

# Chimie intégrative et approches systémiques : vecteurs de la seconde « énergie-morphose »

Clément Sanchez

**T**out est chimie : nous-mêmes comme notre environnement ! La chimie est en fait la science de l'assemblage des atomes, une science qui étudie aussi leur réactivité et celle des réseaux qui en résultent. Ainsi, les édifices les plus complexes, y compris ceux des organismes vivants, relèvent quelque part de cette discipline. D'un autre point de vue, la chimie est duale. En effet, elle soulève nombre de questions fondamentales mais apporte aussi des réponses qui se concrétisent souvent par des applications qui font partie de notre quotidien. La chimie se situe donc nécessairement au cœur des grands défis sociétaux tels que le maintien d'un environnement de qualité, l'alimentation, la médecine, l'eau et l'énergie...

L'un des grands défis, dans lequel nous sommes fortement engagés, concerne la transition énergétique. Le passage d'une énergie basée sur le pétrole, le gaz et le nucléaire de première génération à des énergies décarbonées, douces et sécurisées. Cette transition lente et difficile demandera environ une cinquantaine d'années et sa planification nécessite de corrélérer des avancées, voire des ruptures scientifiques indispensables, avec le contexte géopolitique et l'économie. Le colloque SCF'15, qui s'est tenu à Lille en juillet 2015, et ce double numéro de *L'Actualité Chimique*, tous deux consacrés à la transition énergétique, nous ont permis de faire une analyse et un bilan sans concession de la situation en 2016. Cette analyse structurée en sept grands thèmes – Conversion et stockage de l'énergie ; Chimie bioinspirée pour l'énergie ; De la lumière à l'énergie ; Matériaux : quels défis pour les énergies renouvelables ? ; Efficacité énergétique ; L'énergie nucléaire aujourd'hui et demain : chimie, matériaux et systèmes ; Biomasse et fossile : quel avenir pour les chimies du carbone ? –, très bien illustrée par des travaux scientifiques et technologiques de qualité, illustre l'étendue des interfaces entre les différentes facettes de la chimie.

Une analyse rapide du contenu de cet ouvrage prouve qu'il nous semble à tous primordial d'intensifier la recherche scientifique et technologique sur le développement des énergies renouvelables et sur les mécanismes et procédés de transformation (physiques, chimiques, biologiques) de ces énergies en vecteurs utilisables (électricité, carburant, gaz). Il serait ainsi essentiel de trouver des processus de stockage originaux et efficaces, des procédés de transformation des photons et/ou des électrons en carburants performants, et si possible, de coupler ces procédés avec le recyclage du CO<sub>2</sub>. Cela nécessite non seulement le développement de matériaux en photo- et électrocatalyse associé à une meilleure compréhension de leur comportement, mais

aussi la mise en œuvre de vraies recherches fondamentales sur les catalyseurs classiques.

Les énergies renouvelables non intermittentes comme la biomasse (ou la récupération des déchets) représente une filière prometteuse, et l'importance d'intensifier la recherche pour la production efficace de biomasse/biogaz et pour sa transformation en vecteur énergétique transportable doit être soulignée. Combiner efficacement biomasse/biogaz et électricité renouvelable est une solution déjà envisageable, et dans ce contexte, il faut répéter à nouveau que les recherches fondamentales sur les catalyseurs sont de toute première importance. Par ailleurs, en biomasse, l'utilisation de micro-organismes génétiquement modifiés, plus sélectifs et plus compatibles, qui nécessitent des surfaces d'échange minimales, est une piste qui ne doit pas être négligée.

Nous sommes aussi conscients que cette transition vitale pour nos sociétés nécessitera pendant encore un certain temps de poursuivre la production d'énergie nucléaire. Il nous semble cependant important de mettre en place les moyens et les actions qui permettront de transformer cette dernière. Le passage des réacteurs à neutrons thermiques aux réacteurs à neutrons rapides alimentés en plutonium combustible peut être une solution à moyen terme. Une orientation future à échelle plus éloignée, mais plus acceptable du point de vue écologique, pourrait être basée sur le passage de la fission à la fusion au cours de laquelle le tritium et le deutérium conduisent à la formation d'hélium, de neutrons et d'une grande quantité d'énergie. Ce développement prometteur conduirait à la production de carburants en quantité illimitée, avec un minimum de déchets. Il impose cependant de relever des défis colossaux dans le domaine de la science des matériaux.

L'ensemble des thématiques abordées fait apparaître de manière évidente à quel point les recherches fondamentales sur les matériaux, les catalyseurs et les procédés doivent être développées de façon très urgente. Il est en effet indispensable de trouver et de développer rapidement des matériaux performants et des procédés optimum pour « récolter » des énergies renouvelables en toute sécurité, avec une meilleure efficacité énergétique et économique.

Les propriétés finales des matériaux et leur robustesse dépendent fortement de la qualité du couplage entre leur chimie et leurs procédés d'élaboration. De « véritables défis scientifiques » sont à relever pour comprendre les processus complexes mis en jeu et leur modélisation. Cette démarche nécessite l'utilisation et la mise au point de méthodes

physiques de caractérisation, modernes, sensibles et performantes, au moyen de diverses sources de rayonnement et de microscopies environnementales de haute résolution, ou encore de spectroscopies utilisant le rayonnement synchrotron, etc. En particulier, mieux comprendre ces systèmes complexes pour mieux maîtriser leur mise en œuvre nécessite de concevoir et de mettre en place des expériences de caractérisation *in situ/in operando* qui permettent d'analyser tous les états de la matière, depuis l'état initial (la molécule ou le composé) jusqu'à l'état final (le matériau en cours d'utilisation). Ces méthodologies de conception difficile et qui nécessitent des moyens lourds sont incontournables si l'on veut avancer sur le chemin de la connaissance et permettre l'élaboration raisonnée de nouveaux matériaux et systèmes, de plus en plus bioinspirés, tirant parti d'une chimie douce hybridante.

Les stratégies qui intègrent « les chimies » moléculaire, supramoléculaire, macromoléculaire et des solides, la catalyse, la physico-chimie au sens large avec ses composantes matière molle, photo- et/ou électrochimiques, les méthodologies modernes de caractérisation et l'ingénierie des procédés sont actuellement à la base d'un fort courant de recherche et de réflexion qui donne naissance à une chimie dite « intégrative ». Ces approches systémiques sont indispensables à la réalisation des grandes ruptures technologiques du futur. Un sujet de recherche ambitieux et d'une telle ampleur nécessite de mettre en place des collaborations nationales et internationales constructives afin d'augmenter les interfaces entre les différents domaines disciplinaires impliqués.

Une énergie-morphose ne peut être efficace que si elle est associée à une métamorphose sociétale [1] et les grandes transitions sociétales se sont souvent réalisées sur plusieurs générations. Ce problème se pose pour la transition énergétique mais aussi pour les grands problèmes de la société. Rappelons que les constantes de temps longues de nombreux domaines de la recherche ne sont pas en phase avec celles beaucoup plus courtes des mondes politique, financier et numérique.

En effet, la recherche scientifique est une démarche à long terme qui ne peut être soumise à l'exigence de feuilles de

route qui ne permettent ni de garantir ni de planifier l'émergence de vraies ruptures scientifiques. Comme l'illustre cette phrase du grand biologiste François Jacob : « *L'imprévisible est dans la nature même de l'entreprise scientifique. Si ce que l'on va trouver est vraiment nouveau, alors c'est par définition quelque chose d'inconnu à l'avance.* » La prise de risque est un acte essentiel de la vie du chercheur. Les chimistes, à la fois architectes et maçons de la matière, sauront concevoir et élaborer des matériaux originaux pour apporter encore plus de réponses innovantes aux préoccupations sociétales, actuelles et futures, à la condition que les moyens soient donnés à la recherche fondamentale. Je suis convaincu que la chimie, véritable corne d'abondance nourrie par la créativité des scientifiques qui se consacrent à cette science, impactera positivement le domaine de l'énergie. Ces recherches rendront « *accessibles des étoiles aujourd'hui inaccessibles* ». Je sais bien qu'un optimiste peut se tromper, mais c'est souvent lui qui a raison !

Pour terminer, je souhaite remercier l'ensemble des collègues qui ont permis la réalisation de cet événement fédérateur autour de la thématique « Énergie » et l'élaboration de ce numéro de *L'Actualité Chimique*, tribune et vecteur de communication de qualité de notre discipline. En particulier, je souhaite remercier Stanislas Pommeret, président de l'inter-division Énergie de la SCF et président de SCF'15, ainsi qu'Hervé Toulhoat, membre du Bureau de l'inter-division Énergie et membre du Conseil scientifique de SCF'15, pour leur très forte implication dans la conception et l'organisation de cet événement et la coordination de ce numéro spécial. Leur contribution a été déterminante.

[1] De Vulpian A., *Éloge de la métamorphose : en marche vers une nouvelle humanité*, Éditions Saint Simon, 2016.



**Clément Sanchez**, président du Comité scientifique de SCF'15 (Lille, 4-9 juillet 2015), est professeur au Collège de France\* et membre de l'Institut.

\* Laboratoire de Chimie de la Matière Condensée de Paris (LCMCP), UPMC/CNRS/Collège de France, Équipe Matériaux hybrides et nanomatériaux, 11 place Marcelin Berthelot, F-75231 Paris. Courriel : clement.sanchez@upmc.fr



## Jean Normant nous a quittés

C'est avec une grande émotion que lors de la finalisation de ce numéro, nous avons appris la disparition, le 9 juin dernier, de Jean Normant, chimiste de renommée mondiale, professeur émérite à l'Université Pierre et Marie Curie et membre de l'Académie des sciences.

La Société Chimique de France et *L'Actualité Chimique* s'associent à la tristesse de sa famille, de ses amis, et de tous ceux qui l'ont connu.