leurs partenaires industriels développent la recherche primaire en innovations.

L'Année internationale de la chimie est une occasion unique pour les chimistes d'expliquer leurs recherches et de répondre à la nécessité d'interagir avec la société pour que leurs talents artisanaux et artistiques soient plus que jamais au service de la connaissance et plus encore de l'humanité. Que le chimiste reste humble et créatif, qu'il sache passer son enthousiasme et sa passion aux jeunes et servir de messenger vis-à-vis de notre société, l'Année internationale de la chimie n'en sera que plus belle ■

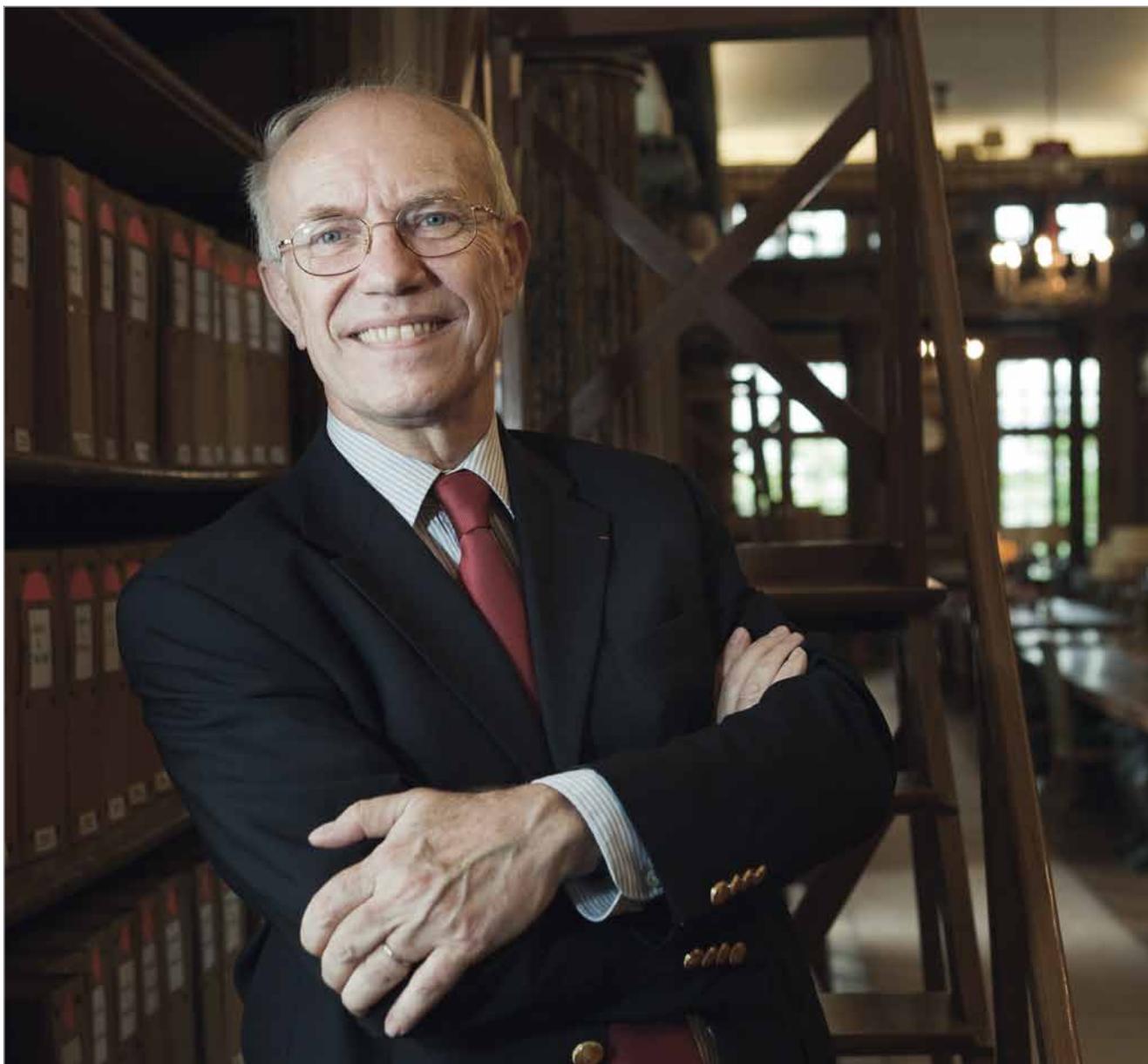
Structures moléculaires et catalyse

Par **Pierre Braunstein**

Membre de l'Académie des sciences,
directeur de recherche CNRS,
laboratoire de chimie de coordination,
université de Strasbourg.

Les sciences chimiques tiennent une place centrale dans notre société et c'est par elles que passeront nombre de solutions aux défis actuels, que ce soit dans les domaines de la santé, de l'alimentation, de l'énergie ou de l'environnement. Science de la création et de la transformation de la matière, la chimie offre un espace de choix à l'imagination. La synthèse de molécules originales et de matériaux nouveaux joue un rôle déterminant et moteur, avec bien souvent des retombées majeures dans les sciences du vivant ou en physique, disciplines avec lesquelles la chimie entretient des liens privilégiés. Les outils et méthodologies de synthèse en chimie n'ont cessé d'évoluer et, avec l'appui des méthodes théoriques et spectroscopiques les plus sophistiquées, ont permis des avancées spectaculaires. Les nouveaux concepts élaborés à partir des données expérimentales les plus récentes et l'imagination des chimistes ont été la source de succès exceptionnels.

L'étude systématique de la chimie des métaux de transition commença au XIX^e siècle et il devint rapidement évident que les nouveaux composés ainsi produits étaient assez différents de ceux auxquels les chimistes étaient habitués. Le comportement d'halogénures typiques des métaux de transition, tels que $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, n'était pas celui des composés ioniques habituels comme le chlorure de sodium. Il était tout aussi évident que ces composés ne ressemblaient pas à ceux, typiquement covalents, de la chimie organique. Considérant que les composés formés par les métaux de transition avaient une constitution complexe, ils furent de ce fait appelés complexes métalliques. Les fondements de ces études furent posés par Alfred Werner (Mulhouse 1866 - Zurich 1919) qui est considéré comme le père de la chimie de coordination et reçu pour cela le prix Nobel de chimie en 1913. Si les complexes de Werner, tels que $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_3$ dont le centre métallique est situé dans un environnement octaédrique formé par les ligands NH_3 , ne possèdent aucune liaison métal-



carbone, les composés organométalliques sont quant à eux caractérisés par la présence d'au moins une liaison M-C. L'appellation « composés de coordination » fait référence à la nature des liaisons entre les ligands et le(s) centre(s) métallique(s), les métaux pouvant en outre être directement liés entre eux par des liaisons métal-métal pour former des clusters, dont l'existence n'était pas du tout envisagée à l'époque d'Alfred Werner¹. C'est l'étude de la formation et de la réactivité des liaisons métal-carbone qui est au cœur des préoccupations de la chimie organométallique et qui continue d'avoir un impact majeur sur les développements de la catalyse homogène.

Impact de la catalyse

Le terme catalyse fut introduit par le chimiste suédois Berzelius en 1835, mais c'est grâce à Wilhelm Ostwald (Prix Nobel de chimie 1909) et Paul Sabatier (Prix Nobel de chimie 1912, partagé avec Victor Grignard pour

sa découverte des organomagnésiens) que fut compris le mode d'action d'un catalyseur, substance qui augmente la vitesse d'une réaction chimique et oriente sa sélectivité sans apparaître dans les produits finaux. Elle n'agit donc que sur les paramètres cinétiques et non pas thermodynamiques de la réaction. L'impact de la catalyse, et donc des catalyseurs, est devenu considérable puisque plus de 60 % des procédés industriels font appel à la catalyse, de même que la production de plus de 90 % des produits chimiques industriels. Le marché mondial des catalyseurs est passé de 9,3 à 12 milliards de dollars entre 1998 et 2003 et devrait atteindre 16,3 milliards de dollars d'ici 2012.

La catalyse est intimement liée dans la Nature à des activités telles que la digestion et la fermentation ainsi qu'à de nombreuses autres formes de procédés enzymatiques. Pensons aussi à l'oxydation catalysée par des complexes porphyriniques du fer, aux réactions de décarboxylation ou de deshydrogénation des alcools catalysées par des complexes du zinc, à la réduction du

diazote N_2 en ammoniac NH_3 par la nitrogénase, enzyme à base de clusters de fer et fer-molybdène, aux hydrogénases à cœur fer ou fer-nickel, au rôle du cobalt dans la formation de liaisons carbone-carbone (méthylcobalamine, forme la plus active de la vitamine B12) ou du cuivre dans le transporteur d'oxygène qu'est l'hémocyanine.

Ainsi, si l'on prend en compte les procédés chimiques utilisés par la Nature et par l'industrie chimique, presque tout ce qui nous entoure dérive d'une manière ou d'une autre de procédés chimiques contrôlés. Qu'il s'agisse des engrais indispensables à une agriculture dont l'un des défis majeurs est de nourrir une population mondiale croissante, des produits pharmaceutiques, des matières synthétiques et des polymères, des carburants et du stockage de l'énergie, on ne pourrait concevoir un confort de vie tel que le nôtre, et auquel aspirent des centaines de millions d'êtres humains, sans la chimie.

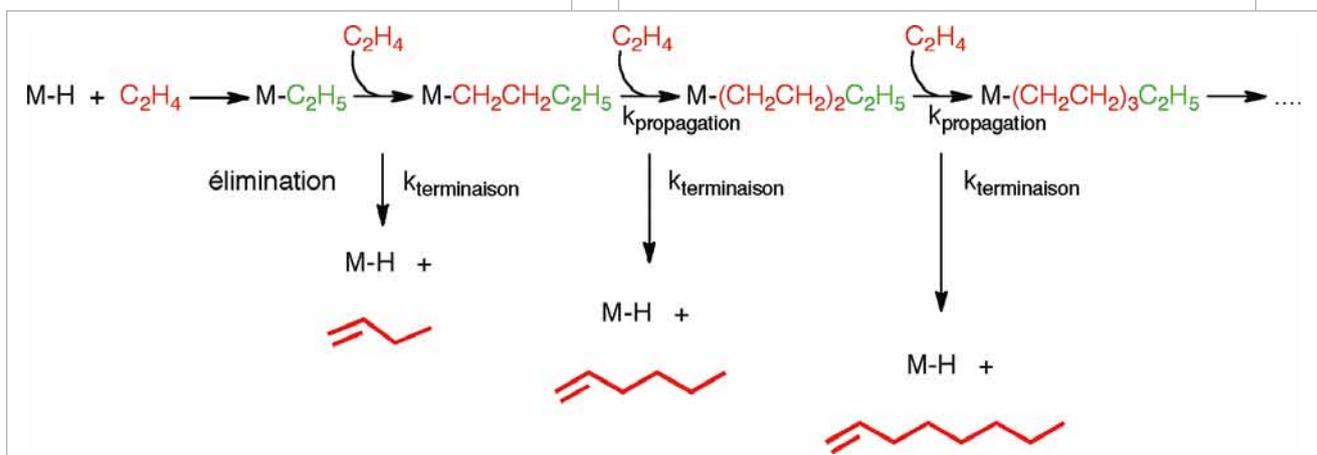
Une préoccupation majeure et légitime de nos sociétés modernes est d'utiliser au mieux et avec sagesse les ressources naturelles et de minimiser la production de déchets. Ceci s'illustre dans les préoccupations de la « chimie verte » ou de la chimie durable et la catalyse est certainement un moyen privilégié de faire « mieux » (plus sélectivement et plus proprement) avec « moins » (économie de ressources, réactions facilitées par l'abaissement de l'énergie d'activation des étapes clés).

Le premier procédé catalytique industriel fut introduit par John Roebuck en 1746 avec la fabrication de l'acide sulfurique par le procédé des chambres de plomb. Le domaine de la catalyse homogène (réactifs, produits et catalyseur forment une seule phase) a certainement le plus bénéficié des progrès réalisés en chimie moléculaire dans la compréhension des relations structures-propriétés des complexes métalliques². Notons néanmoins que dès les années 1920, le sulfate mercurique fut utilisé industriellement pour convertir l'acétylène en acétaldéhyde par addition d'eau. Puis le procédé Wacker utilisant des complexes solubles du palladium (1956) permit l'oxydation catalytique de l'éthylène en acétaldéhyde et donc de s'affranchir de l'acétylène. Vers la même époque s'est développée la polymérisation de l'éthylène et du propylène catalysée par les complexes du titane (Ziegler et Natta, 1953) qui faisait suite à la découverte que des traces de nickel arrêtent la croissance de chaîne qui se produit sur un organoalumine (réaction « Aufbau » de Ziegler) pour conduire au butène-1. Dans les années 1960 se développèrent industriellement le procédé DuPont d'hydrocyanation du butadiène en adiponitrile, précurseur du Nylon-6,6 (complexes du nickel), la carbonylation du méthanol en acide acétique (cobalt, BASF), l'hydroformylation des oléfines catalysée (cobalt, Shell, bien que découverte dès 1938 par Ruhrchemie), l'hydrogénation des oléfines (catalyseur de Wilkinson au Rh) et l'époxydation du propylène (molybdène, Halcon Corporation). La proportion de procédés de catalyse homogène s'est ensuite accrue avec, en particulier, l'hydroformylation des oléfines (rhodium, Union Carbide Corporation et Celanese), la carbonylation du méthanol (rhodium, Monsanto, puis iridium-ruthénium avec Cativa de BP Chemicals), l'oligomérisation de l'éthylène (nickel, Shell Higher Olefin Process), l'hydrogénation asymétrique des oléfines (monophosphines chirales, Knowles, Horner et diphosphines chirales, DIOP de Kagan et BINAP de Noyori) qui fut appliquée à la synthèse de la L-DOPA, médicament permettant de lutter contre les effets de la maladie de Parkinson (Knowles, Monsanto), l'hydrogénation asymétrique des β -cétoesters (Noyori, complexes BINAP du Ru, Takasago), la polymérisation du cyclooctène par ouverture de cycle grâce à une réaction de métathèse (tungstène, Huels) et la polymérisation des oléfines catalysée par les métallocènes (Kaminsky). Si les procédés de catalyse homogène furent, dans leur majorité, initialement développés pour la chimie de base puisque seuls des tonnages importants pouvaient justifier les investissements nécessaires à la mise au point de nouveaux catalyseurs et au développement de l'ingénierie correspondante (de nombreux procédés industriels utilisant la catalyse homogène produisent plus de 100 000 tonnes/an et peuvent atteindre 3-4 millions de tonnes/an), c'est dans les années 1990 que se multiplièrent les

applications de la catalyse homogène en chimie fine, chimie de plus faibles tonnages (inférieurs à 10 000 tonnes/an) mais de produits à haute valeur ajoutée³. Ceci fut rendu possible à la fois par les connaissances acquises dans l'industrie et par les résultats d'une recherche académique en plein essor. Vitesse de réaction, durée de vie et sélectivité (chimio-, régio-, diastéréo- et énanti-sélectivités) sont les paramètres clés du succès d'un catalyseur⁴.

Il est remarquable que depuis 2001, la catalyse ait été récompensée quatre fois par un Prix Nobel : en 2001 avec W. S. Knowles, K. B. Sharpless et R. Noyori, en 2005 avec Y. Chauvin, R. Grubbs et R. R. Schrock, en

tène-1 par Sasol), l'oligomérisation de l'éthylène est un procédé de synthèse des α -oléfines linéaires qui connaît des développements importants. Ces dernières furent initialement produites par le procédé Ziegler (Alfen). La proportion des différentes oléfines obtenues en fonction de leur longueur de chaîne est déterminée par deux réactions concurrentes : la croissance de la chaîne carbonée par insertion d'éthylène dans une liaison métal-carbone, et la rupture de cette dernière, dans une chaîne linéaire ou dans un intermédiaire métallacyclique. Le mécanisme de réaction dépend en particulier de la nature du catalyseur, un exemple est donné dans le Schéma 1.



2007 avec G. Ertl et en 2010 avec R. Heck, E. Negishi et A. Suzuki.

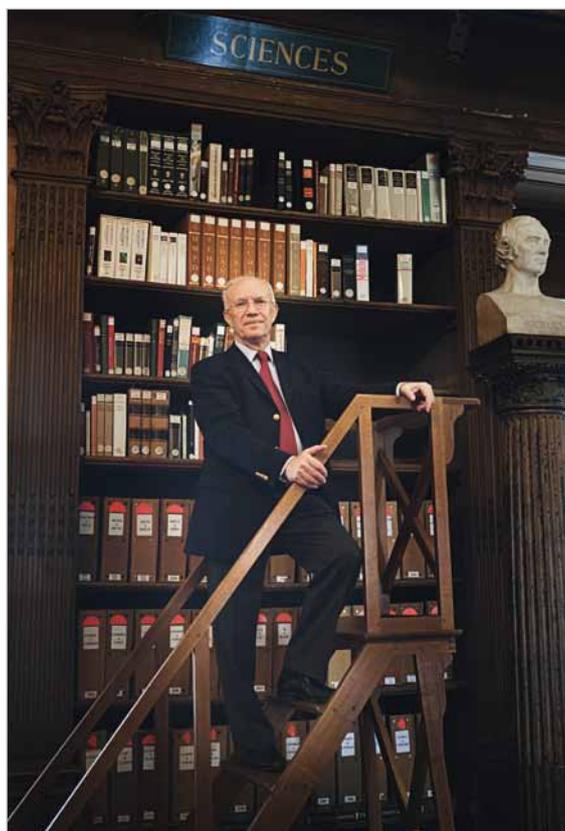
Par souci de concision, nous n'évoquerons ici un peu plus en détail qu'un seul exemple de réaction catalytique, l'oligomérisation de l'éthylène, qui vise à enchaîner l'une à l'autre des molécules d'éthylène, en nombre limité et de manière la plus sélective possible. Il ne s'agit donc pas là de former du polyéthylène mais d'arrêter la croissance de chaîne suffisamment tôt pour former les oligomères les plus recherchés.

L'oligomérisation des oléfines

Les α -oléfines (ou alcènes-1) linéaires sont très recherchées dans les industries chimiques et pétrochimiques car elles y trouvent de très nombreuses applications. Elles représentaient un marché de 4,2 millions de tonnes en 2006 dont la croissance est plus rapide pour les oléfines légères (de C_4 à C_{10}) que pour celles en C_{12} et au delà. Selon la longueur de leur chaîne carbonée, ces oléfines serviront de comonomères pour la fabrication de polyéthylène haute densité, de polyéthylène linéaire basse densité, à la synthèse d'esters, de plastifiants, de lubrifiants, de détergents... Si les oléfines peuvent être obtenues industriellement par craquage thermique des hydrocarbures lourds, par deshydrogénation des paraffines, deshydroatation des alcools, par conversion du gaz de synthèse (production de l'oc-

Schéma 1 : Un exemple de mécanisme d'oligomérisation de l'éthylène par insertion successive du monomère dans la liaison métal-carbone. La première étape est l'insertion de l'éthylène dans une liaison M-H engendrée *in situ* à partir du pré-catalyseur. La réaction de croissance de chaîne ou propagation se fait avec une cinétique $k_{propagation}$ et est en compétition avec la coupure de chaîne par élimination β d'hydrure, $K_{termination}$. Ainsi sont produites les oléfines terminales successives. Dans le cas du mécanisme cyclique (non représenté), les deux extrémités de la chaîne sont liées au métal pour former un métal-cycle à 5, 7 ou 9 chaînons.

Entre les deux extrêmes que représentent dimères et polymères, se situe toute une famille d'oléfines à longueur de chaîne variable, les oligomères. Mais faire en sorte que les catalyseurs produisent majoritairement des oligomères dans la gamme C_8 - C_{20} ne fut pas trivial. Si plusieurs procédés conduisent à des oligomères en C_4 - C_8 ou C_6 - C_{30} , tels que les procédés SHOP (Shell Higher Olefin Process), Gulfene (Chevron-Phillips), BP-Ethyl (Ineos), Alphaselect ou Idemitsu, certains procédés sont très sélectifs pour la dimérisation des oléfines (Dimersol) et la production de butène-1 (Alphabutol, Axens) ou d'hexène-1 (Alphahexol, Axens et Chevron-Phillips). Des catalyseurs homogènes utilisant des complexes du chrome ont été développés récemment qui permettent une trimérisation ou une tétramérisation sélective de l'éthylène. C'est là un domaine de recherche très actif. La production mondiale du trimère hexène-1 est d'environ 0,5 million de tonnes/an et il est principalement utilisé comme comonomère en polymérisation de l'éthylène. La société BP possède environ 40 % du marché (procédé Amoco, anciennement procédé Albemarle d'Ethyl Corporation),

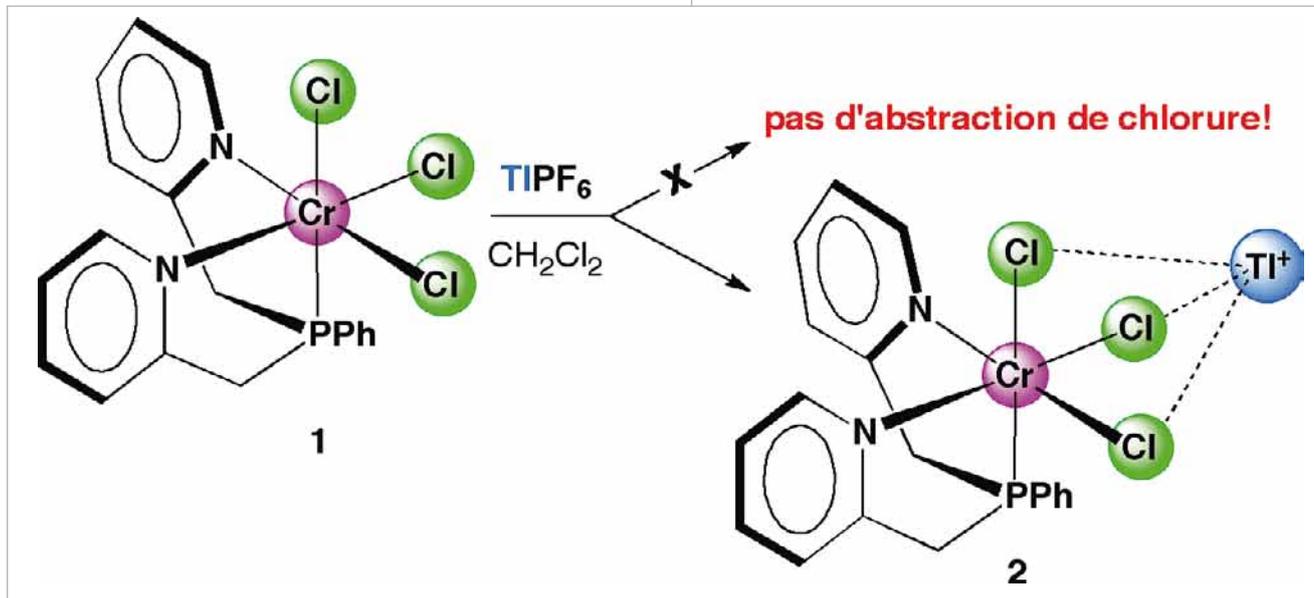


suivie par Sasol en Afrique du Sud avec 25 % du marché (procédé Fischer-Tropsch qui permet de convertir le mélange monoxyle de carbone et hydrogène en hydrocarbures) et Phillips.

Si l'obtention sélective d'oligomères en C_4 - C_{10} est particulièrement recherchée en raison de leurs applications croissantes, on concevra aisément que ceci nécessite la maîtrise fine des paramètres qui contrôlent la croissance de la chaîne carbonée par rapport à sa coupure, aussi bien au niveau des interactions métal-ligands que des conditions de mise en oeuvre du catalyseur. Il sera fait appel pour cela aux connaissances acquises et à la recherche en cours en chimie moléculaire des métaux de transition et en chimie théorique. Mais, comme on peut s'y attendre, tout n'est pas prévisible et c'est toujours l'expérience qui a le dernier mot, avec la part du hasard qui caractérise une science expérimentale comme la chimie.

Sérendipité : de la catalyse homogène au magnétisme moléculaire

Notre laboratoire de chimie de coordination à Strasbourg travaille depuis de nombreuses années sur la synthèse de complexes métalliques actifs en oligomérisation catalytique de l'éthylène⁵. Ceci donne d'ailleurs lieu à une excellente collaboration avec l'*Institut fran-*



çais du pétrole, *Énergies nouvelles*. Sans entrer dans les détails, on relèvera ici un certain nombre de surprises que ces travaux nous ont réservées.

Il est couramment admis qu'un centre métallique électrophile sera plus réactif en catalyse s'il s'agit de coordonner et transformer un substrat riche en électrons. C'est d'ailleurs l'un des rôles que le cocatalyseur peut remplir *in situ*. Mais on peut également souhaiter préparer et isoler un tel complexe par abstraction d'un ligand anionique lié au métal, par exemple un halogénure. Sachant que le cation monovalent du thallium

est un excellent abstracteur de chlorure – du fait de la très faible solubilité du chlorure de thallium formé – on pourrait se contenter de l'ajouter au milieu réactionnel en étant convaincu de son efficacité. Mais il peut être utile de vérifier cette hypothèse ! Ainsi, nous avons fait réagir une solution du complexe *fac*-[CrCl₃(NPN)] (NPN = bis(2-picolyl)phenylphosphine) (1) dans le dichlorométhane avec TIPF₆ et curieusement, n'avons pas observé la précipitation attendue de TlCl blanc⁶. Par contre, le complexe que nous avons réussi à isoler et caractériser par diffraction des rayons X fut (2), dans lequel le cation Tl⁺ forme un adduit avec le complexe de départ et interagit avec ses trois ligands chlorures sans en arracher aucun ! Comme quoi, il est toujours bon de vérifier une hypothèse, même si on la tient pour acquise.

Ayant préparé des complexes dinucléaires du Ni(II) avec des ligands pyridine-alcool (N,OH), comme (3), pour l'oligomérisation de l'éthylène, nous avons constaté que leur faible solubilité limitait leurs performances catalytiques. Nous avons donc cherché à augmenter la solubilité de (3) dans les solvants utilisés en catalyse, et souhaité le transformer en un complexe neutre par déprotonation de deux fonctions alcool. Diverses bases furent utilisées en proportions différentes et s'il est effectivement possible de former l'alcoolate correspondant, la structure des complexes formés fut une surprise ! Dans l'un des complexes obtenus, (4), le cation sodium provenant de la base utilisée, NaH, se retrouve associé à l'édifice moléculaire formé par quatre ions Ni(II) stabilisés par les ligands organiques chélatants N,O (seuls les atomes N et O sont indiqués dans la Figure 1). Il en résulte une structure très originale de cœur Na₃Ni₄, formée de deux pseudo-cubanes partageant un sommet commun manquant⁷.

En faisant varier les rapports molaires entre les réactifs utilisés, nous avons obtenu le cluster [Ni₇L₁₂]Cl₂ (5) (Figure 2) et son analogue [Ni₆NaL₁₂]Cl (6) dans lequel le site métallique central est maintenant occupé par un cation Na⁺ (Figure 3). Il s'agit là du premier exemple de composé de type Na@Ni₆ (7)

En jouant finement sur les conditions expérimentales, nous avons pu isoler un complexe de plus haute nucléarité, [Na₈(NaL)₂](NiL₃)₆(μ₅-OH)₂ (7), dont la structure est très originale :

Des 16 atomes métalliques constitutifs du complexe (7), 14 occupent les sommets de deux doubles pseudo-cubanes Na₃Ni qui partagent une arête (Figure 5), les motifs Na₃Ni₂ ainsi formés étant reliés entre eux par deux unités *fac*-NiL₃⁸.

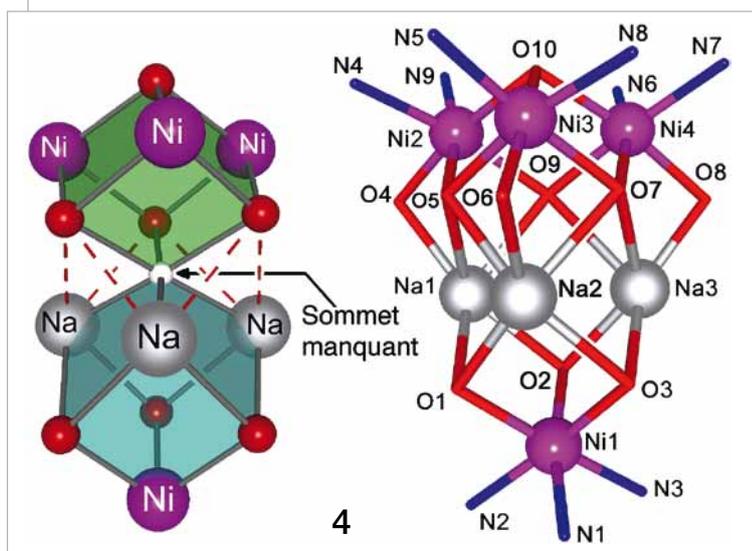
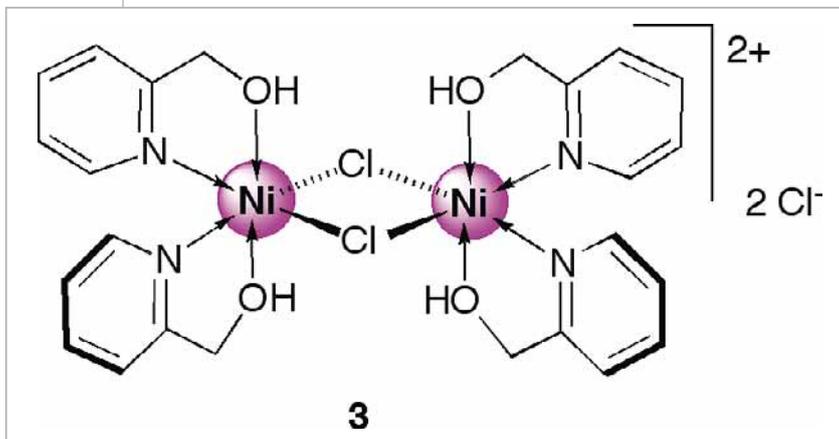


Figure 1. Vues de la structure du complexe polynucléaire [Ni(PyCH₂O)]₄(μ₂-OCH₂PY)₃(μ₅-OH)(μ₃-Na₃)[Ni(PyCH₂O)₃]Cl (4)

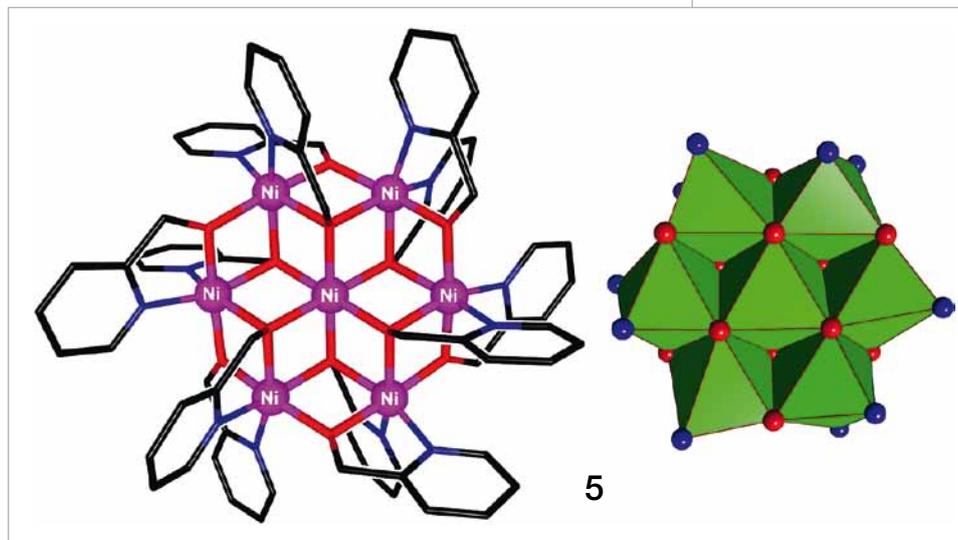


Figure 2. Vue de la structure du complexe $[\text{Ni}_7\text{L}_{12}]\text{Cl}_2$ (**5**) formé de cubanes incomplets et dont la structure de type Anderson formée par les octaédres de coordination autour des ions Ni(II) est illustrée à droite (L = PyCH_2O).

Sans les efforts associés à la purification et la cristallisation de ces différents complexes, il n'y avait aucun moyen d'imaginer la diversité des molécules produites et encore moins de prédire leur structure. Ces résultats montrent une fois de plus les risques encourus à mener des réactions *in situ* : les mélanges peuvent être complexes et recéler quelques perles ! Quel constituant serait alors responsable de la propriété étudiée ? L'incorporation du cation sodium dans certains de ces complexes polynucléaires démontre que les conséquences du choix de la base sont multiples.

Enfin, la similitude des structures des complexes Ni_7 (**5**) et NaNi_6 (**6**) se prêtait à une comparaison de leurs propriétés magnétiques. Alors que (**5**) est le siège d'interactions ferromagnétiques et antiferromagnétiques avec un état fondamental de spin $S = 5$, le complexe (**6**) est le siège d'interactions intramoléculaires faibles, faisant bien ressortir le rôle du cation central sur les propriétés de magnétisme moléculaire et donc l'intérêt de pouvoir le faire varier. D'autres complexes polynucléaires du nickel et du cobalt appartenant à ces familles sont à l'étude et révèlent des propriétés d'aimants moléculaires (« single molecule magnets »)

En guise de conclusion

La chimie moléculaire des métaux de transition et la catalyse homogène ont vu leurs synergies et apports mutuels croître rapidement au cours des dernières années. Et cela ne peut aller qu'en s'accroissant. Dans le même temps, un programme de recherche consacré initialement à la catalyse d'oligomérisation de l'éthylène nous aura conduit au magnétisme moléculaire... Charme de la chimie, où la réalité ne cesse de déborder les prévisions et où la sérendipité permet de découvrir des terres nouvelles. Souvenons nous des *Voyages et aventures des trois princes de Serendip* (ancien nom de Ceylan en Persan), dont l'histoire inspira Horace Walpole en 1754 dans la lettre qu'il écrivit à son ami Horace Mann, un anglais vivant alors à Florence : « It was once when I read a silly fairy tale, called *The Three Princes of Serendip* (from the poet Amir Khusrau, 13 th century), as their highnesses travelled, they were always making discoveries, by accidents and sagacity, of things which they were not in quest of. » Plus proche de nous, Louis Pasteur n'a-t-il pas dit que la chance ne sourit qu'aux esprits bien préparés ? ■

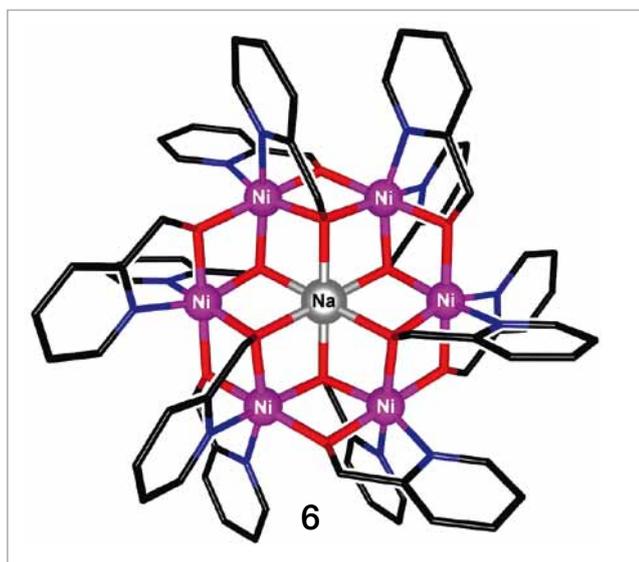


Figure 3. Vue de la structure du complexe $[\text{Ni}_6\text{NaL}_{12}]\text{Cl}$ (**6**) (L = PyCH_2O).

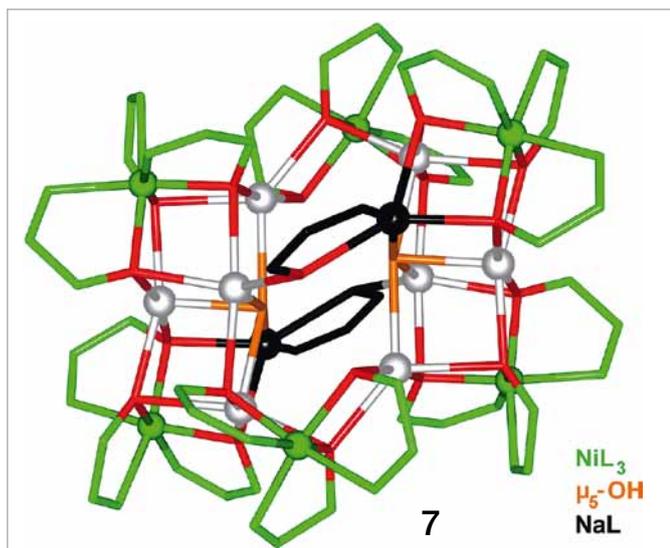


Figure 4. Vue de la structure du complexe polynucléaire de cœur $\text{Na}_{10}\text{Ni}_6$ (7). Par souci de clarté, seuls les atomes du ligand L participant à la chélation des ions métalliques sont représentés. Les fragments NiL_3 , NaL and $\mu_5\text{-OH}$ sont représentés par des couleurs différentes. Les autres ions Na^+ sont en gris.

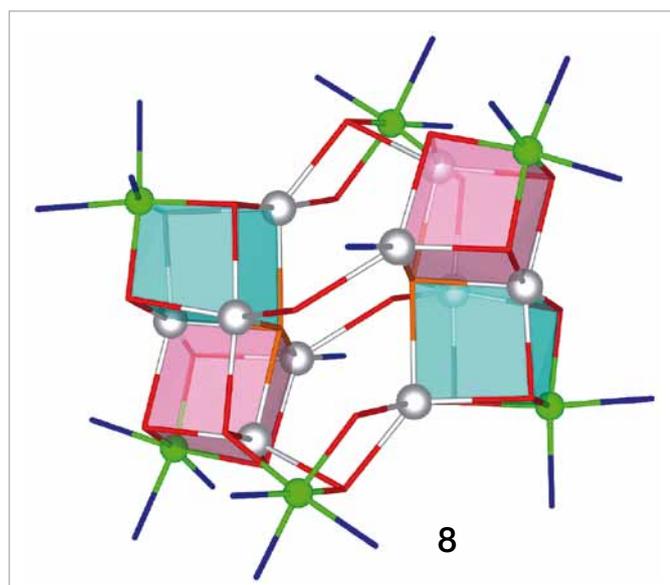


Figure 5. Vue de la structure du complexe polynucléaire de cœur $\text{Na}_{10}\text{Ni}_6$ (7) illustrant les deux paires de pseudo-cubanes Na_3Ni qui partagent une arête. Code couleur: Ni vert, Na gris, O rouge, N bleu, O hydroxide orange.

Remerciements

Je suis très reconnaissant aux collaborateurs et collègues, en France et à l'étranger, qui ont contribué à ces travaux et dont certains sont cités dans les références et, plus généralement à l'ensemble des membres du Laboratoire. Un merci particulier à R. Pattacini pour les illustrations des structures moléculaires. Nos travaux ont été soutenus par le CNRS, le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche, l'IFP Énergies nouvelles, l'Université de Strasbourg, la Fondation icFRC (Strasbourg) et les Ambassades de France à Singapour et Pékin.

Références

- 1 / *Metal Clusters in Chemistry*, P. Braunstein, L. A. Oro and P. R. Raithby (Eds.); Wiley-VCH, Weinheim (Germany), 1999, Vol. 1-3.
- 2 / P. W. N. M. van Leeuwen, *Homogeneous catalysis: understanding the art*; Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2004.
- 3 / H. de Vries, in *Encyclopedia of Catalysis* (Ed. I. T. Horvath), Wiley-VCH, New-York, 2003, Vol. 3, 295-347.
- 4 / J. N. Armor, *Catalysis Today*, 2011, 163, 3.
- 5 / (a) F. Speiser, P. Braunstein, L. Saussine, *Acc. Chem. Res.* 2005, 38, 784; (b) A. Forestière, H. Olivier-Bourbigou, L. Saussine, *Oil & Gas Science and Technology*, 2009, 64, 649; (c) H. Olivier-Bourbigou, A. Forestière, L. Saussine, L. Magna, F. Favre, F. Hugues, *Oil Gas European Magazine*, 2010, 36, 97.
- 6 / S. Liu, R. Peloso, R. Pattacini, P. Braunstein, *Dalton Trans.* 2010, 39, 7881.
- 7 / J. Zhang, P. Teo, R. Pattacini, A. Kermagoret, R. Welter, G. Rogez, T. S. A. Hor, P. Braunstein, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2010, 49, 4443.
- 8 / L. Kayser, R. Pattacini, G. Rogez, P. Braunstein, *Chem. Commun.* 2010, 46, 6461.

Chimie et industrie : la chimie au cœur des enjeux énergétiques

Par **Didier Roux**

Membre de l'Académie des sciences, directeur de la recherche et de l'innovation de Saint-Gobain.

L'utilisation massive des énergies fossiles est une histoire récente (le charbon d'abord au milieu du dix-neuvième siècle, puis le pétrole au début du vingtième siècle, puis le gaz naturel après la Deuxième Guerre mondiale). Cette histoire a eu un début (il y a environ 150 ans), elle aura une fin car la vitesse de consommation de ces ressources naturelles est sans commune mesure avec la reconstitution naturelle des stocks. La disparition programmée des énergies fossiles : cette source accessible, transportable et facilement utilisable d'énergie, demande à nos sociétés dont le développement économique et social est fortement dépendant de l'énergie, une adaptation rapide.

Cette adaptation passe par un ensemble de mesures, toutes indispensables. Il s'agit à la fois d'économiser l'énergie, de mieux utiliser l'énergie fossile disponible et d'améliorer le rendement de son extraction mais aussi de développer de nouvelles sources énergétiques si pos-

sible renouvelables : c'est-à-dire dont la reconstitution des stocks est compatible avec leur utilisation.

La chimie est présente sur tous ces enjeux et on essaiera, dans ce court article, de donner, non pas l'ensemble des enjeux de façon exhaustive, mais d'en décrire quelques-uns dont les progrès récents et leurs potentiels industriels permettent d'envisager un développement industriel prochain. J'insisterai sur le rôle clé de la chimie dans ces solutions développées pour notre futur.

Économiser l'énergie

La plus importante source d'économie d'énergie dans nos sociétés est sans contexte le domaine des bâtiments. Mis en lumière en France par le débat dit des « Grenelles de l'environnement », une amélioration notable de la qualité énergétique de nos bâtiments conduirait à terme à des économies pouvant aller de 15 à 25 % de la consommation totale énergétique d'un pays comme



la France. C'est le plus grand réservoir d'économies énergétiques; c'est pourquoi tous les pays développés se sont lancés dans de grands programmes d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. Si, avec les matériaux accessibles aujourd'hui, une isolation de qualité : permettant de fabriquer des bâtiments qui ne consomment quasiment pas d'énergie, est accessible : c'est au prix d'une augmentation importante de l'épaisseur des couches isolantes. Cela ne va pas sans poser des problèmes, un peu dans les constructions neuves, mais surtout dans la rénovation. De nouveaux matériaux et/ou systèmes permettant de voir arriver des isolants minces performants doivent être développés. Les deux pistes suivies actuellement sont soit des matériaux nano-structurés de type aérogels soit des isolants sous vide. Dans le premier cas, les aérogels sont obtenus par précipitation de particules de silices qui par agrégation irréversible forment des objets fractals qui en se connectant laissent des pores de taille

nanométrique, abaissant sensiblement la conductivité thermique de l'air. Si ces matériaux sont fabriqués dans les laboratoires et produits en faible quantité dans des procédés industriels, il reste à inventer un procédé chimique permettant une fabrication à grande échelle à un coût compatible avec une utilisation de masse. Pour les isolants sous vide il faut inventer des membranes ayant une imperméabilité au gaz bien meilleure que ce que nous connaissons aujourd'hui afin d'assurer la pérennité de leurs propriétés isolantes sur des périodes de temps de plusieurs dizaines d'années.

Utiliser mieux l'énergie fossile

Produire de l'électricité à partir de gaz naturel se fait avec un rendement énergétique de l'ordre de 30 %. Une amélioration de ce rendement ferait économiser des quantités importantes de gaz. Une solution existe depuis longtemps dans les laboratoires de recherche :



Figure 1 Aérogel translucide et feutre d'isolation à base d'aérogel

la pile à combustible qui en séparant dans l'espace les deux demi-réactions redox d'oxydation d'un gaz combustible, permet d'améliorer sensiblement ce rendement (50 % sans cogénération, 80 % ou plus avec cogénération). L'industrialisation à un coût raisonnable de cette pile à combustible bute sur deux problèmes : le coût des matériaux et du système et sa fiabilité : tant en termes de temps de fonctionnement que de résistance aux cycles de changement de température. Des pistes existent qui devraient prochainement conduire à des solutions qui verront l'avènement de cette technologie sur le marché de la production d'énergie. Des progrès récents dans la mise en forme des céramiques et des polymères fluorés permettent en effet d'envisager l'obtention de piles à combustibles fiables à un coût raisonnable.

Les énergies renouvelables

L'utilisation de la biomasse est un enjeu important dans l'énergie. Si, la biomasse dite de première génération (transformation du sucre en alcool ou utilisation d'huiles végétales raffinées ou non) montre ses limites principalement à cause de la compétition avec les ressources alimentaires, la biomasse de deuxième génération pose moins de problèmes. En effet, il s'agit de transformer chimiquement ou biochimiquement

les parties non alimentaires de la biomasse (principalement la cellulose) en molécules plus petites liquides ou gaz utilisables comme combustible. La base des procédés chimiques est la réaction bien connue de gazéification (longtemps utilisée pour faire du gaz à partir de charbon) ou, en présence d'eau et de chaleur on obtient un gaz combustible : mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Ce gaz peut, soit être directement utilisé comme combustible soit, grâce à une réaction supplémentaire permettant de recombinaison le carbone et l'hydrogène pour conduire à un liquide (Procédé de Fisher Tropsch), être utilisé comme substitut du pétrole. Alternativement, un traitement biochimique permet d'obtenir grâce à des plantes ou des algues et en suivant les réactions de photosynthèse, la recombinaison directe du CO_2 en molécules combustible.

Mais la source la plus importante d'énergie accessible partout sur la planète est l'énergie solaire. Chaque m^2 des territoires les plus habités de la planète reçoit en moyenne 1 Mwh d'énergie par an. 5 000 km^2 du territoire français (30 000 km^2 sont actuellement déjà occupés par des infrastructures) équipés de panneau photovoltaïque, produiraient l'équivalent de la consommation actuelle en énergie de la France (en supposant un rendement de 10 %, ce qui est le rendement actuel d'une installation solaire). Là encore la chimie intervient à la fois dans la préparation des matériaux utilisés aujourd'hui (dopage du silicium dépôt par procédés chimiques de couches minces, fabrication des multiples matériaux nécessaire à la fabrication des modules PV...). La chimie intervient de façon encore plus pertinente dans les cellules photovoltaïques de demain (génération III) qui seront soit à base de nanoparticules fonctionnalisées soit de polymères ou de molécules organiques permettant une conversion directe du rayonnement du soleil en électricité. Cette source énergétique demandera

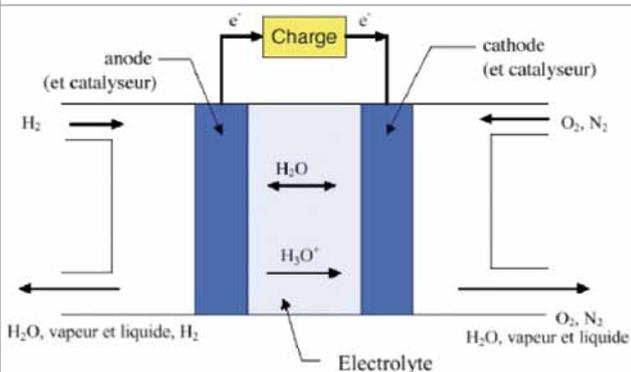
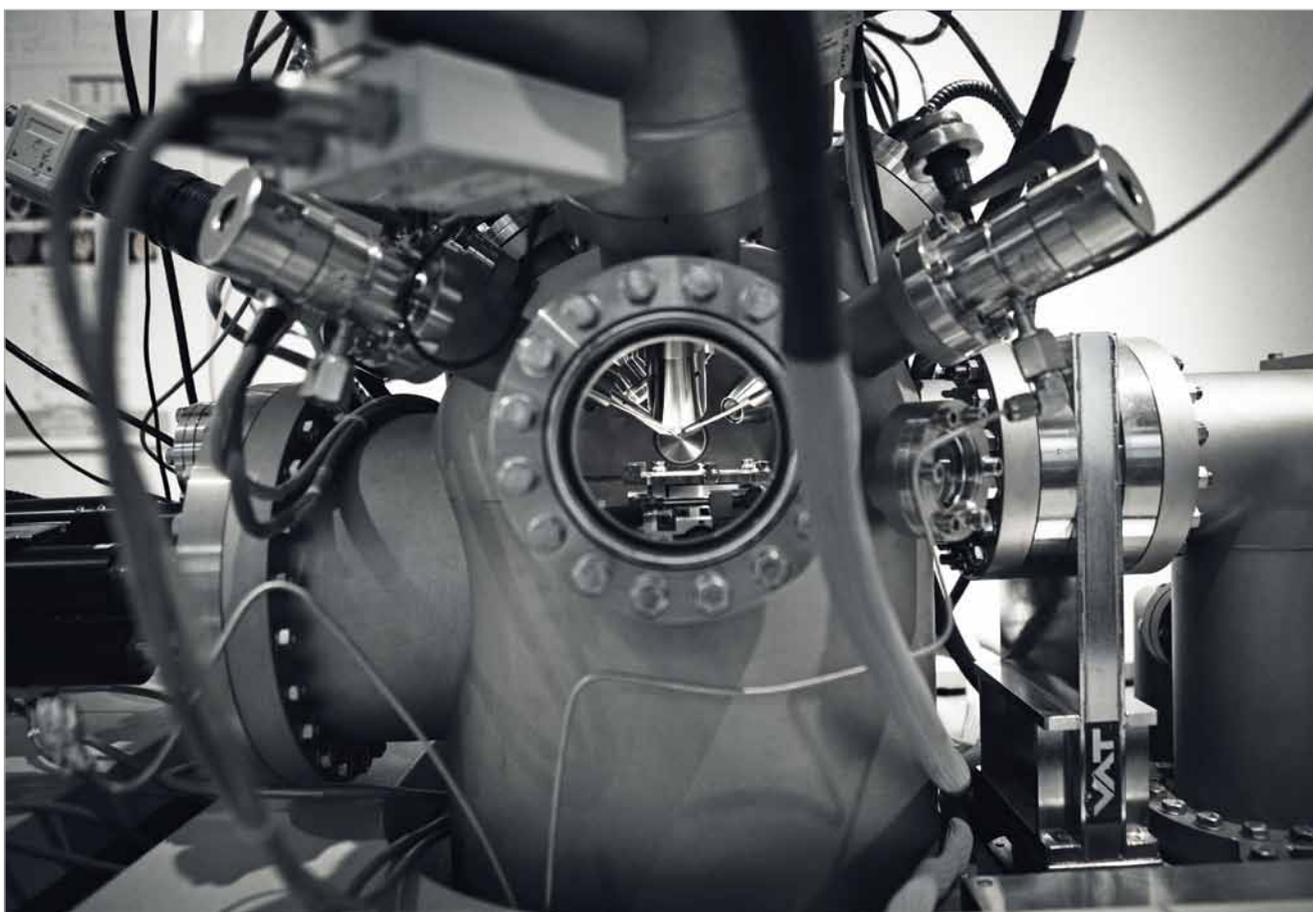


Figure 2 Principe de fonctionnement de la pile à combustible permettant de générer à la fois de l'électricité et de la chaleur



SIMS (Secondary Ions Mass Spectroscopy), appareil d'analyse de surface utilisé pour caractériser de nouvelles couches fines photovoltaïques.

aussi des progrès indispensables dans le stockage de l'énergie et plus particulièrement dans l'énergie électrique. Là encore que ce soit dans les batteries ou des dispositifs autres, la chimie sera l'élément clé du développement de ces solutions.

Matériaux et Procédés

Tous ces progrès, ambitieux et nécessaires, font appel à la chimie et à ses récents développements issus de recherches fondamentales. C'est le cas, par exemple, des évolutions récentes de la chimie minérale : en particulier par les développements de la chimie dite « douce »

ou les matériaux solides sont élaborés par des réactions en solution à basse température plutôt que par des réactions solide/solide dans des fours à haute température (c'est le cas de la synthèse des aérogels). C'est aussi le cas des progrès récents des polymères permettant d'élaborer des polymères conducteurs nécessaires aux cellules photovoltaïques de 3^e génération. Tout ceci démontre une science dynamique toujours en pleine évolution, ou les progrès sur les réactions chimiques elle-même vont de pair avec les progrès étonnants de la chimie des procédés. N'oublions pas aussi l'importance de plus en plus grande de la chimie enzymatique et des procédés biochimiques qui préfigurent l'avenir, y compris dans le monde de l'énergie. La chimie est présente dans tous les domaines industriels et est, le plus souvent, un des éléments clés du succès de nouvelles technologies ■

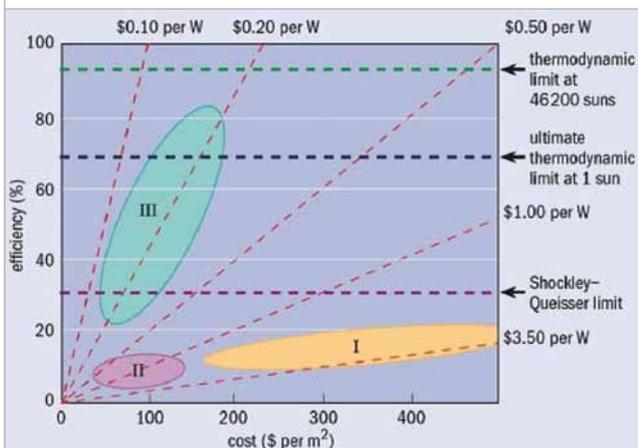


Figure 3 positionnement du photovoltaïque de troisième génération (III) dans un tableau coût efficacité

Chimie et médicament : un vieux couple solide

Par **Bernard Meunier**

Membre de l'Académie des sciences, directeur du laboratoire de chimie de coordination, CNRS, Toulouse.

Le XIX^e siècle a été celui de la naissance de la chimie organique et du début de la purification des principes actifs extraits des végétaux. Aujourd'hui, qui fait attention à la statue située à Paris, sur une petite place à l'angle du boulevard Saint-Michel et de la rue de l'Abbé-de-l'Épée à Paris, en face de l'École des Mines ? Cette statue représente une femme allongée, allégorie très poétique de la guérison du paludisme à l'aide de la quinine. Ce premier médicament antipaludique a été isolé en 1820, à partir de l'écorce de quinquina par deux pharmaciens parisiens, Joseph Pelletier (1788-1842) et Joseph Caventou (1795-1877), deux pionniers de la caractérisation des alcaloïdes.

L'extraction et la caractérisation des principes actifs des plantes médicinales ont été, tout au long des XIX^e et du XX^e siècles, une des grandes sources d'inspiration pour la découverte de médicaments. En parallèle, le XIX^e siècle a été également celui de l'essor de la chimie organique de synthèse, avec la volonté de créer des médicaments à partir de produits chimiques venant du charbon, puis du pétrole. William Perkin en 1856, à l'âge de 18 ans, était à la recherche d'une voie de synthèse de la quinine à partir de l'aniline : il obtint la mauvéine, le premier colorant artificiel ! Ces premières remarques, autour de la quinine, montrent combien la chimie des produits naturels et la syn-

thèse organique ont été les deux piliers de la chimie thérapeutique pendant plus d'un siècle. Les progrès de la biochimie entre 1880 et 1910 ont permis de comprendre que ces molécules actives avaient une cible biologique, souvent une enzyme ou une protéine. Le concept de clé-serrure a été introduit par Hermann Emil Fischer en 1894 et celui de récepteur par Paul Ehrlich en 1906. Cette association chimie-biochimie, avec l'utilisation de modèles animaux pertinents, a été le moteur de la création de pratiquement tous les médicaments entre 1910 et 1980. C'est sur ce modèle scientifique, couplé à des investissements financiers importants que se sont construits les grands groupes de l'industrie pharmaceutique. Cela a conduit en France à la création de groupes très actifs comme Rhône-Poulenc, Roussel-Uclaf, Servier, Pierre Fabre et de nombreuses entreprises de taille moyenne comme Labaz, Parcor et Clin-Midi, celles-là mêmes qui ont été à l'origine du groupe Sanofi en 1974. Ce groupe, maintenant de taille mondiale, s'est développé au départ sur le rachat de petites sociétés créées dans les années 1950-1965. Cette période intense de création d'entreprises au cours des « trente glorieuses » et l'augmentation massive des emplois dans l'industrie pharmaceutique et chimique avaient amené des techniciens et ingénieurs à quitter le CNRS pour rejoindre les laboratoires de recherche industriels, alors en pleine expansion !



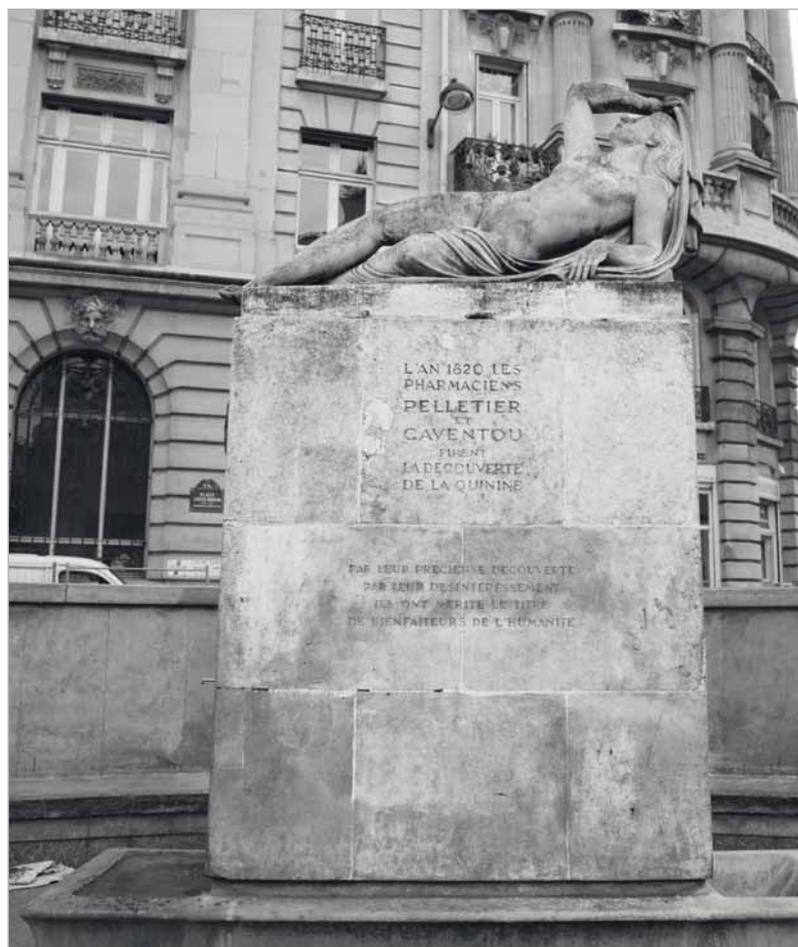
1970-2000 : Restructuration de l'industrie pharmaceutique

Au début des années 1980, tout change sous la pression de plusieurs facteurs, très différents les uns des autres. Chacun de ces facteurs va contribuer à des restructurations faisant que le monde du médicament est maintenant totalement différent de celui des années 1960. Le développement considérable de la biologie moléculaire et de la génétique au cours des dernières décennies va ouvrir des champs nouveaux dans la mise au point de nouveaux médicaments, en créant de nouveaux outils thérapeutiques, comme les anticorps monoclonaux humanisés. À côté de ces changements scientifiques intervenus depuis les années 1980, il faut noter la mise en place de groupes pharmaceutiques géants avec de nouvelles gouvernances contrôlées par des décideurs issus du monde de la finance, au détriment des scientifiques souvent dégradés à des rôles de soutien technique auprès des managers. Ce modèle économique a probablement atteint ses limites au début des années 2000 pour diverses raisons. Parmi celles-ci, n'oublions pas que ces grands groupes ont été construits par acquisition de structures, petites mais créatives, apportant des actifs significatifs en termes de propriété intellectuelle. Au-delà d'une période de 15 ans de consolidation structurelle, il faut développer à nouveau la créativité et renouveler le portefeuille

de brevets et de nouveaux médicaments. Les bons choix de développements doivent se faire au sein des laboratoires avec des chercheurs dynamiques, mais qui sont trop souvent éloignés des niveaux de décision des managers par des strates administratives nombreuses. Dans ces grands groupes, comme dans certaines sphères de la recherche académique, la « réticulation administrative excessive » est un frein notoire à la créativité. Une analyse récente effectuée par Bernard Munos, un chercheur français ayant fait carrière chez Eli Lilly aux États-Unis, a largement mis en évidence la diminution de la créativité des grands groupes pharmaceutiques et la montée en puissance des petites sociétés, jeunes et dynamiques, dans la mise au point des nouvelles entités moléculaires (B. Munos, *Nature Rev. Drug. Disc.*, 2009, vol. 8, 959-968).

Quel sera le futur rôle de la chimie dans la création de nouveaux médicaments ?

Au-delà de ces considérations sur l'évolution de la structuration de l'industrie pharmaceutique, il faut noter que la peur de la chimie a également contribué à dévaloriser le « médicament chimique ». Déjà à l'époque de Pelletier et Caventou, leurs détracteurs refusaient l'arrivée de ces extraits purifiés d'alcaloïdes comme outils thérapeutiques et demandaient le « bannissement des sciences chimiques du sanctuaire de la médecine ».



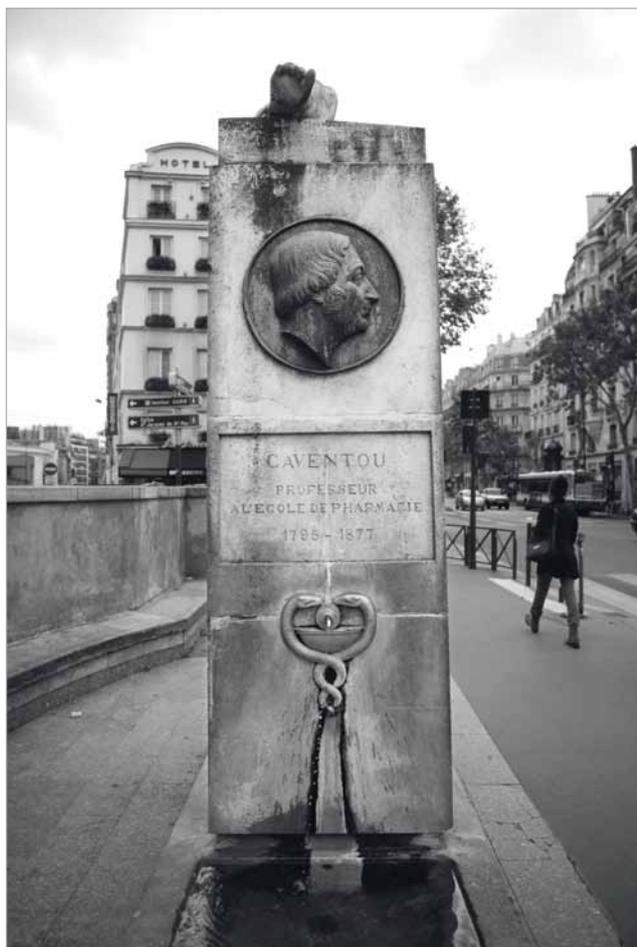
Joseph Pelletier (1788-1842) et Joseph Caventou (1795-1877), deux pionniers de la caractérisation des alcaloïdes, angle du boulevard Saint-Michel et de la rue de l'Abbé-de-l'Épée à Paris.

La peur des médicaments chimiques n'est pas récente ! Les médias ouvrent largement leurs pages et leurs antennes aux adeptes des « médecines naturelles » et de la « médecine douce », en oubliant facilement les apports considérables de la médecine et des médicaments dans l'amélioration de la santé des personnes depuis plus d'un siècle. Ces progrès ont contribué à une augmentation sans précédent de l'espérance de vie. Rappelons qu'en France, l'espérance de vie d'un homme est passée de 63 ans à 77 ans entre 1950 et 2005, grâce aux progrès de la médecine et à un accès facile à des médicaments efficaces.

Les médicaments « biopharmaceutiques » : la chimie a-t-elle encore sa place dans l'arsenal thérapeutique actuel ?

La tendance actuelle est à la « médecine personnalisée » et aux « biopharmaceutiques ». Dans le premier cas, les progrès rapides des méthodes de diagnostic, tant dans le domaine des dosages de bio-marqueurs que de l'imagerie, permettent effectivement d'envisager le dépistage précoce de nombreuses maladies et le suivi de traitements thérapeutiques adaptés au cas par cas. En moins de 20 ans, les progrès de la génétique et de la biologie moléculaire ont permis aux anticorps

monoclonaux, de plus en plus spécifiques, de passer du statut de curiosité de laboratoire à celui de traitements efficaces en cancérologie, sans que le patient soit totalement à l'abri d'effets secondaires. Le coût élevé de ces « biopharmaceutiques » est normalement compensé par un fort bénéfice pour les patients. Pourra-t-on aller toujours plus loin dans l'utilisation des anticorps ? Le coût du traitement d'une maladie très invalidante comme l'arthrite rhumatoïde à l'aide d'anticorps monoclonaux est de l'ordre de 11 à 14 000 euros/an/patient (B. Meunier, *Acc. Chem. Res.*, vol. 41, 69-77, 2008). La société Genzyme propose un traitement de la maladie de Pompe (maladie orpheline induite par une déficience en alpha-1,4-glucosidase) à un coût annuel allant de 120 000 euros pour un enfant à 300 000 euros pour un adulte. De tels traitements très coûteux peuvent-ils être étendus à d'autres maladies courantes ? Quel sera le plafond des dépenses de santé considéré comme acceptable par les actifs d'une population vieillissante ? Ces questions ont été éludées jusqu'à présent en reportant une partie de nos dépenses de santé sur la génération suivante. Par ailleurs, d'aucuns assurent que la copie de ces anticorps monoclonaux sera plus difficile à réaliser que celle des petites molécules, éloignant ainsi le risque des génériques. Qui



peut croire que le savoir-faire des pays émergents, les « usines du monde », va s'arrêter devant les « biopharmaceutiques », faute de compétences intellectuelles et industrielles ?

Le développement de la thérapie génique donne de formidables espoirs pour les patients atteints de maladies d'origine génétique incurables, dans l'état actuel des connaissances, à l'aide de petites molécules. Dans un avenir lointain, il sera possible d'envisager l'utilisation de petites molécules capables d'intervenir de manière sélective dans la régulation de l'expression des gènes.

Les cellules souches, capables de régénérer des tissus endommagés, représentent également l'ouverture vers un monde nouveau, celui de la médecine régénératrice des organes essentiels, permettant ainsi à chacun de faire le rêve de « mourir en bonne santé ». Les mécanismes de différenciation cellulaire mettent en jeu des agents chimiques endogènes ou exogènes, dont la gamme n'a pas été totalement explorée.

Les méthodes de criblage à haut débit (« high-throughput screening »), très en vogue au cours de années 1990, ont conduit à un nombre très faible de nouveaux médicaments. Cet échec est en partie dû à

l'utilisation de banques de molécules de faibles diversités structurales, et dont les propriétés pharmacodynamiques étaient souvent trop éloignées de celles d'un médicament efficace. Augmenter la taille et la diversité des banques de molécules pour atteindre des millions d'entités différentes pouvant être ensuite identifiées est maintenant envisageable par marquage à l'ADN des molécules de manière individuelle.

L'essor des nanotechnologies utilisables pour la vectorisation des médicaments va constituer un apport très important, d'une part en améliorant, par ciblage spécifique, la distribution de médicaments existants et d'autre part en donnant la possibilité de développer des produits très actifs peu solubles. Il est certain que le développement des nanotechnologies, résultant des efforts conjoints des chimistes et des physiciens, sera l'un des atouts majeurs dans l'évolution de la galénique moderne.

Et demain, quel sera l'univers du médicament ?

Tous les outils de la chimie et les avancées récentes de la chimie, aux interfaces de la biologie et de la physique, vont rester au cœur des processus de création des médicaments du XXI^e siècle. Nous ne passerons pas de la chimie thérapeutique dite traditionnelle à la seule « biopharmacie », mais un équilibre se mettra en place entre les différentes approches, en mêlant le meilleur des différentes disciplines, chimie, physique, biologie et médecine, sans oublier les apports de la modélisation et de l'informatique. Un continuum disciplinaire, allant des mathématiques à la médecine, sera à même de fournir, à prix raisonnable, de nouveaux médicaments efficaces et ayant le minimum d'effets secondaires.

C'est dans ce contexte que la chimie continuera à être l'un des piliers de cette création, le centre de gravité des compétences se déplaçant au fur et à mesure du processus : situé au plus près des spécialistes en sciences moléculaires au début pour aller ensuite vers les médecins dès lors que le candidat-médicament entre dans les phases précliniques et cliniques. Le rôle des financiers sera de veiller aux équilibres des comptes de l'ensemble, sans chercher à s'installer dans l'habit des décideurs lors des étapes de recherche et développement. Après la mode des industries sans usines, celle des groupes pharmaceutiques sans laboratoires tente certains groupes financiers. Si la grande industrie pharmaceutique souhaitait faire l'épargne de laboratoires de recherche internes, elle s'installerait alors dans un rôle d'opérateur de la distribution de médicaments, ressemblant en cela aux acteurs de la grande distribution des biens de consommation courante. Elle perdrait ainsi la plus grande partie de son âme ■

Hommage de l'Académie des sciences à Georges Charpak

Par **Yves Quéré**

Membre de l'Académie des sciences,
professeur émérite à l'École polytechnique.

G

Georges Charpak, né le 1^{er} août 1924 à Dabrowica (Pologne, aujourd'hui Ukraine), est arrivé en France à l'âge de 8 ans. Résistant dès 1941, il fut déporté à Dachau et devint citoyen français en 1946. Ingénieur diplômé de l'École des Mines de Paris, entré en 1948 comme stagiaire du CNRS au laboratoire de physique nucléaire du Collège de France dirigé par Frédéric Joliot, docteur ès sciences en 1955, il fit l'essentiel de sa carrière de physicien au Centre européen de recherches nucléaires (CERN) à Genève, qu'il quitta en 1989 pour sa retraite. Il fut élu Membre de l'Académie des sciences en 1985 et reçut le prix Nobel de physique en 1992. Dans la vie si riche qui vient de s'achever, l'hommage rendu aujourd'hui par l'Académie souligne deux faces : celle du physicien, celle de l'humaniste passionné par l'éducation.



Sa vie de physicien nucléaire commença par un défi : il fut chargé de construire un détecteur de particules dont le principe remonte aux travaux de Geiger. Il s'agissait d'une chambre traversée par un fil électrique mis sous tension. Le passage d'une particule chargée provoquait une étincelle. Il montra vite des qualités extraordinaires dans la conception et la construction de ces détecteurs, rendus de plus en plus efficaces. C'est dans ce cadre qu'il effectua des travaux qui ont révolutionné toute la physique expérimentale des particules élémentaires, avec des applications dans des domaines aussi variés que l'astrophysique ou l'imagerie médicale.

Dans les années 1960, l'outil essentiel d'un expérimentateur auprès des grands accélérateurs de particules était la chambre à bulles. La dernière chambre à bulles, construite en France sous le nom de Gargamelle, permit de grandes découvertes, dont, en 1973, celle d'une nouvelle forme d'interaction faible, dite *interaction de courants neutres*. Mais les limites des chambres à bulles étaient atteintes et c'est alors que Georges Charpak inventa la *chambre multifils* pour laquelle il reçut le prix Nobel de physique en 1992. Partant de l'idée mise en œuvre dans les compteurs à fil unique, il imagina des détecteurs planaires constitués de nappes de fils parallèles, portés à un haut potentiel électrique. Une particule chargée électriquement ionise le gaz de la chambre et le signal électrique, causé par la collecte des électrons et des ions produits sur le fil le plus proche, permet une localisation spatiale de la particule. En effet, l'intense champ électrique au voisinage du fil très fin multiplie les ions, ce qui provoque une amplification du signal. Un ensemble de plans de fils d'orientations différentes va alors fournir les coordonnées qui permettent la reconstruction des trajectoires suivies par les particules. La capacité d'invention de G. Charpak s'est manifestée par une grande maîtrise dans le choix des gaz, dans la mécanique des plans de fils ultra-fins et dans le développement de circuits électroniques à faible bruit. Il sut étendre ce concept aux chambres dites à *dérive* aux fils beaucoup plus espacés, mais où la précision spatiale est restaurée par la mesure du temps de migration des ions entre le point d'impact

de la particule et le fil le plus voisin où a lieu l'amplification du signal électrique.

Témoignant de l'importance capitale des travaux de Georges Charpak, toutes les expériences de physique des particules des quarante dernières années ont utilisé des détecteurs réalisés à partir de ses concepts.

La précision spatiale et temporelle de ces détecteurs, ainsi que leur grande flexibilité, a permis la construction d'expériences performantes qui ont fourni une moisson de résultats. Parmi ceux-ci on peut citer les découvertes des bosons messagers de l'interaction faible au CERN (Genève), du gluon (messager de l'interaction forte entre quarks) à l'accélérateur DESY (Hambourg), du quark lourd top au Fermilab (Chicago), des trois types de neutrinos au CERN. Les expériences fonctionnant actuellement sur le LHC au CERN profitent largement des idées de Georges Charpak.

Le physicien des particules a voulu mettre son savoir au service de la biologie fondamentale comme de la médecine. Dans les années 1990, comprenant les possibilités offertes par ses détecteurs et certain que les risques d'exposition aux radiations ionisantes devaient être réduits au strict minimum en médecine, singulièrement pour les enfants, il développa des méthodes puissantes pour la radiographie X, diminuant d'un facteur 50 le temps d'exposition aux rayonnements et permettant en outre une image globale du corps.

À la stature du physicien s'en ajoutait une autre, d'une ampleur comparable : celle du passionné de pédagogie, celle de l'humaniste, celle du citoyen du monde.

Arrivé en France à l'âge de l'école primaire, Georges Charpak avait reçu avec ferveur, de cette école de la République dont il ne cessait de proclamer les vertus, les premiers rudiments d'une langue qu'il aimait et d'une culture qui devait, toute sa vie, l'habiter. Jamais - au cours d'une existence exemplaire en termes de lutte pour la justice et la liberté, dont son entrée dans la Résistance marque un moment fort - il n'allait baisser les bras devant cette terrible absence de culture, et au premier degré cette absence de savoir, dont souffrent tant et tant d'enfants. Une culture qui se construit sur l'ouverture au monde, celui des faits comme celui des idées, une culture qui soit un désir de savoir et de comprendre, une culture qui soit une tension vers plus de raisonnement et plus de vérité.

C'est cet homme qui va, dans le début des années 1990, se passionner pour ce que fait alors, dans les banlieues les plus misérables de Chicago, son collègue et ami Leon Lederman, prix Nobel de physique lui aussi. Devant la calamité d'écoles désertées par les élèves et minées par la violence la plus brutale, Lederman avait décidé de sauver ces écoles par la science. Ayant créé, en plein cœur de Chicago, un centre de formation de professeurs, il y avait peu à peu modifié profondément le rapport des élèves à leurs professeurs par l'introduc-

tion d'un enseignement dit « Hands-on » où les enfants apprennent de la science en la pratiquant.

Frappé par cet exemple, Georges Charpak proposa au ministre de l'Éducation nationale de l'époque, François Bayrou, la renaissance d'un enseignement, par ailleurs profondément innovant, des sciences aux enfants. Car cet enseignement avait pratiquement disparu de nos écoles primaires, malgré de belles initiatives antérieures autour de l'école nouvelle. C'est ainsi que, héritier de ces initiatives et adoubé par Lederman, il créa le mouvement *La main à la pâte*, soutenu par le vote unanime de l'Académie en juillet 1996. Quelques centaines d'instituteurs volontaires allaient, dès la rentrée suivante, s'investir dans l'aventure. Il s'agit que les enfants, guidés par leur maître, partent d'une question sur la nature, proposent des hypothèses – le plus souvent fausses ou naïves, peu importe pourvu qu'ils fassent travailler leur imagination – puis les testent par une expérience, rudimentaire dans son montage mais correcte dans son principe; qu'ils découvrent ainsi une miette de la vérité du monde; et enfin, phase essentielle, qu'ils rédigent sur leur cahier de science la petite aventure intellectuelle et manuelle qu'ils viennent de vivre collectivement.

Simultanément se mettait en place, sous l'égide de l'Académie et avec la contribution enthousiaste de nombre de ses membres, une équipe, dite *Lamap*, dont les fonctions n'allaient cesser de s'amplifier afin d'animer avec le concours tenace et généreux de Georges Charpak, les innombrables développements de son idée. Il avait compris dès le départ que rien ne pourrait se faire si les professeurs des écoles ne recevaient pas un soutien déterminé de la communauté scientifique (chercheurs, étudiants, ingénieurs...), qui ne cesse de s'accroître.

Durant toute cette phase de lancement, Georges Charpak fut un extraordinaire créateur, dissolvant les tiédeurs, écoutant les critiques et balayant les oppositions par cette force de conviction qui émane de la pure générosité, elle que personne ne peut récuser. Aujourd'hui lui survit une œuvre considérable: la science est redevenue présente dans près de la moitié des classes primaires françaises. La pédagogie de *La main à la pâte* n'est pas dogmatique: Georges Charpak était le premier à affirmer que, si l'on veut enseigner aux enfants le nom des planètes, il faudra bien qu'ils les apprennent par cœur!

Une prolongation passionnante et inattendue de *La main à la pâte* fut, au fil de ces douze dernières années, sa rapide diffusion à l'étranger. Dès que fut connu, notamment par l'intermédiaire des relations internationales de l'Académie, ce que Georges Charpak avait lancé dans notre pays, les demandes d'aide et de collaborations se mirent à affluer. Aujourd'hui, *La main à la pâte* se décline dans des pays aussi divers que ceux

de l'Europe, de l'Amérique latine, la Chine, la Turquie, la Malaisie, l'Égypte, le Cambodge, certains pays francophones d'Afrique, sans compter des liens très forts maintenus avec l'Amérique du Nord.

Question finale (et tout autant initiale): pourquoi enseigner les sciences aux enfants? Pour augmenter le nombre des scientifiques ou des ingénieurs dont notre pays a assurément besoin? Pourquoi pas si cela peut en être un résultat. En fait, dans l'esprit de Georges Charpak, là n'est pas du tout le rôle principal d'un tel enseignement. Ce qu'il voulait avant tout, c'est donner aux enfants un esprit de rigueur, une intelligence nourrie par un constant questionnement et par le démêlement de ce qui est vrai et de ce qui est faux, enfin une pensée qui puisse s'exprimer dans une langue bien maîtrisée, conscient qu'il était du lien très fort qui existe entre la science et le langage. Il souhaitait que l'exercice de la raison, inculqué dès l'enfance, protège l'humanité d'une soumission dangereuse aux gourous de tous bords. Ce que voulait Georges Charpak, en un mot, c'était de faire de l'enfant un être de culture.

Ces deux composantes d'une vie si riche se rejoignent dans les multiples engagements, le plus souvent publics, qui furent ceux de Georges Charpak. Particulièrement intense est l'ensemble de ses prises de position concernant le nucléaire. D'une part, avec son ami Richard Garwin, il ne cessa d'exprimer une opposition déterminée à l'accumulation irraisonnée d'armements nucléaires, et aux risques de dissémination à des fins terroristes de ces armes, comme d'autres dont la science pourrait permettre la conception. D'autre part, il ne cessa de soutenir avec vigueur l'utilisation civile de l'énergie nucléaire, au moins à l'horizon du siècle, pour satisfaire les besoins sans affecter l'évolution climatique.

L'Académie des sciences, la nation entière perdent une de leurs prestigieuses figures, celle d'un homme passionnément dédié à la science tout autant que celle d'un humaniste profondément engagé et soucieux de l'avenir du monde ■

Pourrait-on ralentir (un peu) la course aux publications ? ou « Cent fois sur le métier . . . »

Par **Marc Yor**

Membre de l'Académie des sciences,
professeur à l'université Pierre et Marie Curie.

Dans les années récentes, l'Académie s'est intéressée à différents aspects des publications scientifiques, en particulier en ce qui concerne leur rôle dans l'évaluation des chercheurs. J'ai participé à certaines des réunions sur ces thèmes; il apparaissait immédiatement que les fonctionnements des différentes disciplines scientifiques sont très différents. Ceci n'est pas si bien connu dans la communauté scientifique dans son ensemble, chacun comprenant bien les us et coutumes de sa tribu, mais ne s'en écartant jamais beaucoup.

Compte tenu de ces grandes disparités, les remarques qui suivent sont propres aux publications mathématiques et aux mathématiciens. Au regard d'autres disciplines, les mathématiciens publient peu (: publier quatre articles en

une année est la preuve d'un travail soutenu) et la publication d'un article peut prendre deux ans, à partir de sa soumission, le travail du referee prenant six mois, le retour d'une version corrigée prenant six autres mois, etc...

On pourrait penser que cette lenteur soit un gage de qualité (des travaux soumis, puis finalement, publiés). Il n'en est pas forcément ainsi, un auteur – face à ce long temps d'attente – pouvant être amené – inconsciemment? – à rédiger, disons au bout de six mois, voire un an – une version améliorée (comportant peut être de nouvelles erreurs...) qui ne pourra pas remplacer la version qui est alors dans le pipeline, entre rapport du referee, et publication finale. D'où une certaine multiplication des publications, due – partiellement – à la lenteur du processus...

Il me semble toutefois que les aspects positifs de cette lente germination d'un papier mathématique l'emportent largement sur les aspects négatifs :

- combien de fois, après avoir soumis un travail à une revue, n'ai-je eu des doutes sur tel



ou tel argument de démonstration, puis ces doutes se sont évanouis...

- combien de fois le long délai de publication m'a permis de discuter du (ou des) résultat(s) du travail avec plusieurs collègues qui m'apportaient souvent des commentaires intéressants...
- enfin, combien de fois ai-je pu m'apercevoir que des publications voisines, ou en tout cas intéressantes, avaient été faites sur le sujet, et j'ai pu incorporer les références au retour du rapport du referee...

Toutes ces mises au point n'auraient pu avoir lieu si la publication de mon travail avait été beaucoup plus rapide.

Les remarques ci-dessus sont, je n'en doute pas, d'une grande banalité, et néanmoins je suis frappé, malgré les changements révolutionnaires intervenus avec Internet, du nombre de papiers bâclés qui parviennent aux éditeurs de revues mathématiques, ainsi que de l'impatience de chercheurs jeunes ou chevronnés à soumettre leurs travaux à une revue, dès la première rédaction.

Utilisons à bon escient les moyens électroniques maintenant à notre disposition, tout en profitant de la lenteur du mode de publication des mathématiques pour laisser décanter et améliorer les découvertes ■

Démographie, climat et alimentation mondiale

RST n° 32

Animé par **Henri Leridon** et **Ghislain de Marsily**,
de l'Académie des sciences

Préface d'**Erik Orsenna**, de l'Académie française
Éditions EDP Sciences

L'humanité trouvera-t-elle de quoi nourrir 9 milliards d'hommes en 2050, dans un contexte climatique probablement plus difficile? L'inquiétude n'est pas nouvelle, mais la croissance démographique s'est emballée dans la seconde moitié du XX^e siècle, et la crainte d'une crise alimentaire mondiale est réapparue.

Certes, les progrès des technologies agricoles ont permis, au plan global, de maintenir le niveau nutritionnel moyen pendant les années de la « Révolution verte », mais la situation restait loin d'être satisfaisante, puisque environ 850 millions de personnes étaient sous-alimentées au début du XXI^e siècle. Or de nouvelles inquiétudes se font jour: les surfaces cultivables ne sont plus guère extensibles, la productivité des sols atteint des niveaux qui risquent de les endommager de façon irréversible, les prix de l'énergie et des intrants indispensables à l'agriculture moderne sont à la hausse... Et les perspectives de changements climatiques ne sont pas rassurantes. De nouveaux progrès technologiques permettront-ils de dépasser, une fois encore, les contraintes naturelles et démographiques?

Cet ouvrage rappelle d'abord ces contraintes démographiques, climatiques et environnementales qui pèseront sur la disponibilité de ressources à l'horizon 2050, et traite ensuite des facteurs d'évolution de la demande alimentaire, des moyens techniques et économiques d'y faire face, et enfin des conditions d'un équilibre possible. Une synthèse est proposée en début de volume.

Des recommandations y sont faites, destinées aux pouvoirs publics français pour les éclairer sur leur politique nationale et internationale, mais aussi à la société civile, qui est concernée car les problèmes ne sont pas seulement scientifiques ou technologiques: ils mettent aussi en jeu les comportements individuels des producteurs et des consommateurs. Trois domaines où il faut agir sans tarder sont mis en valeur: la nutrition et les habitudes alimentaires, puis la démographie, et enfin l'économie mondiale et le commerce international. Les recommandations portent ensuite sur la production agricole et les questions d'environnement, puis sur la prévention, l'anticipation et la gestion des situations de crise, hélas quasi inévitables.

Potentiellement, nous possédons la technologie pour nourrir aujourd'hui 6,9 milliards d'habitants et pourtant nous n'y arrivons pas équitablement. Demain, nous aurons peut-être les technologies pour nourrir 9 milliards d'habitants, mais y parviendrons-nous mieux? Le risque existe de voir, du fait de la non mise en place des politiques adéquates à toutes les échelles, le nombre de sous-alimentés continuer à croître et franchir la barre des deux milliards... ■

Le Rapport d'étape du groupe de travail de l'Académie des sciences : Solidarité-Japon

Présentation par **Alain Carpentier**
Président de l'Académie des sciences

« **L**e 11 mars 2011, le district Nord-Est du Japon a été frappé par un tremblement de terre massif suivi d'un tsunami majeur et d'une série d'accidents à la centrale nucléaire de Fukushima avec fuites d'éléments radioactifs ». Tel est le message que le professeur Kanazawa, président du Science Council of Japan (SCJ) adressa quelques jours après la catastrophe à ses collègues, présidents des académies des sciences étrangères, ajoutant qu'il nourrissait l'espoir que ces académies aideraient à la réhabilitation nécessaire. Le hasard fait que, dix jours plus tard, une délégation japonaise du SCJ était accueillie par notre académie dans le cadre de la réunion du G8-G20 organisée cette année par notre pays. Ce fut l'occasion de s'informer sur la situation à Fukushima et d'étudier l'aide que notre pays pourrait apporter à un pays ami dont la haute réputation en matière scientifique, singulièrement dans le domaine nucléaire, est depuis longtemps établie. Ainsi naquit l'idée de former au sein de l'Académie des sciences un groupe de travail avec pour mission d'analyser les événements survenus au Japon, de faire le point sur les risques sismiques et nucléaires en France et outre-mer, et d'en tirer les conclusions qui s'imposent, sachant bien les limites d'une telle réflexion dans un contexte en pleine évolution et qui le restera pendant plusieurs années.

Le groupe de travail, immédiatement constitué, comprenait les meilleurs spécialistes, académiciens ou experts des grandes institutions concernées (CEA, CSN, CNES) répartis en trois sous-groupes correspondant aux trois composantes – sismique, nucléaire et médicale – de ce drame. Bien qu'interdépendantes à bien des égards, ces composantes avaient paru suffisamment bien individualisées pour justifier des études préalables séparées. Chaque sous-groupe, confié à un ancien président de

l'Académie des sciences¹, garant de la haute tenue des débats, bénéficia d'informations venant des instances scientifiques japonaises et françaises et aussi des avis de nombreux experts consultés. Dans l'ensemble, les membres des groupes de travail ont eu pour souci permanent de répondre non seulement aux questions scientifiques les plus ardues mais aussi aux questions que le public se pose. De même qu'il y a eu un « avant » et un « après » Tchernobyl, il y aura un « avant » et un « après » Fukushima. L'après Fukushima naîtra de la réflexion que doivent engager les instances scientifiques internationales à l'appel du Scientific Council of Japan.

La contribution de l'Académie des sciences est l'objet d'un rapport d'analyse et de propositions d'actions à entreprendre. À ce stade, on ne doit pas s'attendre à y trouver les réponses à toutes les questions qui se posent. Bien des incertitudes demeurent, concernant notamment le traitement des eaux, la réhabilitation des sols, la réintégration des populations déplacées, la sécurité alimentaire, l'organisation optimale des soins, la gestion des mouvements de population dans des circonstances extrêmes... Toutefois, si le rapport du sous-groupe médical est encore en cours d'élaboration en raison de l'avalanche de nouvelles informations qui chaque semaine viennent enrichir le dossier, les rapports des sous-groupes sismique et nucléaire ont paru suffisamment aboutis pour être publiés en l'état sur le site de l'académie des sciences². Ils ont été adressés à la communauté scientifique internationale, pour contribuer à la réflexion commune, et tout spécialement au Japon, en témoignage de solidarité ■

1 Jacques Friedel : sous-groupe sismique, Édouard Brézin : sous-groupe nucléaire, Étienne-Émile Baulieu et Alain-Jacques Valleron : sous-groupe médical.

2 La composition des sous-groupes est donnée sur le site de l'Académie et les rapports sismique et nucléaire peuvent être consultés sur le site : <http://www.academie-sciences.fr/activite/rapport/rads0611.htm>

Avec la sélection par *Investissements d'avenir*
de son ambitieux projet

“*Des Maisons pour la science et la technologie
au service des professeurs*”

l'Académie des sciences donne un nouvel élan à l'enseignement

Le projet “*Des Maisons pour la science et la technologie au service des professeurs*”, porté par l'Académie des sciences, vient d'être sélectionné par le gouvernement au titre du programme *Investissements d'avenir* – action *Pour le développement de la culture scientifique et technique et l'égalité des chances*. Programmé sur 5 ans (2012-2016) et doté par l'État de 8 millions d'euros, ce projet met en place une stratégie ambitieuse d'accompagnement des professeurs enseignant les sciences de la nature, les mathématiques et la technologie à l'école primaire et au collège, là où se joue l'avenir des élèves. L'action pédagogique, initiée et conduite par l'Académie des sciences depuis 1996 avec *La main à la pâte* sous l'impulsion de Georges Charpak, Pierre Léna et Yves Quéré, change désormais d'échelle.

Au sein de ces Maisons régionales, les professeurs - écoles et collèges -, acteurs de leur développement professionnel, se rapprocheront de la science et de la technique vivantes pour une évolution de leur pédagogie au bénéfice de tous les élèves. Ces Maisons s'ouvriront dans des universités en lien étroit avec les rectorats, ainsi qu'avec les associations de professeurs, les organismes de recherche, les entreprises, les collectivités territoriales.

Un Centre national, prolongement et extension de l'actuelle structure de la Délégation à l'éducation et à la formation de l'Académie des sciences, coordonnera l'action locale des Maisons régionales, tout en poursuivant le développement du réseau national, européen et international de *La main à la pâte*, construit autour de la curiosité, de l'observation et du raisonnement chez les jeunes.

Ce projet s'est bâti avec l'École normale supérieure (Paris) et l'École normale supérieure de Lyon, les six

universités et rectorats qui se sont portés candidats s'engageant à fournir les ressources nécessaires avec le soutien de leur région, la Fondation Mérieux et les entreprises Michelin, Saint-Gobain et Total. Les fonds de concours prévus par l'ensemble de ces partenaires sont d'un montant au moins égal à la dotation d'Investissements d'avenir, ce qui permettra la création des premières Maisons dès 2012. Pour donner corps à ces objectifs et les inscrire dans la durée, l'Académie des sciences met en place une Fondation de coopération scientifique avec les deux Ecoles normales supérieures (Paris et Lyon).

La présente décision du Premier ministre fait écho aux préoccupations majeures exprimées par l'Académie des sciences sur *La formation continue des professeurs enseignant les sciences* (voir l'Avis de novembre 2010). L'Académie des sciences apportera ainsi aux ministères en charge de l'éducation nationale et de l'enseignement supérieur un partenariat exigeant pour repenser cette formation.

Voir sur le site de l'Académie des sciences : http://www.academie-sciences.fr/activite/enseign/ia_0911.htm

- la plaquette du projet porté par l'Académie des sciences ;
- la présentation d'une Maison régionale ;
- un exemple d'offres de formation continue du Centre national et des Maisons régionales ;
- la composition du Comité à l'origine du projet.

Contact presse : Académie des sciences Délégation à l'Information Scientifique et à la Communication Bernard Meunier, Membre de l'Académie des sciences, Délégué.

Marie-Laure Moinet, chargée des relations avec la presse - presse@academie-sciences.fr

Dans la revue *Les Comptes Rendus de l'Académie des sciences*, série Chimie, parution d'un nouveau numéro thématique

Chimie verte et chimie durable¹

Armand Lattes et Isabelle Rico-Lattes

UMR 5623, laboratoire des IMRCP, université Paul-Sabatier, Toulouse.

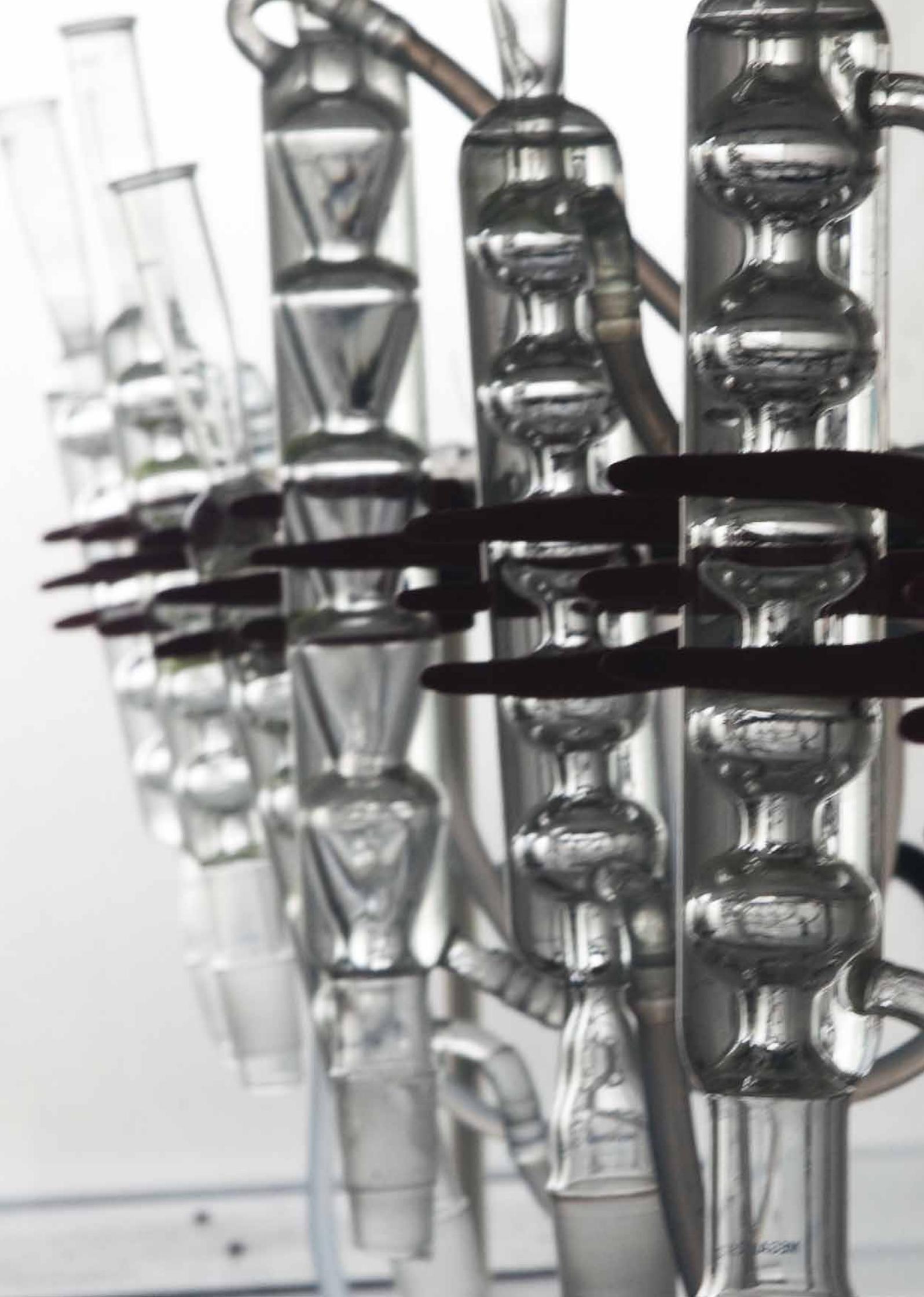
Le concept de Chimie verte a été introduit au début des années 1990 par l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) pour « promouvoir, en chimie, les technologies innovantes qui permettent de réduire ou éliminer la production de substances dangereuses lors de la conception, l'industrialisation et l'utilisation de principes les plus produits chimiques ». En 1998, P.C. Anastas et J.C. Warner ont proposé 12 principes de la « Chimie verte » qui aident à montrer comment cet objectif peut être atteint. Ce numéro spécial des C.R. Chimie est consacré à cet important sujet qui recouvre la plupart des domaines de la chimie. Depuis plus de 20 ans, ce champ a produit des milliers de publications scientifiques, aussi n'est-il pas possible de présenter une information complète dans un numéro de cette dimension. Nous avons choisi de présenter quelques contributions

européennes aux principes fondamentaux et les plus importants de la « Chimie verte » :

- synthèses vertes,
- catalyse et catalyseurs,
- substituts aux solvants organiques,
- produits verts,
- technologie verte,
- chimie et environnement.

En guise de conclusion, et pour illustrer le rôle de ce sujet, nous voudrions rappeler les motivations qui ont accompagné le prix Nobel 2005 décerné à Yves Chauvin, Robert Grubbs et Richard Schrock : « Ceci représente un grand pas en avant pour la Chimie verte par la réduction de résidus potentiellement dangereux grâce à une production plus élégante. La métathèse est un exemple de l'importance de la science de base appliquée au bénéfice de l'homme, de la société et de l'environnement » ■

¹ UMR 5623, laboratoire des IMRCP, université Paul-Sabatier, Toulouse.







Publication de l'Académie
des sciences

23, quai de Conti 75 006 PARIS
Tél. : 01 44 41 43 68
Fax : 01 44 41 43 84
[http : www.academie-sciences.fr](http://www.academie-sciences.fr)

Directeur de publication
Jean-François Bach

Directoire
Jean-François Bach
Catherine Bréchnignac

Rédacteur en chef
Paul Caro

Secrétariat général
de la rédaction
Marie-Christine Brissot

Conception
& réalisation graphique
Nicolas Guilbert

Photographies & illustrations
couv. CNRS photothèque;
p. 1, 7, 31, Académie; p. 27 CERN,
p. 3, 5, 11, 14, 19, 21, 23-24, 25, 36-37
Nicolas Guilbert

Comité de rédaction
Jean-François Bach, Édouard Brézin,
Pierre Buser, Paul Caro, Alain Carpentier,
Pascale Cossart, Anne Fagot-Largeault,
Jean-Pierre Kahane, Nicole Le Douarin,
Jacques Livage, Bernard Meunier,
Philippe Taquet

Photogravure & impression
Edipro/PrintreferenceTM
01 41 40 49 00
n° de C.P. : 0108 B 06337
ISSN 2102-5398

Texture de défaut dans un film
suspendu de cristal liquide
à la transition de phase
smectique-C cholestérique.
L'objectif est de comprendre
le rôle des défauts topologiques
dans les films suspendus
de cristaux liquides.

UPR8641 - Centre de recherches Paul
Pascal (C.R.P.P) - PESSAC
© CNRS Photothèque/CRPP -
Philippe Cluzeau, Pavel Dolganov