La maîtrise de l'énergie **dans l'habitat**

Si la consommation d'énergie du résidentiel-tertiaire a connu une forte croissance, le gisement d'économies d'énergie reste important pour ce secteur. L'amélioration de l'efficacité énergétique passe par le développement de technologies performantes, où sont privilégiés des systèmes valorisant les énergies renouvelables et la mise au point de dispositifs à haute efficacité.

L'enjeu de la maîtrise de l'énergie dans l'habitat est particulièrement important de par le poids de la consommation de ce secteur et sa tendance à augmenter fortement depuis 20 ans. Sont également concernés les bâtiments du secteur résidentiel et tertiaire et, compte tenu du faible taux de renouvellement du parc immobilier en France, le bâti ancien (collectif ou individuel) qui demeure une cible prioritaire d'une politique d'accroissement de l'efficacité énergétique de ce secteur. En contrepartie, l'habitat neuf reste le secteur dans lequel les technologies de l'énergie les plus récentes peuvent le plus aisément et le plus efficacement s'implanter. L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments peut être fortement incitée par des mesures réglementaires, comme cela a été mis en œuvre dès 1975 et est prévu dans le livre blanc sur l'énergie, et sera intégrée dans le cadre de la nouvelle loi sur l'énergie.

Des technologies variées et originales

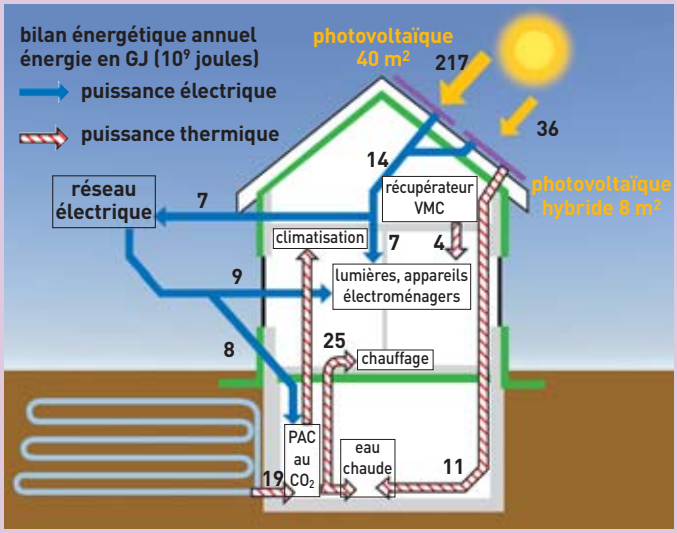
Les technologies permettant une meilleure maîtrise de l'énergie dans l'habitat sont de nature fort diverse. Pour l'*enveloppe du bâtiment*, les qualités isolantes des enceintes et des fenêtres peuvent être renforcées, en particulier par l'usage de techniques actives telles que les vitrages électrochromes. Ces vitrages sont recouverts d'une couche mince présentant la particularité de se colorer, et ainsi limiter la transmission lumineuse, lorsqu'une tension électrique est appliquée.

Olivier Sébart/Ademe 2002

La valorisation des énergies renouvelables favorise l'amélioration de l'indice d'efficacité énergétique dans l'habitat. Une partie de l'eau sanitaire de ces logements HLM situés à Montreuil (Seine-Saint-Denis) est chauffée grâce aux 220 m² de panneaux de capteurs photovoltaïques installés sur le toit.

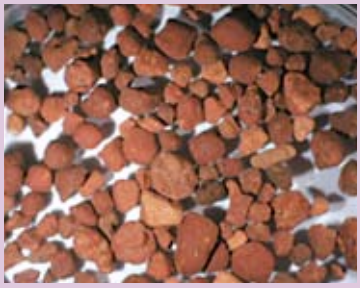
Un exemple d'habitat à très faible consommation énergétique 1

La figure ci-contre montre un habitat valorisant deux **énergies renouvelables** : l'*énergie solaire*, par le biais de capteurs thermiques hybrides (**photovoltaïques**-thermiques) et photovoltaïques placés sur la face sud de la toiture du bâtiment, et l'*énergie géothermique*, par l'intermédiaire de capteurs thermiques enterrés dans le sol et couplés à une pompe à chaleur réversible (PAC). Cette dernière fonctionne avec du CO_2, un fluide frigorigène à très faible **effet de serre** en comparaison avec les fluides frigorigènes actuels de type **HFC**134a, dont la contribution à l'effet de serre par unité de masse est 1 300 fois celle du CO_2.
Dans cet exemple d'habitat, où les flux énergétiques annuels sont évalués pour les différentes sources et convertisseurs d'énergie ainsi que pour les principaux usages, l'énergie électrique est réinjectée au réseau. L'ensemble des besoins énergétiques en chauffage, eau chaude sanitaire et équipements électriques est couvert avec un indicateur d'efficacité énergétique inférieur à 20 **kWh**/m²/an.



Le stockage de chaleur "actif" 2

La température de l'air d'une pièce est un élément déterminant de la sensation de confort. Toutefois, la réalité est plus subtile. La sensation de bien-être résulte également de l'équilibre thermique entre l'énergie que le corps humain rayonne et celle qu'il reçoit de l'environnement. Cette sensation de confort est donc contrôlée par les échanges thermiques s'effectuant essentiellement par rayonnement et **convection** entre le corps humain et l'environnement.
Ainsi, la température des parois du local entre évidemment en jeu dans la sensation de chaleur. Si les murs du local sont à une température inférieure à 18 °C, le corps humain ressent une sensation désagréable car il dissipe une énergie thermique importante par rayonnement. C'est typiquement le cas, en hiver, dans des maisons mal isolées. Par une température extérieure de – 10 °C, les parois intérieures d'un tel bâtiment atteignent à peine 17 °C et de ce fait, la température ambiante doit être "poussée" à 23 °C pour que la température "ressentie" soit de 20 °C. De plus, l'écart thermique entre l'air et les murs favorise des phénomènes de **convection naturelle** que le corps humain ressent particulièrement.
Beaucoup des éléments de confort sont maintenant assurés dans l'habitat récent, dès lors qu'il respecte les réglementations. Les murs froids n'existent plus du fait de l'isolation, les fenêtres sont étanches, les ventilations mécaniques permettent de contrôler pour partie l'hygrométrie et les planchers chauffants garantissent une chaleur douce, à la fois par convection et rayonnement. Il reste néanmoins un paramètre très peu contrôlé, à savoir la température des murs. Ainsi, il serait possible d'améliorer notablement le confort intérieur en régulant la température des parois. Une technique originale consiste à utiliser un stockage d'énergie thermique à l'intérieur des parois. Pour cela, des matériaux à changement de phase sont incorporés dans les cloisons. Leur présence permet de stabiliser la température de surface à une valeur proche de celle de la pièce.


CEA

Granulés de paraffine, matériaux à changement de phase dont la température de fusion est de 26 °C.

De même, sont privilégiés les *dispositifs valorisant les* ***énergies renouvelables***, comme :
- les *capteurs solaires thermiques actifs* pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS) ou en appoint pour le chauffage, voire pour la climatisation ou le rafraîchissement des ambiances ;
- les *capteurs* ***photovoltaïques*** pour la fourniture d'énergie électrique en appoint des apports du réseau, et même, dans certains cas, pour la couverture de l'ensemble des besoins électriques du bâtiment grâce à un ensemble de batteries de stockage ;
- les *capteurs géothermiques* enterrés en superficie dans le sol ou en profondeur par forages verticaux qui, associés à une pompe à chaleur, permettent de remonter en température la chaleur disponible, valorisant une énergie disponible à bas niveau de température (encadré 1) ;
- les *chaudières à bois* qui valorisent la **biomasse**, une ressource renouvelable ;
- à plus long terme, les *piles à combustible* pourront constituer un système dit "polygénération", en fournissant au côté de l'énergie électrique, la chaleur et le froid nécessaires au confort de l'habitat (voir l'encadré *Le projet Gecopac*, p. 88).

Les technologies développées pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments concernent également les *dispositifs de stockage électrique* (voir chapitre III, p. 129) *ou thermique*. Pour ces derniers, les dispositifs de stockage journalier (encadré 2) font appel à l'eau ou, pour une réduction des volumes de stockage, à des matériaux à changement de phase.
En outre, des *émetteurs et récupérateurs efficaces de chaleur ou de froid*, tels un plancher solaire ou un plafond rafraîchissant, permettent de limiter les niveaux de température des sources thermiques et ainsi d'améliorer l'efficacité des cycles thermodynamiques de production de chaleur ou de froid.

Réussir une bonne intégration architecturale

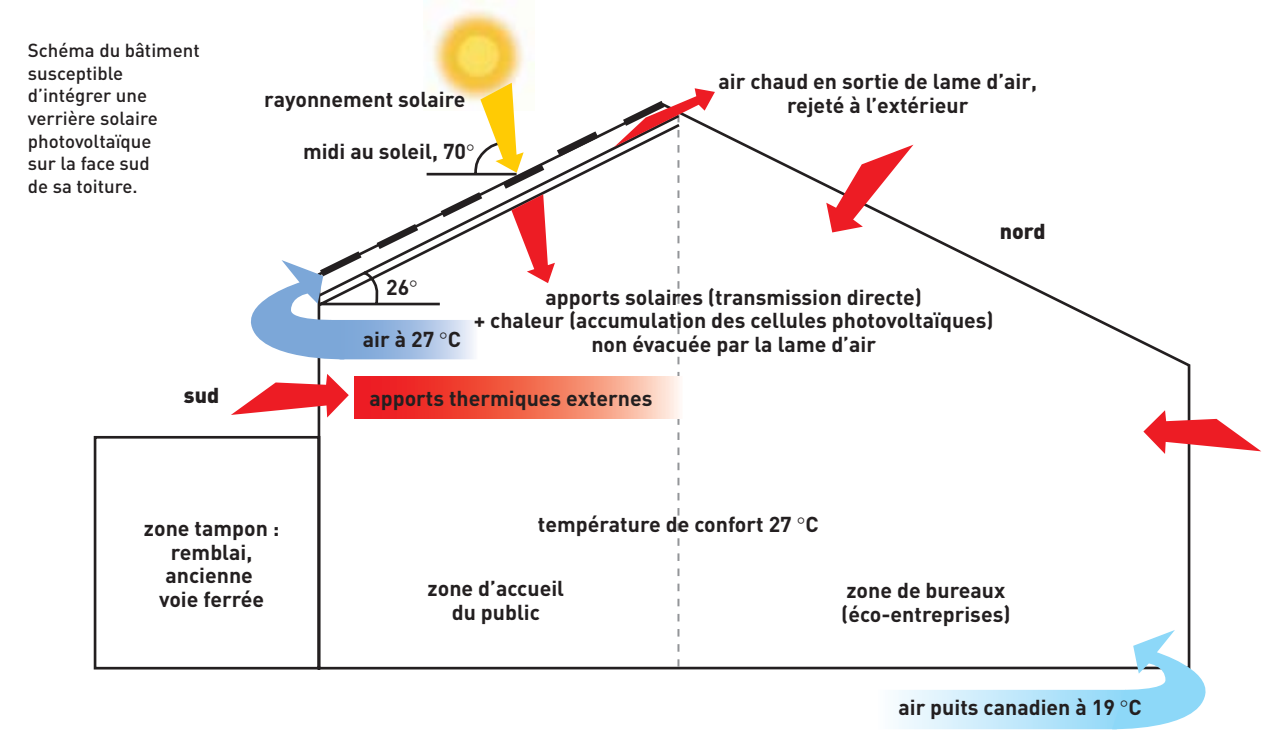
Cet ensemble de technologies ne peut s'imposer sur le marché sans que les nombreuses contraintes associées à la conception et à l'exploitation du bâtiment ne soient clairement prises en compte. Au-delà de la contrainte économique, évidemment majeure, qui réclame des couplages "intelligents" et "performants" de ces technologies et incite à une optimisation de l'architecture du système énergétique du bâtiment, il faut rappeler deux points importants. D'une part, l'intégration architecturale des éléments, en particulier des capteurs solaires dont la surface est généralement grande, est essentielle pour faciliter l'acceptation de ces technologies par le grand public. De nombreuses réalisations ont été menées en Europe du Nord et des réalisations originales sont en cours en France (encadré 3). D'autre part, le confort et la qualité de l'air des ambiances sont des exigences de plus en plus fortes, tant dans les bâtiments à usage résidentiel que tertiaire. En effet, température, taux d'humidité, teneurs en CO_2 et polluants doivent être maîtrisés au mieux.
Par ailleurs, les coûts d'exploitation du système énergétique du bâtiment ne seront maîtrisés et la maintenance des installations ne sera réalisée de façon optimale qu'à la condition que des dispositifs de mesures et de gestion du système soient développés. Ces dispositifs seront également tenus de fournir à l'utilisateur une lisibilité des performances du système énergétique.

> Christophe Marvillet
Direction de la recherche technologique
CEA centre de Grenoble

Intégration d'une verrière photovoltaïque dans un bâtiment en cours de rénovation

3

La société Solarte, en partenariat avec le Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (CEA/Liten) et Anglade Structure Bois, a signé un contrat avec l'Ademe dans le cadre du programme "Préparer le bâtiment à l'horizon 2010" pour un projet de recherche concernant *L'intégration à grande échelle du photovoltaïque en toiture dans un bâtiment ancien situé dans les Pyrénées-Orientales*. Ce projet consiste à concevoir une verrière solaire photovoltaïque refroidie par une lame d'air ventilée. Ce concept original permet, en plus de la production électrique des cellules photovoltaïques, de bénéficier à la fois d'apports lumineux, à travers la surface transparente de la paroi photovoltaïque, et d'apports thermiques, au moyen de l'échauffement de la lame d'air.
L'objectif de ce projet de recherche est d'aboutir à un produit de construction fini avec les caractéristiques physiques adéquates pour fournir un service de gestion thermique et lumineux optimal.



A L'énergie dans tous ses états

« *Rien ne se perd, rien ne se crée* », écrivait en son temps Lavoisier, père de la chimie moderne. Cet adage vrai pour les espèces chimiques l'est tout aussi pour l'énergie. En effet, l'énergie est une entité multiforme qui peut se transformer sous de très divers aspects. Toutefois, les énergies primaires directement accessibles dans la nature sont en nombre limité : ce sont les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), l'**énergie nucléaire** et les énergies renouvelables (hydraulique, biomasse, solaire, éolien, géothermie, énergie des marées). Ces énergies primaires constituent ce que l'on appelle le ***mix*** ou le ***bouquet énergétique*** (figure 1).

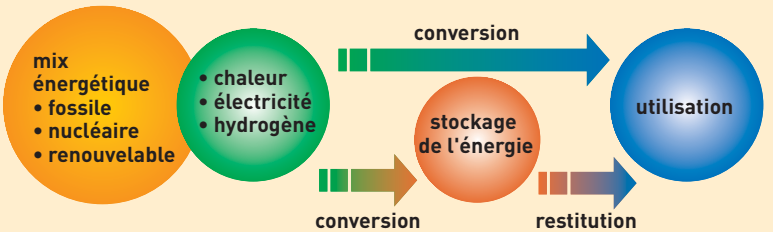


Figure 1.
Le schéma énergétique.

Pour la plupart des applications, il est nécessaire de **convertir** l'énergie afin de la rendre compatible avec l'usage envisagé. Bien évidemment la nature, très ingénieuse, a mis au point les tout premiers convertisseurs énergétiques que sont les êtres vivants. Les plantes, par la photosynthèse, assurent la conversion de l'énergie rayonnante de la lumière en énergie chimique. Le corps humain lui-même permet, en particulier, de convertir l'énergie chimique en énergie mécanique *via* le système musculaire. Par la suite, l'homme a inventé de très nombreux convertisseurs (figure 2). Le premier en date est tout simplement le feu qui convertit de l'énergie chimique (combustion) en lumière et chaleur. Plus récemment un poste de télévision assure la conversion de l'électricité en énergies lumineuse (images) et mécanique (sons). En fait, de nombreux systèmes énergétiques sont l'association de plusieurs convertisseurs, comme par exemple une centrale nucléaire qui réalise la conversion de l'énergie nucléaire en énergie thermique (réacteur) puis en énergie mécanique (turbine) et enfin en énergie électrique (alternateur). Malheureusement, le second principe de la thermodynamique nous enseigne que toute transformation de l'énergie a un coût : une partie plus ou moins importante de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur inutilisable (le frottement dans un système mécanique par exemple). Dans le cas d'une centrale nucléaire de la génération actuelle, l'énergie électrique produite ne représente qu'environ un tiers de l'énergie nucléaire initiale contenue au sein du combustible.

Mais il serait bien évidemment trop simple que l'énergie puisse être consommée au fur et à mesure sur le lieu même de sa production. Dans de très nombreux cas, les sites de consommation de l'énergie peuvent être très éloignés du site de production, cette dernière et la demande correspondante n'étant pas de plus toujours concomitantes (électricité photovoltaïque la nuit, par exemple). Une bonne gestion de l'énergie demande donc la mise en place à la fois d'un **réseau de distribution** et de capacités de **stockage de l'énergie**.

Le **transport de l'énergie** est assuré par l'intermédiaire d'un vecteur énergétique. À l'heure actuelle, les deux principaux vecteurs sont l'**électricité** et la **chaleur**. Mais demain un nouveau vecteur pourrait devenir prépondérant : l'hydrogène qui serait converti en électricité et chaleur grâce aux piles à combustible.

Enfin, pour que l'énergie puisse être disponible à tout moment il est indispensable de pouvoir la stocker : la "mettre en conserve" pourrait-on dire. Ce **stockage** peut se décliner sous diverses formes. L'énergie peut être stockée sous forme **mécanique** (*énergie potentielle* dans le cas d'une retenue d'eau d'un barrage hydroélectrique ou *énergie cinétique* dans un volant d'inertie), **thermique** (ballon d'eau chaude), **chimique** (réservoir d'essence, piles et accumulateurs), voire **magnétique** (bobine supraconductrice).

La gestion de l'énergie est donc un art subtil qui associe production, transformation, transport et stockage. Dans le contexte actuel du débat énergétique, il apparaît de plus en plus évident que demain les réseaux énergétiques vont se développer et se multiplier selon une approche multimodale (gestion simultanée de plusieurs réseaux associant des sources d'énergies diversifiées). Les **nouvelles technologies de l'énergie** sont donc appelées à y jouer un rôle essentiel.

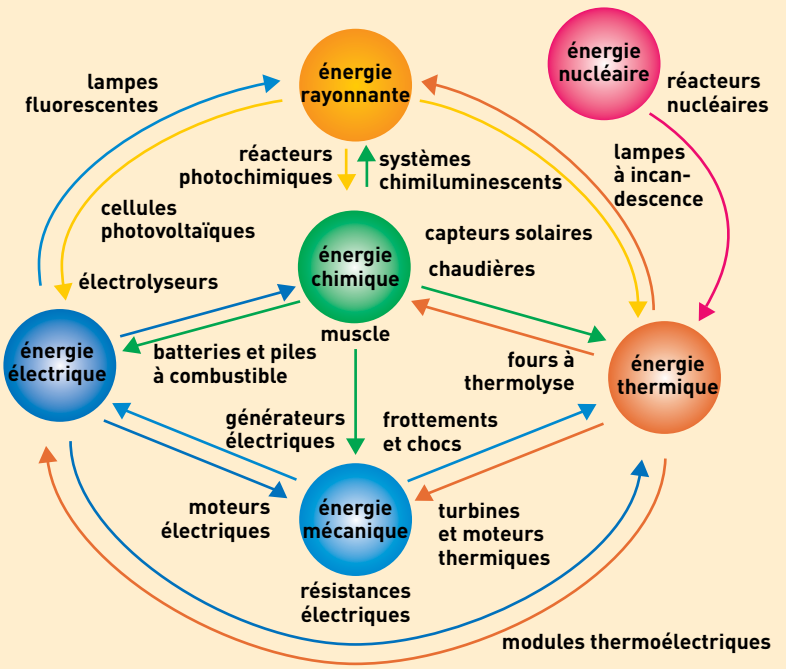
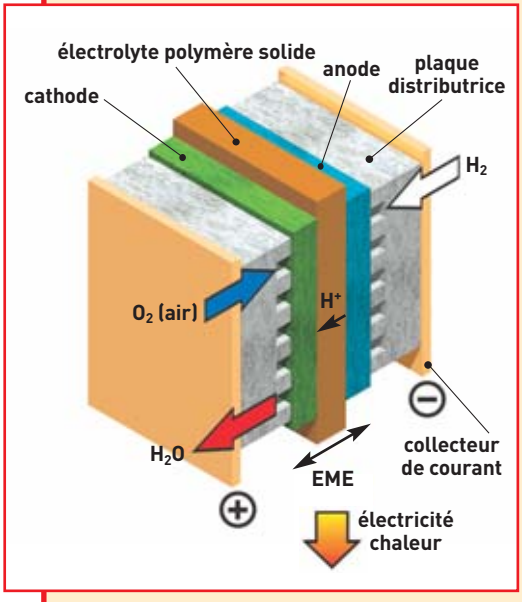


Figure 2.
Conversions des six principales formes d'énergie et quelques exemples de convertisseurs d'énergie.

C Comment fonctionne une pile à combustible ?



Principe de fonctionnement de la pile à combustible. Exemple de la pile à membrane échangeuse de protons. EME représente l'ensemble électrodes-membrane.

La pile à combustible repose sur un principe fort ancien, puisque c'est en 1839 que Sir William Grove construisit la première cellule électrochimique fonctionnant avec de l'**hydrogène** comme carburant, mettant ainsi en évidence la possibilité de produire du courant électrique par conversion directe de l'énergie chimique du **combustible**. La pile à combustible ayant la particularité d'utiliser deux gaz – l'hydrogène H_2 et l'oxygène O_2 – comme couple électrochimique, les réactions d'**oxydo-réduction** qui s'opèrent dans la pile sont donc particulièrement simples. La réaction se produit au sein d'une structure (la **cellule électrochimique élémentaire**) essentiellement composée de deux **électrodes** (l'**anode** et la **cathode**) séparées par un **électrolyte**, matériau permettant le passage des **ions**. Les électrodes mettent en jeu des **catalyseurs** pour activer d'un côté, la réaction d'**oxydation** de l'hydrogène, et de l'autre côté, la réaction de **réduction** de l'oxygène.

Dans le cas d'une pile à électrolyte acide (ou pile à membrane échangeuse de **protons**), l'hydrogène de l'anode est dissocié en protons (ou ions hydrogène H^+) et en **électrons**, suivant la réaction d'oxydation : $H_2 \rightarrow 2\,H^+ + 2\,e^-$. À la cathode, l'oxygène, les électrons et les protons se recombinent pour former de l'eau : $2\,H^+ + 1/2\,O_2 + 2\,e^- \rightarrow H_2O$. Le principe de la pile à combustible est donc inverse à celui de l'**électrolyse** de l'eau. La tension thermodynamique d'une telle cellule électrochimique est de 1,23 volt (V). Toutefois, en pratique, la pile présente une différence de potentiel de l'ordre de 0,6 V pour des **densités de courant** de 0,6 à 0,8 A/cm^2. Le rendement d'une telle cellule est donc d'environ 50 %, l'énergie dissipée l'étant bien évidemment sous forme de chaleur.

E Accumulateurs, piles et batteries : des performances en constante amélioration

Les **accumulateurs** et les **piles** sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie. Ceux-ci restituent sous forme d'énergie électrique, exprimée en wattheure (**Wh**), l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques. Ces réactions sont activées au sein d'une cellule élémentaire entre deux **électrodes** baignant dans un **électrolyte** lorsqu'une charge, un moteur électrique par exemple, est branchée à ses bornes. L'accumulateur est basé sur un système électrochimique réversible. Il est rechargeable par opposition à une pile qui ne l'est pas. Le terme **batterie** est alors utilisé pour caractériser un assemblage de cellules élémentaires (en général rechargeables).

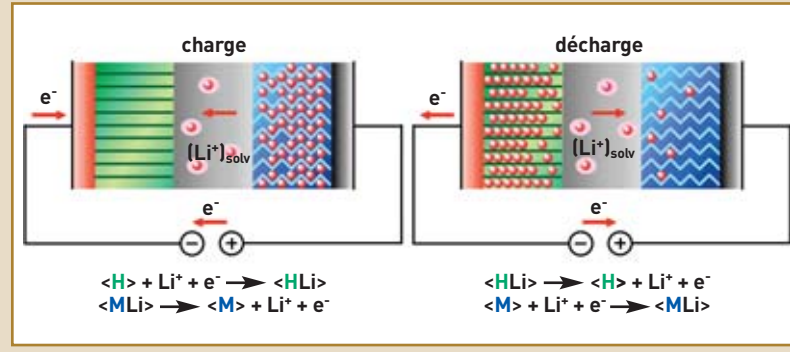
Un accumulateur, quelle que soit la technologie utilisée, est pour l'essentiel défini par trois grandeurs. Sa **densité d'énergie massique** (ou **volumique**), en wattheure par kilogramme, Wh/kg (ou en wattheure par litre, Wh/l), correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (ou de volume) d'accumulateur. Sa **densité de puissance massique**, en watt par kilogramme (W/kg), représente la puissance (énergie électrique fournie par unité de temps) que peut délivrer l'unité de masse d'accumulateur. Sa **cyclabilité**, exprimée en nombre de cycles[1], caractérise la durée de vie de l'accumulateur, c'est-à-dire le nombre de fois où il peut restituer un niveau d'énergie supérieur à 80 % de son énergie nominale, cette valeur étant la valeur la plus souvent demandée pour les applications portables.

Jusqu'à la fin des années quatre-vingt, les deux principales technologies répandues sur le marché étaient les accumulateurs au **plomb** (pour le démarrage de véhicules, l'alimentation de secours de centraux téléphoniques...) et les accumulateurs **nickel-cadmium** (outillage portable, jouets, éclairage de secours...). La technologie au plomb, connue plus communément sous le nom de batterie au plomb, est également qualifiée de système au plomb-acide. En effet, les réactions chimiques mises en jeu impliquent l'oxyde de plomb constituant l'électrode positive (improprement appelée cathode) et le plomb de l'électrode négative (anode), toutes deux plongées dans une solution d'acide sulfurique qui constitue l'électrolyte. Ces réactions tendent à convertir le plomb et l'oxyde de plomb en sulfate de plomb, avec formation d'eau. Pour recharger la batterie, ces réactions doivent être inversées par la circulation d'un courant électrique imposé. Les inconvénients relevés sur la technologie au plomb (poids, fragilité, utilisation d'un liquide corrosif) ont conduit au développement d'accumulateurs alcalins, de plus grande capacité (quantité d'électricité restituée à la décharge) mais développant une force électromotrice moindre (différence de potentiel aux bornes du système en circuit ouvert). Leurs électrodes sont soit à base de nickel et de cadmium (accumulateur nickel-cadmium), soit à base d'oxyde de nickel et de zinc (accumulateur zinc-nickel), soit à base d'oxyde d'argent couplé à du zinc, du cadmium ou du fer (accumulateurs à l'oxyde d'argent). Toutes ces technologies utilisent une solution de potasse comme électrolyte. Les technologies au plomb, comme les accumulateurs alcalins, se caractérisent par une grande fiabilité, mais leurs densités d'énergie massiques restent relativement faibles (30 Wh/kg pour le plomb, 50 Wh/kg pour le nickel-cadmium).

Au début des années quatre-vingt-dix, avec la croissance du marché des équipements portables, deux filières technologiques nouvelles ont émergé : les accumulateurs **nickel-métal hydrure** et les accumulateurs au **lithium** (voir l'encadré *Principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium*, p. 131). La première filière, mettant en jeu une électrode positive à base de nickel et une électrode négative – constituée d'un alliage absorbant l'hydrogène – plongeant dans une solution de potasse concentrée, a permis d'atteindre une densité d'énergie massique de 70 à 80 Wh/kg. La seconde filière avait déjà fait l'objet de travaux vers la fin des années soixante-dix, dans la perspective de trouver des couples électrochimiques présentant de meilleures performances que les accumulateurs au plomb ou au nickel-cadmium employés jusque-là. Les premiers modèles ont ainsi été conçus avec une électrode négative à base de lithium métallique (filière **lithium-métal**). Cependant, cette technologie s'est heurtée à des problèmes liés à une mauvaise reconstitution de l'électrode négative de lithium au cours des charges successives. C'est pourquoi, vers le début des années quatre-vingt, des recherches ont été entreprises sur un nouveau type d'électrode négative à base de carbone, utilisé comme composé d'insertion du lithium. La filière **lithium-ion** était née. Les industriels japonais se sont rapidement imposés en tant que *leaders* dans le domaine. Déjà fabricants d'équipements portables, ils ont considéré la source d'énergie comme faisant partie des composants stratégiques de ces équipements. C'est ainsi que Sony, qui n'était pas à l'origine fabricant d'accumulateurs, a décidé de mobiliser au cours des années quatre-vingt des ressources considérables afin de faire progresser la technologie et de la rendre industrialisable. En février 1992, Sony annonçait à la surprise générale le lancement immédiat de la fabrication industrielle d'accumulateurs lithium-ion. Ces premiers accumulateurs offraient des performances limitées (90 Wh/kg). Depuis, celles-ci se sont notablement améliorées (de 160 à plus de 180 Wh/lkg en 2004), grâce d'une part aux progrès technologiques réalisés (diminution de la part inutile dans le poids et le volume des accumulateurs) et d'autre part à l'optimisation des performances des matériaux. Des densités d'énergie massiques de plus de 200 Wh/kg sont escomptées vers 2005.

(1) Un cycle correspond à une charge et une décharge.

Principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium

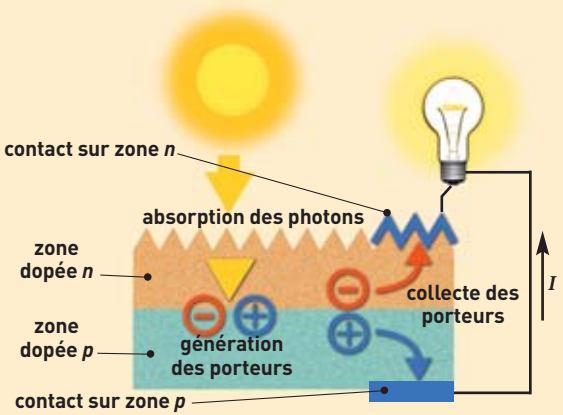


En cours d'utilisation, donc lors de la décharge de l'**accumulateur**, le lithium relâché par l'**électrode négative** (matériau d'intercalation hôte <H>) sous forme **ionique** Li^+ migre à travers l'**électrolyte** conducteur ionique et vient s'intercaler dans le réseau cristallin du matériau actif de l'**électrode positive** (composé d'insertion du lithium de type oxyde métallique <Mli>). Le passage de chaque ion Li^+ dans le circuit interne de l'accumulateur est exactement compensé par le passage d'un **électron** dans le circuit externe, générant ainsi un courant électrique. La **densité d'énergie massique** libérée par ces réactions est à la fois proportionnelle à la différence de potentiel entre les deux électrodes et à la quantité de lithium qui se sera intercalé dans le matériau d'insertion. Elle est également inversement proportionnelle à la masse totale du système. Or le lithium est en même temps le plus léger (avec une masse molaire atomique de 6,94 g) et le plus **réducteur** des métaux : les systèmes électrochimiques qui l'emploient peuvent atteindre des tensions de 4 V, contre 1,5 V pour les autres systèmes. Il permet ainsi aux batteries au lithium d'offrir les plus importantes densités d'énergie massique et volumique (typiquement plus de 160 Wh/kg et 400 Wh/l), supérieures en moyenne de plus de 50 % à celles des batteries conventionnelles.

Le principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium est le même selon qu'est utilisée une électrode négative de lithium métallique ou à base de carbone. Dans ce deuxième cas, la filière technologique est appelée *lithium-ion*, car le lithium n'est jamais sous forme métallique dans l'accumulateur, et fait "yo-yo" entre les deux composés d'insertion du lithium contenus dans les électrodes positive et négative à chaque charge ou décharge de l'accumulateur.

D Comment fonctionne une cellule solaire photovoltaïque ?

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement *dopée de type n* et *dopée de type p*. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau *n* diffusent dans le matériau *p*. La zone initialement dopée *n* devient chargée positivement, et la zone initialement dopée *p* chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone *n* et les trous vers la zone *p*. Une jonction (dite *p-n*) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones *n* et *p*, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone *n* rejoignent les trous de la zone *p via* la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule (figure).



L'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité, en introduisant des niveaux d'énergie intermédiaires dans la bande interdite. Le silicium employé aujourd'hui dans la plupart des cellules a été choisi pour la présence de quatre électrons de valence sur sa couche périphérique (colonne IV du tableau de Mendeleïev). Dans le silicium solide, chaque atome – dit tétravalent – est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons. Si un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne V (phosphore par exemple), un de ses cinq électrons de valence ne participe pas aux liaisons ; par agitation thermique, il va très vite passer dans la bande de conduction et ainsi devenir libre de se déplacer dans le cristal, laissant derrière lui un trou fixe lié à l'atome de dopant. Il y a conduction par un électron, et le semi-conducteur dit *dopé de type n*. Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne III (bore par exemple) à trois électrons de valence, il en manque un pour réaliser toutes les liaisons, et un électron peut rapidement venir combler ce manque et occuper l'orbitale vacante par agitation thermique. Il en résulte un trou dans la bande de valence, qui va contribuer à la conduction, et le semi-conducteur est dit *dopé de type p*. Les atomes tels que le bore ou le phosphore sont donc des dopants du silicium. Les cellules photovoltaïques sont assemblées pour former des modules.

N.B. Voir dans *Les cellules photovoltaïques organiques : vers le tout polymère…* le principe des cellules photovoltaïques organiques (encadré, p. 122).

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique

Après absorption des photons par le polymère, des paires électron-trou liées (excitons) sont générées, puis dissociées. Compte tenu des limitations propres aux matériaux organiques (durée de vie des excitons, faible mobilité des charges), seule une faible fraction des paires électron-trou générées par les photons contribue effectivement au photocourant. L'une des idées majeures est de distribuer en volume les sites de photogénération pour améliorer la dissociation des excitons. Cette démarche est basée sur l'augmentation de la surface de la jonction, grâce à la mise en œuvre d'un réseau interpénétré de type donneur/accepteur (D/A) assurant le transport des trous (P^+) vers l'anode (ITO) et le transport des électrons (e^-) vers la cathode métallique (en aluminium Al, par exemple). Si le rendement quantique de séparation des charges photo-induites des systèmes associant un polymère semi-conducteur (de type PPV ou polythiophène) à un dérivé du fullerène (PCBM) est ainsi proche de l'unité, l'enjeu est désormais de limiter les phénomènes de recombinaison et de piégeage qui limitent le transport et la collection des charges aux électrodes, afin d'augmenter l'efficacité globale des dispositifs qui demeure encore aujourd'hui faible (inférieure à 5 %). L'essor de la filière est également très fortement conditionné par la maîtrise et la compréhension des mécanismes de vieillissement des cellules mais aussi par la maîtrise des technologies en couches minces pour la protection des dispositifs vis-à-vis de l'oxygène et de la vapeur d'eau atmosphériques.

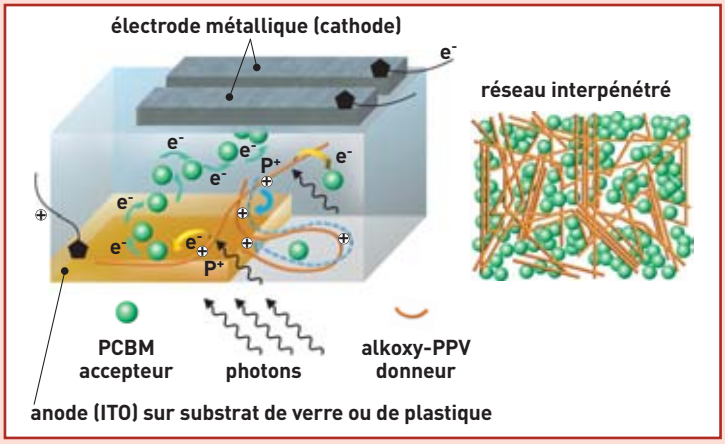


Figure tirée d'une présentation de S. Sariciftci (www.lios.at)

La ligne bleue en pointillés correspond au parcours des trous dans le matériau.

B Effet de serre et CO_2

L'énergie solaire qui parvient au sol réchauffe la Terre et se transforme en rayons infrarouges. Comme les vitres d'une serre – d'où le nom donné à ce mécanisme – des gaz présents dans l'atmosphère piègent une partie de ces rayons qui tendent à la réchauffer. Ainsi, en termes de puissance, la Terre reçoit en moyenne un peu plus de 240 watts/m^2. Sans effet de serre, la température moyenne sur la Terre serait de - 18 °C et peu d'eau serait sous forme liquide. Cet effet a donc une influence bénéfique puisqu'il permet à notre planète d'avoir une température moyenne de 15 °C.

Cependant, depuis le début de l'ère industrielle, soit plus d'une centaine d'années, l'homme a rejeté dans l'atmosphère des gaz (gaz carbonique, méthane, oxydes d'azote, etc.) qui augmentent artificiellement l'effet de serre. Depuis 1750, cette augmentation, pour ce qui est des gaz "bien mélangés", a été de 2,43 W/m^2. Avec un "forçage radiatif supplémentaire" de 1,46 W/m^2, le gaz carbonique (CO_2) compte pour plus de la moitié de cet "effet de serre additionnel", loin devant le méthane (0,48 W/m^2), les halocarbures (chlorofluorocarbures CFC, hydrochlorofluorocarbures HCFC et hydrofluorocarbures HFC) avec 0,34 W/m^2 et le dioxyde d'azote avec 0,15 W/m^2. En outre, l'ozone troposphérique présente un forçage radiatif *positif* de 0,35 W/m^2 (mais on estime que l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique constaté entre 1979 et 2000 a entraîné un forçage radiatif *négatif* de 0,15 W/m^2).

Cet ajout à l'effet de serre naturel (155 W/m^2) est faible, correspondant à un accroissement de l'ordre de 1 %. Néanmoins, il est presque certain qu'il a contribué à l'augmentation de la température moyenne de notre planète d'environ 0,5 °C, observée au cours du vingtième siècle (figure 1). Si rien n'est fait pour réduire ces émissions, la concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère (figure 2) pourrait doubler d'ici 2100. À partir de la consommation mondiale actuelle[1] de combustibles fossiles (7 700 Mtep), il est aisé de calculer la masse de CO_2 actuellement produite : 20 milliards de tonnes par an ! Cela pourrait conduire à une augmentation substantielle de l'effet de serre et mener, par des effets amplificateurs non linéaires, à de profondes altérations du climat. La plupart des modèles prévoient que le double de la concentration de gaz carbonique actuelle conduirait, à la fin du vingt et unième siècle, à une élévation de la température de l'ordre de 2 à 3 °C. Certains donnent même une fourchette entre 1,5 et 4,5 °C, laissant prévoir des conséquences dramatiques sur l'environnement, comme la montée notable du niveau de la mer.

Ces chiffres peuvent sembler petits et n'avoir que de faibles conséquences sur le climat ; il n'en est rien. Pour s'en convaincre, il faut se rappeler que lors du "petit âge glaciaire", entre 1450 et 1880, la température moyenne ne s'est abaissée en France que de 1 °C en moyenne. Il y a 6 000 à 8 000 ans, alors que l'Europe occidentale a connu une période plus chaude avec une température moyenne supérieure de 2 °C à 3 °C à celle d'aujourd'hui, le Sahara n'était

(1) CEE DG XVII (1996), scénario "Sagesse traditionnelle".

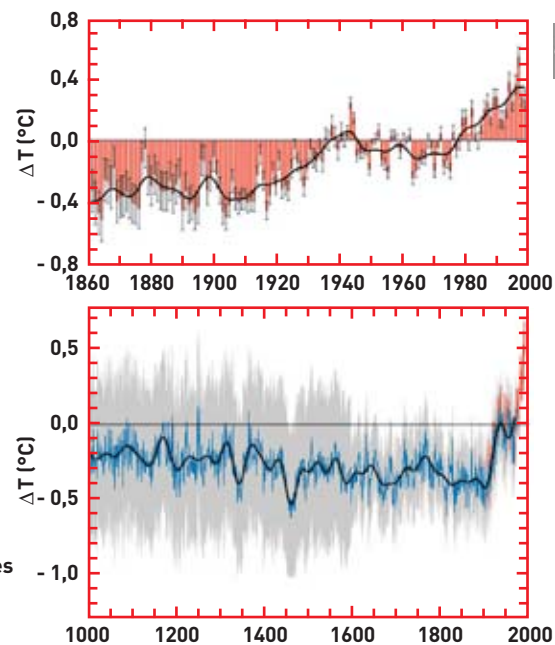


Figure 1. Écarts en température (ΔT) par rapport à la moyenne des années 1961-1990 pour les années 1860-2000 à l'échelle globale (en haut) et pour les mille dernières années dans l'hémisphère Nord (en bas).

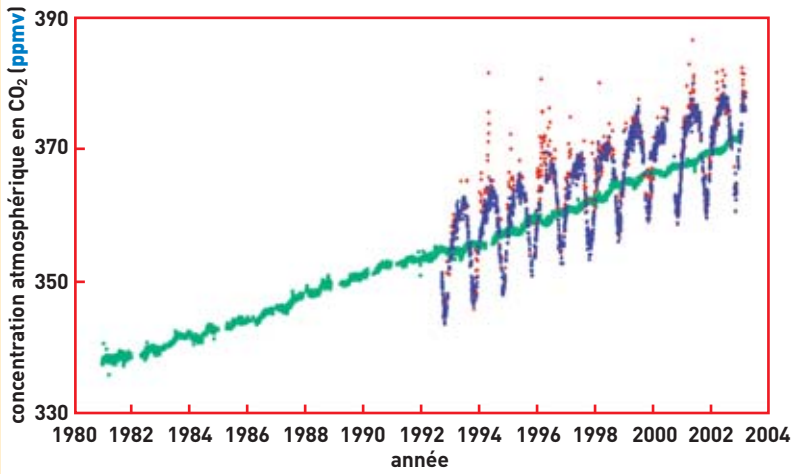


Figure 2.
Évolution de la concentration atmosphérique en CO_2 depuis 1980 telle qu'elle est mesurée quotidiennement par les stations automatiques du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), depuis 1981 sur l'Île d'Amsterdam (Océan indien) et depuis 1992 à Mace Head sur la côte ouest de l'Irlande.
Les mesures à l'Île d'Amsterdam (en vert), loin de toute perturbation anthropique directe, mettent essentiellement en évidence l'augmentation continue de la concentration. Le site de Mace Head mesure essentiellement l'air océanique (régime normal de vents d'ouest ; mesures en bleu). Quand le régime des vents s'inverse, il reçoit une atmosphère continentale, avec un fort excès de CO_2 (mesures en rouge) par rapport à l'atmosphère océanique. À l'augmentation moyenne de la concentration de CO_2 se superpose une forte modulation saisonnière due au cycle végétatif (photosynthèse chlorophyllienne) des plantes, émetteur de CO_2 en hiver et absorbeur en été.

pas un désert mais le siège de pluies abondantes. C'est moins l'augmentation de la température qui est préoccupante que sa variation rapide (en un siècle). Les grandes variations déjà observées dans la nature se sont produites sur des échelles de temps beaucoup plus longues, au moins pour celles qui ont un caractère global. Ainsi, la dernière glaciation a duré 100 000 ans et la déglaciation correspondante 10 000 ans. La variation rapide que nous sommes en train de vivre peut induire des perturbations importantes et inattendues du climat et de l'écosystème, qui n'aura pas toujours le temps de s'adapter.

De Rio à Kyoto : les grandes conférences sur l'environnement

L'évolution de l'environnement global a suscité l'organisation d'importantes conférences, depuis la dernière décennie du vingtième siècle.
Au Sommet de la Terre de **Rio de Janeiro** (juin 1992) a été signée la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques qui adopta l'objectif d'une stabilisation des émissions de gaz à effet de serre (entrée en vigueur le 21 mars 1994).
À la conférence de Kyoto (décembre 1997) a été signé le protocole de réduction globale des émissions de ces gaz, de 5,2 % en moyenne en 2008-2012 par rapport à 1990, pour les pays de l'OCDE et les pays de l'Europe de l'Est (dont la Russie). Les objectifs de réduction pour l'Union européenne et la France sont de respectivement 8 % et 0 %. Les moyens de les atteindre ont été débattus sans succès en novembre 2000 à **La Haye**. Les conférences suivantes, tenues à **Marrakech** (2001), **Johannesbourg** (Sommet de la Terre en août-septembre 2002), **New-Delhi** (octobre 2002), **Moscou** (septembre-octobre 2003) et **Milan** (décembre 2003) n'ont pas permis la mise en application dès 2004 du protocole de Kyoto, enfin intervenue en 2005, grâce à sa récente ratification par la Russie.
Sous l'impulsion du programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), les problèmes posés par les substances appauvrissant la couche d'ozone atmosphérique ont été traités à **Vienne** (1985) et surtout à **Montréal** (septembre 1987) où a été signé le protocole imposant une réduction de la production et de l'utilisation des chlorofluorocarbures

National University of Ireland

La station de mesure de Mace Head, en Irlande.

(CFC). Ce protocole a fait l'objet des amendements de **Londres** (1990), qui a imposé l'abandon des CFC au 1er janvier 2000 et étendu la réglementation à d'autres produits (dont les HCFC), de **Copenhague** (1992), **Montréal** (1997) et **Pékin** (1999).

Le projet Gecopac

Le projet Gecopac (Génération d'énergie combinée par pile à combustible), qui associe la Région Centre, le CEA, l'académie d'Orléans-Tours et les partenaires industriels Dalkia et Snecma Moteurs, consiste à mettre au point le premier système français complet prototype de **cogénération**, intégrant une pile à combustible SOFC. Celle-ci sera conçue, développée et réalisée par le CEA. D'une puissance de 5 **kW**, ce système sera alimenté par le réseau de **gaz naturel** et sera couplé au réseau électrique du lieu d'implantation, un lycée choisi par le rectorat. Le projet Gecopac comprendra un cœur de pile, une unité de traitement du **combustible**, développée par la société N-Ghy, une unité de conversion de puissance et contrôle commande, développée par la société Ainelec, ainsi que les modules nécessaires à la gestion thermique interne et externe du système. Les partenaires du projet réaliseront dans un premier temps une maquette de 1 kW qui comportera les mêmes sous-systèmes que le futur prototype. Un premier bilan sera fait après 6 mois de tests afin de décider du lancement de la fabrication et de la mise en place du prototype de 5 kW.

Objet de recherche et développement, le projet Gecopac apportera support technique et financier, notamment sur le cœur de pile pour le CEA. Il offrira également la possibilité d'avoir un premier retour d'expérience sur un système complet de cogénération intéressant Dalkia, en tant qu'utilisateur, et Snecma Moteurs, comme potentiel ensemblier. De plus, l'intégration dès le début du projet d'un partenariat avec le rectorat d'Orléans-Tours permettra de développer les filières pédagogiques nécessaires à la formation des professionnels qui participeront à l'intégration de ces systèmes dans le paysage énergétique futur.

Le marché de la cogénération, estimé en France à environ 10 000 MW dans les années à venir va probablement s'ouvrir à partir de 2005, en raison de l'application de directives européennes sur la cogénération (voir l'encadré *La cogénération par pile à combustible*, p. 67). La pile à combustible serait très concurrentielle sur le marché résidentiel de la cogénération (1 à 100 kW), par rapport aux autres technologies de cogénération (microturbines à gaz par exemple). Le prototype de 5 kW constituera une excellente expérience sur la future "brique de base" de ces futurs systèmes modulaires.

Le projet Gecopac est essentiel pour la mise à niveau d'une activité SOFC en France. Il doit permettre de maîtriser les technologies clés des systèmes SOFC. Il favorisera la création d'un centre de compétences et d'excellence ouvert au Ripault et destiné à s'intégrer dans une plate-forme européenne de premier plan.