

# Le rôle stratégique de la chimie dans la transition énergétique

Pierre Papon

<b>Résumé</b>	La transition énergétique est à l'ordre du jour depuis une bonne dizaine d'années déjà et ses principaux objectifs sont inscrits dans une loi qui sera votée par le Parlement en France. Les grandes thématiques de l'énergie (économies d'énergie, émergence des énergies renouvelables, avenir du nucléaire, etc.) appellent presque toutes des progrès scientifiques et techniques et la recherche va jouer un rôle clé pour faire sauter des verrous techniques. Après avoir rappelé les conclusions de scénarios pour la demande énergétique à l'horizon 2050 en France, cet article montre que la recherche en chimie a un rôle stratégique pour préparer l'avenir : mise au point de nouveaux matériaux pour l'énergie solaire, les batteries et les catalyseurs, procédés pour la production de biocarburants, combustibles nucléaires, recyclage de métaux. La chimie doit figurer en bonne place dans une stratégie énergétique à long terme.
<b>Mots-clés</b>	<b>Transition énergétique, biocarburants, biologie synthétique, catalyseurs, gaz de schiste, matériaux, nucléaire, recyclage, solaire.</b>
<b>Abstract</b>	<b>The strategic role of chemistry in the energy transition</b> The energy transition has been on the political agenda for a good ten years now and its main objectives will be embedded in a law which will be passed by Parliament in France. The main issues for energy (energy savings, emergence of renewable energy, future of nuclear power, etc.) call almost all scientific and technical developments and research will certainly play a key role to overcome major technical obstacles. After recalling the conclusions of scenarios for energy demand in 2050 in France, this article shows that chemical research should play a strategic role for the future: development of new materials for solar energy, batteries and catalysts, processes for biofuels production, nuclear fuels, metals recycling. Chemistry should be considered as a key player in a long-term energy strategy.
<b>Keywords</b>	<b>Energy transition, biofuels, synthetic biology, catalysts, shale gas, materials, nuclear, recycling, solar.</b>

Deux articles récents, parus dans le même numéro de *Nature*, mettent bien en évidence le rôle clé de la chimie dans des processus industriels ouvrant de nouvelles voies pour la production de carburants synthétiques. Le premier décrit une avancée dans la production d'éthanol par voie électrochimique à partir du monoxyde de carbone et de la vapeur d'eau en utilisant un catalyseur constitué par des nanoparticules de cuivre [1]. Le second fait état d'un projet industriel au Royaume-Uni, baptisé GreenSky, qui a pour objectif de traiter chaque année 500 000 tonnes de déchets, dans une usine à Londres, pour produire d'ici deux ans 60 000 tonnes de kérosène et une quantité équivalente de gazole. GreenSky utilisera une voie thermo-chimique en procédant en deux temps. Les déchets sont tout d'abord volatilisés en les portant à une température de 3 500 °C avec une torche à plasma et sont immédiatement transformés en un gaz de synthèse, un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Le gaz est alors introduit dans un réacteur où il subit une bonne vieille réaction de Fischer-Tropsch avec un catalyseur constitué par des nanoparticules de cobalt [2]. Un mélange d'hydrocarbures sort du réacteur et est ensuite raffiné pour produire des carburants, notamment du kérosène. L'efficacité énergétique d'un tel procédé reste pour l'heure problématique [3]. De nombreuses techniques dérivées de la chimie permettront certainement de produire à l'avenir des carburants à partir de matières premières renouvelables.

La transition énergétique est à l'ordre du jour depuis une bonne dizaine d'années déjà et elle a fait l'objet d'un débat en France en 2013, dont les principales conclusions sont inscrites dans une loi de programme votée qui sera par le Parlement en fin d'année. Observons que si la nécessité de diminuer fortement notre consommation

d'énergies fossiles, non renouvelables, n'est pas contestée (elles représentent environ les deux tiers de notre consommation d'énergie finale), un consensus ne s'est pas dégagé sur des objectifs clairs où le souhaitable et le possible iraient de pair. Remarquons aussi que si le rôle de la R & D est évoqué dans les conclusions de ce débat, il est loin d'être considéré comme central alors que les grandes thématiques de l'énergie (économies d'énergie, émergence des énergies renouvelables, avenir du nucléaire, etc.) appellent presque toutes des progrès scientifiques et techniques. Qui plus est, certaines filières d'avenir ne peuvent être développées qu'au prix de ruptures qui peuvent changer la donne énergétique à long terme comme ce fut le cas à plusieurs reprises au cours de l'histoire (avec l'avènement du pétrole ou du nucléaire par exemple). Comment peut-on stimuler et orienter la recherche pour faire sauter des verrous et prendre des paris pour l'avenir ? Il est important de tenter de répondre à cette question en mettant un coup de projecteur sur quelques grands chantiers et sur la contribution que peut apporter la chimie dans leur avancement.

Auparavant, il n'est pas inutile de tirer les enseignements des très nombreux scénarios énergétiques qui ont été envisagés pour la France à l'occasion du débat sur la transition énergétique. On se limitera à ceux qui ont été proposés par l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie (ANCRE), qui coordonne la stratégie de R & D en matière d'énergie des principaux organismes de recherche publics et des universités [4].

L'ANCRE a proposé trois scénarios qui permettraient à la France de diviser par un facteur 4 ses émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. Ils décrivent à la fois des évolutions contrastées de

la demande et du mix énergétique final. Le premier scénario, « Sobriété renforcée » (SOB), suppose que les comportements individuels et collectifs permettront de diminuer de façon drastique la demande primaire et finale (- 41 % de baisse pour celle-ci), au prix d'un programme très important de rénovation thermique des bâtiments et du développement des énergies renouvelables. Le scénario « Décarbonisation par l'électricité » (ELE) mise sur un effort d'efficacité énergétique couplé à un accroissement important des usages de l'électricité, notamment dans les transports (45 % de mobilité électrique en 2050). Enfin le troisième scénario, « Vecteurs diversifiés » (DIV), privilégie également l'efficacité énergétique avec une utilisation importante de la biomasse (notamment des biocarburants) et de la chaleur produite par cogénération. Dans les scénarios ELE et DIV, la demande finale d'énergie chute de 27 %, et dans les trois scénarios, la part de l'électricité produite par le nucléaire passe à 50 % en 2025 (75 % aujourd'hui).

L'ANCRE a également proposé une stratégie de recherche permettant de faire sauter les verrous scientifiques et techniques qui risquent de bloquer la transition énergétique (la mise au point de batteries performantes par exemple).

La plupart des scénarios, ceux de l'ANCRE comme ceux d'autres organismes nationaux et internationaux, permettent d'identifier les domaines où des avancées, voire des « ruptures », sont indispensables. Sans faire un inventaire à la Prévert de ces domaines, on constate ainsi que l'amélioration des rendements des moteurs thermiques et la production de carburants alternatifs aux produits pétroliers – les biocarburants et l'hydrogène principalement – se trouvent en bonne place. Quatre autres chantiers concernent l'électricité :

- son stockage par les batteries et au moyen des piles à combustible qui est un point clé pour le développement des énergies renouvelables (l'éolien et le solaire qui sont des énergies intermittentes) ;
- un « nouveau solaire » avec des matériaux nouveaux offrant un meilleur rendement que le silicium (d'autres semi-conducteurs, notamment des matériaux organiques), mais ouvrant aussi la voie à une chimie solaire ;
- le nucléaire dit de quatrième génération (mettant en œuvre des réacteurs surgénérateurs au plutonium ou au thorium et un fluide caloporteur tel que le sodium liquide, un alliage métallique liquide ou l'hélium) fonctionnant dans de bonnes conditions de sûreté ;
- les réseaux dits « intelligents » capables d'assurer le transport et la distribution d'électricité produite à la fois par des grandes centrales fonctionnant en quasi-permanence et des installations intermittentes comme des centrales solaires ou des fermes éoliennes [5].

Enfin, beaucoup de rapports de prospective soulignent la nécessité de faire sauter le verrou que constitue l'insuffisance actuelle des moyens physico-chimiques économiques pour assurer la séparation du CO<sub>2</sub> (et son stockage) émis par des centrales thermiques.

La chimie est appelée à jouer un rôle clé dans la plupart de ces chantiers de la transition énergétique. Elle travaille en quelque sorte sur cinq fronts :

- la relation entre les propriétés (par ex. la conductivité électrique) et les structures des matériaux (les électrodes de batteries notamment) ;
- la synthèse de matériaux permettant de trouver des propriétés nouvelles et l'amélioration des performances de certains d'entre eux (comme les cellules solaires) ;
- la cinétique de réactions *via* la catalyse (produire de l'hydrogène et des biocarburants par ex.) ;
- l'alliance avec la biologie pour réaliser des synthèses de génomes de cellules afin de produire directement des biocarburants ;
- de nouvelles réactions consommant moins d'énergie ou permettant le recyclage de matériaux (le recyclage de terres rares ou les cycles du plutonium et du thorium pour le nucléaire).

Les travaux publiés récemment dans la littérature scientifique illustrent bien les capacités de la chimie à faire sauter des verrous ; les deux articles que nous avons cités en introduction en sont d'ailleurs des exemples. Sans être exhaustifs, contentons-nous de donner quelques coups de projecteurs sur des avancées potentielles. S'agissant du solaire photovoltaïque, la préoccupation est d'abaisser le coût des cellules et de trouver de nouveaux matériaux

avec des rendements élevés (le rendement commercial des cellules au silicium plafonnant dans une fourchette de 20-25 %).

La chimie du solide a ainsi ouvert une nouvelle voie avec la synthèse d'un matériau semi-conducteur de la famille des pérovskites (en général ce sont des oxydes métalliques), un organométallique composé d'un halogène (chlore, iode ou brome) et d'un métal comme le plomb ou l'étain déposé en phase vapeur sur un support [6]. Le rendement de ces cellules est actuellement de 15 % avec un voltage supérieur à celui du silicium. Cette nouvelle filière qui est testée a l'avantage d'être facile à utiliser, éventuellement en tandem avec le silicium car les pérovskites n'absorbent pas les mêmes photons.

De même, les plastiques semi-conducteurs (comme le transpolyacétyle) sont une autre filière de cellules sur laquelle travaillent les chimistes. Leur rendement ne dépasse pas 10 % pour l'heure, mais leur coût de production est moins élevé que celui du silicium. L'objectif est d'augmenter la mobilité des électrons dans ces matériaux pour élever le rendement (il faut éviter la présence de microcristaux ou d'agrégats dans le matériau avec des polymères à longue chaîne). Des polythiophènes (contenant du soufre) à longue chaîne ouvrent aussi des perspectives intéressantes.

La structure des matériaux (électrodes et électrolytes) joue un rôle tout aussi essentiel dans les batteries et les piles à combustible destinées aux véhicules électriques, voire au stockage « en masse » de l'électricité dans des installations adaptées à des sources intermittentes. C'est le cas pour les batteries lithium-ion qui ont fait une percée, mais aussi de celles mettant en œuvre le sodium et le soufre [7]. La chimie des matériaux, couplée à l'électrochimie, doit permettre d'améliorer les performances des batteries électrochimiques et des supercondensateurs, en particulier leur densité énergétique et leur capacité à subir de très nombreux cycles de charge et de décharge.

La vitesse des réactions chimiques est souvent un point clé dans le fonctionnement de systèmes énergétiques. C'est le cas en particulier pour les piles à combustible à hydrogène des moteurs électriques qui fonctionnent à température ambiante et qui utilisent le platine comme catalyseur ; la chimie doit trouver une alternative aux métaux platinoides qui sont coûteux, des pistes organiques peuvent s'avérer intéressantes (par exemple des phthalocyanines de cobalt ou de fer). Il reste bien sûr à résoudre le problème de la production de l'hydrogène (soit par électrolyse de l'eau soit par voie thermochimique à partir du gaz naturel). La voie photochimique, utilisant l'électricité photovoltaïque pour décomposer la vapeur d'eau (ce que savent faire les plantes), est une possibilité ; là encore, il faut un bon catalyseur. Plusieurs pistes sont explorées, en particulier des catalyseurs à base de sulfure de molybdène. Une alternative consisterait à utiliser la chaleur solaire, dans un four par exemple ; un laboratoire américain a ainsi mis au point récemment un nouveau catalyseur pour décomposer la vapeur d'eau qui est un oxyde de manganèse fonctionnant dans un cycle à 1 000-1 400 °C [8].

La chimie intervient dans d'autres secteurs de l'énergie en coopération avec la biologie. Ainsi la percée des biocarburants de deuxième génération (utilisant la biomasse lignocellulosique) et de troisième génération (la matière première est fournie par les algues) dépend-elle notamment de la possibilité de trouver des enzymes performantes pour transformer avec un bon rendement la cellulose et l'hémicellulose, et des catalyseurs pour opérer par voie thermochimique comme dans le procédé GreenSky. À très long terme, la « biologie synthétique » avec une chimie de l'ADN ouvre des perspectives intéressantes pour la fabrication de biocarburants à partir de micro-organismes génétiquement modifiés (bactéries, levures ou algues) ou dont les génomes auront été complètement synthétisés, à partir de nucléotides, et reprogrammés. Deux laboratoires coréens ont ainsi modifié deux gènes de la bactérie *Escherichia coli* qui peut produire des alcanes à chaîne courte [9].

De même, à long terme, le recyclage incontournable de métaux comme le lithium (il est effectif pour le platine) et des terres rares (le dysprosium constituant les aimants de turbines d'éoliennes et de moteurs électriques de voitures hybrides) sera-t-il crucial et mobilisera une expertise chimique.

N'oublions pas non plus que la synthèse de nombreuses molécules qui jouent un rôle clé dans la société et l'économie mondiale

est très énergivore. Il en va ainsi de l'ammoniac qui est à la base de la production d'engrais azotés utilisés massivement dans l'agriculture mondiale. Sa synthèse est réalisée à partir de l'azote atmosphérique et de l'hydrogène (produit à partir du gaz naturel) avec le procédé Haber-Bosch mis en œuvre par la BASF en Allemagne dès 1913. Ce procédé, qui donna un avantage industriel important à l'Allemagne pendant la Première Guerre mondiale, est encore largement utilisé dans le monde puisqu'environ 140 millions de tonnes d'ammoniac sont produites annuellement et cette production consomme à elle seule entre 1 et 2 % de l'énergie mondiale, ce qui est considérable. Or, dans une publication récente, deux équipes japonaises et une équipe chinoise ont annoncé avoir réalisé une percée importante. Elles ont en effet montré que la réaction de synthèse de l'ammoniac serait peut-être possible à température ambiante et à pression ordinaire avec un catalyseur qui est un composé organique avec trois atomes de titane (un trihydrure) permettant de casser la triple liaison de l'azote [10].

Rappelons enfin que le gaz naturel est une matière première importante pour l'industrie chimique et que la chimie joue un rôle essentiel dans des procédés mis en œuvre pour l'exploitation de certains gisements de gaz, notamment le gaz de schiste. Ainsi par exemple, la fracturation hydraulique utilisée pour extraire le gaz de schiste met en œuvre un liquide sous pression (de l'eau en général) qui envoie un cocktail de produits chimiques (acides, gélifiants, etc.) dans la roche mère dont l'impact environnemental peut être important. La mise au point de nouveaux procédés passe sans doute par l'élaboration de composés chimiques moins agressifs [11].

La transition énergétique est une entreprise de longue haleine qui prendra très probablement au minimum trois à quatre décennies. Aussi est-il nécessaire de mener en permanence une réflexion prospective permettant d'identifier à la fois les verrous techniques qu'il faut faire sauter et les ruptures qui sont en cours et qui pourraient changer la donne. Si la plupart des rapports de prospective sur les techniques du futur considèrent que l'énergie est une priorité incontournable et identifient ces verrous, rares sont ceux qui considèrent que la chimie est une voie de passage souvent obligée pour les politiques énergétiques [12].

Qui plus est, la réflexion stratégique sur les objectifs et les priorités de la R & D sur l'énergie est souvent à court terme ; c'est en particulier le cas en France, car elle prend insuffisamment en compte la nécessité de faire des paris scientifiques pour préparer l'avenir. Cette réflexion doit aussi dépasser le cadre national pour tenir compte des expériences et des initiatives prises au-delà de nos frontières. La chimie doit être partie prenante des réflexions prospectives sur l'énergie dans les agences publiques chargées de la politique énergétique, les entreprises, et bien sûr les organismes de recherche et les universités. Cela est d'autant plus nécessaire que la chimie est une science qui a été délaissée en France, où l'industrie chimique n'a pas reçu toute l'attention des pouvoirs publics qu'elle méritait. La chimie a elle-même été insuffisamment valorisée dans l'enseignement secondaire ainsi que dans nombre d'écoles d'ingénieurs [13], ce qui n'a pas contribué à rehausser le statut d'une discipline dont on s'apercevra qu'elle joue un rôle essentiel dans les stratégies énergétiques.

*NDLR : le compte rendu de la soirée de la division Chimie Industrielle de la SCF « Contribution de la chimie au développement des énergies renouvelables », co-organisée par Infchimie, qui s'est déroulée à l'IFPEN à Rueil le 5 mars dernier et à laquelle Pierre Papon a participé, est en ligne sur [www.societechimiquedefrance.fr/fr/chimie-industrielle.html](http://www.societechimiquedefrance.fr/fr/chimie-industrielle.html).*

## Notes et références

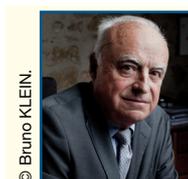
- [1] Li C.W., Ciston J., Kanan M.W., Electroreduction of carbon monoxide to liquid fuel on oxide-derived nanocrystalline copper, *Nature*, **2014**, *508*, p. 504. L'électricité peut être produite par la voie photovoltaïque.
- [2] Krieger K., Biofuels heat up, *Nature*, **2014**, *508*, p. 448. Ce procédé a initialement été mis au point dans les années 1920 en Allemagne pour la gazéification et la liquéfaction du charbon, et utilisé pendant la guerre par les Allemands et les Japonais pour produire le kérosène pour leurs avions.
- [3] On peut aussi réaliser, plus simplement, soit une pyrolyse classique des déchets à température plus basse, qui a l'inconvénient de produire des goudrons dont il faut se débarrasser, soit une gazéification directe de la biomasse à 1 000 °C, et utiliser directement le gaz pour le chauffage ou



© vectormart - Fotolia.com

la production d'électricité. Le projet GreenSky est peut-être une application du principe « pourquoi faire simple quand on peut faire compliqué ? »... mais il a le mérite de montrer que les déchets avec des traitements chimiques sont une ressource importante de matières premières pour produire des carburants synthétiques.

- [4] ANCRE, *Scénarios de l'Ancre pour la transition énergétique*, **2013**, [www.allianceenergie.fr](http://www.allianceenergie.fr)
- [5] La plupart des scénarios énergétiques font l'hypothèse d'une forte progression de la demande mondiale d'électricité à l'horizon 2050. Dans un rapport récent (*Energy Technology Perspectives 2014, Harnessing electricity potential*, IEA, Paris, mai 2014), l'Agence internationale de l'énergie (AIE) envisage trois scénarios où cette augmentation serait dans une fourchette de 80 à 130 %. L'augmentation de la mobilité électrique est un point critique de ces scénarios ; elle bute sur des verrous techniques comme les batteries et leur recharge rapide, les catalyseurs pour les piles à combustible, le recyclage des métaux (rarement évoqué...).
- [6] Liu M. *et al.*, Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapor deposition, *Nature*, **2013**, *501*, p. 395. Des semi-conducteurs comme AsGa ou CdTe sont aussi une alternative au silicium : n'absorbant pas les mêmes photons, on peut les coupler au silicium dans des cellules dont les rendements peuvent atteindre 45 % mais dont le coût est plus élevé. Les physiciens savent jouer aussi sur les nanostructures des matériaux ou d'autres phénomènes comme l'effet thermo-ionique pour augmenter les rendements. L'utilisation du cadmium, toxique, est interdite.
- [7] Bruce P.G., Freunberger S.A., Hardwick L.J., Tarascon J.-M., Li-O<sub>2</sub> and Li-S batteries with high energy storage, *Nature Materials*, **2012**, *11*, p. 19.
- [8] Muhich C.L. *et al.*, Efficient generation of H<sub>2</sub> by splitting water with an isothermal cycle, *Science*, **2013**, *341*, p. 540.
- [9] Choi Y.J., Lee S.Y., Microbial production of short-chain alkanes, *Nature*, **2013**, *502*, p. 571.
- [10] Shima T. *et al.*, Dinitrogen cleavage and hydrogenation by a trinuclear titanium polyhydride complex, *Science*, **2013**, *340*, p. 1549.
- [11] L'exploitation massive du gaz de schiste aux États-Unis donne à leur industrie chimique un avantage indéniable (énergie et matière première bon marché). Les ressources potentielles en Europe sont très mal évaluées. Voir Papon P., Le gaz de schiste : mythes et réalité, *Futuribles*, **2014**, *399*, p. 81.
- [12] Voir notamment les rapports annuels du Forum économique mondial, *The top ten emerging technology 2014* ([www3.weforum.org/docs/GAC/2014/WEF\\_GAC\\_EmergingTechnologies\\_TopTen\\_Brochure\\_2014.pdf](http://www3.weforum.org/docs/GAC/2014/WEF_GAC_EmergingTechnologies_TopTen_Brochure_2014.pdf)), de McKinsey, *Disruptive technologies* ([www.mckinsey.com/insights/business\\_technology/disruptive\\_technologies](http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/disruptive_technologies)), et du MIT, *Ten breakthrough technologies* ([www.technologyreview.com/lists/breakthrough-technologies/2013/](http://www.technologyreview.com/lists/breakthrough-technologies/2013/)), ainsi que les plans publiés en France pour promouvoir l'innovation, les 34 projets pour « La nouvelle France industrielle » du Ministère du Redressement productif, et enfin le rapport d'Anne Lauvergeon, *Un principe et sept ambitions pour la France*, publié en 2013 ([www.viameca.fr/assets/files/2030\\_Rapport\\_oct2013.pdf](http://www.viameca.fr/assets/files/2030_Rapport_oct2013.pdf)).
- [13] Des manifestations comme les Olympiades nationale de la chimie contribuent certainement à attirer l'attention des jeunes sur les potentialités de la chimie et ses métiers. C'est un effort qui, en mobilisant les milieux académiques et l'industrie, va dans le bon sens et doit être amplifié.



© Bruno Klein.

Ancien directeur général du CNRS, **Pierre Papon\*** est professeur émérite de physique thermique à l'ESPCI de Paris.

\* Courriel : [pierre.papon@wanadoo.fr](mailto:pierre.papon@wanadoo.fr)