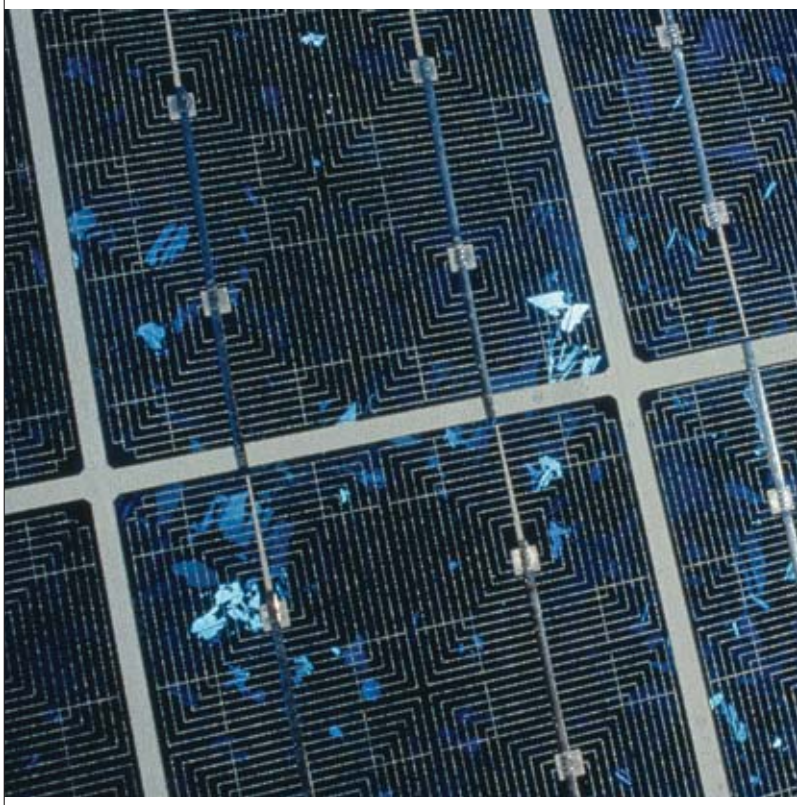
Les trois voies de l'énergie solaire

Les trois façons d'utiliser "directement" l'énergie solaire – la thermodynamique, la thermique et le photovoltaïque – font l'objet de nouveaux développements pour améliorer leurs performances et surtout leur compétitivité économique. Le CEA travaille, depuis une trentaine d'années, sur ces filières pour en étendre les applications et en baisser les coûts.



Coulon/CEA

Cellules photovoltaïques en silicium polycristallin testées au CEA/Cadarache.

Parmi les trois voies d'exploitation de l'énergie solaire, la filière thermodynamique a eu naguère son heure de gloire avec des installations comme, en France, la centrale Thémis. L'utilisation thermique, pour le chauffage direct de locaux ou de l'eau (piscine, chauffe-eau, plancher chauffant), reste une solution attractive que les garanties, subventions et améliorations technologiques contribuent à relancer. La transformation directe du rayonnement solaire en électricité, le **photovoltaïque**, constitue la voie la plus riche de progrès et est en expansion très rapide.

L'électricité solaire thermodynamique

La concentration du rayonnement solaire sur un seul foyer permet d'atteindre des températures élevées. Ce principe, connu depuis l'Antiquité, met en œuvre soit des capteurs paraboliques ou cylindro-paraboliques, soit des centrales dites "à tour", pour lesquelles une multitude d'héliostats orientables concentrent l'énergie solaire sur une chaudière unique située sur une tour. Cela rend possible le réchauffement de fluides caloporteurs, en général de l'huile ou des sels fondus, dans une gamme de température allant de 250 à 1 000 °C, selon les techniques employées. Ces fluides viennent ensuite chauffer de la vapeur d'eau, qui entraîne un turboalternateur, comme dans les centrales thermiques conventionnelles. Des unités prototypes de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts (**kW**) à une dizaine de mégawatts (**MW**) ont été construites à travers le monde au cours des trois décennies écoulées. Dans les Pyrénées, la centrale Thémis, d'une puissance de 2 MW, a fonctionné au début des années 80. Le plus grand développement commercial a toutefois été réalisé par la société Luz Corp., qui a construit au cours de la même décennie trois centrales à capteurs cylindro-paraboliques totalisant une puissance électrique nominale de 354 **MWe**, et fournissant au réseau de Southern California Edison – qui alimente Los Angeles – une électricité de pointe durant les après-midi d'été. Ces centrales témoignent de la relative maturité de cette filière avec des prix de revient de l'électricité autour de 0,10 €/**kWh**.
Un potentiel d'amélioration de 20 à 30 % reste envisageable, notamment *via* la production directe de vapeur dans les capteurs, et l'optimisation des miroirs. Les États-Unis, Israël et, pour l'Europe, l'Allemagne et l'Espagne (centrale solaire d'Almería) mènent conjointement des recherches sur ces thèmes. Des réalisations, combinant parfois turbine à gaz et solaire, sont annoncées dans plusieurs pays tels que l'Égypte, le Maroc, l'Inde et le Brésil. La filière thermodynamique à concentration demeure toutefois réservée aux pays sans nuage. Son avenir est remis en cause par le développement spectaculaire de la filière photovoltaïque, plus simple et fiable, même si cette dernière reste plus coûteuse pour des productions centralisées de quelques MW ou gigawatts (**GW**) pour encore deux à trois décennies.

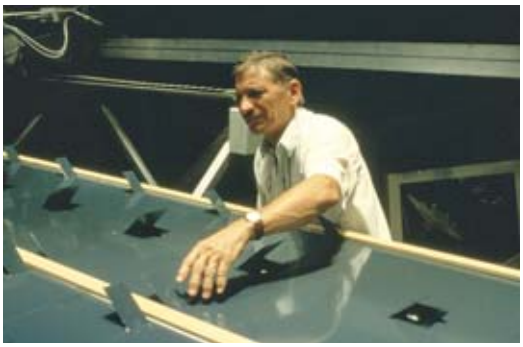
L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique s'utilise principalement au travers de deux applications : le chauffage de l'eau chaude sanitaire et le chauffage des locaux. Pour le premier point, quatre mètres carrés permettent de répondre aux besoins en eau chaude d'une famille de quatre personnes, pour un investissement moyen de 1 500 à 4 000 €. Pour le second, dix à vingt mètres carrés assurent le chauffage d'une maison individuelle. Un chauffage d'appoint est nécessaire pour les périodes climatiques les plus défavorables. En moyenne sur l'année, une installation de chauffage solaire procure un taux de couverture des besoins, donc une économie sur la facture, de l'ordre de 50 à 70 %. Selon les types d'énergie d'appoint et d'énergie substituée, les temps de retour s'étalent de six à douze ans.

De tels capteurs thermiques produisent annuellement de 200 à 800 kWh/m², avec des rendements de 30 à 60 %, selon les besoins, les températures et les modes d'utilisation. 200 kWh/m² correspondent à des usages épisodiques d'eau chaude sanitaire à température élevée (supérieure à 55 °C). 800 kWh/m² sont obtenus dans le cas de chauffage continu à basse température. Pour ce type d'application, souvent appelée "plancher solaire direct", le fluide caloporteur issu des capteurs est injecté directement dans le plancher des bâtiments à une température de 25 à 30 °C. Cette conception conduit d'une part, à des habitations très confortables et d'autre part, à une rentabilité technico-économique des meilleures.

Le développement du marché européen a démarré autour de 250 000 m²/an dans les années 80. L'introduction de nouveaux concepts comme la garantie de résultats solaires et les aides multiples ont induit une forte croissance, en France et ailleurs, avec une augmentation des surfaces vendues d'un facteur 2 à 4 sur les cinq dernières années. À court terme, le marché annuel européen est estimé à plusieurs millions de m². En France, les aides sont en crédit d'impôts (40 % en 2005), aides régionales et nationales (**Ademe**).

Les développements technologiques en cours ont pour objectif de baisser les coûts, *via* une meilleure facilité d'intégration et de mise en œuvre dans le bâti. Une voie prometteuse (Face Sud) est l'association de trois fonctions dans le même capteur (trois en un) : couverture, production thermique, production électrique. Un circuit caloporteur refroidit le module en face arrière, augmentant le rendement de 20 % en moyenne, et chauffe le plancher. La loi d'orientation sur l'énergie prévoit dès 2010 l'installation de 50 000 toits/an en Face Sud. Ces maisons produiront plus de 100 % de l'énergie électrique et 60 % de l'énergie thermique qu'elles consomment.



Coulon/CEA

Modèle de toit à double paroi permettant aux courants d'air naturels de rafraîchir la température d'une habitation testé dans un simulateur solaire au CEA/Cadarache.

L'électricité solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est un moyen intéressant de réduire les coûts de distribution de l'électricité dans certaines régions. Particulièrement disponible dans la plupart des pays situés entre l'équateur et les 45es parallèles, c'est une source d'énergie d'une fiabilité remarquable qui présente un bilan énergétique et environnemental tout à fait favorable (encadré D, ***Comment fonctionne une cellule solaire photovoltaïque ?***, p. 115).

EyeWire

Centrale à tour de la société Luz Corp., en Californie, une des principales réalisations commerciales dans le domaine du solaire thermodynamique de la fin du XXe siècle.

Réels avantages et vraies contraintes

L'énergie solaire est une ressource relativement bien répartie géographiquement, et donc disponible en de multiples endroits. Dès lors, l'usage de **cellules** ou de **modules photovoltaïques** (voir *Des cellules de haute technologie pour des modules moins chers*, p. 116) conduit à la production d'électricité "sur place", à proximité immédiate des besoins. C'est là un atout essentiel de l'électricité solaire. Elle permet d'éviter les coûts de distribution inhérents aux solutions conventionnelles, que ce soit l'emploi de groupes électrogènes alimentés par des **énergies fossiles** (diesel, essence ou gaz), ou l'extension d'un réseau électrique principal jusqu'au lieu d'utilisation.

En effet, dans le premier cas, il est nécessaire de prendre en compte la disponibilité et le coût d'approvisionnement du **combustible** jusqu'au site concerné ainsi que la maintenance périodique. Dans le second cas, les coûts de l'extension ou du renforcement d'une ligne renchérissent de manière très importante le prix du kWh, surtout si les besoins sont faibles. S'ils sont importants, l'amortissement sur chaque kWh sera proportionnellement réduit.

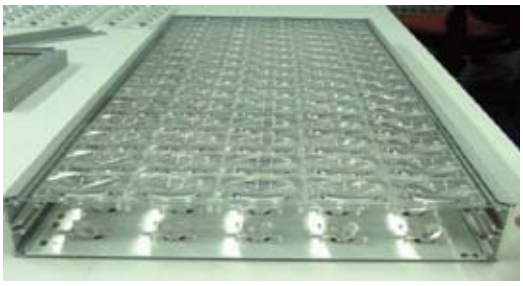
L'absence de tout mouvement mécanique ou de circulation de fluide confère à l'électricité photovoltaïque une fiabilité exceptionnelle. Les modules les plus vendus, à base de **silicium cristallin**, font maintenant couramment l'objet de garanties de l'ordre de vingt ans, pour des durées de vie escomptées largement supérieures. Le bilan énergétique est favorable, puisqu'un module photovoltaïque rend l'énergie nécessaire à sa réalisation en un à quatre ans d'exposition au soleil, selon sa technologie de fabrication.

Le photovoltaïque est dès aujourd'hui sans concurrent pour alimenter des besoins de quelques kWh/jour, là où le réseau n'existe pas. Par exemple, les besoins typiques dans un pays en développement concernant l'éclairage, un radio-lecteur de CD, un chargeur de piles, une petite télévision N&B correspondent à une surface de modules photovoltaïques de 0,5 m². Les

besoins domestiques liés à un niveau de confort moderne incluant télévision, hi-fi et électroménager, ou une installation de pompage pour une distribution d'eau villageoise demanderont plusieurs kWh/jour. Dans tous ces cas de figure, des systèmes de l'ordre du m^2 ou de la dizaine de m^2 conviennent, et ils posent rarement des difficultés d'intégration.
En revanche, l'utilisation de l'électricité solaire reste largement à étendre pour des besoins supérieurs, associés aux activités économiques villageoises et à la mécanisation. C'est le défi en cours. Le développement des zones actuellement sans réseaux doit se faire sans investir dans un réseau mais en créant un univers du solaire autonome, mettant en œuvre des équipements spécifiques en courant continu haut rendement.
L'électricité solaire photovoltaïque peut être employée de deux manières : pour la fourniture d'électricité en sites isolés ou pour l'injection d'électricité dans un réseau électrique.

Montée en puissance de l'alimentation des sites isolés

La première application est la plus ancienne et la plus répandue au regard des millions de systèmes installés à travers le monde. Ce type d'application a commencé dès les années 60 pour les satellites, où les modules solaires photovoltaïques se sont imposés face à la plupart des autres solutions, principalement pour des questions de poids et de fiabilité. Les premières applications terrestres se sont développées dans les années 70, essentiellement pour des besoins professionnels (alimentation de stations météorologiques ou de relais de télécommunications). Les années 80 ont vu l'apparition successive de nombreuses niches de marché, comme le balisage maritime et aérien, la protection cathodique des oléoducs ou des pylônes, le mobilier urbain et surtout, sous l'impulsion notamment du CEA qui a accompli une série de premières mondiales en ce domaine, l'électrification rurale, qui englobe principalement des besoins tels que l'éclairage domestique, l'audiovisuel et le pompage de l'eau. L'approvisionnement en eau des sites isolés et son traitement en vue de la rendre potable représenteront dans un avenir proche un marché très important, tant les difficultés environnementales sur ce thème sont prévisibles.



Isofoton

Une des solutions pour réduire le coût du solaire photovoltaïque consiste à n'utiliser qu'un nombre minimal de cellules à haut rendement équipées de systèmes optiques de concentration, tel ce prototype de 1 kWc réalisé par le CEA et l'industriel espagnol Isofoton.

Michel Courillon/Ademe 1998

Deux panneaux solaires alimentent en partie en électricité le village de Towé, au Bénin.

Les années les plus récentes auront permis une montée en puissance du nombre de réalisations dans chacun de ces secteurs. Dans le monde, 90 % des balises maritimes sont ainsi équipées. Dans les pays en développement, toutes les stations de télécommunications ou les relais hertziens utilisent cette source d'énergie. Les programmes d'électrification rurale se réalisent maintenant par tranches de plusieurs milliers de systèmes. Près de deux millions sont en fonctionnement en 2004.
La caractéristique principale de cette première catégorie d'applications de l'électricité solaire est qu'elle nécessite l'emploi de batteries lorsque le besoin d'électricité n'est pas en phase avec la production, la ressource, autrement dit le soleil (voir *Le stockage de l'électricité d'origine photovoltaïque*, p. 127).

Croissance accélérée pour l'électricité "au fil du Soleil"

La seconde application, plus récente, bénéficie d'un taux de croissance encore plus rapide. Il s'agit dans ce cas de transformer directement le courant continu des modules photovoltaïques en courant alternatif identique à celui qui est utilisé dans les réseaux électriques basse tension. L'électricité ainsi générée "au fil du Soleil" est soit consommée sur place, soit injectée dans le réseau. L'intérêt économique et l'engouement actuel pour cette solution viennent du fait que l'électricité produite peut être vendue à la compagnie de distribution d'électricité à un prix subventionné : 0,50 €/kWh en Allemagne, 0,15 à 0,30 €/kWh en France. Dans notre pays s'y ajoutent des aides diverses : crédit d'impôts jusqu'à 40 %, aides régionales.
L'approche habituelle tire profit du caractère *réparti* de la ressource et se décline en réalisations "domestiques", d'environ 3 à 5 kW sur chaque toit. Les précurseurs en matière de "toits solaires" ont été le Japon et l'Allemagne à la fin des années 80. À l'heure actuelle, des programmes importants sont en phase de réalisation, au Japon et en Europe du Nord principalement, sur un rythme de l'ordre de 20 000 systèmes montés en toiture chaque mois. Ce "couplage" au réseau pourrait se faire un jour de façon centralisée avec des centrales photovoltaïques de quelques mégawatts. Enfin, en couvrant de modules 5 % de la surface des

déserts, il serait possible dans un temps futur d'alimenter la planète entière.

Des prix de revient en baisse régulière

En 2003, le marché a représenté un volume de 745 MW de puissance de module, et un chiffre d'affaires total du secteur photovoltaïque de 5 milliards d'euros. La croissance est forte et en vive accélération, de 20 % par an en moyenne sur les dix dernières années, et de plus de 37 % par an sur les trois dernières. En 2004, la production dépassera le gigawatt. Le lancement des programmes de diffusion à grande échelle des toits photovoltaïques, au Japon puis en Allemagne, est à l'origine d'une certaine pénurie.

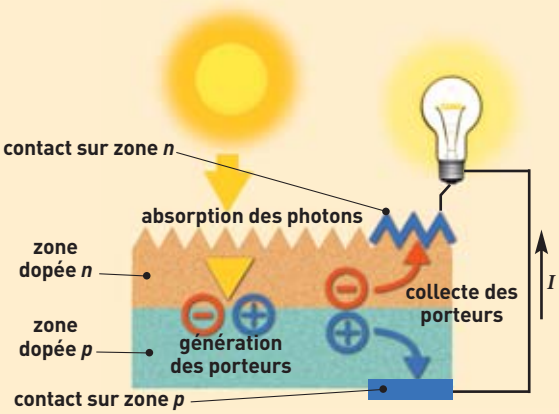
Les projections, établies sur des hypothèses de croissance de 20 et 25 % par an, sont toutes dépassées. Pour 2020, selon les estimations de l'Association européenne des industriels du photovoltaïque (EPIA), le marché serait de 50 GW, et 1 000 GW en 2030. À ce jour, les principaux pays producteurs sont par ordre d'importance le Japon (44 %), l'Europe (29 %) et les États-Unis (17 %). Les principaux acteurs sont de grands groupes du pétrole (BP, Shell et Total) ou de l'électronique (Kyocera, Sharp et Sanyo). Photowatt, entreprise d'origine française implantée en Rhône-Alpes, se classe au quatrième rang européen et au onzième mondial.

Les prix de vente des modules sur le marché international se situent actuellement autour de 2,70 €/W (prix sortie usine, en grande série). Ils ont connu sur les vingt dernières années une évolution régulière, correspondant à une division par deux tous les dix ans. La projection vers le futur conduit ainsi à un prix de l'ordre de 1,50 €/W, en 2010. Pour un système photovoltaïque de quelques kW couplé au réseau, le prix de revient pour l'usager, installation et onduleur compris, est d'environ 4 €/W en posé et 6 €/W en intégré au toit. Pour un système avec stockage sur batteries, les prix varient selon les applications entre 6 et 10 €/W.

> Patrick Jourde
Direction de la recherche technologique
CEA centres de Grenoble et de Cadarache

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. 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).

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).

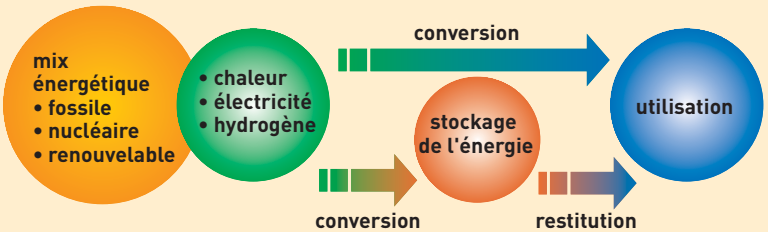


Figure 1.
Le schéma énergétique.

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.

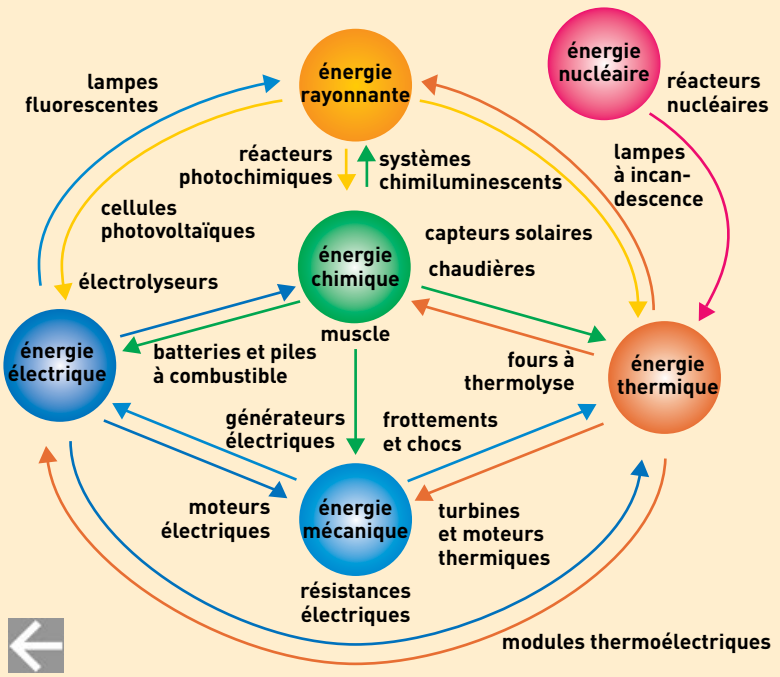
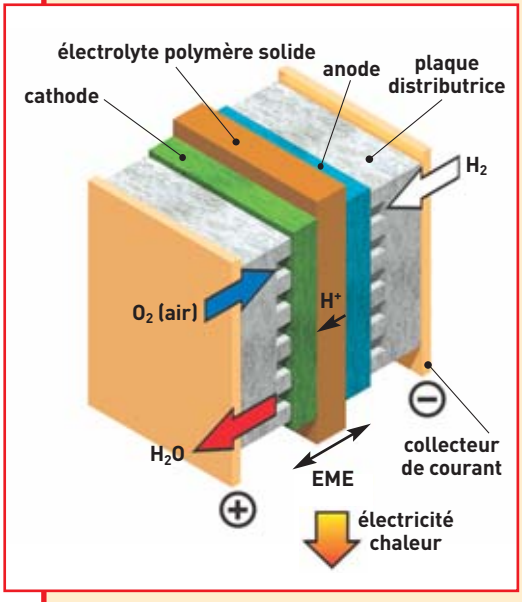


Figure 2.
Conversions des six principales formes d'énergie et quelques exemples de convertisseurs d'énergie.

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).

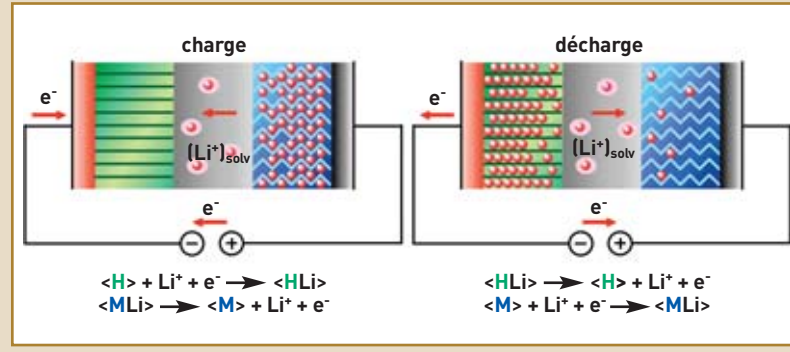
Un accumulateur, quelle que soit la technologie utilisée, est pour l'essentiel défini par trois grandeurs. Sa **densité d'énergie massique** (ou **volumique**), en wattheure par kilogramme, Wh/kg (ou en wattheure par litre, Wh/l), correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (ou de volume) 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.

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.

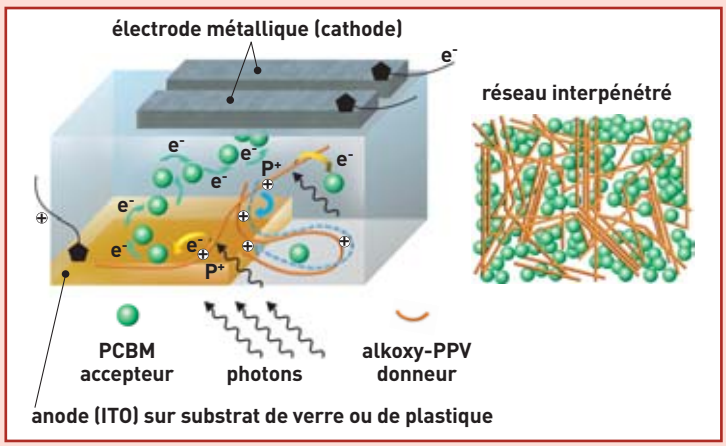


Figure tirée d'une présentation de S. Sariciftci (www.lios.at)

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