Maisons expérimentales, totalement instrumentées, de la plateforme Incas installée sur le site de l'Institut national de l'énergie solaire (Ines).

P. Avavian/CEA

III. POUR UNE MEILLEURE UTILISATION DE L'ÉNERGIE

La mobilisation grandissante d'énergie par être humain est historiquement corrélée au développement de nos civilisations et à la croissance du PIB. La quantité d'énergie n'est pas pour autant le seul facteur intervenant dans la satisfaction des besoins de l'être humain.

À ce stade et sur la base de l'emploi majoritaire d'énergie fossile, la consommation actuelle d'un occidental est incompatible avec les ressources que la planète est en mesure de fournir de façon durable. La ressource en énergie renouvelable, et surtout en énergie solaire, est potentiellement très élevée, mais difficilement mobilisable partout au plus près des points d'utilisation et à un coût très bas. Le faible coût de l'énergie a jusqu'alors orienté vers des solutions qui ne seront plus adaptées à un monde dans lequel l'énergie sera plus chère.

Or, certains usages (transport, habitat) peuvent se faire dans le même confort, avec des consommations énergétiques très différenciées selon les modalités auxquelles on a recours. Il y a donc un champ d'investigation prioritaire autour de la sobriété énergétique. Nous sommes toujours frappés à l'Institut national de l'énergie solaire de voir, quand nous sommes confrontés à la nécessité de concevoir un système photovoltaïque autonome, combien il est possible de gagner en consommation d'énergie pour assurer les mêmes fonctions par rapport à un système équivalent élaboré au départ pour être raccordé au réseau. C'est un signe tout à fait encourageant montrant que la diminution de la consommation énergétique est réalisable avec un effort d'imagination et d'ingénierie.

Le bâtiment est également un exemple saisissant des opportunités de réduction de la consommation énergétique, allant de pair avec une amélioration du confort des occupants. Les solutions techniques d'isolation existent. Il s'agit essentiellement d'un choix de priorité d'investissement. Cette transformation des bâtiments est aussi le meilleur moyen de créer de l'emploi local et de la valeur dans nos sociétés occidentales.

Ce chapitre présente plusieurs études menées par le CEA, qui toutes visent cet objectif de meilleure efficacité énergétique. D'une large diversité, qui souligne la richesse de notre tissu de recherche, allant du plus amont au plus aval, elles couvrent les grandes applications que sont le transport, le bâtiment, la production industrielle, l'eau. Elles montrent que notre organisme est fortement impliqué dans cet enjeu fondamental et est capable d'offrir rapidement des solutions techniques exploitables à l'échelle industrielle.

Il est d'ailleurs frappant de constater que ces études s'appuient sur la façon d'utiliser au mieux et plus efficacement trois ressources énergétiques : le nucléaire, le solaire et la biomasse. Pour le nucléaire, il s'agit notamment de valoriser la chaleur rejetée dans l'environnement par les centrales. Pour le solaire, une gestion intelligente de l'énergie conduit, par exemple, à tirer profit de l'électricité photovoltaïque produite dans l'habitat, pour recharger des véhicules électriques. En matière de biomasse, l'une des clés du succès passe par la capacité de tirer au mieux parti de l'aptitude des enzymes à activer les réactions biochimiques, à un coût énergétique minimal et quasiment sans générer de déchets.

Autant de preuves de l'engagement du CEA dans la diversification énergétique, preuves aussi de la nécessité de mobiliser toutes les opportunités pour atteindre sobriété et efficacité énergétiques.

> Jean-Pierre Joly
Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Grenoble (Site Ines)

La **mobilité solaire**

Principaux consommateurs d'énergies fossiles en France et à l'origine de plus de la moitié des émissions de gaz à effet de serre, le transport et le bâtiment sont des cibles privilégiées pour le développement des énergies renouvelables, des technologies de l'énergie et de l'efficacité énergétique. Pour atteindre les objectifs fixés par le plan européen sur le climat et le Grenelle de l'environnement, **faire converger l'énergie solaire photovoltaïque, l'habitat et le transport – *via* la recharge de véhicules électriques ou hybrides – est l'une des solutions qui vont dans le sens d'une gestion intelligente de l'énergie**.

P. Avavian/CEA

Parking solaire sur le site de l'Ines à Chambéry (Savoie). L'ombrière en bois est recouverte de panneaux photovoltaïques. Elle abrite 12 places de parking, soit une surface de 150 m². La station est équipée de 12 bornes de recharge.

La mobilité solaire est née en 2007, au CEA, sur le site de l'Ines (Institut national de l'énergie solaire). Son ambition : valoriser au niveau local l'électricité produite par un système photovoltaïque (PV), directement pour recharger les véhicules électriques ou alimenter les équipements électriques de l'habitat. Il s'agissait de se projeter dans un contexte futur, mais proche, sans tarif d'achat, ni crédit d'impôt pour le photovoltaïque.

Aujourd'hui, aucune incitation économique ne pousse le producteur/consommateur à autoconsommer localement sa production photovoltaïque. Chacun produit en permanence au fil du soleil et consomme quand il le souhaite. C'est une aberration sur le plan énergétique et un problème potentiel pour le réseau de distribution d'ERDF (Électricité réseau distribution France) au niveau électrique. Les objectifs de la R&D visent ainsi à limiter les impacts combinés du PV et du véhicule électrique sur le réseau et à maximiser l'efficacité énergétique de l'ensemble.

Quelques calculs simples suffisent pour se convaincre de la faisabilité de ces objectifs. Ils montrent qu'en 2020, 5 à 10 TWh seront fournis annuellement par des systèmes PV sur le réseau (soit une puissance installée entre 5 et 10 GWc) et qu'une puissance équivalente sera consommée par les 2 à 4 millions de véhicules électriques qui seront alors en service, à raison de 12 000 km/an et de 200 Wh/km.

Plus localement, une place de parking de 12 m² recouverte de panneaux solaires photovoltaïques peut générer l'équivalent de 12 000 km/an, en fonction du lieu géographique et de la période de l'année. Or, la distance nationale moyenne des trajets allers simples domicile-travail est de 25 km, la moitié des travailleurs parcourant moins de 8 km. La première application s'est donc tout logiquement focalisée sur une recharge sur le lieu de travail, là où le véhicule est stationné dans la journée, pendant la présence de la ressource solaire.

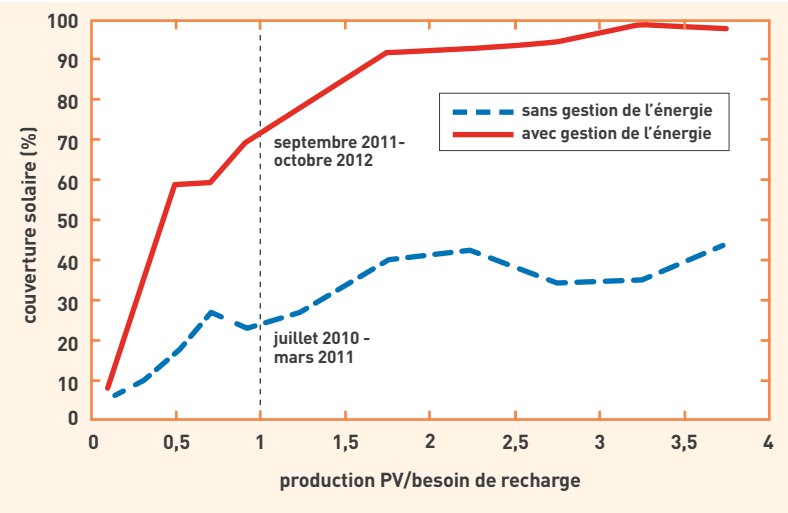


Figure 1.
Apport de la gestion de l'énergie à la couverture solaire. Comparaison entre une période sans gestion, de juillet 2010 à mars 2011, et une période avec gestion, de septembre 2011 à octobre 2012. Par exemple, dans le cas où le rapport sur une journée est égal à 1 (soit autant d'énergie PV que de besoin en recharge), sans gestion, la couverture solaire est de 25 %, alors qu'elle est de 73 % avec gestion.

Des parkings photovoltaïques

Un projet de démonstration de parkings solaires, cofinancé par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), Toyota et le CEA, est en cours sur les sites du CEA à Grenoble et à l'Ines. Dix véhicules hybrides rechargeables y sont rechargés sous des ombrières PV et le plein de la batterie est garanti aux utilisateurs. Les enjeux scientifiques de ce projet sont clairs. Il s'agit d'une part, de minimiser l'impact de l'application sur le réseau de distribution et d'éviter les pics de consommation, notamment le matin à 8 heures lors de l'arrivée des employés, et,

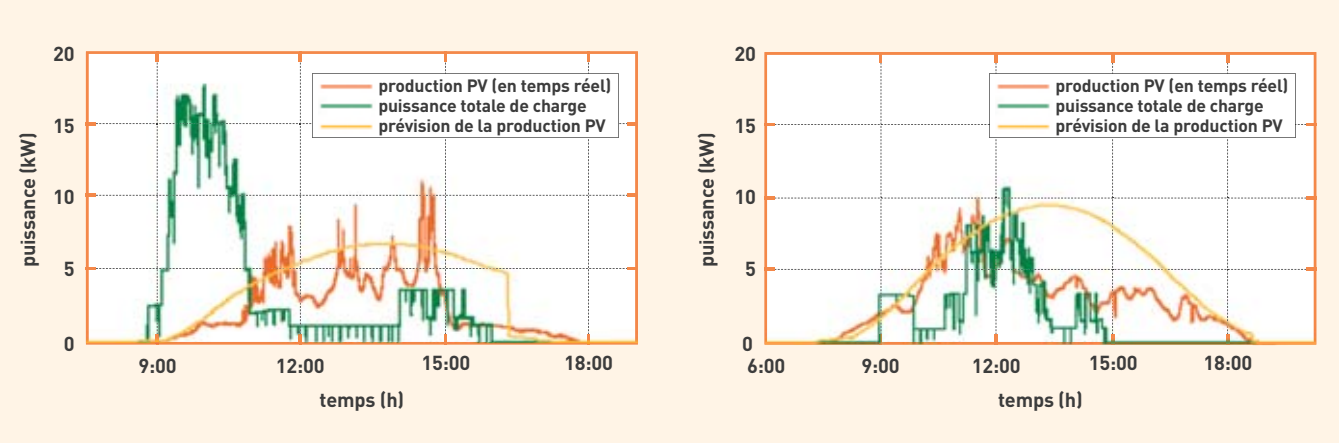


Figure 2.
À gauche, courbe de production et de consommation sans gestion de l'énergie (couverture solaire de 27 %) pour la journée du 24 novembre 2010.
À droite, courbe de production et de consommation avec gestion de l'énergie (couverture solaire de 74,5 %) pour la journée du 15 mars 2011.

d'autre part, de maximiser la quantité d'électricité produite par le PV directement dans les véhicules, en prenant en considération la couverture solaire, c'est-à-dire la part des besoins en énergie des véhicules couverts par l'installation PV.
D'autres applications de parkings solaires sont développées. Elles concernent l'auto-partage en ville, où les véhicules sont mutualisés entre plusieurs utilisateurs, et les véhicules de location pour la Corse en période estivale, ce qui présente un très grand intérêt vu la capacité limitée du réseau et le besoin en énergie fortement carbonée. Sont également à l'étude des parkings pour des véhicules légers destinés aux visiteurs d'un grand site industriel ou d'un site touristique ainsi que des emplacements pour des vélos à assistance électrique.

Gérer l'énergie localement

La gestion de l'énergie est au cœur des axes de R&D du CEA. La couverture solaire des parkings développés pour les véhicules Toyota a ainsi été sensiblement améliorée grâce à une gestion intelligente tenant compte de l'heure de départ des usagers, de la prévision d'éclairement solaire et de l'état de charge des batteries. Cette gestion est d'autant plus optimisée que la couverture solaire est élevée (figures 1 et 2).
Un second aspect concerne la gestion électrique d'un véhicule bidirectionnel en courant, c'est-à-dire capable de donner de l'électricité au réseau pendant les pics de consommation et de se recharger pendant les heures creuses. Un démonstrateur sera effectif début 2013, en partenariat avec Renault, pour illustrer la faisabilité technique du couplage d'un système PV avec un véhicule électrique fournisseur d'énergie. Dans le futur, une telle utilisation permettra de mutualiser les fonctionnalités du stockage embarqué et d'offrir des services au réseau, par exemple la participation au plan de tension[1] ou à la réduction des pics de consommation. Outre la recherche d'une gestion optimale, tout un travail vise à quantifier et à minimiser le vieillissement supplémentaire qui pourrait être occasionné à la batterie lors de la fourniture de courant au réseau.

(1) Plan de tension : la tension électrique du réseau est régulée pour être constante dans une fourchette de ± 10 %.

Des pistes pour demain

Si la mobilité solaire apparaît prioritairement comme une problématique de gestion d'énergie locale, d'autres pistes de recherche sont étudiées.
Le diagnostic à l'arrêt et sans intervention intrusive sur le véhicule est une fonctionnalité à grande valeur ajoutée. Elle permet à un exploitant de flotte d'anticiper la maintenance et, par voie de conséquence, de diminuer les coûts d'exploitation. Plusieurs solutions de reconnaissance de signatures électriques ont déjà été développées à l'Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux).
Un autre axe de recherche porte sur la conception d'un dispositif d'électronique de puissance autorisant le maintien de l'équilibre des phases de l'infrastructure électrique en temps réel. En effet, les puissances de recharges des véhicules peuvent atteindre 7 kW en courant monophasé et créer de forts déséquilibres sur le réseau. Ces derniers sont sources de pertes et de surdimensionnement de l'installation électrotechnique.
Enfin, dans un tout autre registre, des travaux exploratoires ont été initiés sur la manière de « solariser » les routes en intégrant dans la chaussée des panneaux solaires qui alimenteront peut-être demain nos moyens de transport électriques.

La mobilité solaire illustre une des plus grandes qualités de l'électricité photovoltaïque, à savoir sa délocalisation au plus près de la consommation (encore faut-il gérer intelligemment l'énergie). À l'évidence le PV est le seul système permettant un rapprochement si étroit et donc une limitation des pertes électriques par transport. Un avantage non négligeable puisque ces pertes, dues à l'effet Joule, représentent en moyenne 6 à 8 % de l'électricité générée en France, soit l'équivalent de la production de deux tranches d'une centrale nucléaire.

> **Franck Barruel**
Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Grenoble (Site Ines)

Chimie verte, biocatalyse et biomimétisme

Dès leurs débuts, les industries chimique, pharmaceutique ou agro-alimentaire se sont orientées vers l'utilisation d'enzymes pour mettre au point des procédés de production efficaces. Ces dernières catalysent des réactions chimiques avec un coût énergétique minimal tout en ne générant que peu de déchets. Les performances, à ce jour inégalées, de ces biomolécules sont cependant liées à des conditions de milieu, de température et de pression restreintes, qui limitent leur emploi dans l'industrie. **Avec l'essor de la chimie verte, de nouveaux procédés, concernant aussi bien l'amélioration des performances des réactions enzymatiques par des méthodes biotechnologiques que la conception d'enzymes artificielles inspirées par leurs homologues naturelles, pour la production de bioénergie par exemple, sont en plein développement.**

C. Dupont/CEA

P. Avavian/CEA

À gauche, automates de culture continue permettant d'accélérer l'évolution de souches microbiennes ou d'enzymes *in vivo* pour des utilisations biotechnologiques. À droite, photoproduction bio-inspirée d'hydrogène. L'hydrogène est produit à partir de l'eau sous l'action d'un photocatalyseur inorganique inspiré du fonctionnement des hydrogénases lors de la photosynthèse.

Les apports de la chimie sont incontestables dans tous les domaines : alimentation, matériaux de la vie quotidienne, habillement, céramiques, colorants ou matières plastiques, santé ou énergie. L'industrialisation lui a permis de couvrir de nombreux besoins de la société mais, du fait de ce caractère industriel, les procédés et les productions sont à l'origine de pollutions et contribuent à l'épuisement de ressources limitées. Le développement de nouveaux procédés, dits de chimie verte, a été promu pour réduire les effets indésirables de l'industrie chimique. Cette chimie s'appuie notamment sur la catalyse, une technologie-clé qui rend possible la réalisation de réactions chimiques à un coût énergétique moins élevé et avec une meilleure sélectivité, tout en conduisant à une diminution importante de la quantité de déchets générés (solvants, produits secondaires non valorisables).

Les propriétés des catalyseurs

Un catalyseur est une petite molécule, une macromolécule ou un matériau solide qui interagit, de manière transitoire et hautement sélective, avec une ou plusieurs des espèces chimiques d'une réaction en abaissant l'énergie d'activation de cette dernière. Il permet d'orienter la réaction vers un produit majoritaire avec de bons rendements, dans des conditions relativement douces. En outre, à l'issue de la réaction, le catalyseur retrouve son état initial, si bien qu'il peut contribuer successivement à la transformation d'un grand nombre (idéalement une infinité) de molécules. Une très faible quantité de catalyseur est ainsi nécessaire. Ceci explique que l'industrie chimique ait cherché de manière constante durant ces cinquante dernières années à introduire la catalyse dans les procédés de synthèse mis en œuvre. La recherche de nouveaux catalyseurs, toujours plus sélectifs et robustes, est l'une des approches les plus développées en chimie industrielle et, de fait, 80 % des produits manufacturés résultent d'une étape effectuée *via* un processus catalytique. Mais où découvrir ces nouveaux catalyseurs ? C'est probablement dans la Nature que se trouvent les plus performants, les enzymes. Ces protéines catalysent en milieu aqueux, avec un faible coût énergétique et dans des conditions généralement douces de température et de pH, des milliers de réactions hautement chimio-, régio- et stéréosélectives, sans générer de sous-produits toxiques. Certaines sont utilisées comme catalyseurs dans des processus industriels ou domestiques de synthèses ou de biodégradations. Les chercheurs tentent aussi de les imiter, soit en élaborant des protéines artificielles capables de catalyser des réactions originales, soit en concevant des assemblages de molécules issues de la chimie de synthèse et aptes à reproduire des réactions effectuées par les enzymes dans des systèmes biologiques. Plusieurs laboratoires du CEA sont directement impliqués dans ces différentes alternatives biocatalytiques ou bio-inspirées.

Enzymes, biocatalyse et chimie de synthèse

Dans la pratique, deux grandes voies offrent la possibilité de tirer profit des propriétés des enzymes.
Historiquement, la première a consisté à utiliser directement les organismes vivants pour réaliser les transformations chimiques recherchées en vue d'obtenir un produit d'intérêt (figure 1). C'est la manière la plus verte, qui permet notamment d'accomplir *in vivo*, à un coût énergétique minimal, une succession de réactions en se servant de la biomasse comme matière première. Ainsi, ces procédés suscitent à l'heure actuelle un grand regain d'intérêt. Les levures et bactéries provenant de milieux naturels ont été les premiers microorganismes employés pour catalyser une ou plusieurs étapes réactionnelles du processus de production d'un composé chimique. Leurs rendements ont par la suite été améliorés par

des méthodes génétiques, puis par génie génétique. Aujourd'hui, des gènes issus de la biodiversité, codant des voies complètes de biosynthèse, parfois totalement inédites, sont introduits dans des microorganismes (figure 1). L'introduction de ces voies biosynthétiques exogènes est parfois mal tolérée par les cellules hôtes, allant jusqu'à compromettre leur viabilité. Pour aider ces cellules à se réadapter, on peut, dans certains cas, les laisser évoluer dans des automates de culture permettant d'alterner les conditions de croissance (voir l'illustration de gauche, p. 78). Les rendements sont également améliorés *via* l'optimisation des régulations et des équilibres chimiques au sein des cellules.

La seconde voie repose sur la mise en œuvre des enzymes elles-mêmes, en solution ou immobilisées. La panoplie d'enzymes connues et utilisables pour des applications industrielles reste cependant limitée et leurs qualités (efficacité, robustesse...) sont souvent insuffisantes. Outre l'amélioration de leurs propriétés par les méthodes d'évolution dirigée de gènes qui peut être pratiquée à l'aide des automates de culture mentionnés précédemment, il est possible d'explorer la biodiversité enzymatique pour découvrir de nouveaux biocatalyseurs. Les bases de données de séquences d'ADN regorgent en effet de gènes codant des fonctions inconnues, notamment des activités biocatalytiques inédites. Le Genoscope de l'Institut de génomique (IG) a entrepris d'exploiter ces gigantesques collections pour y trouver des gènes codant de nouvelles activités. Ce travail débute par la recherche de gènes candidats par des méthodes bioinformatiques. Ces candidats sont ensuite criblés à l'aide de tests à grande échelle sur des composés non physiologiques pour détecter des enzymes susceptibles de catalyser une transformation nouvelle, en s'appuyant sur le phénomène de promiscuité par lequel une enzyme donnée peut catalyser une réaction chimique sur différents composés chimiquement proches.

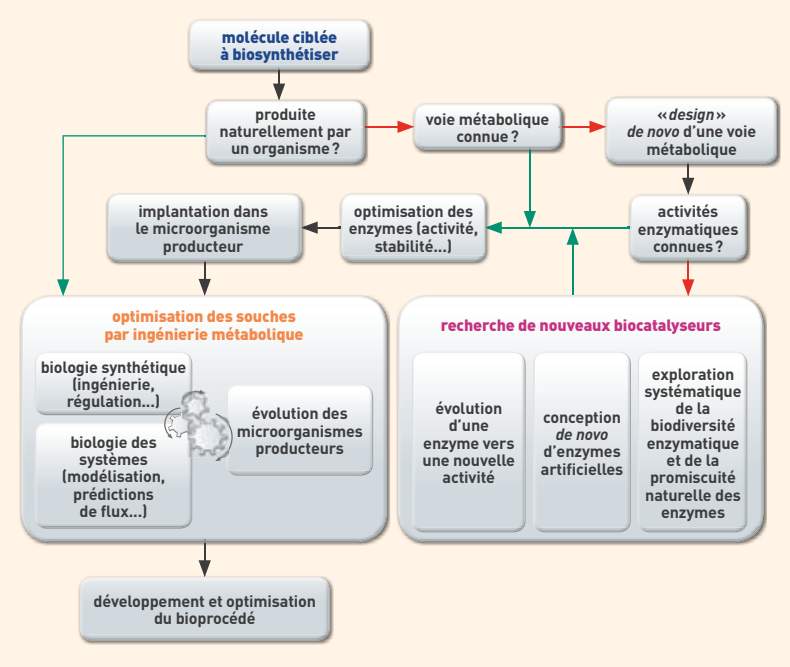
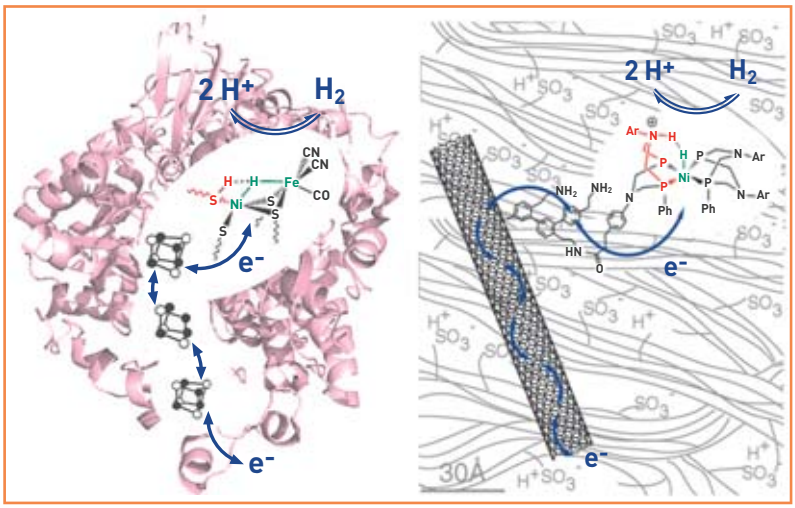


Figure 1.
Stratégie mise en œuvre pour la production d'une molécule par un microorganisme.
Les flèches vertes indiquent l'action suivie en cas de réponse positive à la question posée, contrairement aux flèches rouges qui renvoient vers une autre alternative.

Biocatalyse et bioénergie

Les biotechnologies pour l'énergie sont en plein développement. Les hydrogénases[1] sont particulièrement intéressantes pour la production ou l'utilisation de l'hydrogène. Elles s'adsorbent spontanément sur certaines électrodes de carbone, les couvrent d'un film protéique et catalysent de manière remarquable, aussi bien que le platine dans certaines conditions, la production d'hydrogène ou son oxydation. La cristallographie révèle que leur site actif est un cluster[2] binucléaire (figure 2) où deux atomes métalliques de nickel (Ni) et/ou de fer (Fe) sont connectés par des atomes de soufre (S), appartenant, soit à des résidus cystéine[3] de la chaîne protéique – cas des hydrogénases nickel-fer (NiFe) –, soit constitutifs d'un petit ligand dithiométhylamine – cas des hydrogénases fer-fer (FeFe). Les atomes de fer sont, de plus, coordinés par des ligands monoxyde de carbone (CO) et cyanure (CN^-). Des sites basiques, comme certains ligands thiolates terminaux du site actif des hydrogénases NiFe ou la fonction amine du ligand dithiométhylamine des hydrogénases FeFe, jouent un rôle crucial en facilitant les réactions de protonation ou de déprotonation[4] au cours du cycle catalytique.

La structure cristallographique des hydrogénases montre également la présence d'une chaîne de clusters fer-soufre, distants les uns des autres de moins de 15 Å. Cette dernière permet aux électrons de circuler entre le site actif et la surface de la protéine, où ils sont amenés ou d'où ils sont extraits par les partenaires physiologiques des hydrogénases[5], réductases notamment. Les équipes de l'IBS (Institut de biologie structurale) ont mis en



CEA/DSV

Figure 2.
À gauche, représentation schématique de la structure d'une hydrogénase NiFe. Les résidus cystéine (〰 S), ligands des centres métalliques, sont symbolisés par leur atome de soufre. La cystéine terminale, fonctionnant comme une base dans le mécanisme catalytique, apparaît en rouge. L'interaction entre le ligand hydrure (H^-) coordiné au site actif (en vert) et un proton porté par ce site basique est représentée par des pointillés. Les flèches bidirectionnelles bleues montrent les échanges d'électrons entre les centres fer-soufre de l'hydrogénase et le catalyseur. À droite, représentation schématique de la structure et de la réactivité du matériau obtenu par greffage du catalyseur bio-inspiré nickel-bisdiphosphine sur les nanotubes de carbone enchâssés dans un film de Nafion®. Les fonctions amine du ligand diphosphine sont indiquées en rouge. L'interaction entre le ligand hydrure (H^-) porté par l'atome de nickel (en vert) et un proton porté par une fonction amine est représentée par des pointillés. Les flèches bidirectionnelles bleues montrent les échanges d'électrons entre les nanotubes et le catalyseur.

(1) Hydrogénases : enzymes qui peuvent, soit produire de l'hydrogène à partir des protons H^+ de l'eau et d'électrons, soit l'oxyder.

(2) Cluster : agrégat de plusieurs atomes.

(3) Cystéine : acide α-aminé naturel possédant un groupement thiol (–SH).

(4) Protonation/déprotonation : réaction chimique au cours de laquelle un proton H^+ est ajouté/retiré à une molécule.

(5) Dans les systèmes biologiques, les réactions d'oxydation (perte de un ou plusieurs électrons) et de réduction (gain de un ou plusieurs électrons) sont catalysées par, respectivement, des oxydases et des réductases.

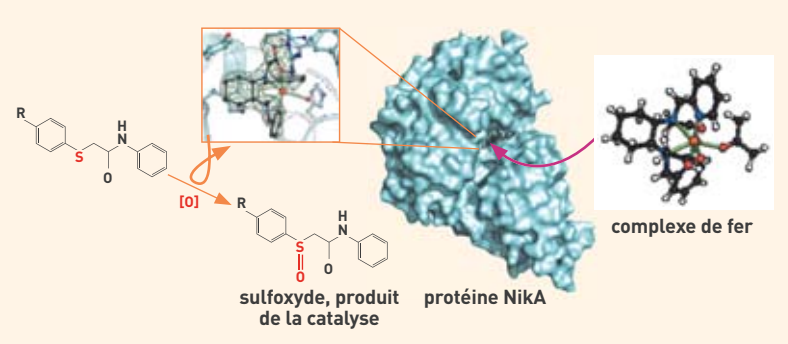


Figure 3.
L'introduction d'un complexe de fer au sein de la poche hydrophobe de NikA, une protéine de transport de nickel, permet son activation pour la catalyse de transfert d'un atome d'oxygène, pour former un sulfoxyde. Le produit de la catalyse est un analogue potentiel de l'oméprazole, inhibiteur de la pompe à protons dans les muqueuses de l'estomac chez l'homme. La position du catalyseur chimique est identifiée par cristallographie des protéines.

évidence un chemin préférentiel au sein de la protéine pour le transfert des protons et pour la circulation des gaz. De fait, les hydrogénases sont de véritables petites usines à hydrogène dont la logistique est optimisée.

La chimie bio-inspirée et les enzymes artificielles

Les enzymes sont des biomolécules fragiles, qui le plus souvent ne développent leur activité que dans l'eau, dans des conditions assez restreintes de température, de pH ou de force ionique, et qui nécessitent des partenaires physiologiques. Une solution consiste à imiter le fonctionnement enzymatique pour élaborer des catalyseurs, dits bio-inspirés. Grâce à la connaissance, au niveau moléculaire, de la structure du site actif d'une enzyme, le chimiste peut, soit en faire une copie synthétique fidèle (modèle biomimétique), soit inventer de nouveaux catalyseurs s'inspirant de son mécanisme de fonctionnement ou de ses interactions avec ses partenaires biologiques (modèle bio-inspiré). Cette approche permet d'utiliser des éléments chimiques ou des combinaisons d'atomes que la Nature n'a ni explorées, pour des questions de biodisponibilité, ni sélectionnées, en raison par exemple de leur toxicité durant l'évolution. De tels catalyseurs présentent de multiples avantages. Faciles à synthétiser et peu coûteux à produire à grande échelle car ils ne renferment généralement pas de métaux nobles ou rares, ils peuvent, contrairement aux enzymes dont ils s'inspirent, être employés dans de nombreux solvants et dans une large gamme de température ou de pression. Ils sont également moins sensibles à l'oxydation par l'oxygène de l'air.

La conception d'hydrogénases artificielles

Les complexes bisdiphosphine de nickel sont un exemple de catalyseurs bio-inspirés de la structure du site actif des hydrogénases. Ils combinent des éléments structuraux pris aux sites actifs des deux types d'hydrogénases : l'ion nickel des hydrogénases NiFe et une fonction amine, incorporée cette fois dans un ligand diphosphine plutôt que dans le cofacteur dithiolate des hydrogénases FeFe. L'un de ces complexes a été choisi par une équipe du Laboratoire de chimie et biologie des métaux de l'Institut de recherches en technologies et sciences pour le vivant (iRTSV) pour développer, en collaboration avec une équipe de l'Iramis (Institut rayonnement matière de Saclay/Direction des sciences de la matière), le premier matériau sans métal noble capable de catalyser, comme le fait le platine, aussi bien la production d'hydrogène à partir de l'eau (pour une utilisation dans les électrolyseurs) que son oxydation (pour un emploi dans les piles à combustible). En greffant le catalyseur bio-inspiré sur des nanotubes de carbone et en incorporant cet assemblage au sein d'une matrice de Nafion®(6), il a été possible d'optimiser la logistique d'approvisionnement du site catalytique en protons et électrons, exactement comme cela est organisé au sein des hydrogénases (figure 2).

Les métallo-enzymes artificielles

Le contrôle de l'environnement proche du site où se déroule la catalyse est crucial pour l'optimisation de son activité. Ceci peut être obtenu *via* une approche originale consistant à créer des objets hybrides basés sur l'insertion d'un catalyseur inorganique au sein d'une protéine. On parle alors de métallo-enzymes artificielles. L'activité de l'enzyme artificielle est contrôlée par la nature du composant synthétique tandis que sa sélectivité dépend de la charpente protéique, ce qui permet à la fois d'obtenir des catalyses originales (des réactions non répertoriées par la biocatalyse) dans des conditions douces et de favoriser la sélectivité de la réaction visée. Il est ainsi possible de contrôler la stabilité de la protéine formée et de maîtriser les coûts de production. De récents résultats acquis au Laboratoire de chimie et biologie des métaux de l'iRTSV démontrent le potentiel des métallo-enzymes artificielles dans le cadre de réactions d'hydroxylations aromatiques(7) ou d'oxydations de sulfures. En collaboration avec le groupe Métalloprotéine de l'IBS, un nouveau type d'oxydases(5) efficaces de thioéthers (R—S—R') a été élaboré en fixant, par des liaisons supramoléculaires, un catalyseur bio-inspiré à base de fer au sein d'une protéine de transport de nickel, NikA (figure 3). Le complexe de fer n'est actif que s'il est inséré dans la protéine, démontrant ainsi la synergie des deux partenaires formant l'hybride. Un autre volet, plus fondamental, a permis de développer une nouvelle technique pour disséquer un mécanisme catalytique d'hydroxylation aromatique en alliant cristallographie des protéines et catalyse bio-inspirée.

Les procédés biologiques, alternative aux procédés industriels

Du fait de la crise énergétique et des contraintes environnementales, notre société va devoir proposer des alternatives à un grand nombre de pratiques industrielles existantes. Beaucoup de ces alternatives vont reposer sur la mise au point de procédés totalement ou partiellement biologiques ou s'inspirant directement des solutions mises en œuvre par la Nature. Plusieurs laboratoires de la Direction des sciences du vivant se sont déjà engagés activement et avec succès dans l'exploration de ces différentes voies. Le CEA contribue ainsi au développement d'alternatives énergétiques et de procédés biotechnologiques durables.

> **Vincent Artero**[1], **Véronique de Berardinis**[2], **Stéphane Ménage**[1] et **Jean Weissenbach**[2]
[1]Institut de recherches en technologies et sciences pour le vivant (iRTSV)
Direction des sciences du vivant
CEA Centre de Grenoble

[2]Institut de génomique (IG)/Genoscope
Direction des sciences du vivant
Évry

(6) Nafion® : polymère fluoré échangeur de protons H^+.

(7) Hydroxylation aromatique : ajout d'un groupement hydroxyle (OH) au cycle d'une molécule.

Les **nanosciences** et les **nanotechnologies** pour l'**énergie**

Nanosciences et nanotechnologies sont des sources majeures d'innovation pour l'ensemble des enjeux associés à l'énergie : la production et le stockage de l'énergie, la conversion et les économies d'énergie. En outre, elles dégagent des voies de progrès en ce qui concerne l'économie de la matière première, en particulier pour le remplacement ou la moindre utilisation des matériaux rares. **Le CEA dispose d'une large base de compétences dans ce domaine. Il la mobilise sur l'ensemble de ces enjeux, avec l'ambition de contribuer aux ruptures scientifiques requises face aux défis de la production d'énergies renouvelables et des économies d'énergie**.

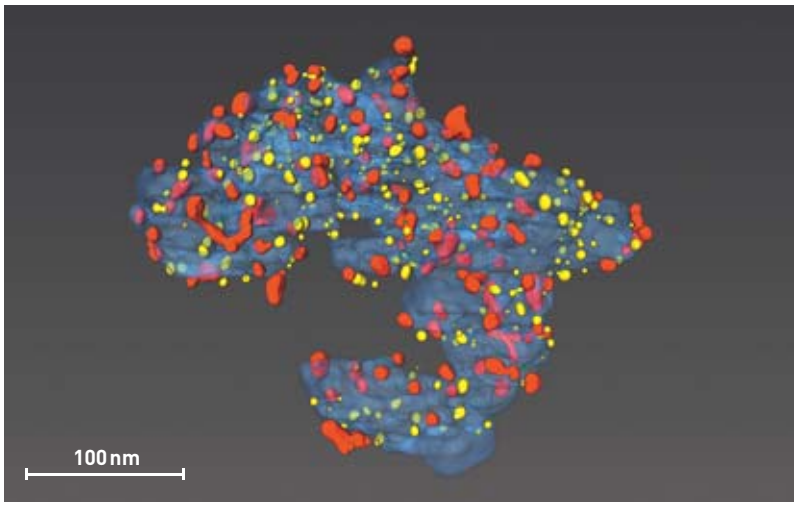
Les compétences en nanosciences et nanotechnologies du CEA reposent sur des techniques avancées de nanofabrication, d'auto-organisation de la matière, de caractérisation et de simulation numérique. Souvent, afin d'accélérer le parcours de l'innovation dans un contexte de vive concurrence internationale, les travaux effectués associent intimement, dès le départ, équipes de recherche amont et équipes de recherche technologique.

Produire de l'énergie électrique

L'énergie solaire **photovoltaïque** est certainement l'un des domaines où les bénéfices d'un contrôle de la matière à l'échelle **nanométrique** sont les plus évidents. La description des processus mis en jeu permet de le comprendre. Après la création de l'exciton (paire électron-trou) lors de l'absorption d'un photon incident au sein d'un matériau **semi-conducteur**, la génération du courant électrique repose sur la séparation des charges sous l'influence du champ électrique d'une **jonction p-n** : l'électron part vers un semi-conducteur **dopé n** et le trou vers un semi-conducteur **dopé p**. Dans une large mesure, le **rendement** de la **cellule photovoltaïque** dépend de l'efficacité de cette séparation. Les défauts des matériaux étant autant d'opportunités de recombinaison des charges produites, il est important de minimiser les distances de transport des électrons et des trous.

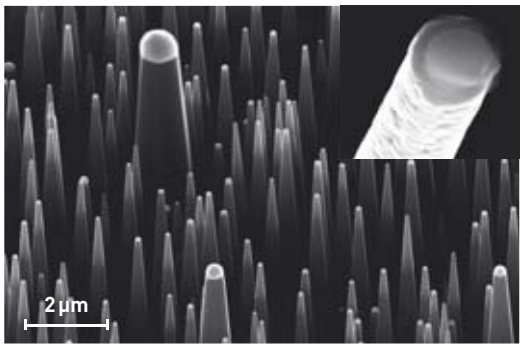
Dans le cas du solaire à base de semi-conducteurs, cette recherche conduit à explorer, au-delà de la classique structure en couches minces, des voies très innovantes comme les structures à base de nanofils semi-conducteurs, qui offrent la perspective de rendements comparables, avec une importante économie de matière. Ces solutions s'appuient sur une maîtrise avancée des procédés de nanofabrication pour réaliser les hétérostructures désirées (figure 1).

Dans le cas du photovoltaïque organique, les mêmes contraintes imposent le mélange intime de deux phases organiques semi-conductrices de types n et p et la réduction à quelques nanomètres des distances entre interfaces, afin d'optimiser la dissociation de l'exciton initial et le transport des charges photogénérées. Cet objectif mobilise les compétences des chimistes, tant sur la synthèse de matériaux organiques n ou p plus performants, que sur la nanostructuration du matériau lors du mélange des **polymères** (figure 2). Sur la base de tels systèmes organiques, les meilleurs rendements obtenus aujourd'hui au CEA approchent les 7 %.



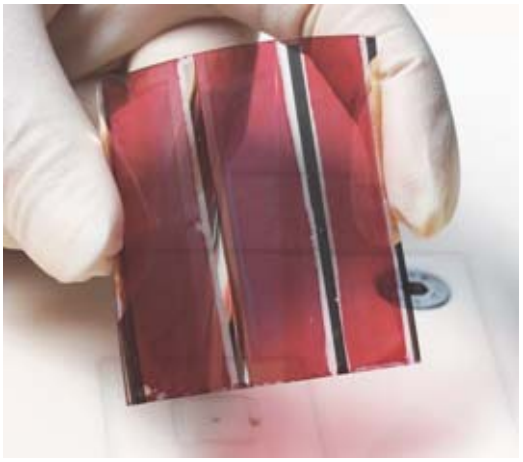
CEA

Catalyseur efficace d'une pile à combustible (PAC), le platine est un métal rare et coûteux qu'il convient d'économiser. Pour réduire sa quantité et optimiser le fonctionnement de la PAC, il est utilisé sous la forme de nanoparticules qui sont dispersées dans des matériaux supports poreux de taille nanométrique, souvent à base de carbone (noir de carbone). Les nanoparticules de platine réparties sur le noir de carbone, ici de la cathode, après 2000 heures de fonctionnement de la PAC, apparaissent nettement sur cette image obtenue en microscopie électronique à transmission (en tomographie) sur la plateforme de nanocaractérisation (PFNC) de MINATEC. Il est possible de voir que les plus grosses (> 10 nm, artificiellement colorées en rouge) se situent à la surface du noir de carbone, tandis que les plus petites (< 3 nm, colorées en vert) se trouvent à l'intérieur.



CEA

Figure 1.
Nanofils de silicium élaborés par croissance CVD (*Chemical Vapor Deposition*) à l'Inac (CEA Grenoble). L'insert montre une hétérojonction radiale SiGe-Si (silicium germanium-silicium) dans un autre nanofil. Les deux images ont été obtenues en microscopie électronique. De telles géométries constituent un des axes de recherche pour de futures générations de cellules photovoltaïques, dans lesquelles le matériau actif est finement nanostructuré afin de combiner performances et économie de matière.



P. Avavian/CEA

Figure 2. Cellule photovoltaïque organique flexible fabriquée au Liten (CEA Grenoble, site Ines). Le matériau actif de telles cellules est constitué de polymères semi-conducteurs organiques. Le travail des chimistes porte sur la synthèse des molécules adaptées pour absorber efficacement la lumière du spectre visible et sur la réalisation d'un mélange de polymères dont la nanostructuration est contrôlée afin d'optimiser le transport des électrons et des trous vers les électrodes.

Stocker l'énergie

Les **batteries** sont un composant essentiel d'une transition vers une économie plus respectueuse de l'environnement : véhicules automobiles électriques, adaptation de l'offre à la demande avec le stockage de l'énergie produite par des sources intermittentes (photovoltaïque, éolien), etc.

Dans ce domaine, les nanomatériaux sont une source de progrès considérables, comme l'illustre le cas des batteries lithium-ion (Li-ion), l'une des technologies les plus performantes et les plus diffusées (voir *Énergie en batteries*, p. 56).

Ces batteries sont basées sur l'échange réversible de l'ion lithium, au travers d'un liquide **électrolytique**, entre une **électrode positive** (insertion de l'ion Li^+, classiquement dans un composé tel que du phosphate de fer, $FePO_4$) et une **électrode négative** (insertion de l'atome de lithium). La **capacité** de la batterie dépend directement de la quantité de lithium pouvant être réversiblement stockée par chacune des électrodes. Le **silicium**, qui est à même de former une phase particulièrement riche en lithium ($Li_{15}Si_4$), apparaît ainsi comme un matériau d'insertion très prometteur. Cependant, l'insertion de telles quantités de lithium induit un gonflement important, d'un facteur supérieur à 3, du silicium. Ce gonflement conduit à la fragmentation du matériau lors des cycles de charge-décharge des batteries. Face à cette difficulté, la nanostructuration du silicium apporte une solution : le phénomène de fracturation est bien plus limité pour des nanoparticules, plus aptes à supporter la contrainte associée au gonflement, qu'un matériau massif. Sur de tels enjeux, les équipes du CEA, ici celles de l'Institut rayonnement matière de Saclay de la Direction des sciences de la matière (Iramis/DSM) et de l'Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux) de la Direction de la recherche technologique (DRT), sont actives, depuis la synthèse des nanomatériaux (figure 3) jusqu'à la réalisation de dispositifs technologiques permettant l'évaluation des performances et préparant le transfert industriel.

Récemment, une équipe de l'Institut nanosciences et cryogénie (Inac/DSM), en collaboration avec l'**Institut des Matériaux Jean Rouxel** (Nantes, Loire-Atlantique), a pour la première fois étudié les performances d'électrodes en nanofils de silicium pour des supercapacités. Dispositifs similaires aux batteries, les supercapacités permettent de délivrer une **densité de puissance** bien plus élevée, avec cependant une **densité d'énergie** stockée plus faible. Dans ce cas, des électrodes constituées de nanofils de silicium offrent une **densité de courant** 7 fois supérieure à celle d'une surface plane de silicium, tout en préservant une excellente tenue lors de cycles de charge-décharge répétés.

Convertir l'énergie

Face au caractère intermittent de la production des énergies renouvelables, le stockage de l'énergie sous d'autres formes, *in fine* non émettrices de gaz à effet de serre, est un enjeu majeur. L'hydrogène est un vecteur particulièrement efficace, dont la combustion est non polluante. Les **piles à combustible** reposant sur les membranes échangeuses d'ions sont une technologie relativement mature, mais exigent l'usage de quantités significatives de platine. Les équipes du CEA travaillent sur l'amélioration des technologies disponibles, notamment sur l'économie de platine, ainsi que sur l'exploration de voies de rupture.

Sur le premier axe, les dernières années ont enregistré des progrès significatifs, avec une forte diminution de la quantité de platine mise en œuvre. Dans ce contexte, il importe de disposer de techniques de caractérisation très avancées autorisant la connaissance de la structure des couches **catalytiques**, en particulier la distribution en taille et la répartition des particules de **catalyseur**. Pour ce faire, sur la plateforme de nanocaractérisation PFNC[1] de **MINATEC**, les équipes de l'Inac et du Liten s'appuient par exemple sur la technique de **tomographie électronique**. Il est ainsi possible de voir la distribution en trois dimensions des catalyseurs sur leur carbone support et de suivre son évolution à diverses étapes de la vie du dispositif (voir l'illustration p. 81).

CEA

P. Avavian/CEA

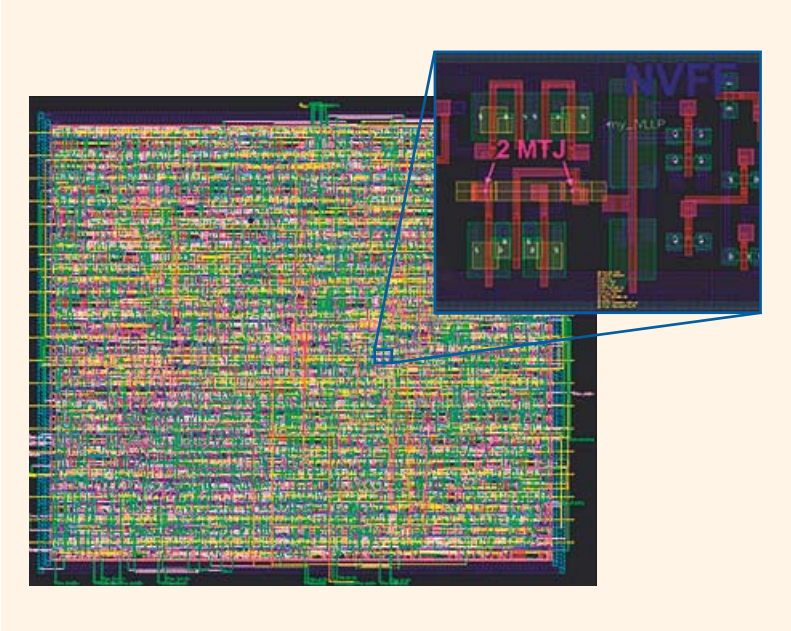
Figure 3.
Synthèse de nanomatériaux. À gauche, installation pour la production de nanoparticules par pyrolyse laser (Iramis, CEA Saclay). Les nanoparticules sont élaborées lors de l'interaction entre un faisceau laser infrarouge et un flux de réactifs formé à partir de précurseurs gazeux ou liquides. Cette installation de recherche permet la fabrication de 60 g de nanoparticules de silicium par heure. Sur des matériaux similaires (carbure de silicium, SiC), des taux de production plus élevés, de l'ordre du kg/h, sont obtenus sur un pilote développé au sein du Département des matériaux pour le nucléaire de la Direction de l'énergie nucléaire (DMN/DEN). Les nanoparticules de silicium sont ensuite associées à d'autres matériaux pour constituer les électrodes de batteries. À droite, déchargement confiné d'un broyeur haute énergie semi-industriel contenant des poudres nanostructurées, au sein de la plateforme Nanomil (*Nanostructured materials by milling*) du Liten (CEA Grenoble). Nanomil est dédiée au transfert industriel (synthèse de matériaux nanostructurés pour batteries Li-ion).

(1) Pour faire face aux exigences de la caractérisation la plus avancée (expertise élevée, coûts d'investissements considérables) associée à ses programmes, le CEA a rassemblé au sein de la PFNC les équipes des Instituts Inac, Leti (Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information) et Liten. Recherche fondamentale et recherche technologique sont développées sur les mêmes outils, en assurant un passage rapide des développements méthodologiques conduits en amont vers les usages technologiques. D'autres techniques de caractérisation de la plateforme contribuent aux recherches pour l'énergie, comme les spectroscopies de surface, la diffraction X, les analyses par faisceaux d'ions ou la résonance magnétique nucléaire.

Économiser l'énergie

Les économies d'énergie constituent un dernier enjeu majeur. L'apport des nanotechnologies dans ce domaine est d'ores et déjà important. Ainsi, dans le cas de l'éclairage, les diodes électroluminescentes permettent la production de lumière avec une efficacité élevée à partir de puits ou de boîtes quantiques. Elles connaissent une vaste diffusion auprès du grand public. La start-up HelioDEL, créée en 2011 sur la base des travaux du CEA Grenoble, a ainsi pour ambition le développement de diodes à nanofils de nitrure de gallium (GaN) sur substrat silicium.

Dans un autre domaine, l'innovation réside dans les composants et dans l'architecture des circuits intégrés issus de la microélectronique. En effet, les processeurs des ordinateurs, des téléphones portables et de nombreux autres dispositifs sont une source importante de consommation d'énergie, non négligeable à l'échelle d'un pays. De plus, la consommation des circuits intégrés limite l'autonomie et donc les usages des appareils mobiles (téléphones, consoles de jeu…). Les mémoires de type MRAM(2), sur lesquelles le laboratoire Spintec (Spintronique et technologies des composants)(3) du CEA Grenoble a fortement innové, combinent consommation très faible, cyclabilité(4) élevée, grande vitesse d'écriture, immunité aux radiations ionisantes et surtout non-volatilité. Les performances et l'intérêt de composants électroniques hybrides (CMOS(5)-MRAM) sont étudiés en vue de déterminer la réduction de consommation possible par comparaison aux technologies classiques de la microélectronique silicium (CMOS-SRAM(6) et DRAM(7)). Pour ce faire, les recherches combinent étude de la physique des composants élémentaires de type MRAM et travail sur la conception des futures architectures CMOS-MRAM (figure 4). En associant plus intimement fonctions logiques et mémoires dans l'architecture des circuits, il est par exemple possible de créer des circuits reprogrammables, à la fonctionnalité optimisée pour un calcul donné, et de réaliser une électronique *normally-off*, c'est-à-dire où les diverses parties d'un processeur ne sont alimentées que le temps nécessaire au calcul.



CEA

Figure 4.
Dessin des masques d'un filtre numérique complet, conçu avec les outils classiques de la microélectronique.
Le zoom montre une bascule synchrone (*flip-flop*) à mémoire non volatile (NVFF).
La non-volatilité vient de l'ajout des deux jonctions tunnel magnétiques (MTJ) fabriquées dans une étape complémentaire au-dessus des composants CMOS, donc avec un très faible surcoût en surface consommée.
À partir des calculs effectués, le gain en consommation de tels circuits hybrides, intégrant électronique silicium et éléments de type MRAM est, comparativement aux architectures classiques, estimé à un facteur 10 !

Un domaine prioritaire pour l'énergie

Le potentiel considérable des avancées issues des nanosciences et des nanotechnologies pour les technologies pour l'énergie a été identifié par l'ensemble des grands acteurs internationaux. Il se situe ainsi au premier rang des priorités de la National Nanotechnology Initiative aux États-Unis, dont le DoE (US Department of Energy) est maintenant la principale agence contributrice, et des priorités du Plan d'Action 2015 pour les nanotechnologies publié en 2011 par le Gouvernement fédéral en Allemagne.

Sur la base des avancées déjà réalisées, l'apport des nanotechnologies à des domaines aussi divers que le solaire photovoltaïque, la récupération de chaleur (thermoélectricité), le stockage de l'énergie dans les batteries, les supercapacités ou les piles à combustible est désormais une réalité. Avec ses partenaires académiques et industriels, le CEA combine ses compétences en nanosciences et nanotechnologies, et son savoir-faire sur les systèmes industriels dans les nouvelles technologies pour l'énergie. Il entend ainsi répondre aux deux enjeux-clés de ces technologies : des performances améliorées et un développement technologique durable, permettant une diffusion à grande échelle des technologies en limitant le recours aux ressources non renouvelables (matériaux rares…).

> **Yves Samson**
Direction du Programme transversal
« Nanosciences »
CEA Centre de Grenoble

(2) MRAM : *Magnetic Random-Access Memory*. Cette mémoire non volatile est basée sur l'utilisation de jonctions tunnel magnétiques. Elle combine non-volatilité intrinsèque, immunité élevée aux radiations, grande vitesse à la lecture et à l'écriture, forte densité et faible consommation. Aussi est-elle aujourd'hui identifiée par la feuille de route de la microélectronique comme l'une des technologies les plus prometteuses pour au moins une partie des mémoires dans les applications logiques.

(3) Le laboratoire Spintec (CEA-CNRS-Université Joseph Fourier-Institut national polytechnique de Grenoble) et le Leti, en collaboration avec le Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier (Hérault) et l'Institut d'électronique fondamentale d'Orsay (Essonne), ont mis au point un ensemble d'outils logiciels pour évaluer les gains pouvant être obtenus en ajoutant des jonctions tunnel magnétiques dans les circuits intégrés, notamment dans les processeurs. Ces outils ont permis la conception du circuit représenté figure 4. Ils sont mis à la disposition de plusieurs partenaires nationaux et internationaux.

(4) Cyclabilité : aptitude d'un composant à passer de l'état 0 à l'état 1 sans dégradation. Les parties de la mémoire d'un ordinateur proches du processeur, sollicitées un grand nombre de fois, requièrent une cyclabilité très élevée (10^{14}).

(5) CMOS : *Complementary Metal Oxide Semiconductor*. Technologie de circuits intégrés basée sur l'utilisation de transistors de type MOS complémentaires (un étage de type p et un étage de type n). Elle est employée dans la quasi-totalité des applications purement logiques en raison de ses atouts (vitesse, fiabilité et faible consommation).

(6) SRAM : *Static Random-Access Memory*. Il s'agit d'une mémoire CMOS, donc volatile, extrêmement rapide mais peu dense (6 transistors par cellule mémoire). Elle est utilisée dans les applications nécessitant une grande vitesse, pour une quantité de données relativement faible, par exemple dans les mémoires caches des processeurs.

(7) DRAM : *Dynamic Random-Access Memory*. Cette mémoire est constituée d'une capacité et d'un transistor d'accès. L'information est stockée sous forme de charge électrique dans la capacité. Elle doit être rafraîchie régulièrement car la capacité se décharge spontanément au cours du temps. Cette mémoire moyennement rapide, mais très dense, est typiquement utilisée comme mémoire principale dans les ordinateurs.

Les **transports électriques**

Véhicules hybrides et hybrides rechargeables, auto-partage de voitures à batteries électriques dans un nombre croissant de villes, communes se dotant de tramways électriques et de bus à hydrogène ou encore bateaux électriques, automobiles et avions bientôt équipés de systèmes de piles à combustible… **La motorisation électrique connaît aujourd'hui un développement réel et touche tous les modes de transport**. Un déploiement permis par les progrès réalisés dans la conception des batteries électriques. Son avenir repose notamment sur la mise en place d'infrastructures appropriées, la compétitivité économique de la mobilité électrique, la poursuite des travaux de R&D dans ce domaine, en particulier en matière d'autonomie des batteries, et l'adaptation des usagers à ce type de transport.

CEA

Recharge du bus hybride rechargeable d'Irisbus sur la station de recharge rapide du CEA Grenoble.

La mobilité à venir peut être résumée en trois mots : propre, sûre et connectée. Étant donné la diversité des moyens de transport et des types de trajet, il n'existe pas de solution magique et universelle pour y arriver. Les véhicules thermiques vont continuer à fournir une part importante du parc pendant de nombreuses années encore. Cependant, les véhicules électriques vont prendre toute leur place dans le cadre de cette nouvelle offre. En effet, la mobilité électrique, sous toutes ses formes, permet de répondre à la fois aux défis environnementaux et énergétiques et à l'attente justifiée des populations pour une mobilité meilleur marché et plus pratique, notamment dans les pays émergents. Néanmoins, de nombreux challenges restent à relever, tels que la mise en place de nouveaux modèles économiques, l'établissement d'une nouvelle chaîne industrielle respectueuse de l'environnement, tenant compte dès sa conception de l'ensemble de la vie d'un véhicule (production, utilisation et recyclage), l'adaptation des infrastructures et l'adoption par les usagers de nouvelles habitudes de déplacement.

Des débuts difficiles

L'électrification des véhicules automobiles n'est pas une idée nouvelle. Les premiers moteurs électriques et les premiers **accumulateurs** rechargeables remontent au milieu du XIXe siècle. Quant aux premiers véhicules, ils datent de la fin du même siècle, dont la célèbre « La Jamais contente », qui atteignit une vitesse de 106 km/h en 1899 et parcourut un trajet sans recharge de 307 km en 1901. Cependant, après un démarrage prometteur au début du XXe siècle, la motorisation électrique a été supplantée par la motorisation thermique. L'amélioration rapide des performances et de la fiabilité des moteurs, la baisse du coût du carburant, l'autonomie associée, la praticité d'usage avec l'essor des infrastructures (routes et stations-service) et l'arrivée d'un démarreur électrique ont eu raison de la traction électrique et de ses **batteries** au plomb lourdes, chères et sans autonomie réelle.

Au cours des années quatre-vingt-dix, le véhicule électrique (BEV pour *Battery Electric Vehicle*), équipé généralement de batteries nickel-cadmium (NiCd), a tenté une nouvelle percée, notamment en France. Sans plus de succès : seuls 10 000 véhicules ont été mis sur la route. Le coût, la durée de vie, l'assurance des batteries contre le risque ainsi que leur autonomie limitée ne répondaient pas aux attentes des usagers.

En parallèle, les constructeurs automobiles ont développé la gamme des **véhicules hybrides** thermique/électrique (HEV pour *Hybrid Electric Vehicle*). Cette technologie offre des possibilités parfaitement adaptées à un usage diversifié de l'automobile. En ville, la conduite à vitesse faible et très variable profite du rendement élevé (de l'ordre de 90 %) du moteur électrique. Les batteries, généralement de chimie nickel-hydrure métallique (NiMH) et d'autonomie réduite (quelques kilomètres), sont rechargées par le moteur thermique positionné à son rendement maximal. Sur les trajets interurbains et sur autoroute, le moteur thermique reprend ses droits et assure une grande autonomie, liée au carburant liquide.

Lancée en 1997, la Toyota Prius, pionnière des véhicules hybrides, a dépassé les 2 millions de modèles vendus. Même si le taux de pénétration des véhicules hybrides reste encore bas comparé à l'ensemble du parc automobile, nul ne doute que l'élan est donné. Ainsi, de nombreux constructeurs comptent désormais au moins un véhicule de ce type dans leur gamme.

Véhicules électriques : un marché en émergence

Le développement des batteries lithium (voir *Des batteries pour la mobilité électrique*, p. 56), dotées de **densités d'énergie massique** et **volumique** accrues, acceptant de nombreux et rapides cycles

de charge-décharge et présentant des durées de vie améliorées, a conduit les constructeurs automobiles à lancer, à partir de 2010, une troisième tentative de déploiement de véhicules électriques. Les modèles proposés offrent des autonomies de 70 à 150 km, qui dépassent largement la distance moyenne parcourue quotidiennement par un automobiliste. Leur avantage est notable pour des usages urbains ou une utilisation locale à la campagne. Le nombre d'immatriculations, bien qu'encore très faible (0,2 % du marché automobile français en 2011), est en augmentation : il a atteint en 2012 plus du double des immatriculations délivrées en 2011. Parmi les déploiements les plus significatifs figurent les Bluecar d'Autolib', service d'auto-partage parisien, les Ion et les C-Zéro, et les véhicules utilitaires, de type Kangoo, commandés à 15 000 exemplaires par la centrale d'achats de l'État (Union des groupements d'achats publics) pour le compte d'une vingtaine d'entreprises publiques ou privées. De nouveaux véhicules électriques sont apparus au cours du second semestre 2012, avec notamment l'entrée remarquée de la Fluence. Toutefois, le décollage des ventes de véhicules électriques pourrait venir des petits véhicules urbains ou des quadricycles, qui proposent un compromis intéressant entre la sécurité, la maniabilité et la facilité de stationnement en environnement urbain par rapport aux voitures et aux scooters.

Hybrides rechargeables et véhicules à hydrogène

Pour répondre à la fois à la volonté de réduire les émissions polluantes, notamment en milieu urbain, tout en préservant une autonomie de plusieurs centaines de kilomètres, les véhicules hybrides évoluent avec l'apparition des **véhicules hybrides rechargeables** (PHEV pour *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*). D'architecture comparable aux hybrides classiques, ces véhicules offrent une autonomie accrue en mode électrique, de 15 à 60 km, grâce à l'intégration d'une batterie lithium de plus grande **capacité** et la possibilité de la recharger à une prise électrique. Les premiers véhicules en vente sont la Chevrolet Volt aux États-Unis, l'Opel Ampera et la Toyota Prius Rechargeable en Europe.

Un pas supplémentaire dans la recherche d'une automobile propre à grande autonomie est franchi avec l'avènement des véhicules à **pile à combustible** (FCEV pour *Fuel Cell Electric Vehicle*). Des progrès significatifs dans la technologie des piles à combustible (PAC) ont été réalisés ces dernières années, aussi bien en termes de performance et de durée de vie, que d'intégration – utilisation de châssis standards pour des systèmes de 90 **kW** –, d'autonomie – la Toyota FCHV-adv (*Fuel Cell Hybrid Vehicle-advanced*) a parcouru 760 km sans émettre de gaz carbonique (CO_2), mieux que l'essence ! – et de coûts – réduction de 80 % depuis 2002 conduisant, d'ici 2025, à un coût total de possession[1] comparable à celui d'un véhicule thermique ou à batterie, voir *La compétitivité des déplacements électriques*, p. 87. Les retours des centaines de démonstrateurs, avec plus de 15 millions de kilomètres effectués et plus de 90 000 pleins, confortent les constructeurs automobiles comme Daimler, General Motors, Toyota, Honda ou Nissan, qui ont annoncé le lancement commercial de ce type de véhicule pour 2015. Une PAC de plus faible puissance (5 à 40 kW) est aussi intégrée comme prolongateur d'autonomie dans des véhicules, notamment utilitaires.

L'autre défi à relever pour les FCEV est le développement d'une infrastructure hydrogène (H_2). Plusieurs centaines de stations H_2 sont déjà déployées à travers le monde et des initiatives de création de voies hydrogène se multiplient en Amérique du Nord, dans les pays scandinaves, au Royaume-Uni et en Allemagne, pays qui vise l'installation de 500 à 1 000 stations d'ici 2020. L'évolution récente de la réglementation sur la circulation de véhicules à hydrogène sur la voie publique devrait favoriser les initiatives de même type en France (figure).

(1) Le coût total de possession (CTP) représente l'ensemble des dépenses afférentes à la possession d'un véhicule : achat, entretien, réparations, consommation de carburant.

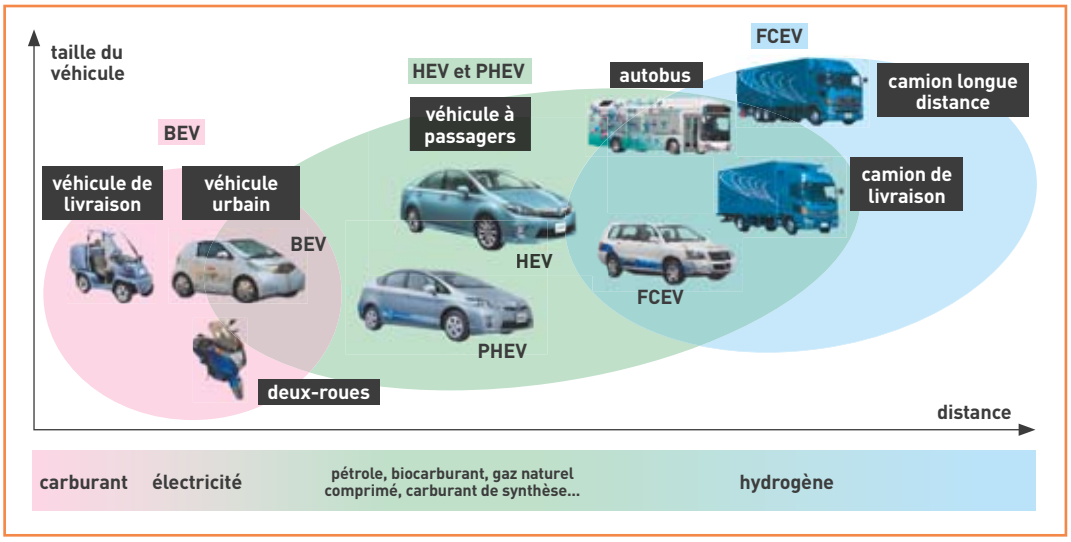


Figure.
Offre complémentaire de motorisations électriques pour le transport terrestre en fonction des usages. Elle permet de répondre à la diversité des types de trajet et aux attentes des usagers : véhicules électriques à batterie (BEV) pour les trajets à rayons d'action limités, véhicules hybrides thermique/électrique (HEV) et véhicules hybrides rechargeables (PHEV) pour un usage mixte urbain/moyennes distances et véhicules à pile à combustible (FCEV) pour les moyennes/longues distances, sans émission de CO_2.

CEA

Le voilier Zéro CO_2 naviguant au large d'Ajaccio. Long de 12 m, il est équipé d'une batterie lithium et d'un système de PAC de 25 kW. Ce dernier alimente le moteur auxiliaire électrique du voilier. Des énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique) subviennent aux besoins du bord.

Tous les transports sont concernés

L'électrification ne se limite pas à l'automobile ; elle s'adresse à tous les modes de transport et à tous les types de véhicules. Ainsi, nombre de véhicules spéciaux, tels des véhicules d'aéroport ou de propreté urbaine, des chariots élévateurs..., sont équipés depuis plusieurs années de moteurs électriques. La nouveauté réside dans l'introduction de systèmes de PAC quand un fort besoin en autonomie est nécessaire ou pour des activités continues. C'est notamment le cas des chariots élévateurs : plus de 3 000 unités ont été vendues avec, puis sans incitations financières ces deux dernières années dans des centres logistiques comme ceux de Coca-Cola ou US Postal. Le bilan de leur exploitation est très positif tant sur le plan de la productivité que sur celui du retour sur investissement. Cela présage un déploiement important dans les années à venir.

Le monde aéronautique n'est pas à l'écart et s'intéresse à l'électrification de sa flotte. Même si l'électricité à bord des avions est actuellement produite par des turbines et des groupes électrogènes à carburant **fossile**, des systèmes de PAC ont été testés comme auxiliaires de puissance (APU), par exemple le système 20 kW de Michelin évalué dans un A320. Les avionneurs (Airbus, Boeing) visent des premiers vols commerciaux équipés de systèmes de PAC, pour l'alimentation d'applications non essentielles, avant 2020.

Le marché maritime suit la même évolution. L'offre de bateaux électriques ne cesse de croître, notamment dans le domaine touristique. Les batteries employées actuellement sont au plomb. Le coût encore trop élevé des batteries lithium reste le frein majeur à leur introduction. De même que pour les voitures, une augmentation de l'autonomie passe par l'ajout de systèmes de PAC, soit en tant qu'APU, soit pour la motorisation. À ce propos, le CEA a récemment démontré, à travers son voilier Zéro CO_2 équipé d'une motorisation électrique hybride batterie lithium/système de PAC, la faisabilité et l'intérêt de ces nouvelles technologies.

Des flottes d'autobus moins polluants

La réduction de la pollution dans le transport terrestre passe aussi par l'intensification de transports en commun propres. De nouvelles gammes d'autobus ont été développées : bus électriques à batterie, bus hybrides thermiques, bus à hydrogène. Une vingtaine de bus à PAC sont ainsi en service à Vancouver (Canada) depuis les Jeux olympiques d'hiver de 2010 et des bus comparables ont été déployés pour les Jeux olympiques de 2012 à Londres (Royaume-Uni).

Le bus électrique représente aujourd'hui une fraction infime du parc français (200 trolleybus[2] pour un parc de 20 000 bus). Ceux roulant en ce moment ont un coût d'exploitation supérieur aux bus **diesel** ou gaz, dû au remplacement fréquent des batteries. Le trolleybus nécessite de plus des installations filaires onéreuses et jugées disgracieuses. Le bus à batterie actuel souffre d'une autonomie trop faible, associée à un volume et à une masse de stockage d'énergie trop élevés qui réduisent sa capacité d'emport en passagers. Ces inconvénients empêchent de jouir de leurs avantages : confort, silence, performances, très peu d'émissions de CO_2 et un prix kilométrique de l'énergie trois fois plus bas que celui du diesel.

La problématique des bus électriques ou hybrides rechargeables est liée au dimensionnement de la batterie. Deux options sont possibles : des batteries permettant de tenir la durée d'un poste ou une batterie plus petite associée à une recharge rapide partielle en bout de ligne. Cette dernière solution est actuellement expérimentée au CEA dans le cadre d'un projet AMI (Appel à manifestations d'intérêt) de l'**Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie** (**Ademe**) piloté par Irisbus (projet ElLiSup, voir *Des batteries pour la mobilité électrique*, p. 56). Le déploiement de ces autobus nécessite le développement de la meilleure solution technique et économique de borne de recharge rapide de forte puissance (200 kW), réglable en tension pour s'adapter au niveau requis pour chacun des bus en exploitation (300 V, 600 V...) et minimisant l'impact sur le réseau. Suivant la longueur des lignes et la distance entre les nœuds du réseau, les bus électriques à recharge en fin de ligne ont un coût sur la durée de vie équivalent au diesel. Les bus hybrides rechargeables verraient quant à eux leur bilan consommation diesel diminuer de 40 à 50 % au lieu de 15 à 25 % pour l'hybride non rechargeable. Les résultats obtenus en 2012 sont très prometteurs et plusieurs agglomérations se sont déjà déclarées intéressées.

Les technologies actuelles présentent une offre complémentaire de motorisations électriques (batterie, hybride, pile à combustible) et un niveau de maturité permettant de répondre à la diversité des types de trajet et de transport et aux attentes des usagers.

> **Laurent Antoni**
Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Centre de Grenoble

(2) Le trolleybus est un autobus propulsé par un moteur électrique alimenté par deux lignes aériennes de contact (caténaires).

La compétitivité des déplacements électriques

Pour des raisons environnementales et stratégiques, les modes de propulsion des transports se diversifient depuis peu : emploi de carburants de synthèse dans les moteurs à combustion interne, véhicules fonctionnant au gaz naturel, électrification du parc automobile, que ce soit pour les véhicules hybrides rechargeables, ou pour les véhicules entièrement électriques à batterie (BEV pour *Battery Electric Vehicle*) et/ou à pile à combustible (FCEV pour *Fuel Cell Electric Vehicle*)... Qu'en est-il aujourd'hui des compétitivités respectives de ces différents systèmes ?

Une analyse technico-économique globale de la mobilité doit prendre en compte non seulement les données relatives aux composants technologiques majeurs des différentes motorisations, présentes et futures, des véhicules (moteurs à combustion interne, moteurs électriques), mais aussi les besoins réels de mobilité de la population, notamment pour des raisons d'autonomie encore faible des BEV. Un rapport du CGDD[1] indique en effet que la motorisation à autonomie limitée peut répondre à bien des besoins du parc de véhicules particuliers légers en France : pour une distance moyenne parcourue de 15500 km/an, plus de 90 % des déplacements journaliers se font sur une distance inférieure à 100 km, soit l'autonomie type des véhicules électriques qui vont être mis sur le marché à très court terme. Les 10 % restants représentent cependant 37 % du kilométrage total, ce qui laisse une place confortable aux modes de déplacement offrant une grande autonomie (véhicules classiques et à pile à combustible).

Les véhicules électriques à batterie

Lorsqu'une mobilité électrique peut se substituer à tout ou partie de la mobilité pétrole classique, la compétitivité du «carburant électricité» pris au réseau est bien réelle, en tout cas au prix actuel de cette énergie en France dans le cadre d'un contrat domestique (par exemple recharge de nuit de véhicules à batterie ou hybrides rechargeables). À condition de ne pas être soumis à un équivalent de la taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques (TICPE). En revanche, une analyse économique en coût total de possession (CTP : achat, entretien, réparations et consommation), par exemple sur une durée de dix ans et prenant en compte les différences de coûts d'investissement, montre que le déplacement électrique n'est, hors subventions telles que pratiquées aujourd'hui, pas rentable si les coûts des batteries restent élevés, par exemple autour de 300 €/kWh (figure 1), valeur moyenne envisagée en 2020 par une étude européenne[2]. Il apparaît par ailleurs qu'il n'est pas intéressant de rechercher des autonomies élevées, notamment pour des distances annuelles parcourues inférieures à 30000 km : la fréquence des trajets journaliers longs ne justifiant pas un surinvestissement en capacité de stockage.

Les véhicules électriques à pile à combustible

La segmentation des déplacements n'a, dans ce cas, pas d'impact sur la compétitivité des déplacements en véhicule à hydrogène (H_2) par rapport aux véhicules classiques. En effet, plusieurs centaines de kilomètres pourront être parcourus d'une traite pour des durées de rechargement quasiment identiques. En revanche, le prix des piles à combustible, exprimé généralement en €/kW, influe grandement sur les seuils de rentabilité de l'hydrogène à la pompe, confirmant ainsi l'intérêt des recherches dans ce domaine. Comme le montre la figure 2, en raisonnant en CTP, un véhicule à pile à combustible de 70 kW, au coût de 40 €/kW[2] et consommant 1 kg de H_2/100 km (valeur actuelle du véhicule en question) serait compétitif avec un véhicule classique similaire consommant 5,6 L/100 km, si les prix des carburants à la pompe sont respectivement d'environ 6,8 €/kg de H_2 et 1,75 €/L. Le DoE (US Department of Energy) envisage d'ores et déjà un coût cible de 30 $/kW (autour de 20 €/kW), pour une production de masse à moyen terme[3]. Ceci rendrait l'hydrogène carburant compétitif jusqu'à 8 €/kg. Un objectif qui semble tout à fait réalisable.

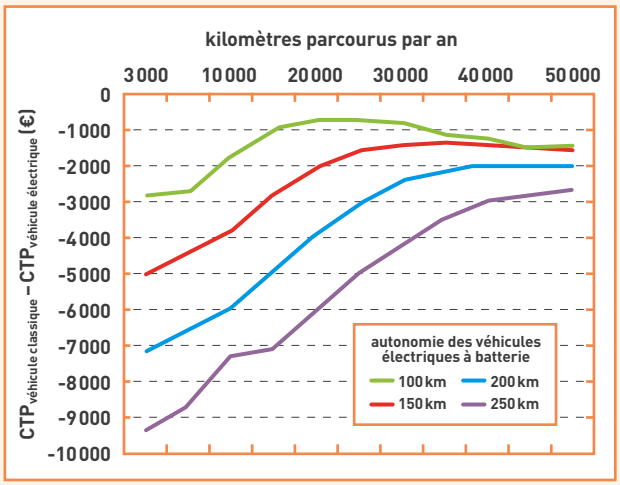


Figure 1.
Différences des coûts totaux de possession (CTP) de véhicules classiques et électriques à batterie (autonomies variables, prix de la batterie = 300 €/kWh), pour 10 ans d'usage (taux d'actualisation de 5 %).

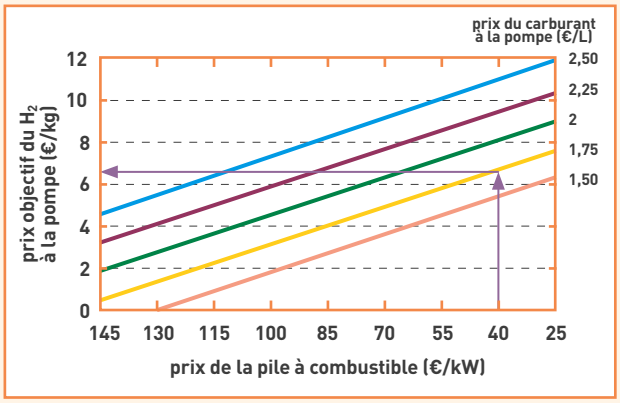


Figure 2.
Prix objectifs de l'hydrogène à la pompe en fonction des coûts des piles à combustible (pile de 70 kW, 15000 km/an, sur 10 ans, taux d'actualisation de 5 %).

(1) Stéphanie Depoorter et Pierre-Marie Assimon, «*Les véhicules électriques en perspective. Analyse coûts-avantages et demande potentielle*», mai 2011, Commissariat général au développement durable (CGDD). Téléchargeable à l'adresse suivante : http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-vehicules-electriques-en.html.

(2) «*A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis. The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles*», McKinsey & Company, novembre 2010. Téléchargeable à l'adresse suivante : http://www.fch-ju.eu/sites/default/files/documents/Power_trains_for_Europe.pdf.

(3) 2011 Annual Merit Review Proceedings, US Department of Energy. Téléchargeable à l'adresse suivante : http://www.hydrogen.energy.gov/annual_review11_fuelcells.html.

> **Alain Le Duigou, Yuan Guan** et **Aimen Smatti**
Institut de technico-économie des systèmes énergétiques (I-tésé)
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Saclay

Améliorer la **performance énergétique** de l'**habitat**

Construire des bâtiments plus économes en énergie, sans réduire le confort des habitations et sans impact négatif sur la facture des particuliers est un enjeu fort de la politique énergétique française. C'est aussi un des axes de développement stratégique du CEA. **Ses chercheurs conçoivent au quotidien des innovations, testées sur des plateformes de démonstration qui font le lien entre la R&D et les performances en milieu réel**. À la clé, l'optimisation énergétique des constructions, de la conception à la gestion de toutes leurs composantes, en neuf comme en rénovation.

P. Avavian/CEA

P. Rifflard/CEA

La plateforme Incas. Située à l'Ines, elle comporte trois maisons expérimentales totalement instrumentées, les cellules PASSYS associées (une cellule en bas à gauche) et plusieurs bancs pour tester l'intégration de systèmes photovoltaïques en toiture. Les cellules PASSYS permettent de développer et de caractériser des composants d'enveloppes et de systèmes CVC (chauffage, ventilation et climatisation) innovants. Cet outil de recherche offre aux scientifiques les moyens d'appréhender le comportement de dispositions constructives nouvelles.

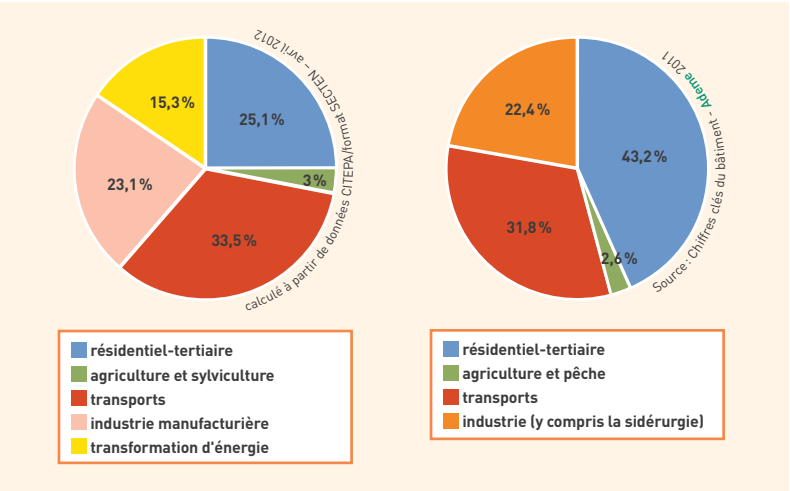


Figure 1.
À gauche, répartition par secteur d'activité des émissions de gaz à effet de serre en France métropolitaine en 2010. Les émissions du résidentiel-tertiaire dépendent des conditions climatiques. Des températures douces permettent de réduire la consommation de chauffage et donc les émissions de gaz à effet de serre. L'année 2010 a été particulièrement froide.
À droite, consommation d'énergie finale en France par secteur en 2010. Le secteur du résidentiel-tertiaire est responsable de plus du quart des émissions de gaz à effet de serre. C'est également celui qui consomme le plus d'énergie.

Le domaine de la construction représente aujourd'hui, en France et en Europe, le secteur d'activité le plus énergivore et le plus émetteur de gaz à effet de serre (figure 1). Plus particulièrement, le secteur de l'habitat en France recèle de nombreuses passoires thermiques[1] qu'il convient de rénover et de classer à l'aide de la fameuse étiquette énergétique, bien connue du public pour sa généralisation dans le secteur des produits électroménagers.
L'habitat est appelé à subir une révolution majeure, tant au niveau de la conception – cas des bâtiments neufs (Bâtiment Basse Consommation ou BBC et Bâtiment à Énergie Positive ou BPOS) qui constituent moins de 3 % du parc total – que de la rénovation (part principale du marché à venir). En effet, qu'il s'agisse du réchauffement climatique et de l'augmentation des coûts de l'énergie, qui vont peser de façon sensible sur la facture des usagers, ou de la complexité croissante des équipements au sein de l'habitat (**domotique**, sécurité, multimédias, assistance aux personnes âgées...), le bâti doit s'adapter... et vite !

Un axe stratégique pour le CEA

De près ou de loin, plus de 400 chercheurs du CEA œuvrent dans le sens de l'amélioration énergétique du bâtiment. Ils trouvent dans ce domaine d'activité un terrain d'expérimentation et de démonstration idéal pour accueillir les nombreuses briques technologiques élaborées dans leurs laboratoires de recherche. Il s'agit, par exemple, de composants et de systèmes énergétiques (génération, stockage d'énergie électrique, thermique) pour la production d'électricité, de chauffage en hiver ou de rafraîchissement en été ; de dispositifs permettant de capter, mesurer et transmettre toute information utile à l'amélioration de la performance énergétique, en relation étroite avec les attentes des usagers ; de la conception de solutions (logiciels, interface homme-machine...) à même d'interpréter et d'afficher sans erreur, sous une forme compréhensible par un large public, les informations issues des capteurs.
Les sujets d'innovation appliqués au secteur de l'habitat ont été initiés au sein du Laboratoire énergétique

(1) Le secteur français de l'habitat est caractérisé par 31 millions de logements (17 millions de logements individuels et 14 millions de logements collectifs), dont les deux tiers ont été construits avant la première Réglementation thermique de 1974. Le chauffage représente plus de 70 % de la consommation d'énergie.

du bâtiment (LEB) de l'Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux), créé en 2005 à l'**Ines** (**Institut national de l'énergie solaire**). Ils se sont depuis élargis à plusieurs autres thèmes : intégration à l'habitat de l'énergie solaire, **photovoltaïque** puis thermique (objectif de performances technique et socio-économique) ; étude des performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment et de ses techniques constructives ; diagnostics de bon fonctionnement et de bon usage des habitats neufs et rénovés ; amélioration de la qualité de l'environnement intérieur et de l'air. L'importance de ce dernier aspect va croître pour les habitations ayant un degré d'isolation rendant obligatoire la présence de dispositifs de renouvellement de l'atmosphère à des fins de performance énergétique et surtout de salubrité et de santé publique.
Le LEB constitue pour l'ensemble des chercheurs de la Direction de la recherche technologique (DRT), mais aussi de la profession du bâtiment et des acteurs académiques, un lieu d'expérimentation exceptionnel, compte tenu de sa dimension systémique qui lui permet de tester n'importe quel composant (production de chaleur, froid, énergie, stockage...) en association avec d'autres produits, dans un souci de performance globale.

Des plateformes pour tester l'habitat

Outils de modélisation en amont, de caractérisation, de simulation, tests en grandeur réelle des solutions à l'échelle de vraies constructions : les plateformes technologiques du CEA comme la plateforme Incas (Instrumentation de nouvelles constructions d'architecture solaire) de l'Institut Liten à l'Ines, ou la plateforme @Home de l'Institut Leti (Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information) à Grenoble, sont complémentaires pour tester des systèmes constructifs innovants ou des composants dialoguant ensemble.

La plateforme Incas

Cette plateforme est dédiée au développement d'habitations à énergie positive, c'est-à-dire produisant plus d'énergie qu'elles n'en consomment sur une année. Elle se compose à ce jour de trois maisons expérimentales – deux conçues avec des techniques basées sur le béton et une avec une ossature en bois – d'environ 80 m² sur deux niveaux. De forme géométrique et de disposition identiques pour faciliter la comparaison des résultats, ces maisons sont équipées de **panneaux solaires photovoltaïques** et thermiques et dotées d'instruments qui simulent les gestes d'habitants au quotidien (douche, ouverture/fermeture des volets...). En outre, la plateforme comprend des cellules **adiabatiques** PASSYS mobiles en rotation, qui permettent d'expérimenter plusieurs conditions d'éclairement naturel et d'apprécier la performance thermique d'éléments de façades interchangeables. Elle comporte également plusieurs toitures pour tester l'intégration de systèmes photovoltaïques dans les bâtiments (voir *Production décentralisée d'électricité : le solaire intégré au bâti*, p. 36).
D'autres compétences du CEA, issues par exemple des laboratoires systèmes[2] de l'Ines ou de DRT, viennent compléter celles du LEB sur plusieurs domaines de l'habitat individuel :

P. Avavian/CEA

Mise en place de capteurs à l'intérieur de l'une des maisons expérimentales de la plateforme Incas.

- systèmes pour l'utilisation de l'énergie (électrique/thermique/climatisation) ;
- stockage électrique et thermique ;
- automation, *monitoring*, systèmes de gestion de l'énergie ;
- diagnostic et maintenance prédictive ;
- logiciels ;
- systèmes pour la production d'énergies photovoltaïque et thermique ;
- industrialisation, préfabrication, production industrielle ;
- labels et certification.

L'habitat collectif et les éco-quartiers font eux aussi l'objet de travaux qui concernent, entre autres, les interactions entre immeubles, les réseaux de chaleur (*heat network*, smart grids thermiques) ainsi que la production et le stockage d'énergies électrique et thermique à l'échelle des quartiers.
Toutes ces activités de R&D dépassent le cadre du Liten et rejaillissent sur l'ensemble des deux autres instituts de la DRT, le Leti et le List (Laboratoire d'intégration des systèmes et des technologies).

La plateforme @Home

Cette plateforme a été conçue par le Leti [Département systèmes et intégration de solutions (DSIS) et Département architectures conception logiciels embarqués (DACLE)] pour maîtriser la complexité et le caractère hétérogène des « dispositifs intelligents » pour l'habitat. Elle accueille les briques technologiques du Leti et de ses partenaires, avec trois enjeux : le déploiement simplifié des systèmes de capteurs eux-mêmes (température, humidité, luminosité, gaz carbonique CO_2...) ; la gestion de leur interopérabilité et le traitement de leurs données pour déclencher des actionneurs (dalles lumineuses, volets roulants...) ; l'optimisation de leur consommation et l'autonomie en énergie des capteurs et actionneurs. Pour cela, les techniques développées doivent respecter les contraintes zéro câblage et zéro maintenance.
L'établissement de cette plateforme a nécessité la mise en œuvre ou le développement de systèmes communicants de capteurs et d'actionneurs du Leti ou du

CEA/Leti - G. Cottet

Un capteur Homes. Développés par Schneider Electric et le CEA/Leti, les capteurs Homes sont des dispositifs fonctionnant en réseau et communiquant, sans fil, pour le contrôle des paramètres du confort (température, luminosité, humidité et CO_2). Simples à installer, de faible encombrement et alimentés à partir d'une cellule solaire, les capteurs Homes sont autonomes en énergie et ne nécessitent aucune maintenance.

(2) Laboratoire des systèmes solaires (L2S)/Laboratoire de stockage de l'électricité (LSE)/Laboratoire d'étude des systèmes thermiques (LETH).

CEA/Leti - G. Cottet

À gauche, interface graphique sur Smartphone et à droite, interface graphique sur PC, développées pour la plateforme @Home. La plateforme est multimodale : il est possible d'interagir de différentes manières.

commerce répondant aux domaines (énergie, santé et bien-être, sécurité) et aux critères visés ainsi que la conception d'un *middleware*(3) et d'une interface graphique sur Smartphone.

Les capteurs et les actionneurs présentent une grande hétérogénéité dans leur type et leur mode de communication, hétérogénéité qui, immanquablement, se retrouvera dans une habitation. Elle tient à la diversité de leurs modes de liaison. Ils peuvent en effet être connectés par des liaisons filaires – c'est le cas des capteurs actuels de **formaldéhydes** de la société ETHERA(4) – ou par des liaisons **radiofréquences**. Ces dernières sont de trois types :

- liaisons radiofréquences propriétaires(5) du Leti pour répondre à des contraintes applicatives : réseau de capteurs de vibrations, système multi-capteurs (luminosité, température, accéléromètre, magnétomètre) ;
- liaison radiofréquence ZigBee(6) : système de capteurs de présence, plafonnier à **diode électroluminescente** (LED pour *Light-Emitting Diode*), dalle colorimétrique à LED, prise intelligente ;
- liaison radiofréquence ZigBee Green Power(6) : système de capteurs Homes(7) (température, CO_2, humidité et luminosité) développé en partenariat avec Schneider Electric.

Outre l'absence de câblage pour les éléments communiquant par liaison radiofréquence, ces dispositifs se caractérisent par une autonomie énergétique et donc une absence de maintenance pour le système de capteurs Homes, par la faible consommation des autres dispositifs et enfin par leur encombrement réduit et la facilité de leur installation.

Le *middleware* et l'interface graphique sur Smartphone permettent de répondre aux critères d'absence de configuration ou d'administration et de gestion de l'interopérabilité. Ils autorisent ainsi l'accès aux données hétérogènes provenant des différents capteurs et la commande des actionneurs (commerciaux et issus de la R&D), la prise en compte d'autres données, notamment celles émanant du Web, la coordination des dispositifs en fonction de scénarios déterminés et la gestion dynamique du réseau de capteurs et d'actionneurs.

L'architecture de la plateforme @Home rend possible l'ajout aisé de nouveaux dispositifs, protocoles de communication et scénarios. Outre son extension, les perspectives de cette plateforme concernent son déploiement en conditions réalistes, pour identifier les besoins en capteurs et en actionneurs et les usages associés, lors de projets nationaux et européens.

Flux thermiques et évaluation de l'efficacité énergétique du bâtiment

Ce projet, fruit d'une collaboration entre le Liten [Département des technologies solaires (DTS) et Département des technologies des nanomatériaux (DTNM)] et le Leti [Laboratoire systèmes de capteurs multimodaux (LSCM)/DSIS], vise à adapter des fluxmètres thermiques aux contraintes du bâtiment et à exploiter la mesure des flux de chaleur dans le diagnostic énergétique des constructions.

La mesure de la température est fortement répandue dans le secteur de l'habitat. Cependant, alors que cette dernière est la conséquence/résultante d'un bilan d'échanges et de flux thermiques, la connaissance des coefficients de transfert **convectif** au niveau des parois reste très limitée, malgré d'importants efforts réalisés ces dernières années par la Communauté scientifique. Grâce à la mesure des flux de chaleur, il sera possible de réduire les incertitudes concernant les échanges à la paroi, de travailler sur la cause des changements de température et ainsi de les anticiper. De plus, un bâtiment est un système en permanente évolution, le régime stationnaire n'existe pas compte tenu des sollicitations journalières et saisonnières. La connaissance conjointe des flux thermiques et des températures donnera les moyens de s'affranchir plus facilement d'une partie de l'historique du bâtiment et de prédire plus fidèlement son comportement futur.

La mesure des flux thermiques permettra également l'élargissement des connaissances sur le comportement des parois à forte **inertie thermique** ou sur les apports solaires à travers les parois vitrées. En effet, l'efficacité de l'inertie thermique ne se limite pas à la capacité d'un matériau à conserver la température. Elle tient aussi à l'aptitude de ce matériau à stocker et déstocker de l'énergie, ce qui est directement lié à sa **conductivité**. En outre, la compréhension des échanges au niveau des parois autorisera le développement de modèles permettant de déterminer leurs constantes de temps(8) et donc l'amortissement(9) et le déphasage(10), ouvrant ainsi la voie à la possibilité de définir la constante de temps à l'échelle d'une construction, au moment de sa conception. La maîtrise de ce paramètre conduira à l'élaboration de bâtiments autonomes en énergie pour le chauffage grâce à une gestion des apports solaires stockés et déstockés, la régulation étant alors assurée par le renouvellement d'air.

Un meilleur contrôle énergétique des bâtiments

En optimisant le contrôle des systèmes thermiques dans les constructions, il est possible non seulement d'économiser de l'énergie, mais aussi d'en réduire

(3) *Middleware* : logiciel tiers utilisé pour créer un réseau d'échange d'informations entre différentes applications informatiques.

(4) À ce sujet, voir *Clefs CEA* N° 60, Été 2011, p. 70.

(5) Lorsqu'un protocole de communication standard ne remplit pas les exigences de l'application visée, le Leti conçoit et développe des protocoles propriétaires. C'est le cas du réseau de capteurs de vibrations qui requiert une synchronisation fine des différents nœuds et des débits élevés.

(6) ZigBee : technologie de communication sans fil sur de courtes distances. ZigBee Green Power a élargi les possibilités de ZigBee en offrant une technologie pour les dispositifs fonctionnant grâce aux techniques de récupération d'énergie. L'énergie provenant de sources extérieures (solaire, éolienne, vibratoire, chimique, cinétique...) est récupérée puis convertie en électricité. Celle-ci est utilisée pour alimenter de petits dispositifs, qui ne nécessitent donc plus de batterie.

(7) Du nom du programme européen Habitat et bâtiment Optimisé pour la Maîtrise de l'Énergie et des Services, piloté par Schneider Electric et dont le CEA est partie prenante.

le coût d'exploitation. Le Laboratoire intelligence, modèles et apprentissage (Lima) du List a développé un logiciel qui répond à ce double défi.
Dans l'habitat, le chauffage, le rafraîchissement et la production d'eau chaude sont fournis par différents appareils. Leur fonctionnement est souvent complexe et interdépendant, d'autant plus qu'arrivent de nouvelles sources d'énergie ou de nouveaux systèmes, comme les capteurs solaires ou les pompes à chaleur. Pour répondre à cette problématique, le List a mis au point un logiciel qui assure le contrôle de ces divers appareils (figure 2). Installé dans l'habitat, ce logiciel optimise la consommation d'énergie globale, le coût d'exploitation et l'impact environnemental. Couplé à des simulations thermiques, il fournit un outil d'aide à la conception de contrôle-commande.
Le logiciel s'appuie sur la modélisation du bâtiment sous la forme d'un système multi-agents et sur des techniques d'optimisation distribuée. L'optimisation prend en compte différents critères : les ressources énergétiques (électrique, solaire, éolien, gaz...), dont le prix et la disponibilité peuvent fluctuer au cours du temps, des données exogènes (informations météorologiques) pour prévoir les apports gratuits ou encore la prévision de la présence des habitants. En considérant l'ensemble de ces facteurs, l'optimisation du système assure le confort des occupants tout en permettant des économies d'énergie, donc de réduction des coûts (figure 3). L'approche est en outre conçue pour être totalement utilisable avec différents bâtiments, l'enjeu étant de répondre aux problématiques industrielles du développement des contrôles-commandes.
Réalisé en collaboration étroite avec le Laboratoire d'étude des systèmes thermiques (LETH) de l'Ines, le logiciel est en cours de test dans des environnements physiques réels. Lors de sa validation en simulation, il a aussitôt été possible d'effectuer des améliorations du confort de chauffage de plus de 40 % sur l'année, avec une très faible répercussion sur les coûts de fonctionnement et d'intégration. Au vu de ces résultats, certains industriels ont déjà manifesté leur intérêt. Le List travaille dès à présent à son extension pour l'adapter aux futures évolutions des systèmes énergétiques, en particulier par la prise en compte de prédictions exogènes afin d'affiner la planification du pilotage. Les prochaines étapes ? Intégrer dans l'approche les problématiques des réseaux électriques intelligents et des réseaux de chaleur pour qu'à partir des travaux menés sur des équipements, puis sur des bâtiments isolés, le passage à l'échelle d'un quartier devienne possible.

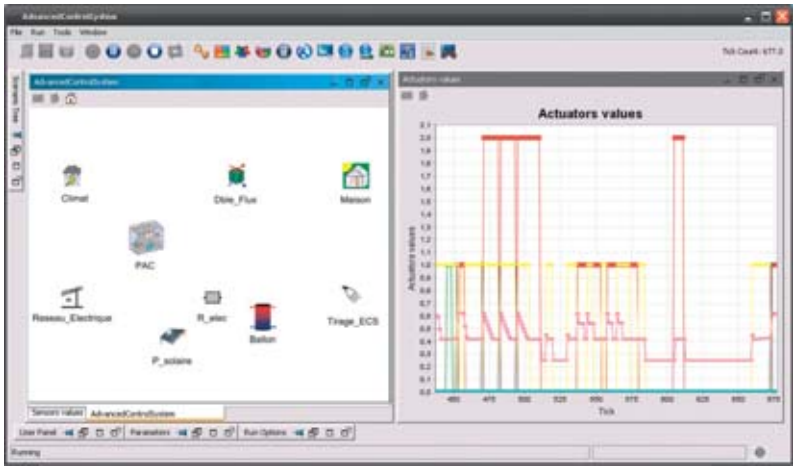
Perspectives d'avenir

Les enjeux à relever portent sur plusieurs aspects. L'intégration à l'extrême en usine des dispositifs de construction, avec des qualités de finition poussées au maximum, permettra des assemblages rapides avec un minimum de désagrément sur les chantiers (cas des tours de trente étages construites en 15 jours en Chine).

(8) Constante de temps : temps de réponse d'un matériau à un changement brusque de la température extérieure.

(9) Amortissement : absorption par une paroi d'une partie des variations thermiques. Il permet d'atténuer l'effet des canicules ou des grands froids.

(10) Déphasage : décalage dans le temps entre les pics de température à l'extérieur et à l'intérieur d'un bâtiment.



CEA/List

Figure 2.
Le logiciel de contrôle développé par le List. À gauche, les différents appareils contrôlés par le logiciel (pompe à chaleur PAC, résistances électriques R_elec, ballon pour la production d'eau chaude, tirage d'eau chaude sanitaire Tirage_ECS...), les ressources énergétiques (panneaux solaires...). À droite, une représentation au cours du temps des valeurs affectées aux actionneurs du système (marche, arrêt...).

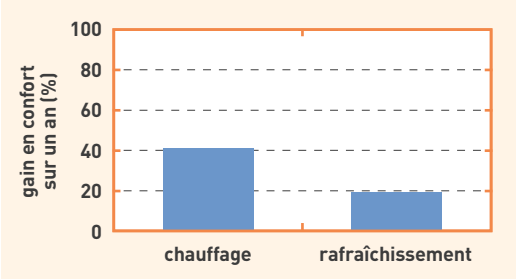


Figure 3.
Gains en confort cumulés sur un an introduits grâce au logiciel de contrôle développé par le List.

La conception d'un bâtiment autonome non seulement en énergie, mais aussi moins gourmand en eau et recyclant l'essentiel de ses déchets (*Autonomous Building Concept*® de Bouygues Construction) ainsi que celle de cités mutualisant la production, le stockage et la consommation de leurs bouquets énergétiques à l'aide des smart grids électriques et thermiques, figurent également au nombre des objectifs visés.
Enfin, il importe d'arriver à baisser les coûts de construction et de fonctionnement pour les nouvelles générations de bâtiments avec, à la clé, l'émergence de nouveaux modèles économiques, à l'instar de l'usage de la batterie pour les véhicules électriques.

> **Jean-Louis Six**[1], **Stéphanie Riché**[2] et **Frédéric Suard**[3]
[1]Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Grenoble (Site Ines)

[2]Institut Leti (Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information)
Direction de la recherche technologique
CEA Centre de Grenoble

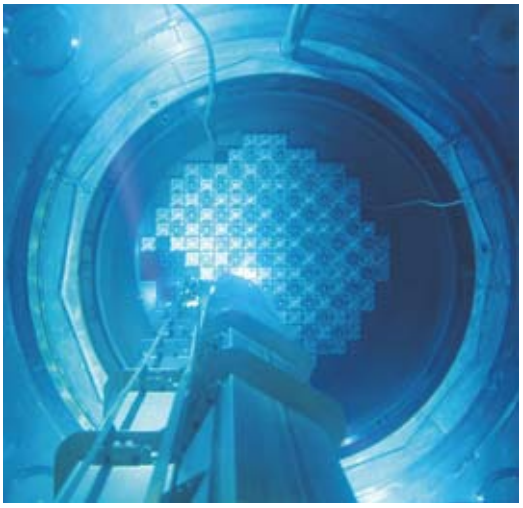
[3]Institut List (Laboratoire d'intégration des systèmes et des technologies)
Direction de la recherche technologique
CEA Centre de Saclay

CEA

Prototype d'un appareil multifonctions permettant d'assurer les fonctions de chauffage, rafraîchissement, ventilation et production d'eau chaude sanitaire. Haut d'environ 2 mètres et contenant une importante instrumentation, ce prototype a servi à valider l'algorithme de contrôle-commande. Il a été construit dans le cadre du projet AMMPERe (Appareil Multifonctions dédié aux Maisons Passives et utilisant les Énergies Renouvelables) par le CEA/Ines, le Groupe Atlantic et le Cetiat (Centre technique des industries aérauliques et thermiques).

Valoriser la **chaleur du nucléaire** pour des **applications non électriques**

Alors qu'une grande partie de l'énergie primaire est consommée dans le monde sous la forme de chaleur, celle générée par les réacteurs nucléaires n'est essentiellement utilisée que pour la production d'électricité. Pourtant, **la chaleur nucléaire offre de multiples opportunités, que ce soit dans les domaines du chauffage urbain, du dessalement de l'eau, de la synthèse de carburants liquides et d'hydrogène ou encore des applications industrielles**. Avec une production indépendante des énergies fossiles et sans émission de gaz à effet de serre, ses débouchés apparaissent porteurs de voies d'avenir.



Cœur d'un réacteur nucléaire. Outre son utilisation, aujourd'hui majoritaire, pour la production d'électricité, la chaleur générée par la fission dans le cœur des réacteurs pourrait couvrir une grande part des besoins en énergie thermique, sans faire appel aux ressources limitées en combustibles fossiles et sans émission de gaz à effet de serre.

Areva/C. Pauquet

En France, l'énergie nucléaire est presque exclusivement exploitée pour la production d'électricité. Pourtant, de multiples autres applications de cette énergie, tirant directement profit de la chaleur générée par **fission** dans le cœur du réacteur, sont envisageables. Elles correspondent à trois domaines de températures associés à trois types de réacteurs.

L'utilisation de la chaleur à basse température (inférieure à 250 °C) peut être envisagée avec les **réacteurs à eau** actuels. Deux applications principales sont aujourd'hui mises en œuvre de par le monde : le chauffage urbain et le dessalement de l'eau de mer.

La chaleur à température moyenne (entre 200 °C et 500 °C) est nécessaire pour générer la vapeur industrielle employée dans certains procédés de pétrochimie comme le **craquage** d'**hydrocarbures** ou l'extraction de sables bitumineux[1]. Pour ces applications, la gamme de température des **réacteurs à neutrons rapides** (**RNR**) conviendrait parfaitement.

Enfin, des réacteurs à haute température (supérieure à 500 °C), voire à très haute température (supérieure à 800 °C) sont requis pour la synthèse de carburants ou d'hydrogène (H_2).

Le dessalement de l'eau

L'eau douce est un élément indispensable à l'être humain, que ce soit pour l'alimentation ou pour l'hygiène. Dans certains pays, son approvisionnement est une question de survie et des régions du monde, de plus en plus nombreuses, sont en état de stress hydrique. La situation risque de se détériorer encore davantage sous l'effet combiné de l'accroissement de la population, de l'épuisement des nappes aquifères et du changement climatique. Un moyen de pallier ce manque d'eau douce réside dans le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres.

La décennie 2000-2010 a vu une augmentation fulgurante du nombre d'usines de dessalement dans le monde (+ 160 %), avec plus de 14 000 usines en fonctionnement générant un total de 70 millions de m^3 d'eau douce par jour. Il y a fort à parier que la croissance va encore s'accélérer dans le futur.

Les technologies employées sont basées d'une part, sur l'évaporation de l'eau, par système multi-flash[2] ou distillation avec ou sans compression de vapeur, et, d'autre part, sur la filtration par osmose inverse[3]. La distillation nécessite à la fois de la chaleur et de l'électricité alors que la séparation membranaire ne requiert que de l'électricité.

Desalination Division/Bhabha Atomic Research Centre (BARC)

Ensemble de modules à osmose inverse (à droite) à l'usine de démonstration de dessalement nucléaire de Kalpakkam, en Inde. L'usine comprend un second système basé sur l'évaporation multi-flash. Ces installations, d'une capacité de production de 6,3 millions de litres d'eau douce par jour, sont couplées à deux réacteurs à eau lourde sous pression (RELP) d'une puissance de 170 MWe chacun.

Le craquage des hydrocarbures

Une usine de raffinage de pétrole utilise de la chaleur industrielle pour ses procédés de distillation et pour le craquage des hydrocarbures. Pour ce faire, une proportion non négligeable (de 6 % à 12 %) du combustible produit est brûlée dans une unité de **cogénération** afin de porter de grandes quantités de vapeur d'eau à une température avoisinant les 350 °C. De plus, une fraction du **méthane** extrait est réemployée pour synthétiser l'hydrogène nécessaire à la désulfurisation des essences. Ces importants besoins énergétiques de la raffinerie peuvent être avantageusement couverts grâce à un réacteur nucléaire dédié. À titre d'exemple, un seul RNR de 600 **MWe** suffirait à subvenir à l'ensemble des besoins en électricité, en chaleur et en hydrogène de l'usine Total Petrochemicals France de Gonfreville-l'Orcher en Normandie. Cela permettrait à l'opérateur non seulement d'obtenir près de 1,5 million de tonnes de carburants additionnels par an mais aussi, dans le même temps, de réduire ses émissions annuelles de gaz carbonique (CO_2) de 4 millions de tonnes.

L'extraction des huiles lourdes

Certaines régions du monde renferment des réserves très importantes de sables bitumineux. Par exemple, le potentiel des gisements en **bitume** de l'Alberta (Canada) est évalué à 1 700 milliards de barils[4], soit l'équivalent de 50 ans de consommation mondiale. Malheureusement, ces hydrocarbures lourds sont très visqueux et difficiles à extraire. Une technique possible consiste à injecter de la vapeur d'eau chaude à 300 °C, sous haute pression, dans des puits creusés dans le sol, pour liquéfier les bitumes et les rendre extractibles. Cette extraction *in situ* permet la séparation du bitume et du sable dans le même réservoir. Le besoin en eau étant très important, il faut brûler une assez grande partie du pétrole extrait pour obtenir la quantité de vapeur d'eau nécessaire. Au final, le rendement énergétique se révèle assez mauvais – il peut être inférieur à 50 % – et les conséquences environnementales sont désastreuses : l'extraction d'un seul baril de pétrole génère plus de 80 kg de gaz à effet de serre (GES). Là encore, l'utilisation de la chaleur nucléaire peut grandement améliorer les rendements d'extraction et ce sans émissions de GES.

(1) Sables bitumineux : mélange de **bitume** brut, de sable, d'argile et d'eau.

(2) Système multi-flash : dans ce procédé, de la chaleur à basse température (70 °C en tête d'usine) est utilisée pour chauffer l'eau. Celle-ci est introduite dans une chambre à pression subatmosphérique dans laquelle se produit une vaporisation immédiate (flash). En effet, la température d'ébullition de l'eau diminue avec la pression. La vapeur d'eau est récupérée sur un condenseur. L'eau restante passe ensuite dans une 2e chambre, soumise à une pression plus réduite. Un nouveau flash a lieu, une nouvelle condensation, puis passage dans une 3e chambre à pression encore plus faible et ainsi de suite dans 7 à 10 chambres successives, voire plus.

(3) Osmose inverse : procédé de séparation consistant à pousser l'eau sous pression au travers d'une membrane semi-perméable qui retient le sel et autres impuretés.

(4) Baril : un baril de pétrole équivaut à 159 litres.

(5) Reformage : opération de craquage chimique d'une molécule d'hydrocarbure ou d'alcool pour la transformer en ses composants majeurs. Le reformage du méthane libère de l'hydrogène et du monoxyde de carbone.

Total

Raffinerie et usine pétrochimique Total Petrochemicals France à Gonfreville-l'Orcher (Normandie). Les besoins énergétiques (électricité, chaleur et hydrogène) nécessaires au fonctionnement des installations du site pourraient être couverts par un seul RNR de 600 MWe.

La chaleur urbaine

Le chauffage urbain est l'un des débouchés les plus prometteurs du nucléaire industriel. Il pourrait se réaliser tout simplement par l'exploitation des réacteurs du parc actuel.

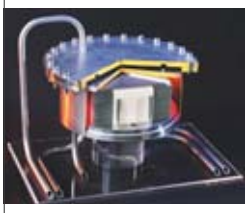
Pendant longtemps, l'éloignement géographique entre le lieu de production, la centrale nucléaire, et les usagers, concentrés dans les grandes villes, a été un frein au développement de cette application. Mais des réseaux de chauffages urbains se sont progressivement étendus et l'amélioration de la technologie des lignes de chaleur permet aujourd'hui le transport de cette chaleur sur de très longues distances, supérieures à 100 km, avec des pertes thermiques inférieures à 2 %. Ceci ouvre réellement la voie à la cogénération nucléaire à grande échelle. À titre d'exemple, les Finlandais ont récemment proposé d'alimenter la ville d'Helsinki en électricité et en chaleur en construisant une nouvelle centrale nucléaire sur le site de Loviisa, à 80 km de la capitale.

CPCU

Canalisations pour le transport de la chaleur sur le site de cogénération de la Compagnie parisienne de chauffage urbain (CPCU) à Vitry-sur-Seine (Val-de-Marne). Le site produit à la fois de l'électricité (125 MWe) et de la vapeur (400 tonnes par heure), *via* une turbine fonctionnant au gaz naturel.

La production d'hydrogène

L'hydrogène peut être fabriqué industriellement selon trois procédés : par reformage[5] de méthane, par **électrolyse** de l'eau ou par la mise en œuvre des cycles thermochimiques. D'autres techniques existent ou sont en phase d'études, telle la biosynthèse d'hydrogène à partir d'algues cultivées dans des bioréacteurs. La méthode la plus employée (à 96 %) et la moins chère est sans conteste la **réduction** de la vapeur



P. Avavian/CEA

Électrolyseur à haute température pour la production d'hydrogène. L'utilisation de la chaleur nucléaire dans le procédé d'électrolyse de l'eau permettrait d'améliorer son rendement énergétique et de réduire son coût.

d'eau à haute température par un hydrocarbure – le méthane en l'occurrence – en présence d'un **catalyseur**. L'électrolyse présente l'avantage de ne pas dégager de CO_2, mais elle s'obtient au prix d'un rendement énergétique plus faible et à un coût plus élevé. Selon les procédés, le rendement énergétique global varie entre 30 % et 65 %. Tous peuvent être assistés par un apport de la chaleur issue d'un réacteur nucléaire, avec à la clé un meilleur usage final du carbone et une réduction des émissions de CO_2.
Lorsque l'hydrogène ainsi synthétisé est exploité comme vecteur énergétique dans les **piles à combustible** pour fournir de l'électricité, l'opération revient de fait à une conversion ou à un stockage d'électricité. Cependant, en sus du faible rendement et du coût élevé de sa production, les difficultés technologiques posées par le stockage de l'hydrogène (c'est un gaz de faible densité), son transport et sa distribution compromettent sérieusement, pour l'instant, cette conversion d'énergie à grande échelle.

La synthèse de biocarburants

La gazéification de substances carbonées (charbon, gaz, **biomasse**) génère un gaz de synthèse, mélange de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène, qui peut servir pour l'élaboration de carburant liquide par **catalyse** chimique (procédé Fischer-Tropsch). Sont désignées par le terme générique XTL (*Coal To Liquid, Gas To Liquid* ou *Biomass To Liquid*), ces techniques qui consistent à fabriquer des carburants synthétiques. Le terme biocarburant est employé lorsque le composé organique de départ n'est pas **fossile**.
Deux filières d'agrocarburants, carburants issus de la biomasse agricole, existent : la filière alcool, qui conduit à la synthèse de **bioéthanol** par fermentation de sucres provenant de plantes sucrières ou céréalières (canne à sucre, maïs, blé...), et la filière huile, qui fournit du **biodiesel** par **transestérification** des lipides de plantes oléagineuses (tournesol, colza, palmier à huile...). La transformation de la lignine et de la **cellulose** des végétaux (bois, paille, déchets forestiers) en alcool ou en gaz de synthèse permet d'éviter le recours à des produits alimentaires pour l'élaboration de biocarburants.
L'apport du nucléaire à la production de biocarburants pourrait être double. D'une part, la chaleur d'un réacteur à haute température peut aider à réaliser les réactions de pyrolyse ou de gazéification sans brûler d'hydrocarbures, réduisant ainsi les émissions de CO_2. D'autre part, l'injection d'hydrogène additionnel dans le gaz de synthèse entraîne la réaction inverse de celle du gaz à l'eau[6] (*Reverse Water Gas Shift*). En compensant le déficit en hydrogène du gaz de synthèse organique, on obtient le bon rapport H_2/CO (~ 2) compatible avec la molécule du carburant que l'on souhaite produire.

(6) Réaction du gaz à l'eau : réaction chimique conduisant à la synthèse de gaz carbonique et d'hydrogène à partir de monoxyde de carbone et d'eau.

P. Avavian/CEA

Lit fluidisé à haute température (LFHT), pour la production de gaz de synthèse à partir de biomasse, situé au Centre CEA de Grenoble. Un apport de chaleur nucléaire aiderait à effectuer la gazéification sans consommer d'hydrocarbures.

Des valorisations courantes mais méconnues

Outre la chaleur, de nombreuses autres applications non électrogènes de l'énergie nucléaire sont déjà communément usitées pour le bien public, sans que les populations en aient d'ailleurs vraiment conscience. Citons pêle-mêle le bénéfice tiré de la fabrication en réacteur de **radioisotopes** pour la médecine, que ce soit pour le diagnostic (imagerie) ou pour le traitement (oncologie), la propulsion navale (et peut-être dans le futur la propulsion spatiale) ou les générateurs thermoélectriques à radioisotopes, comme sources d'énergie des sondes spatiales éloignées du Soleil. Par ailleurs, grâce à la sensibilité des méthodes de détection de la **radioactivité**, les éléments radioactifs servent de plus en plus comme **traceurs** dans de multiples applications industrielles ou environnementales. Ils sont utilisés pour détecter des fuites, étudier le vieillissement des matériaux par érosion ou par corrosion, vérifier les soudures, déterminer la nature des sols ou la configuration des gisements. Le traçage par **radionucléides** est également une technique employée en hydrogéologie pour suivre le ruissellement et l'infiltration des eaux de surface, la dynamique des masses d'air ou les courants marins.

La cogénération nucléaire, une option d'avenir

Les réacteurs nucléaires assurent aujourd'hui une proportion importante (75 %) de la production électrique en France et contribuent déjà fortement à la réduction des émissions de GES. Dans le même temps, ils rejettent dans l'environnement de grandes quantités de chaleur inutilisées. Dans l'optique d'une meilleure gestion de l'énergie, il apparaît à présent techniquement possible de récupérer une partie de cette chaleur pour des usages non électriques tirant au maximum profit de l'énergie primaire fournie par la fission. Dans le futur, la cogénération nucléaire sera naturellement amenée à prendre de plus en plus d'importance.

> **Henri Safa**
Direction scientifique
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Saclay