

# La Chimie au cœur des énergies d'avenir

Bernard  
BIGOT\*

Les énergies se répartissent aujourd'hui en trois grandes catégories, dont les énergies fossiles – évidemment très liées à la chimie – qui assurent près de 82 % de la consommation mondiale d'énergie primaire et ne seront abordées que brièvement. Nous nous focaliserons sur les deux autres ressources capables de satisfaire durablement les besoins énergétiques de la planète et sur lesquelles le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) concentre ses efforts : les énergies renouvelables et – bien entendu – l'énergie nucléaire. Ci-dessous de larges extraits de l'intervention de Bernard Bigot au Colloque « Chimie et enjeux énergétiques » qui s'est tenu le 14/11/2012 à la Maison de la Chimie (Paris).

## Révisiter notre modèle énergétique...

Quels que soient nos efforts d'économie et d'efficacité énergétique, la demande mondiale d'énergie dans les décennies à venir va continuer à croître sous l'influence de deux facteurs : l'augmentation de la popu-

lation mondiale et la nécessité de mieux satisfaire les besoins de l'ensemble de cette population.

Il reste aujourd'hui dans le monde plus de 1,6 milliard d'habitants qui n'ont toujours pas accès à l'électricité (Figure 1). Dans ce contexte, il est avéré que nous ne pourrions pas satisfaire les besoins mondiaux par simple homothétie. Les énergies fos-

siles ne représentent en effet qu'un stockage intermédiaire de l'énergie solaire, mais ce stockage est particulièrement long à reconstituer. À l'origine se situe la photosynthèse, qui combine, sous l'action de la lumière solaire, le dioxyde de carbone et l'eau pour produire des carbohydrates (des biopolymères constitués de C, H et O). Enfouis dans le sous-sol, ils subissent

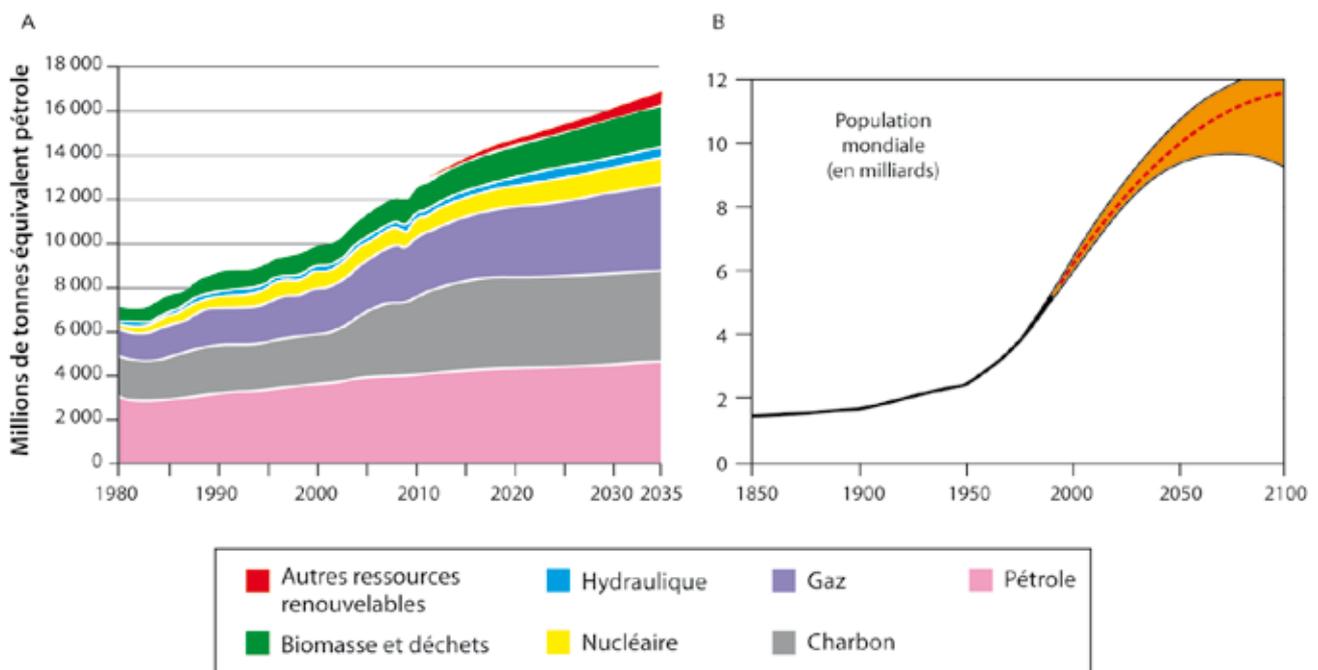


Figure 1 - Une demande mondiale en énergie croissante.

A. Prévision de l'évolution de la demande mondiale d'énergie primaire par catégorie.

B. Prévision de l'évolution prévue de la population mondiale (+ 20 % en 2035) conduisant à environ 9 milliards d'habitants en 2050.

une lente transformation chimique et biochimique pour aboutir à des produits qui sont, soit du carbone plus ou moins pur comme le charbon, soit du carbone combiné à l'hydrogène que sont les hydrocarbures. D'autre part, la raréfaction de ces produits est inéluctable. On est contraint de les chercher de plus en plus profond, leurs ressources sont de plus en plus dispersées et leur exploitation de plus en plus coûteuse.

• **Faire face à la raréfaction des sources d'énergie fossiles...**

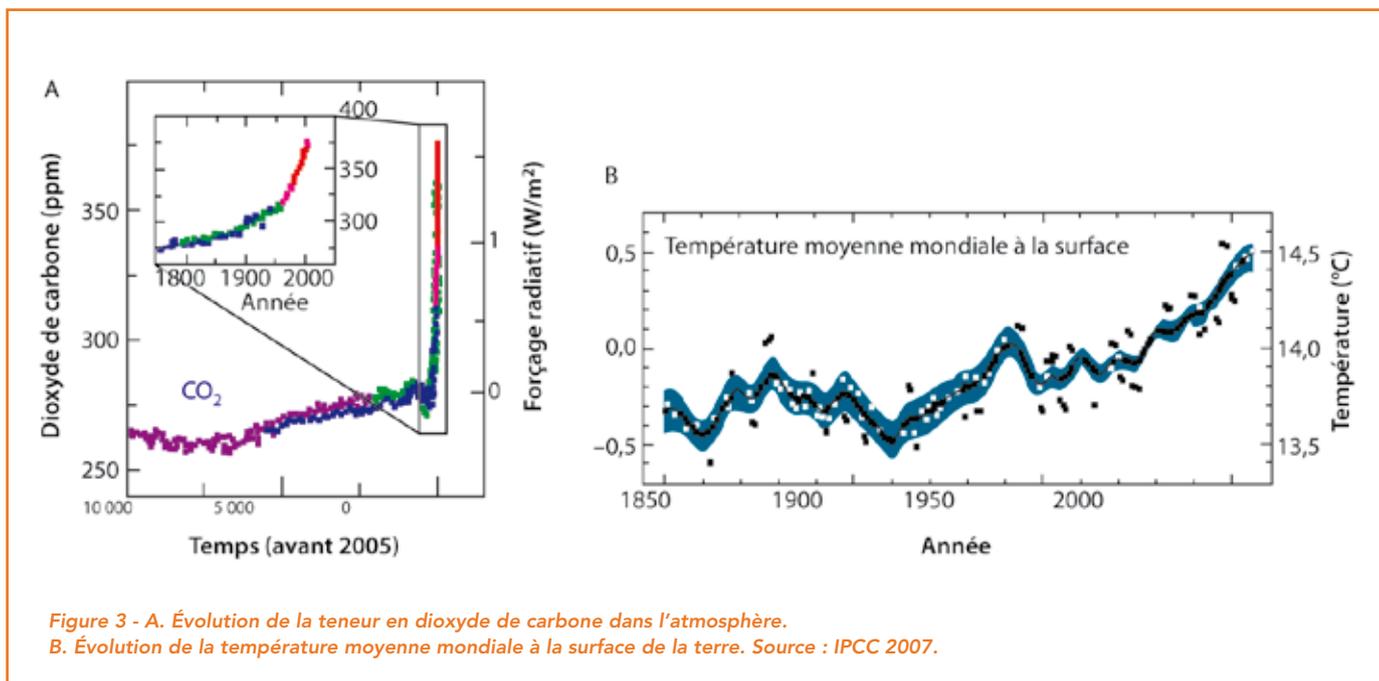
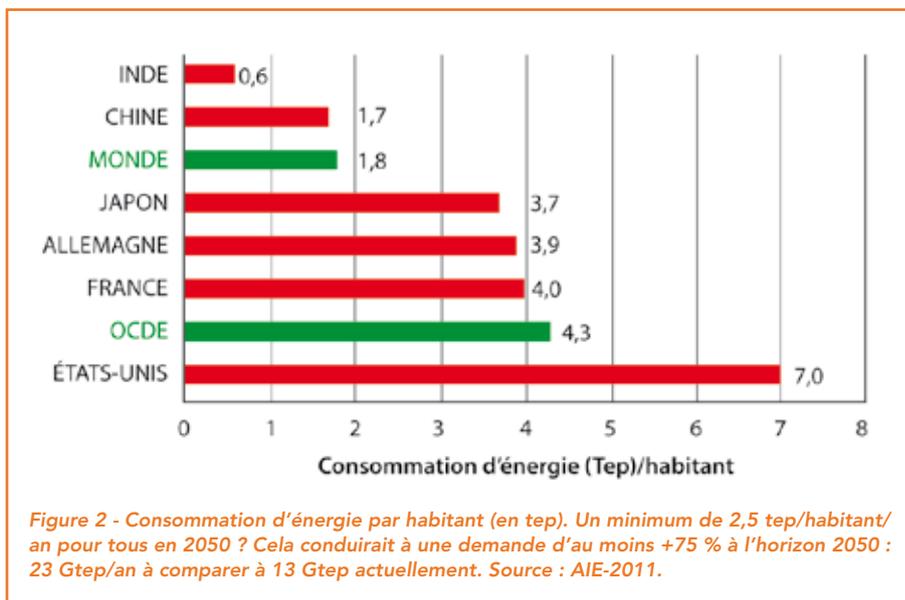
En France, entre 2005 et 2011, le prix payé pour importer les combustibles fossiles nécessaires à notre consommation annuelle a été presque multiplié par trois, passant en six ans de 23 en 2005 à 62 milliards d'euros en 2011. Ce coût est difficilement supportable sur de longues durées. En 2011 il a ainsi représenté plus de 90 % du déficit de la balance commerciale française. La disparité des consommations d'énergie par habitant (qui vont de 1 à 10/tête) selon les pays est également très forte (Figure 2). Les plus gros consommateurs mondiaux sont les Islandais avec plus de 13,6 tep/habitant/an (tep : tonne équivalent pétrole). Mais, comme ils utilisent beaucoup la géothermie, une ressource durable et abondante, leurs préoccupations sont différentes des nôtres.

On estime qu'un **développement économique et social équitable pour toute la planète exigerait une consommation minimale d'environ 2,5 tep/habitant/an**. Ce qui implique une augmentation d'au moins 75 % des besoins énergétiques mondiaux d'ici 2050.

**Et diminuer l'impact sur le climat**

Nous savons maintenant de manière sûre que la consommation massive des combustibles fossiles modifie l'environnement de la planète. La Figure 3 montre sur une période de plusieurs dizaines de milliers d'an-

nées l'évolution de la concentration du dioxyde de carbone dans l'atmosphère (Figure 3A) et l'évolution correspondante de la température (Figure 3B). Ces mesures ont été réalisées à partir de l'analyse chimique de sédiments ou de dépôts glaciaires, et sont maintenant considérées comme très fiables. On observe une augmentation significative des gaz à effet de serre dans l'atmosphère depuis le début du 19<sup>e</sup> siècle, ainsi qu'une corrélation entre l'augmentation de 40 % des émissions de CO<sub>2</sub> entre 1990 et 2009 et l'augmentation de la température. Le débat actuel est de savoir si cette corrélation est uniquement associée



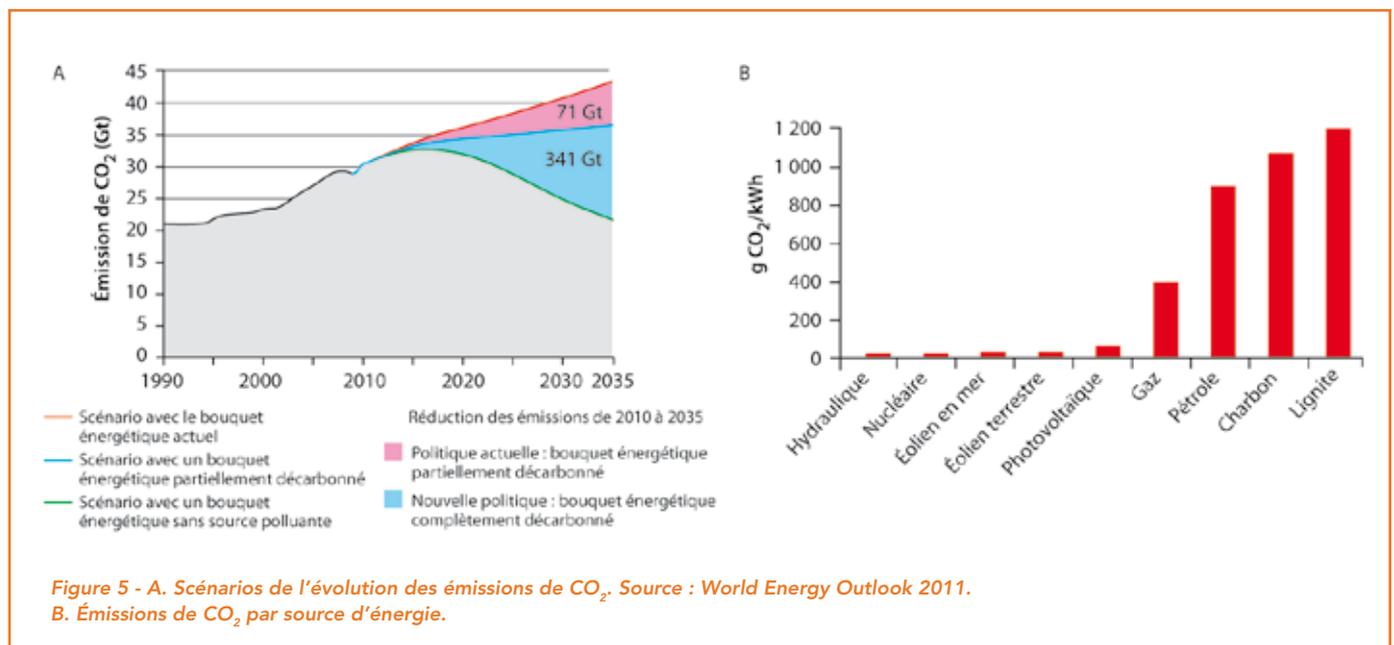
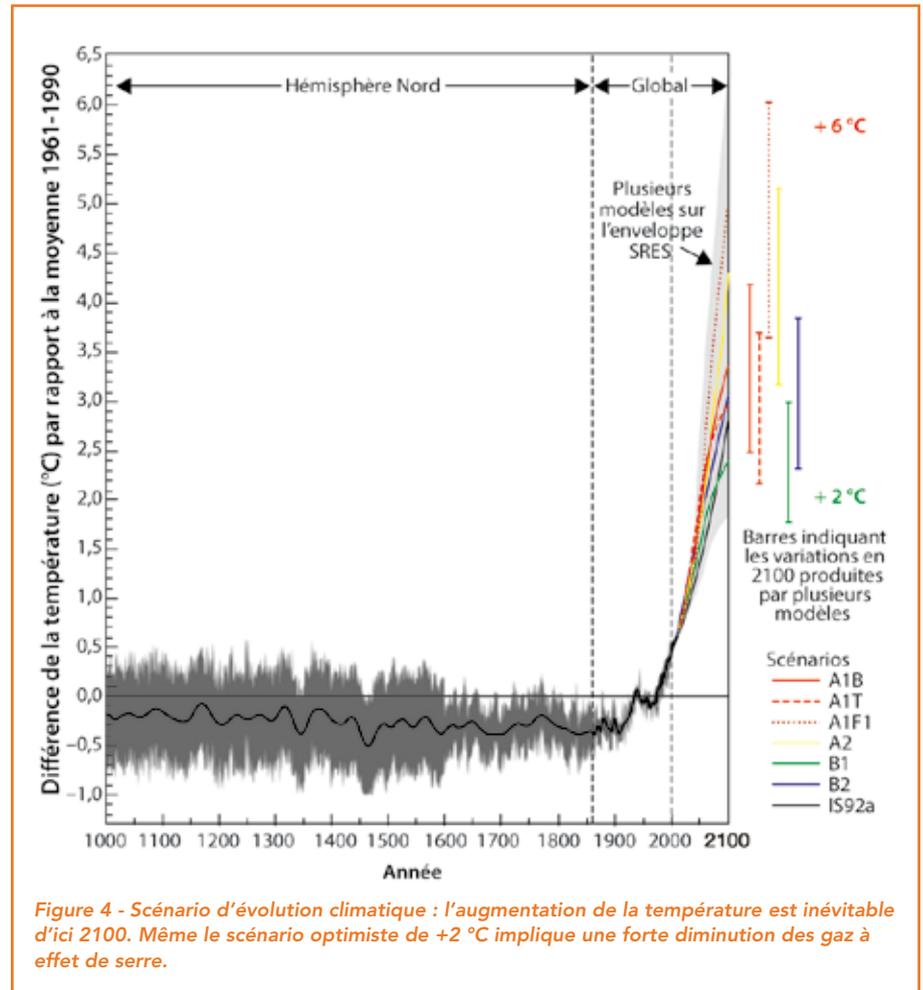
à ces émissions accrues de dioxyde de carbone dans l'atmosphère ou s'il résulte de la combinaison avec d'autres phénomènes naturels également importants. Quoi qu'il en soit, la courbe (Figure 3B) est éloquent, et beaucoup de chercheurs du monde entier auscultant ce phénomène recommandent très vivement que l'on essaie de limiter l'augmentation de la température à 2° C à la fin du siècle. Cela représente un effort énorme, car si nous ne limitons pas fortement nos émissions de gaz à effet de serre, c'est une augmentation de 6° C qui serait alors prévue (Figure 4). Jamais une évolution aussi rapide, et dans ces proportions, n'a été observée dans l'histoire de notre planète.

• **À quelles ressources énergétiques devons-nous faire appel ?**

Les prévisions d'évolution de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone montrent sur la Figure 5A l'évolution prévisible de nos émissions si l'on ne fait rien (courbe rouge) comparée à celle (courbe verte) attendue si au contraire on fait l'effort de choisir, parmi les différentes ressources énergétiques disponibles, celles qui produisent le moins de rejets en dioxyde de carbone. La Figure 5B montre que les technologies qui donnent les rejets en dioxyde de carbone les plus faibles, c'est-à-dire marginaux par rapport à nos préoccupations, sont : le solaire, l'éolien terrestre ou marin, le nucléaire et l'hydraulique, tandis

que pour les autres ressources et notamment le charbon, les rejets sont considérables. La stratégie sur laquelle la France est mobilisée est **le développement de la combinaison des énergies renouvelables et de**

**l'énergie nucléaire.** Le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives s'inscrit dans cette stratégie, avec un cadrage national et européen qui fixe sur trois points des jalons extrêmement exigeants pour



2020 et que l'on appelle les « trois fois vingt » :

- réduire notre consommation énergétique de 20 % par rapport à celle de 1990 ;
- utiliser 20 % d'énergies renouvelables dans le bouquet énergétique français ;
- diminuer de 20 % les rejets de gaz à effet de serre avec la perspective d'atteindre - 80 % en 2050.

### • **Décarboner le bouquet énergétique : un scénario possible pour la France**

Pour cela, nous pouvons utiliser deux leviers. Le premier est l'efficacité et la sobriété énergétique, dans tous les usages et particulièrement ceux où les combustibles fossiles sont le plus utilisés actuellement, c'est-à-dire le transport (31,8 % du total, chiffres de 2010) et l'habitat (43,2 %). Ce sont aussi les seuls usages dont les émissions de CO<sub>2</sub> continuent à augmenter depuis 20 ans. Contrairement à ce qu'on constate pour les deux autres usages : industries (22,4 % des consommations d'énergie totales) et agriculture (2,6 %).

Le second levier est le développement des énergies renouvelables en les substituant aux combustibles fossiles partout où cela est possible, pour autant qu'elles soient économiquement compétitives et techniquement gérables, mais aussi de tirer le meilleur parti de l'énergie nucléaire avec comme conséquence sans doute un accroissement de la part de l'électricité dans notre bouquet énergétique. En effet, dans les transports, la substitution de l'énergie fossile pourra s'appuyer sur la transformation de la motorisation thermique en motorisation électrique, tandis que dans l'habitat, les efforts d'isolation des bâtiments limiteront les besoins résiduels qui pourront alors être satisfaits par des technologies utilisant l'électricité comme les pompes à chaleur en liaison avec le stockage inter-saisonnier de la chaleur solaire dans le sous-sol.

### • **Préparer la transition vers un bouquet énergétique décarboné**

Cela n'est pas un rêve ! En effet, s'il y a en France environ 36 millions de véhicules particuliers et utilitaires, 80 %

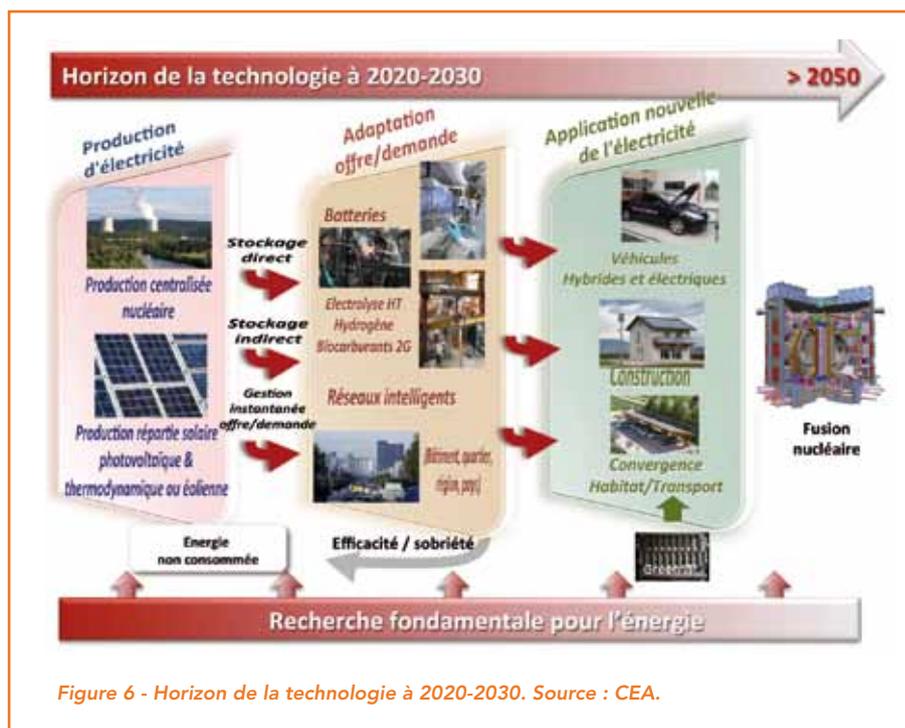


Figure 6 - Horizon de la technologie à 2020-2030. Source : CEA.

d'entre eux font moins de 150 km par jour, ce qui est parfaitement compatible avec le stockage de l'énergie électrique nécessaire pour la motorisation, par exemple dans une batterie, ou à plus forte raison dans un réservoir à hydrogène en association avec une pile à combustible ; ceci d'autant plus que cette évolution de motorisation ne représenterait, à kilométrage annuel équivalent, que 15 % de notre consommation électrique actuelle. Nous sommes donc clairement dans des zones de grande accessibilité à l'élasticité de notre potentiel de production. La ressource en électricité, dite de base, de cette stratégie, doit être le plus continue et stable possible et donc s'appuyer en France sur notre potentiel d'énergie nucléaire. La France consomme actuellement une puissance électrique moyenne annuelle de 60 milliards de watts avec un niveau minimum non compressible de 30 milliards de watts, qui correspond par exemple à la consommation de la chaîne alimentaire du froid, à l'alimentation en eau, aux services hospitaliers, aux transports en commun... Ce socle ne peut pas être fourni par les énergies renouvelables comme le solaire et l'éolien qui ne fonctionnent pas en continu.

C'est donc l'adaptation de l'offre à la demande en jouant de la combinaison des potentialités de l'énergie nu-

cléaire et des énergies renouvelables qui constitue l'enjeu majeur des prochaines décennies avec sans doute, à la clef, l'avenir énergétique durable de la planète. **Cet avenir énergétique durable passe par le stockage de l'énergie.** En effet, l'énergie solaire est à la base pratiquement de toutes les énergies renouvelables et elle représente plus de 1 000 fois la quantité moyenne annuelle d'énergie consommée actuellement. Quand cette adaptation sera réalisée, il faudra développer les technologies capables d'utiliser le plus intelligemment possible ce type de ressources : c'est ce qui est représenté sur la **Figure 6**. Prenons quelques exemples, pour illustrer ce que la chimie apporte, ou pourra apporter, au champ de ces énergies de l'avenir que sont la combinaison du nucléaire et des énergies renouvelables.

### Chimie et nucléaire

Dans le nucléaire, il faut étudier les matières radioactives, les caractériser, les extraire, les stocker, et nous allons montrer sur quelques exemples l'apport de la chimie tout au long du cycle du combustible.

#### • **Chimie et cycle du combustible**

La matière première de l'énergie nucléaire est l'uranium. L'uranium est le seul élément chimique, la seule

matière naturelle fissible, c'est-à-dire capable d'être engagée dans un processus de réaction en chaîne contrôlée. Cet uranium qui est un élément peu abondant, mais suffisamment cependant pour être une source industrielle durable d'énergie, est aujourd'hui extrait de mines ; ces mines présentent une capacité de fourniture limitée, même si les délais avant épuisement sont suffisamment éloignés pour ne pas être une préoccupation actuelle. Cependant, il existe d'autres ressources naturelles d'uranium qu'il faut envisager si l'on veut permettre un développement de la technologie nucléaire à hauteur des besoins d'énergie de la planète, notamment les minerais dont on extrait le phosphate.

**L'optimisation des ressources naturelles** est un enjeu important et, ces dernières années, de nouvelles voies de recherche ont permis la mise au point de molécules extractantes, capables de récupérer efficacement l'uranium même en faible concentration dans un grand volume de minerais de phosphate.

**Des techniques analytiques performantes et sensibles fournissent des données clés sur la chimie des actinides.** Même si la radioactivité est un phénomène naturel dans lequel nous baignons, même si nous sommes nous-mêmes pour partie radioactifs, il y a des doses qu'il ne faut pas atteindre si l'on ne veut pas que cette radioactivité soit dommageable pour les organismes vivants. Il y a donc un besoin, tout au long du cycle du combustible, de caractériser et d'identifier, à l'état de traces et de manière extrêmement fine, la quantité de matière radioactive présente dans notre environnement. Par exemple, le curium, élément issu des combustibles usés du nucléaire, peut être identifié à l'état de traces infinitésimales, tout comme peut l'être le plutonium pour lequel on sait maintenant distinguer les différentes variétés sous lesquelles il peut exister dans une solution. En utilisant la molécule complexante C5-BTP le complexe du curium est remarquablement bien identifié à de très faibles concentrations ( $10^{-10}$  M) par électrophorèse capillaire couplée à la spectrométrie de torche à plasma. De même, on peut, par spectroscopie laser résolue dans le temps, identi-

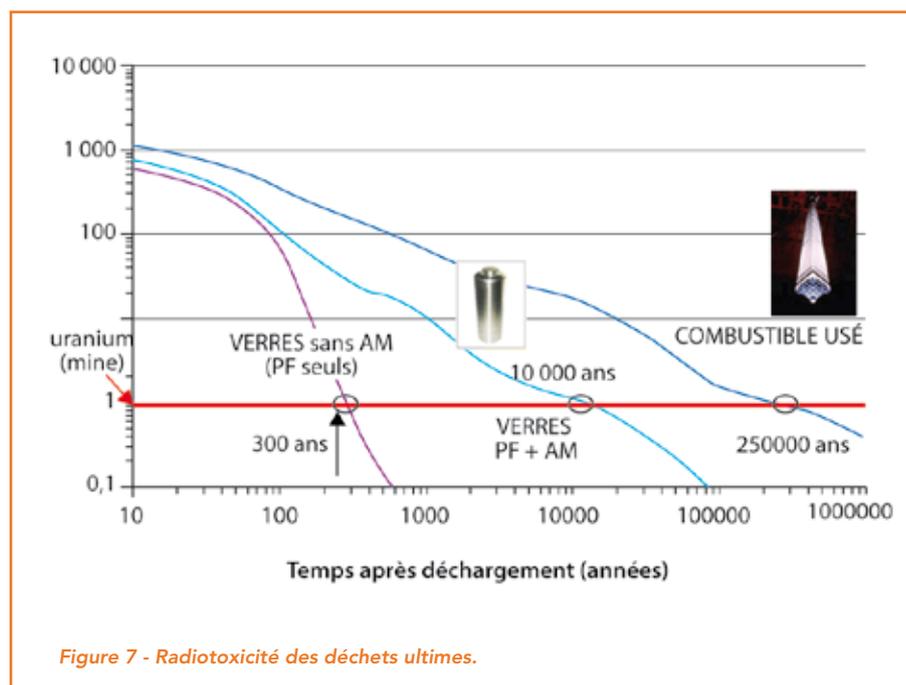
fier clairement les variétés chimiques différentes du plutonium même à très faible concentration ( $10^{-6}$  M).

**La chimie joue un rôle important dans la réduction de la radiotoxicité des déchets ultimes du nucléaire.**

La **Figure 7** montre que la radioactivité du combustible usé est fortement exaltée par rapport à celle du minerai qui a servi à le fabriquer ; à ce niveau de dose, les organismes vivants ne peuvent mettre en œuvre des mécanismes efficaces de réparation des dommages qui peuvent être causés aux cellules, donc au matériel biologique de nos organismes, par les radiations. Il faut donc rendre inertes ces déchets ultimes pour pouvoir les stocker.

Les déchets ultimes, c'est-à-dire les produits de fission de l'uranium, correspondent à environ 4 % d'un combustible usé, alors que 95 % des déchets sont de l'uranium qui n'a pas encore été consommé, recyclable, et que 1 % représente les actinides mineurs radiotoxiques, ceux qui ont, sous forme de plutonium, d'américium, de neptunium ou de curium, des durées de vie radioactives beaucoup plus longues, de plusieurs centaines de milliers d'années. On sait maintenant extraire jusqu'à 99,99 % des matières dites recyclables de celles qu'il convient de stocker parce qu'elles n'ont plus d'usage, mais qu'il faut confiner du fait de leur forte et durable radiotoxicité. L'enjeu est en-

suite de séparer les déchets qui n'ont plus de valeur énergétique et qui sont à durée de vie relativement courte à l'échelle du temps humain (quelques centaines d'années au plus), de ceux qui sont effectivement dangereux à des échelles de temps beaucoup plus longues. L'extraction liquide utilisant des molécules complexantes adaptées permet d'extraire d'une solution aqueuse les actinides à très longues durées de vie. Jusqu'à présent, les déchets recyclables contenant de l'uranium (U) et du plutonium (Pu) étaient extraits séparément, en particulier le plutonium était extrait sous forme de complexe oxalique par le procédé PUREX. Un nouveau procédé chimique complexe (COEX™) de traitement des combustibles usés permet maintenant, de co-extraire, par co-conversion oxalique, l'uranium et le plutonium en une fois, ce qui limite les manipulations compliquées et représente des gains considérables, non seulement en termes de radiologie et de sécurité pour les personnels, mais aussi du point de vue économique. La meilleure façon de gérer la radiotoxicité des déchets ultimes est de les rendre inertes en les insérant dans une matrice de verre jusqu'à ce que la radioactivité soit redescendue par décroissance naturelle à un seuil inférieur à la radioactivité initiale de l'uranium, et sans danger, c'est-à-dire au moins 300 ans, jusqu'à plusieurs dizaines de milliers d'années pour les



actinides. Depuis 2010, un nouveau procédé de vitrification en creuset froid est mis en œuvre à La Hague. Les déchets et le verre sont fondus plus rapidement à plus haute température par chauffage inductif tandis que les murs du creuset sont directement refroidis, ce qui limite très fortement la corrosion et représente une économie et une simplification industrielle considérables.

Le verre est un matériau naturel que l'on peut extraire de certaines laves volcaniques pour connaître son évolution sur de très grandes échelles de temps. Ce type d'études a permis de fabriquer des verres de durée de rétention extrêmement longue, répondant aux objectifs de confinement sûr des déchets.

## • Chimie des matériaux des réacteurs

Dans la **prévention de la corrosion**, l'enjeu majeur est de faire fonctionner le réacteur pendant une durée de vie prévue pour 50 à 60 ans, dans les conditions de sécurité maximum alors que tous les matériaux et en particulier les matériaux métalliques se transforment sous l'effet de l'oxydation au contact des produits avec lesquels ils se trouvent fonctionner. La re-fusion laser de surface assure ainsi une protection contre la corrosion de plaques d'acier en contact avec le fluide caloporteur d'un réacteur à eau pressurisée.

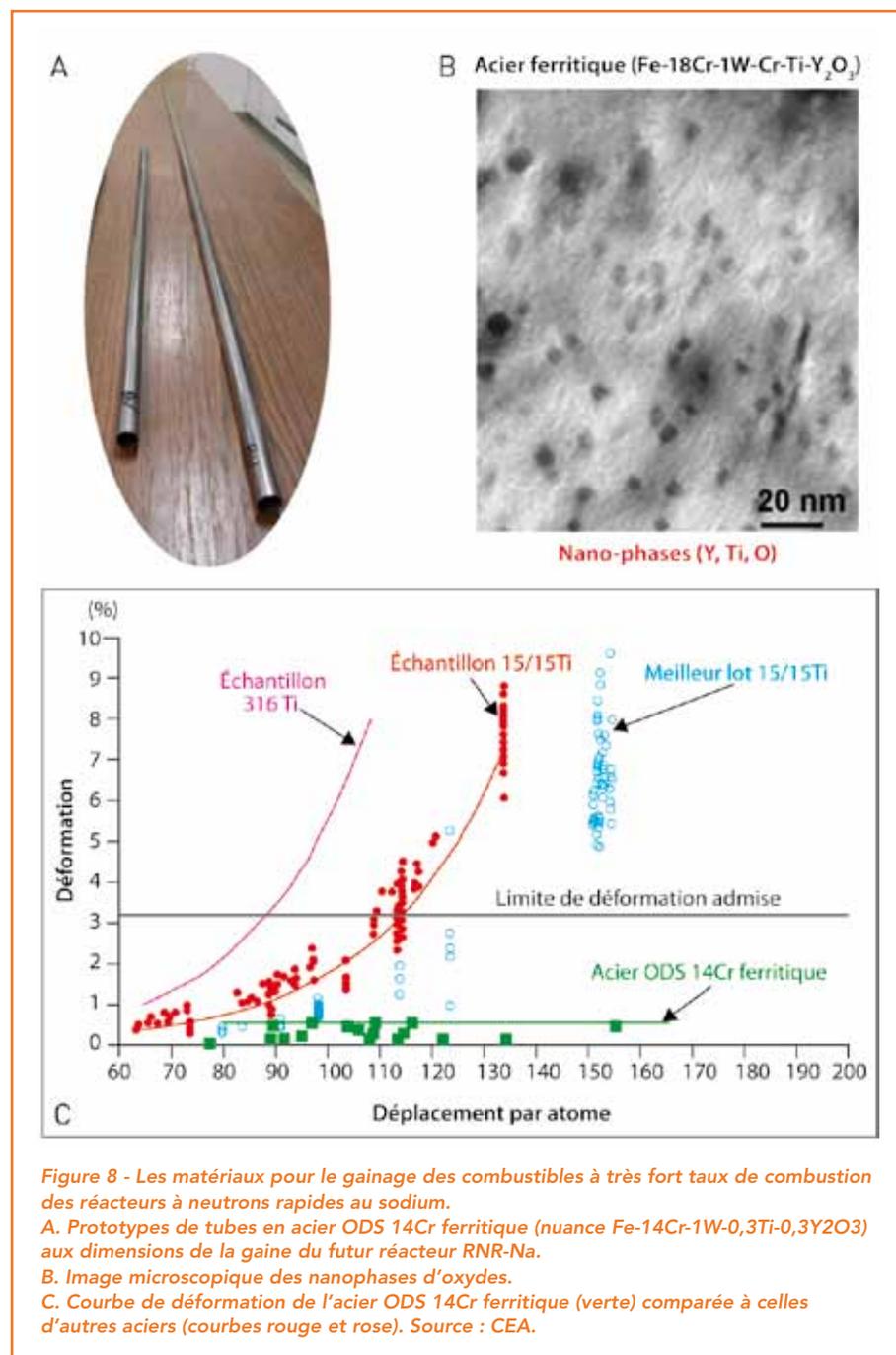
**Prévention de la déformation** : dans les réacteurs nucléaires, les matériaux sont utilisés dans des conditions extrêmes à des températures de quelques centaines de degrés sous des pressions de quelques centaines d'atmosphères, sous un fort flux de neutrons issu de la fission du noyau d'uranium qui vient heurter leur surface. L'empilement des atomes des parois métalliques épaisses de quelques dizaines de centimètres est soumis à un véritable bombardement de neutrons qui se comportent comme des boules de billard. Certains atomes sont déplacés sous l'effet du choc, créant ainsi de nouvelles lacunes dans le métal. Il faut limiter au maximum ces déplacements pour ne pas modifier les propriétés mécaniques de l'enceinte. On y réussit par un choix judicieux de l'acier

constitutif de l'enceinte, mais aussi par l'ajout de petites quantités de certains oxydes, sous forme de nanoparticules, qui peuvent effectivement améliorer considérablement la résistance à la déformation.

La **Figure 8** montre le résultat obtenu dans le cas de tubes en acier pour le gainage des combustibles d'un réacteur à neutrons rapides : sur les courbes de la **Figure 8C**, on voit clairement la différence entre la courbe rouge qui correspond à un acier ferritique sans ajout de nanoparticules, et la courbe verte qui correspond à

l'acier du prototype qui contient des nanophases d'oxydes d'yttrium et de titane. Dans ce dernier cas, la déformation est fortement réduite, même pour 180 déplacements en moyenne par atome, ce qui est considérable.

La chimie intervient donc à toutes les étapes de la production de l'énergie nucléaire et est essentielle pour un développement sûr et durable de cette dernière, la sûreté absolue sans relâchement de matières radioactives dans notre environnement étant une exigence parfaitement légitime de nos concitoyens.



## Chimie et énergies renouvelables

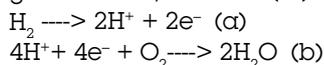
Nous avons vu précédemment que nous devons, par substitution aussi large que possible des combustibles fossiles, ne serait-ce que pour en prolonger la durée de vie et la disponibilité pour les générations futures, essayer d'utiliser au mieux la combinaison énergie nucléaire/énergies renouvelables. Le CEA est fortement mobilisé sur cet objectif et fait pour cela appel très fortement à la chimie, pour permettre le développement des composants des cellules photovoltaïques, les matériaux pour les batteries, les catalyseurs pour la transformation de la biomasse, les composants pour le stockage électrochimique ou les piles à combustibles.

C'est un travail considérable dans lequel le CEA est engagé avec toute la communauté scientifique et industrielle française pour, d'une part, extraire et développer effectivement les matières premières indispensables à cette stratégie et, d'autre part, pour les mettre en forme et les recycler.

**Les nanomatériaux et la nanochimie** sont des éléments clés pour développer les énergies décarbonées et économiser les ressources naturelles. Les nano-catalyseurs pour les piles à combustibles, les nano-poudres pour les nouvelles batteries lithium/ion, les nano-fils de silicium pour les cellules solaires, tous ces nanomatériaux sont des composants cœurs, dans la logique de découverte des ruptures technologiques et des innovations majeures dont nous avons besoin dans une stratégie de compétitivité intégrant l'ensemble de la chaîne de l'énergie. Presque toutes les énergies renouvelables sont encore à des coûts beaucoup trop élevés pour être compétitives avec les énergies hydraulique ou nucléaire qui sont aujourd'hui les moins onéreuses. Ces composants cœurs sont intégrés dans des démonstrateurs et testés en grandeur nature, par exemple sur des véhicules, ou dans un habitat, pour en démontrer la performance.

**Les piles à combustible** fabriquent de l'électricité grâce à l'oxydation, sur une électrode recouverte d'un catalyseur au platine (l'anode), d'un combustible réducteur tel que l'hydro-

gène selon la réaction (a), couplée à la réduction sur l'autre électrode (la cathode) d'un oxydant tel que l'oxygène de l'air, réaction (b) :



Les électrodes recouvertes d'un catalyseur à base de platine et l'électrolyte qui permet la circulation des protons dans la pile constituent les éléments essentiels de cette dernière. La quantité de catalyseur nécessaire pour produire efficacement la même quantité d'énergie par unité de temps a été réduite d'un facteur 40 à 50 000 entre 1955 et 2005. La raison est l'amélioration de la nano-architecture des électrodes qui permet l'utilisation de 100 % du platine : en effet, seuls les atomes à la surface du catalyseur sont actifs pour accélérer la vitesse d'une réaction chimique, donc plus une particule de platine est petite, plus le nombre d'atomes en surface est grand par rapport au nombre total d'atomes de la particule. Comme le platine est très cher (36 000 €/kg actuellement) il y a intérêt à avoir des matériaux aussi dispersés que possible, c'est-à-dire des particules aussi petites que possible. C'est ce que les chimistes ont su réaliser récemment. Par ailleurs, le coût élevé du platine a conduit à chercher d'autres éléments substitutifs plus abondants et moins chers ; récemment, des chercheurs du CNRS, du CEA et des universités ont mis en évidence une variété de cobalt capable de remplacer le platine avec la même efficacité dans la réaction d'électrolyse de l'eau (l'inverse de la réaction qui se passe dans la pile). Ce nouveau catalyseur est préparé par électrodéposition à partir d'une solution de nitrate  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  sur une électrode à base d'oxyde métallique (FTO) en milieu neutre. Le catalyseur existe sous deux formes entre lesquelles il peut évoluer, l'une qui catalyse la production d'hydrogène (appelée  $\text{H}_2\text{-CoCat}$ ), l'autre qui catalyse la production d'oxygène ( $\text{O}_2\text{-CoCat}$ ) à partir d'eau.

**Le stockage de l'énergie dans les batteries** est un enjeu stratégique majeur pour le développement des énergies renouvelables intermittentes. Une batterie est un assemblage complexe de composants, chacun d'entre eux faisant appel très largement à des

matériaux et à des phénomènes physico-chimiques complexes. L'objectif est de transporter le maximum d'énergie avec le maximum de sécurité durant de très nombreux cycles. Beaucoup d'efforts et de progrès ont été accomplis dans les trente dernières années grâce en particulier aux nanomatériaux et aux électrodes nanostructurées qui sont la clé des nouvelles batteries lithium-ion. En 1980, l'autonomie d'un véhicule équipé d'une batterie électrique n'était que de 30 km avec des cycles peu nombreux, donc une durée de vie courte. Aujourd'hui les véhicules électriques sont capables de faire 250 km avec une excellente fiabilité et l'objectif est d'aller encore beaucoup plus loin, d'atteindre une autonomie de 300 km et plus en combinant éventuellement la batterie avec une pile à combustible (Figure 9).

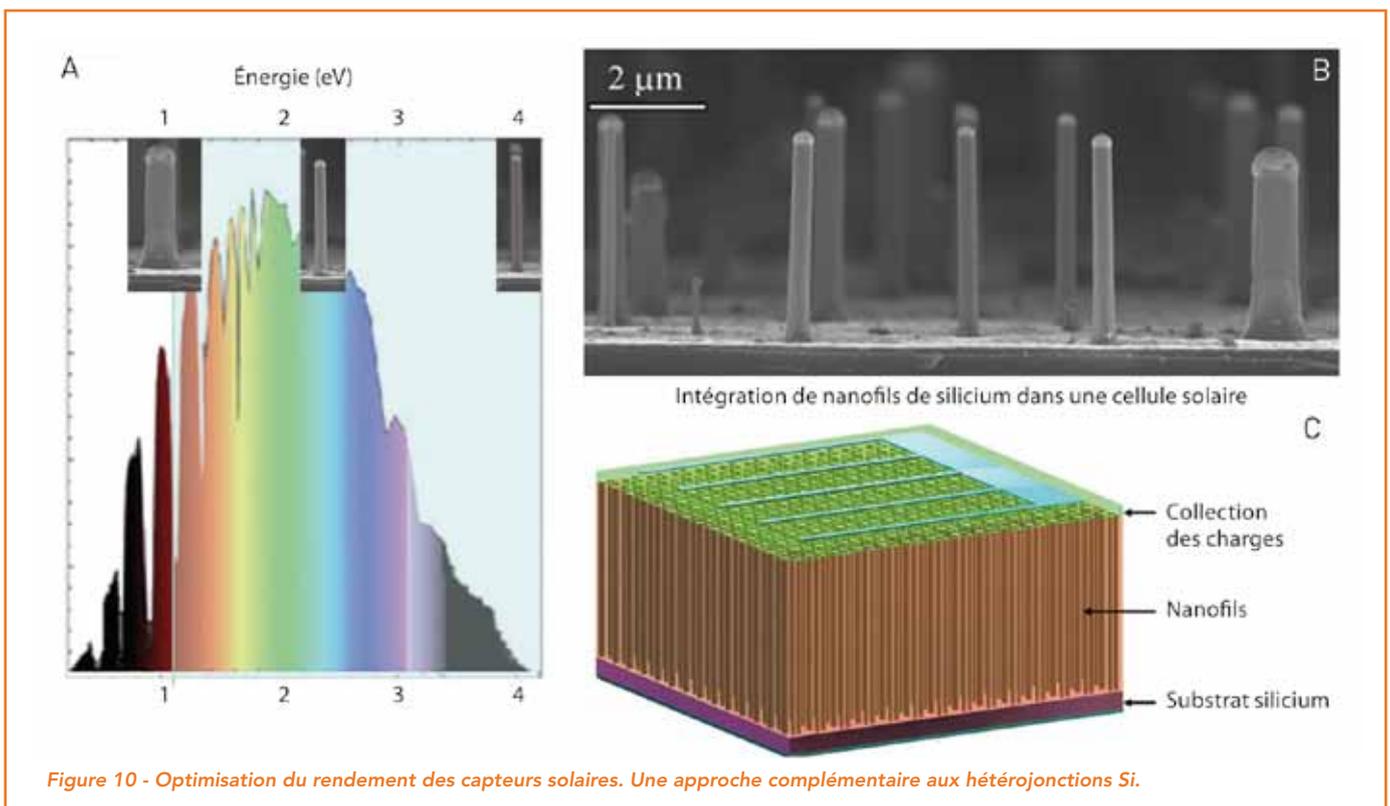
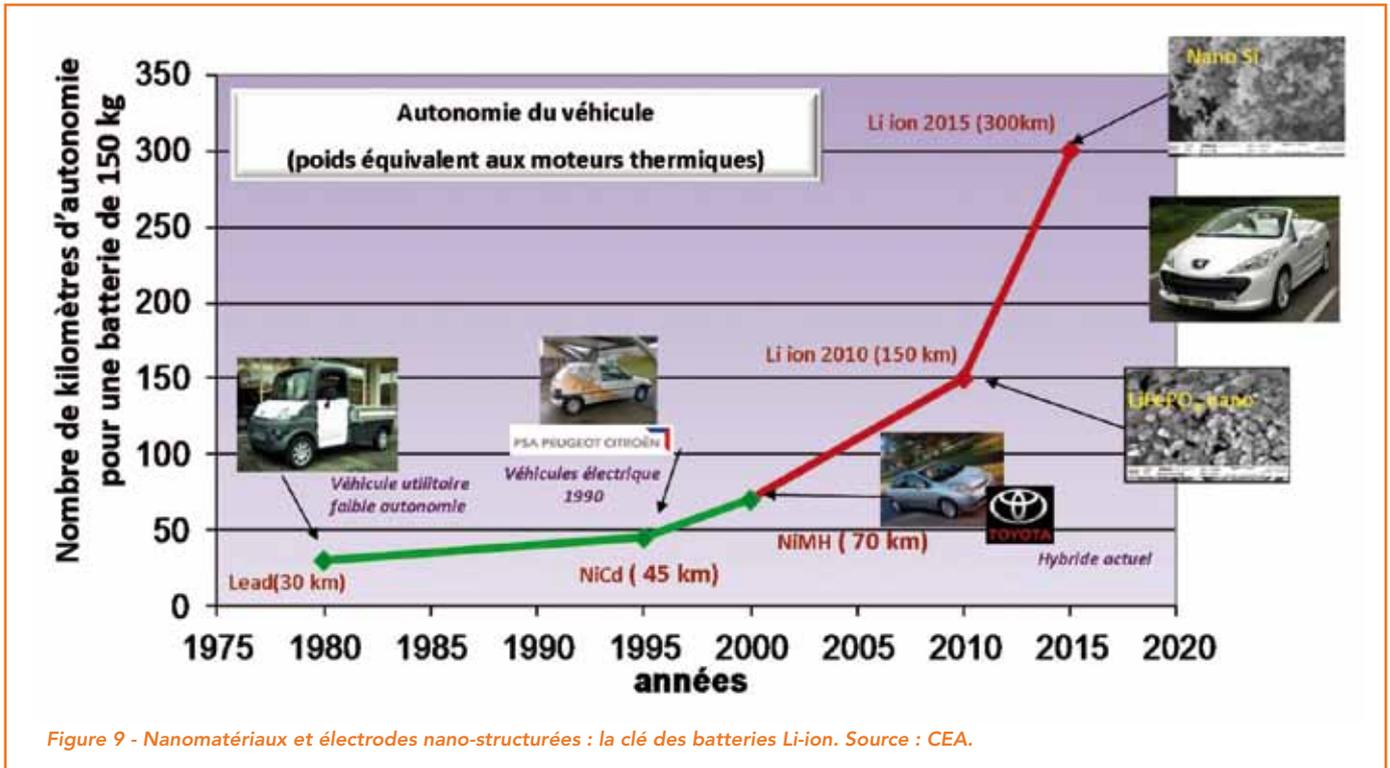
**L'énergie photovoltaïque** : actuellement, le silicium ultra-pur représente 80 % des matériaux utilisés dans les cellules photovoltaïques. Il provient des rebuts de silicium de qualité électronique, mais ces rebuts ne sont plus en quantité suffisante pour le développement du solaire. Une autre solution a été recherchée dans le cadre d'une recherche coopérative entre le CEA et le CNRS pour produire du silicium de très haute pureté. Elle consiste à fondre, à plusieurs centaines de degrés, le silicium métallurgique pour faire remonter les impuretés résiduelles en surface (soufre et bore) où elles sont alors éliminées sélectivement, en perdant le minimum de silicium, par évaporation avec une torche à plasma, c'est-à-dire un jet de matière extrêmement chaude et de haute réactivité chimique. L'optimisation du rendement énergétique des cellules photovoltaïques est un enjeu important dans lequel la chimie de l'état solide joue un grand rôle. Sur un substrat de silicium, grâce à un catalyseur, on peut faire croître des fils de silicium (Figure 10) de section contrôlée. Chaque fil selon sa section absorbe une fréquence lumineuse différente au lieu d'une seule fréquence pour une plaque de silicium, ce qui permet d'utiliser tout le spectre de l'énergie du soleil.

**La biomasse est une source d'énergie renouvelable.** La nature utilise l'énergie solaire pour produire via la

photosynthèse de la biomasse par combinaison de dioxyde de carbone et d'eau. Les carbohydrates de la matière végétale de la biomasse constituent une large palette de matière première renouvelable : plantes à fibres, bois et dérivés, oléagineux, algues et micro-algues. La biomasse

est une ressource encore sous-exploitée qui peut être utilisée pour la production d'énergie ainsi que pour la chimie et l'industrie. Combustion, transformation chimique et fermentation sont les trois processus utilisés pour sa valorisation (Figure 11). Produits en remplacement de l'es-

sence et du diesel, les biocarburants sont issus de procédés de transformation chimique et doivent faire face à des défis techniques et économiques. Les biocarburants de première génération ont utilisé des cultures destinées traditionnellement à l'alimentation, la deuxième génération est



produite à partir de plantes non alimentaires à forte productivité, de résidus de récoltes ou de bois. Toutefois, la consommation d'énergie réclamée par l'exploitation de cette biomasse à l'aide de différentes méthodes (procédés thermo-chimiques ou catalyse enzymatique) en limite encore l'inté-

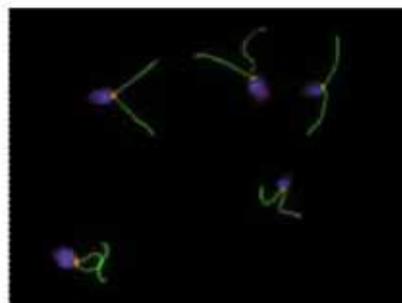
rêt. La troisième génération est déjà à l'étude : par exemple, pour produire de l'hydrogène, elle fait appel à de nouveaux catalyseurs bio-inspirés pour remplacer notamment le platine, à la chimie enzymatique dans l'ingénierie et la synthèse de catalyseur, et à l'utilisation de micro-orga-

nismes comme les cyano-bactéries ou de micro-algues.

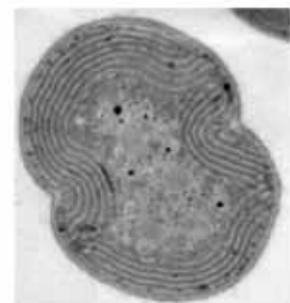
**L'énergie éolienne** dépend actuellement beaucoup de la qualité des matériaux (bétons, métaux), de leur résistance mécanique, ainsi que des problèmes de corrosion (notamment dans l'éolien marin) et de recyclage.



Figure 11 - Biomasse et bioénergies : utiliser les compétences de la chimie des procédés pour le développement de la biomasse de 2<sup>e</sup> génération. Source : CEA.



Chlamydomonas vue par microscopie à fluorescence



Vue en MET de la cyanobactérie Synechocystis PCC6803

**Recycler le CO<sub>2</sub> ?** Les besoins en électricité d'une population mondiale en constante augmentation laissent prévoir que les sources énergétiques le plus exploitées en 2050 seront encore le charbon, le gaz naturel et le gaz de schiste. Avec des consommations prévisibles multipliées par 2,5 et 3, la te-

neur de l'atmosphère en CO<sub>2</sub> finirait par augmenter considérablement. L'extraction et la valorisation du dioxyde de carbone deviennent ainsi des stratégies de développement durable. Un exemple est d'utiliser le dioxyde de carbone avec par exemple une amine pour produire ainsi des matières valo-

risables qui pourront être recyclées. La transformation du CO<sub>2</sub> en méthane ou en méthanol par réaction avec l'hydrogène issu du stockage des énergies renouvelables intermittentes pourrait aussi constituer une nouvelle source d'énergie, mais le coût en est encore très élevé. ■



## RÉSUMÉ DES DÉBATS AVEC LE PUBLIC DU COLLOQUE

**Pourrait-on envisager la réduction du dioxyde de carbone atmosphérique par l'hydrogène, obtenu par électrolyse ou même craquage de l'eau ?**

À l'heure actuelle, cette piste est peu utilisée car trop coûteuse en énergie, mais l'imagination et la créativité des chimistes étant sans limite, pourquoi pas, un jour ?

**Que penser de la méthanisation comme moyen de transformation de la matière végétale ?**

Oui, c'est une piste, et il y a un certain nombre de pays dont le nôtre où des efforts très importants sont faits. L'ADEME (l'Agence De l'Environnement et la Maîtrise d'Énergie) vient de proposer un certain nombre de programmes dans lesquels figure la méthanisation. C'est un phénomène plus biologique que chimique, puisque la transformation est actuellement faite avec un certain nombre d'enzymes. La méthanisation est une possibilité d'usage tout à fait intéressante des énergies renouvelables.

**La question porte sur le remplacement des métaux précieux ; aussi bien pour la catalyse que dans les matériaux qui doivent résister à des contraintes très fortes dans le do-**

**maine du nucléaire, on a besoin de plus en plus de métaux précieux qui vont devenir rares.**

**Comment faire face à ce défi, car à l'avenir on aura besoin de trouver des substituts comme le cobalt pour le platine comme cela a été montré dans le texte.**

Effectivement un des enjeux majeurs aujourd'hui, du développement de toutes les énergies, mais plus encore des énergies renouvelables, c'est la disponibilité des métaux précieux. Peu de gens savent peut-être que, dans une éolienne, pour les plus grosses, il y a jusqu'à 500 kilos de métaux précieux. Pourquoi ? Parce qu'il y a là effectivement des bobines magnétiques et tout un ensemble de composants qui, si l'on veut qu'ils soient au meilleur niveau de performance, font appel à des métaux précieux. Alors il y a deux pistes. La première, c'est d'essayer d'extraire du sous-sol de plus en plus de ces métaux précieux, c'est-à-dire de développer un certain nombre de moyens chimiques de séparation de ces métaux précieux de la gangue dans laquelle ils se trouvent. Aujourd'hui on exploite à des teneurs de l'ordre du pour cent ou même dix fois moins, ce qui veut dire que pour

une tonne de minerai, on sait récupérer une dizaine de kilos, et parfois même un kilo. Donc il faut mettre au point des molécules capables avec je dirai beaucoup d'intelligence, d'aller chercher ce métal sélectivement, de l'extraire dans des conditions économiquement viables, et parfaitement respectueuses de l'environnement. La seconde méthode est le recyclage. Le défi aujourd'hui est d'être capable de concevoir des équipements où, dès le début, nous imaginons ce que la chimie sera capable de faire pour recycler les matériaux quand ils seront hors d'usage.

On peut imaginer que la première étape de récupération sera la séparation mécanique du dispositif dans lequel ils sont insérés, mais ensuite, dans les mélanges complexes où ils sont inclus, seule la chimie pourra effectivement les extraire. Et là il y a un formidable défi pour les chimistes : accroître la capacité de recyclage. Nous sommes en effet en train, avec la croissance de la population, de consommer en quelques décennies plus de métaux précieux que l'humanité ne l'a jamais fait. Donc cet enjeu est majeur : les énergies renouvelables ne pourront pas se développer si l'on ne maîtrise pas ce cycle des métaux précieux.

\* Bernard Bigot, Administrateur général du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) et président de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie.

NOTA : Cet article est l'adaptation par Dmitri SAVOSTIANOFF (promo 63), pour la revue, de l'exposé de Bernard Bigot au colloque du 14 novembre 2012, « Chimie et enjeux énergétiques » organisé par la Fondation de la Maison de la Chimie.

Avec l'aimable autorisation de l'auteur, de EDP sciences et de l'Actualité chimique.