

Un effort public soutenu en faveur des nouvelles technologies de l'énergie



Le développement de technologies innovantes moins consommatrices d'énergie et moins polluantes, notamment dans le domaine des transports, constitue un enjeu compétitif important pour la France.

Entre financements nationaux et procédures communautaires, le dispositif public français d'aide au développement des nouvelles technologies de l'énergie doit éviter l'éparpillement des efforts.

Les principaux domaines sur lesquels l'effort national dans le domaine des nouvelles technologies de l'énergie (NTE) doit porter sont, estime-t-on généralement : le développement de technologies innovantes moins consommatrices d'énergie, notamment dans les transports et le bâtiment, la recherche sur de nouveaux **vecteurs énergétiques** tel l'**hydrogène** ou sur des **convertisseurs d'énergie** comme les **piles à combustible**, l'amélioration des procédés de traitement des **gaz à effet de serre** (capture et **séquestration** du **CO₂**) ou de traitement de l'aval du cycle des différentes filières, ainsi que la R&D dans le domaine des **énergies renouvelables** à impact limité sur l'environnement (solaire **photovoltaïque**, éolien, **biomasse**...).

La maîtrise de ces technologies constituera un atout stratégique pour un développement durable. Les enjeux en termes de compétitivité sont énormes. Il est souhaitable que la France prenne une position en pointe sur ces technologies clés, afin d'assurer un avantage compétitif à son économie et à ses entreprises. Le pays y consacre un certain nombre de ressources, le principal financement national provenant du BCRD (budget civil de recherche et de développement) dont la part accordée à l'énergie évolue autour de 7,5% depuis dix ans soit environ 570 millions d'euros (M€) en 2001. Le CEA assure la quasi-totalité des moyens de l'objectif énergie du BCRD, secteur qui représente près de 60% de ses recherches finalisées, en grande partie dévolues au nucléaire. Viennent ensuite l'**Ademe**, dans une

optique de maîtrise des consommations, de développement des énergies renouvelables et de protection de l'environnement, l'**Anvar** et les ministères chargés de la Recherche et de l'Industrie.

L'Europe s'implique également sur ce sujet et la réduction des gaz à effet de serre figure au rang des objectifs du **6^e PCRD**. Il est doté de 810 M€ pour l'énergie sur quatre ans (640 M€ pour les transports et 250 M€ pour l'environnement, utilisables marginalement pour l'énergie). Force est toutefois de constater que ces crédits sont souvent répartis entre un grand nombre d'axes de recherche.



Série d'éoliennes sur le site d'Escales-Conilhac, dans l'Aude. L'éolien et la biomasse font partie des sources d'énergie qui bénéficient d'un soutien public pour leur développement.



Les enjeux en termes de compétitivité sont tels que l'approche du sujet est nécessairement communautaire, voire mondiale. Mais il faut aussi éviter l'éparpillement de l'effort. Une politique de recherche et développement efficace, seule à même de parvenir à des réalisations d'ampleur, suppose d'abord une concertation étroite entre entreprises et organismes de recherche ainsi que des programmes concertés ambitieux, et surtout rythmés par des applications concrètes à brève échéance. On doit viser la rupture technologique, mais celle-ci est nécessairement précédée par un certain nombre d'étapes.

Viser la rupture technologique

Dans cette optique, le Gouvernement a mis en place en 2003 un groupe de travail sur les ruptures technologiques. Constitué essentiellement d'industriels et de laboratoires (l'Administration y est représentée) sous la présidence d'un industriel, il avait pour but d'identifier des objectifs et des axes prioritaires pour la recherche

française et européenne et de proposer aux pouvoirs publics des recommandations sur l'évolution des dispositifs de soutien à la recherche et à l'innovation pour atteindre ces objectifs. Son rapport a constaté que l'addition des financements publics des pays européens et du PCRDT conduit à un effort de recherche dans le domaine de l'énergie inférieur (sans doute de 20%) à celui consenti respectivement par les États-Unis et le Japon. Le groupe de travail a réalisé un bilan et élaboré des propositions tenant compte des besoins planétaires en énergie, en technologie, en équipement et en politiques publiques. Il a élaboré une réflexion prospective ainsi qu'une stratégie française de recherche et d'innovation à plus long terme, afin d'orienter les choix publics nationaux, de fonder une initiative française pour mobiliser l'Union européenne, de fournir des références aux discussions scientifiques internationales et d'aider les entreprises à définir leurs choix propres pour une meilleure compétitivité. Il a émis des recommandations combinant objectifs et perspectives de faisabilité.

Deux axes forts pour la R&D

Deux axes thématiques forts se dégagent pour la R&D : accorder la priorité à la maîtrise de l'énergie dans ses trois grands usages (transport, habitat/tertiaire et industrie), en accroissant sensiblement les dotations publiques et privées, et pour l'offre en énergie, à la R&D sur les carburants de synthèse issus de la biomasse, à la séquestration du CO₂ et, pour le nucléaire, à la sûreté, au traitement des déchets et à la génération IV.

Par ailleurs, la France se fixe pour objectif d'être un partenaire important dans les programmes de recherche concernant l'hydrogène et la pile à combustible, le photovoltaïque, les réseaux et le stockage de l'électricité, la production de carburants à partir d'énergie fossile, la fusion, l'éolien *offshore* et l'exploitation-production des énergies fossiles.

Il faut désormais s'interroger sur les meilleurs outils de mise en œuvre de ces axes stratégiques et sur un ciblage complémentaire. Le niveau national, préalable nécessaire, ne suffira pas à une action ambitieuse qui nécessitera que l'Europe augmente très sensiblement les aides à la recherche sur les NTE. Les porter au même niveau que pour les biotechnologies conduirait à leur triplement (2,4 milliards d'euros contre 0,8 actuellement).

> **Jean-Claude Hulot**

Ministère délégué à l'industrie
Paris

Les NTE, domaine de formation stratégique pour l'INSTN

Les nouvelles technologies de l'énergie (NTE) constituent un des seize domaines stratégiques de formation choisis par le CEA à l'issue du repositionnement des enseignements de l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) entamé sous l'impulsion du Haut commissaire à l'énergie atomique.

Institut d'enseignement supérieur administré par le CEA (sa mission est de valoriser les compétences de l'organisme à leur plus haut niveau vis-à-vis de l'enseignement supérieur et de l'industrie, que ce soit en formation initiale ou en formation continue), l'INSTN est engagé depuis plusieurs années sur les NTE. En formation initiale⁽¹⁾, il participe (ou participera dès 2005) à des masters spécialisés en lien avec les NTE, par exemple à Grenoble sur le cycle de l'hydrogène et à Saclay sur les matériaux pour les structures de l'énergie.

Aussi, en 2005, l'INSTN, associé à l'École du pétrole et des moteurs (IFP), à l'université Paris X et aux grandes écoles du réseau PariTech (X, Mines, INAPG...), va proposer à Saclay un master sur le thème de l'économie de l'énergie et de l'environnement. Ce nouveau master reprendra un module de l'actuel DESS Économie et politique de l'énergie (cohabilité par l'INSTN Saclay Paris X) qui donne aux étudiants un bagage technico-économique solide sur l'ensemble des énergies renouvelables et sur les NTE, en particulier (hydrogène et pile à combustible notamment).

Au niveau de la formation permanente⁽²⁾, des sessions d'études conçues avec le Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (Liten/DRT) sont organisées depuis trois ans déjà sur l'hydrogène, la pile à combustible, le photovoltaïque et le stockage de l'énergie. L'objectif principal de ces formations est de dresser un état de l'art des connaissances acquises, au CEA et ailleurs, sur ces technologies afin de sensibiliser les chercheurs, les industriels ou les institutionnels qui voudraient participer à leur développement.

Parallèlement, une autre formation a été mise en place avec l'Ademe sur la production décentralisée d'électricité en milieu rural (Cooper).

Enfin, chaque année depuis 2002, une école d'été sur l'énergie et le développement durable en Méditerranée est organisée à Tunis. L'efficacité énergétique et la place des énergies renouvelables y sont largement discutées.

> **Paul Maître**

Institut national des sciences et techniques nucléaires
CEA centre de Saclay

(1) En matière d'enseignement universitaire, l'INSTN est positionné sur 20 spécialités de Master en coopération avec une quinzaine d'universités.

(2) Dans le cadre de la formation continue, l'INSTN forme 8 000 personnes par an, dont un tiers au CEA.

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).

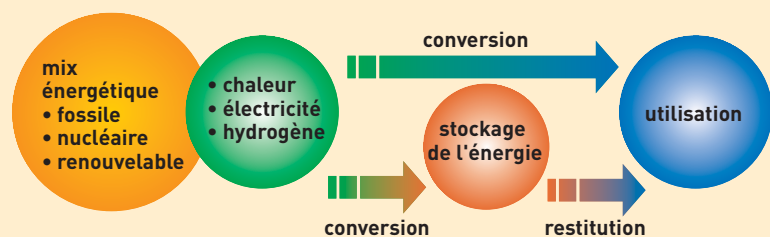


Figure 1. Le schéma énergétique.

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 éner-**

gétique. 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.

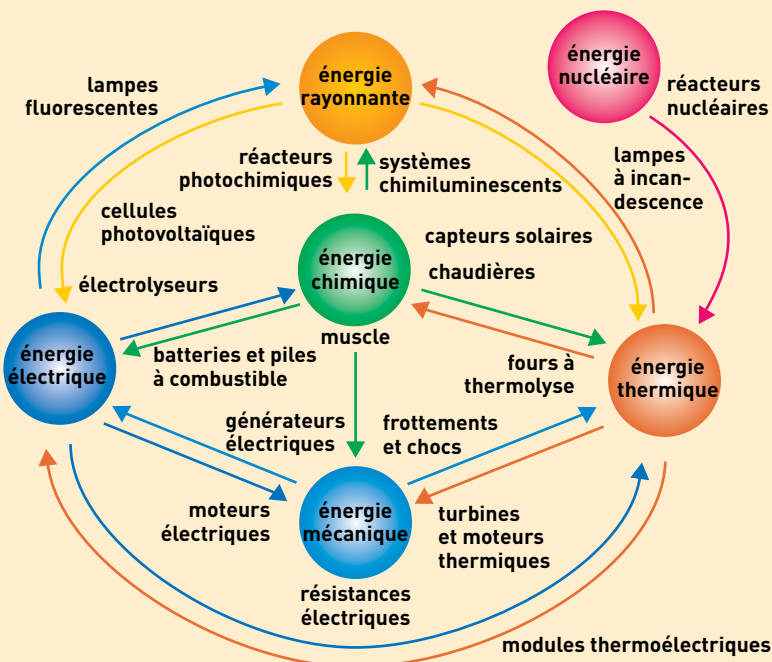
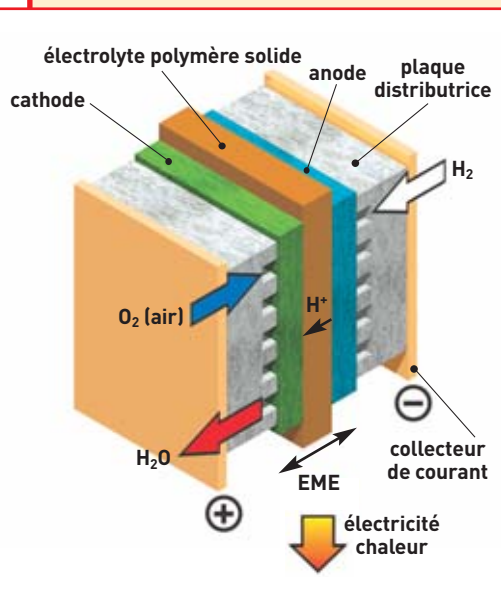


Figure 2. Conversions des six principales formes d'énergie et quelques exemples de convertisseurs d'énergie.

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/cm². 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

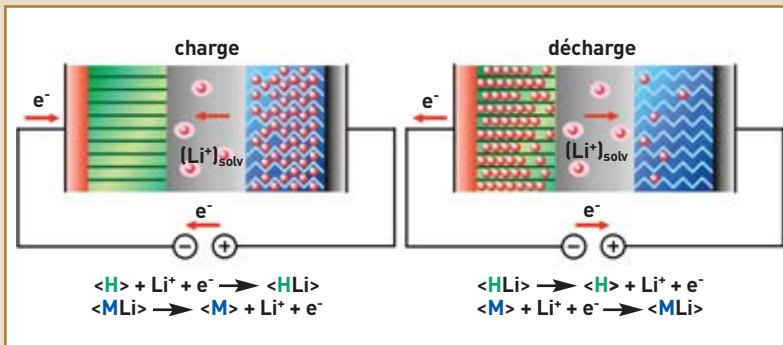
solution de potasse concentrée, a permis d'atteindre une densité d'énergie massique de 70 à 80 Wh/kg. La seconde filière avait déjà fait l'objet de travaux vers la fin des années soixante-dix, dans la perspective de trouver des couples électrochimiques présentant de meilleures performances que les accumulateurs 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 (filiale **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/kg 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

1

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



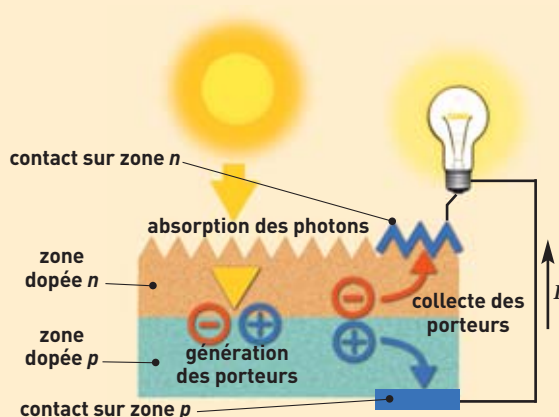
160 Wh/kg et 400 Wh/l), supérieures en moyenne de plus de 50 % à celles des batteries conventionnelles.

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**. 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.

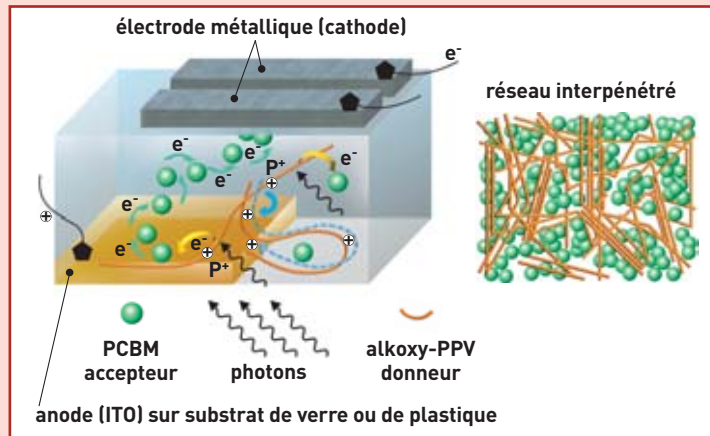


Figure tirée d'une présentation de S. Sarriciffici (www.llois.at)

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