



## Le reformeur embarqué, solution transitoire ?

Une des principales utilisations envisagées pour l'hydrogène se trouve dans le transport automobile. Pour faciliter une transition vers le véhicule électrique équipé d'une pile à combustible, pourquoi ne pas installer dans celui-ci une mini-unité de reformage ? Un constructeur comme Renault y songe.

En 1998, l'Association européenne des constructeurs automobiles (ACEA) s'est engagée à diminuer les émissions de  $\text{CO}_2$  de 25 % par rapport au niveau atteint en 1995. Les véhicules électriques, et plus particulièrement ceux équipés d'une **pile à combustible**, apparaissent comme des solutions prometteuses pour atteindre ces objectifs. Cependant une question demeure : *quid* du **carburant** ?

Si, l'**hydrogène** apparaît comme un **vecteur énergétique** d'avenir, un certain nombre de problèmes doivent être résolus avant de le retrouver dans la rue (réseau de distribution, moyens de stockage, sécurité des procédés). Afin de gérer cette période transitoire qui pourrait durer plusieurs décennies, le **reformage** embarqué semble une étape séduisante. Cependant, il faut que les performances de ces générateurs d'hydrogène soient compatibles avec les contraintes automobiles : rendement élevé, transitoires (démarrage, augmentation ou diminution de la puissance) rapides, faible coût, encombrement restreint, sécurité, et recyclabilité des matériaux.

En quelques années, d'énormes progrès ont été effectués dans ce domaine. Si à la fin des années 90, le volume d'un système reformeur complet était voisin du mètre cube, aujourd'hui les systèmes les plus compacts capables d'alimenter un véhicule de type Scenic II ne font pas plus de 50 à 100 litres.

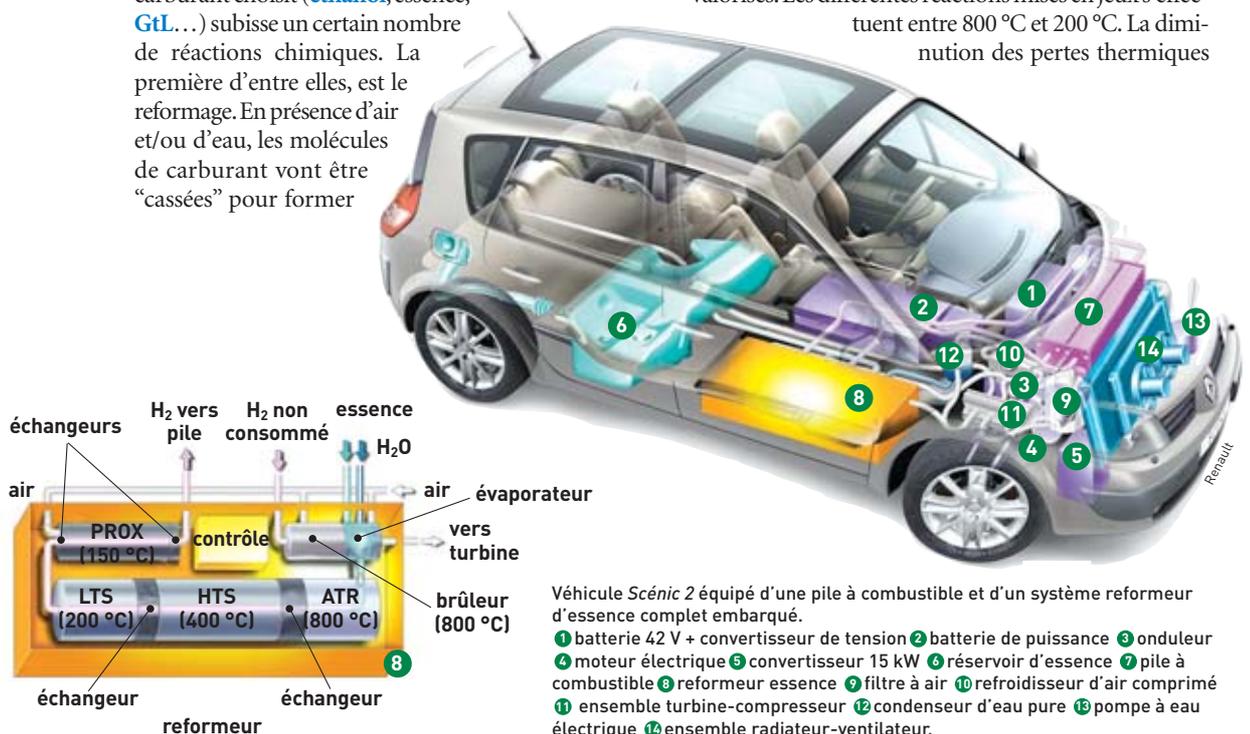
Pour générer de l'hydrogène de qualité pile à combustible (taux de CO inférieur à 100 ppm), il faut que le carburant choisis (**éthanol**, essence, **GtL**...) subisse un certain nombre de réactions chimiques. La première d'entre elles, est le reformage. En présence d'air et/ou d'eau, les molécules de carburant vont être "cassées" pour former



Système reformeur développé par Nuvera Fuel Cells, spécialiste international du reformage multicarburants et de la pile à combustible dans le capital duquel Renault a pris, en mai 2004, une participation de 10 %.

un mélange d'hydrogène (30 à 35 %), de monoxyde et de dioxyde de carbone (10 à 15 % chacun). Afin de diminuer le taux de CO, trois étapes vont être nécessaires. Deux réactions de conversion de gaz à l'eau et une étape d'oxydation préférentielle vont permettre de passer de 10 - 15 % de CO à moins d'une centaine de ppm. Ces réactions chimiques sont relativement lentes et nécessiteraient des réacteurs de grande taille incompatibles avec une application automobile. L'utilisation de **catalyseurs** permet d'augmenter les vitesses de réaction, et de ce fait de diminuer drastiquement la taille des réacteurs.

Afin d'obtenir un système compact et à haut rendement, les échanges thermiques doivent être particulièrement valorisés. Les différentes réactions mises en jeux s'effectuent entre 800 °C et 200 °C. La diminution des pertes thermiques



permettra d'autant l'augmentation du rendement du système reformeur. Aujourd'hui, les meilleurs systèmes atteignent des rendements supérieurs à 80 %.

Si dans l'ensemble de gros progrès ont été réalisés, l'aspect "transitoire" et le coût sont les deux principaux axes de recherches pour les années à venir. Pour avoir un système concurrentiel avec le véhicule classique, il faudrait que le système reformeur "démarré" en moins de 30 secondes et que son coût ne dépasse pas 700 €. Un chiffre dont sont encore assez éloignés les meilleurs systèmes existants, des prototypes dont le coût se chiffre en centaines de milliers d'euros.

Déjà engagé depuis plusieurs années dans la réduction des émissions de **gaz à effet de serre** et de la consommation de carburant des véhicules, Renault intensifie

ses travaux en matière de pile à combustible. Fort de l'expertise, acquise au cours des programmes de recherche menés entre 1992 et 2002, le constructeur complète son savoir-faire avec celui d'entreprises leaders dans ce domaine. Depuis 1999, Renault et Nissan travaillent en synergie sur le développement du véhicule "pile à combustible", le premier se concentrant sur la voie du reformage embarqué de l'essence tandis que le second se focalise sur le véhicule alimenté directement en hydrogène.

> **Fabien Boudjemaa**

Pôle de compétence pile à combustible  
Direction de la Recherche Renault  
Guyancourt (Yvelines)

## La production par électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est un procédé aujourd'hui coûteux de production d'hydrogène, mis en œuvre industriellement, dans des installations de plusieurs mégawatts, pour produire de l'hydrogène de grande pureté lorsque l'électricité est disponible à faible coût. Elle pourrait se développer aussi bien dans de petites installations utilisant des énergies renouvelables que réalisée à grande échelle avec le recours à des réacteurs nucléaires à haute température.



Terje S. Knudsen

Électrolyseur pour la production d'hydrogène conçu par Hydro Electrolysers.

L'**électrolyse** de l'eau est, avec le **vaporeformage** ou la gazéification d'**hydrocarbures**, l'un des principaux procédés disponibles pour la production d'**hydrogène**, même si l'hydrogène ainsi produit ne représente aujourd'hui qu'une part négligeable, de l'ordre de 1 %, de la production mondiale. Ce procédé est mis en œuvre industriellement, dans des installations de plusieurs **mégawatts**, pour produire de l'hydrogène de grande pureté lorsque l'électricité est disponible à faible coût ou en excès, par exemple, auprès du barrage d'Assouan en Égypte.

### Un principe simple

La décomposition de l'eau par électrolyse s'écrit globalement  $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$  avec une **enthalpie** de réaction de 285 kJ/mole (à 298 K et 1 bar). L'apport d'énergie électrique dépend de cette enthalpie de

réaction, de l'**entropie** de réaction et de la température ( $\Delta H = \Delta G + T\Delta S$ , où  $\Delta H$  est l'enthalpie de réaction,  $\Delta G$  l'énergie électrique et  $\Delta S$  l'entropie de réaction). Le potentiel théorique de la décomposition à 298 K est de 1,481 V. Les valeurs classiques des potentiels de cellule dans les installations industrielles sont de l'ordre de 1,7 à 2,1 V.

L'alimentation en eau d'un électrolyseur est de 0,8 L/Nm<sup>3</sup> d'hydrogène, en pratique proche de 1 L/Nm<sup>3</sup>. L'eau utilisée doit être la plus pure possible, afin d'éviter l'accumulation de boues et les phénomènes de corrosion aux **électrodes**.

Une cellule d'électrolyse est constituée de deux électrodes (**anode** et **cathode**, conducteurs électroniques) reliées à un générateur de courant continu et d'un **électrolyte** (milieu conducteur **ionique**). Dans l'électrolyse conventionnelle à basse température, l'électrolyte est généralement une solution aqueuse alcaline



constructeur	technologie	capacité (Nm <sup>3</sup> /h)	pression (bar)	rendement énergétique de la cellule (% PCI) <sup>(1)</sup>	rendement énergétique global (% PCI) <sup>(2)</sup>	consommation électrique (kWh/Nm <sup>3</sup> )
Giovanola	alcaline	20 – 500	1	77	60	5
Giovanola	alcaline	20 – 500	33	77	63,8	4,7
Hydro	alcaline	100 – 400	/	87	/	/
Vandenborre Technologies	membrane (inorganique)	10 – 60	1 – 8	91	62 – 65	4,6 – 4,8
Proton Energy Systems	membrane (polymère)	1 – 10	13	90	50 – 68	4,4 – 6
Stuart Energy	alcaline	10 – 36	/	/	51	5,9

(1) Rendement énergétique de la cellule : énergie dans H<sub>2</sub> produit/énergie électrique apportée.

(2) Rendement énergétique du système : énergie dans H<sub>2</sub> produit/énergie électrique consommée par le système.

Tableau.

Caractéristiques de certains électrolyseurs commerciaux. Les rendements énergétiques globaux des systèmes tiennent compte des consommations électriques des auxiliaires associés au module d'électrolyse proprement dit.



C. Etievant/École polytechnique

Prototype d'électrolyseur à membrane polymère solide pour la génération d'hydrogène et d'oxygène développé avec l'École polytechnique.

(hydroxyde de potassium – électrolyse industrielle) ou une membrane **polymère** échangeuse de **protons** (électrolyse de faible capacité). Dans le cas de l'électrolyse avancée où l'eau est à l'état de vapeur, l'électrolyte est une membrane **céramique** conductrice d'ions O<sup>2-</sup> (voir *L'électrolyse haute température*). La suite de l'article traite de l'électrolyse à basse température.

## Développements actuels et aspects économiques

Durant les dix dernières années, de nombreuses sociétés ont développé des électrolyseurs de petite capacité de production (0 à 100 Nm<sup>3</sup>/h d'hydrogène) pour certaines applications industrielles (électronique, agro-alimentaire, traitements des métaux, céramiques...). Dans certains cas l'électrolyse s'avère, en effet, une

solution plus économique et plus sûre que la livraison d'hydrogène par camion.

Le tableau donne quelques exemples et caractéristiques d'électrolyseurs de petite et moyenne capacité commercialisés. Les coûts de production de l'hydrogène par électrolyse sont donnés par les coûts d'investissement de l'électrolyseur, les coûts d'exploitation et de maintenance, les coûts de l'électricité et le taux de disponibilité. Selon les technologies et les capacités, ils sont compris entre 11 et 50 \$/GJ (soit entre 9,1 et 41 €/GJ).

## Perspectives

La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau est une des options techniques envisagées pour la production sur site d'hydrogène destiné à alimenter de petites flottes de véhicules à **pile à combustible** (utilisation d'électricité du réseau ou produite à partir d'énergies renouvelables). Environ le tiers des stations-service à hydrogène actuellement en cours d'exploitation ou en projet sont équipées d'un électrolyseur (soit environ une vingtaine).

La production d'hydrogène par électrolyse en petite capacité présente, à capacité de production égale, un niveau de maturité technique plus élevé que les technologies classiques de production à partir d'hydrocarbures. Des travaux de recherche et développement sont cependant encore nécessaires pour mettre au point des systèmes optimisés. De nouveaux concepts de "mini-électrolyseurs" sont à l'étude pour la production "à domicile" d'hydrogène pour son véhicule personnel. L'impact environnemental de l'électrolyse en termes d'émissions de CO<sub>2</sub> est nul si l'électricité utilisée est d'origine renouvelable ou nucléaire.

Pour la production en plus grande capacité, l'électrolyse à haute température est également envisagée (possibilité de combinaison avec des réacteurs nucléaires à haute température). Cette technologie permet de réaliser la dissociation de l'eau avec un meilleur rendement énergétique que l'électrolyse à basse température. En effet, plus la température augmente, plus l'énergie électrique à fournir diminue.



Stuart Energy

Borne de distribution d'hydrogène alimentée par une unité d'électrolyse.

➤ **Michel Junker**  
ALPHEA

Pôle de compétences sur l'hydrogène  
Forbach (Moselle)

# 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).

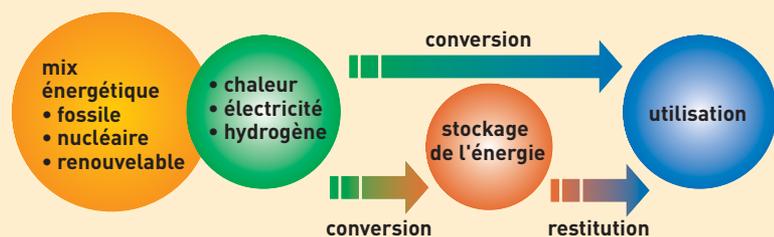


Figure 1. Le schéma énergétique.

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.

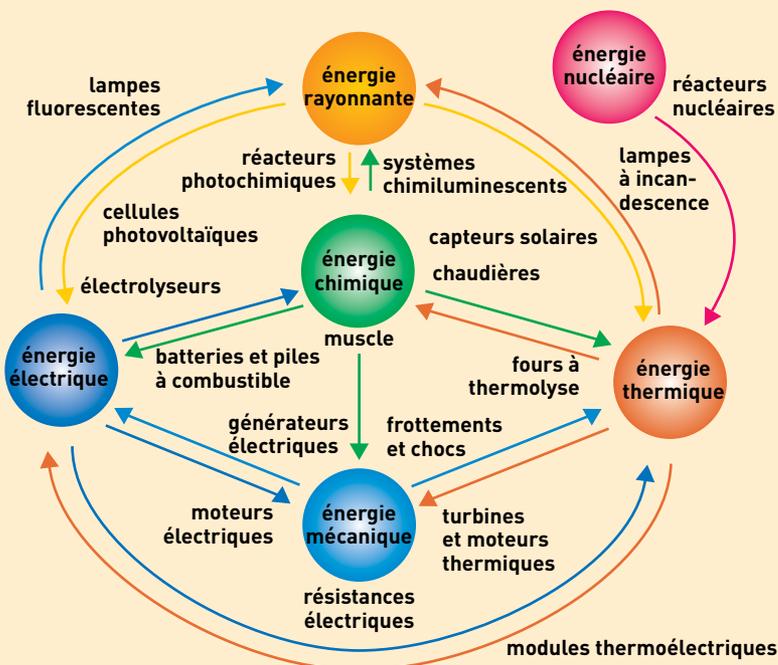
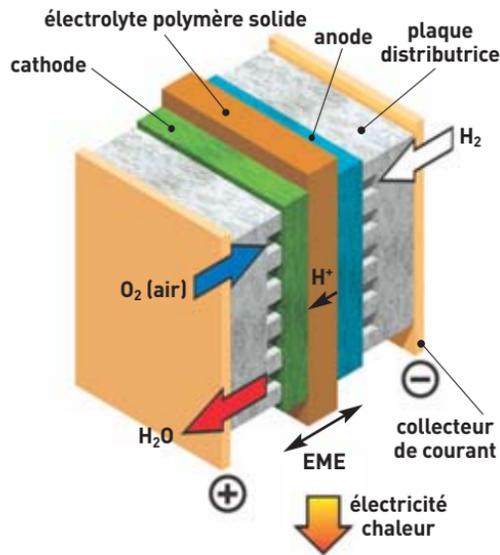


Figure 2. Conversions des six principales formes d'énergie et quelques exemples de convertisseurs d'énergie.

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/cm<sup>2</sup>. 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<sup>(1)</sup>, 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

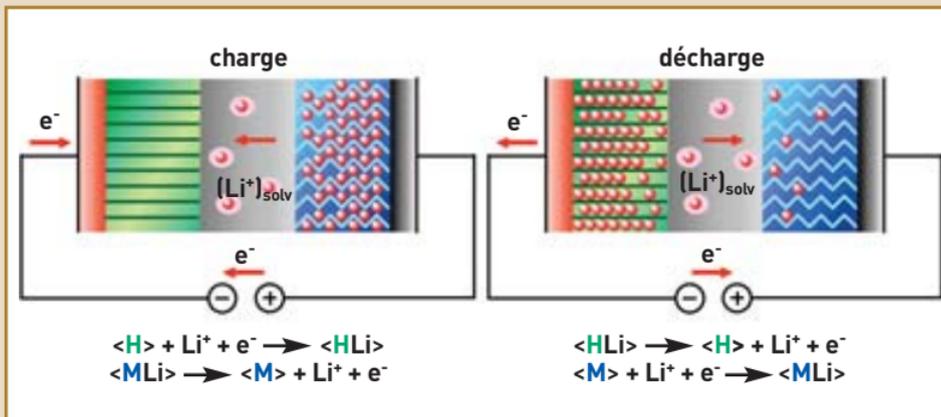
solution de potasse concentrée, a permis d'atteindre une densité d'énergie massique de 70 à 80 Wh/kg. La seconde filière avait déjà fait l'objet de travaux vers la fin des années soixante-dix, dans la perspective de trouver des couples électrochimiques présentant de meilleures performances que les accumulateurs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