

- 1 - L'atome
- 2 - La radioactivité
- 3 - L'homme et les rayonnements
- 4 - L'énergie
- 5 - L'énergie nucléaire : fusion et fission
- 6 - Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire
- 7 - Le cycle du combustible nucléaire
- 8 - La microélectronique

DE LA RECHERCHE
À L'INDUSTRIE

4 > L'énergie



QU'EST-CE QUE L'ÉNERGIE ?
LES DIVERSES FORMES D'ÉNERGIE
CARACTÉRISTIQUES
DES DIVERSES ÉNERGIES



L'énergie

QU'EST-CE QUE L'ÉNERGIE ? 4

L'énergie est plus ou moins élevée	5
L'énergie se transforme	5
L'énergie se conserve	6
L'énergie se mesure	6
La puissance	7

LES DIVERSES FORMES D'ÉNERGIE

Énergie cinétique	9
Énergie de gravitation	9
Énergie élastique	9
Travail	9
Énergie calorifique	10
Énergie électrique	10
Énergie radiative	10
Énergie chimique	10
Énergie nucléaire	11

CARACTÉRISTIQUES DES DIVERSES ÉNERGIES

Énergies diluées ou concentrées	13
La dégradation	15
Le stockage	16
Le transport de l'énergie	17
Les réserves	17
Les nuisances	18



© PhotoDisc

Le vent constitue l'une des multiples sources d'énergie.



© PhotoDisc - MHN

L'énergie se manifeste dans un mouvement, une réaction chimique, un rayonnement, un dégagement de chaleur, un système électrique ou la fission d'un atome.

“L'énergie est essentielle à l'homme. Elle représente un enjeu majeur dans les domaines politique, économique, scientifique et environnemental.”

introduction

De tout temps, l'homme a eu besoin de l'énergie pour se nourrir, se mouvoir. Celle-ci existe sous plusieurs formes. Aujourd'hui, la technologie permet d'en produire en grande quantité, en utilisant toutes les ressources possibles (fossiles, eau, vent, soleil...). À l'aube du XXI^e siècle, l'énergie reste un enjeu majeur,

tant au niveau politique, économique, scientifique qu'environnemental... Parmi les diverses propriétés des objets matériels, l'énergie est l'une des plus importantes, mais aussi l'une des plus abstraites car elle n'est pas directement tangible.

Cet ouvrage donne quelques notions sur la physique de l'énergie.

CONCEPT ABSTRAIT, L'ÉNERGIE VIENT DU MOT GREC "ENERGIA" QUI SIGNIFIE "FORCE EN ACTION".

Qu'est-ce que l'énergie ?



© PhotoDisc

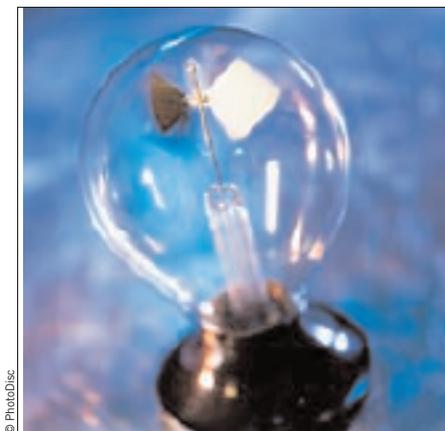
L'ÉNERGIE EST PLUS OU MOINS ÉLEVÉE

L'existence de l'énergie peut apparaître sous des masques divers et on peut ainsi sentir de quelle manière elle dépend de la situation. Une voiture possède une énergie d'autant plus élevée qu'elle roule plus vite; cette énergie est inférieure à celle d'un camion allant à la même vitesse. Un ressort, lorsqu'il est comprimé, a une énergie plus grande que lorsqu'il est détendu. L'énergie d'une pile électrique avant sa mise en service est plus grande que lorsqu'elle est déchargée. L'énergie d'une casserole d'eau augmente lorsqu'on la chauffe.

L'énergie se présente ainsi sous des formes très diverses. Pour chacune d'entre elles, les comparaisons effectuées montrent que l'énergie d'un système physique **dépend de l'état** dans lequel il se trouve. Dans les exemples ci-dessus, cet état est caractérisé par la vitesse et la masse du véhicule, la déformation du ressort, la charge. Nous allons le voir, les divers types d'énergie peuvent, au moins partiellement, prendre bien d'autres formes. Ces transformations de l'énergie sont utilisées dans la vie courante, mais chacune d'entre elles génère des pertes.

L'ÉNERGIE SE TRANSFORME

L'énergie peut **se transmettre** d'un système à un autre: sous forme de chaleur, elle passe d'un radiateur à l'air d'une pièce. Elle peut aussi se transformer en changeant de nature.



© PhotoDisc

Dans une ampoule, l'énergie électrique se convertit en énergie lumineuse et calorifique.

Dans un jouet mécanique, le ressort se détend en provoquant un mouvement. L'énergie associée au mouvement d'un vélo se transforme, lorsqu'on freine, en chaleur communiquée aux patins des freins et à la jante des roues. L'énergie emmagasinée dans une pile de lampe de poche se change, lorsqu'on ferme le circuit, en énergie électrique; celle-ci se convertit à son tour dans l'ampoule en énergie lumineuse et calorifique. Dans une centrale thermoélectrique, l'énergie stockée dans le carburant (énergie chimique dans le charbon et le pétrole, ou énergie nucléaire dans l'uranium) est transformée (par combustion ou par réaction nucléaire) en chaleur; puis une partie de cette chaleur

“L'énergie se conserve : rien ne se perd, rien ne se crée. C'est le premier principe de la thermodynamique.”

est récupérée dans les turbines sous forme mécanique; enfin, cette énergie mécanique est convertie en énergie électrique dans les alternateurs.

C'est à travers de telles transformations ou de tels transferts que l'énergie se manifeste à nous.

L'ÉNERGIE SE CONSERVE

La caractéristique la plus remarquable de l'énergie est qu'**elle se conserve toujours**. Lorsqu'elle est transférée d'un système à un autre, ou lorsqu'elle change de nature, il n'y a jamais ni création ni destruction d'énergie. Si un objet a perdu de l'énergie, la même quantité d'énergie a obligatoirement été gagnée par un autre objet en communication avec le premier. De même, **lorsque l'énergie change de forme, le bilan est toujours exactement équilibré**.

C'est donc par abus de langage que les journaux, les économistes ou les hommes politiques parlent de “production d'énergie”, ou de “pertes d'énergie”, puisque l'énergie ne peut être ni créée ni perdue. En réalité, dans une centrale thermoélectrique, on ne “produit” pas d'énergie, mais on **transforme** de l'énergie chimique ou nucléaire en énergie électrique et calorifique. **Le bilan global de cette conversion est caractérisé par un rendement**. Celui d'une centrale représente 33 %, ce qui signifie que pour envoyer sur le réseau 33 unités d'énergie électrique, il a fallu consommer 100 unités d'énergie nucléaire, tout en dégageant 67 unités de chaleur; cette chaleur, évacuée dans l'environnement,

par exemple par la vapeur d'eau sortant des tours de refroidissement, est donc, en général, perdue pour nous. Certaines centrales en récupèrent toutefois une partie pour chauffer des habitations ou des serres.

Nous verrons plus loin que, si l'énergie se conserve toujours, ses diverses formes ne sont pas équivalentes, car toutes les transformations concevables ne sont pas réalisables.

L'ÉNERGIE SE MESURE

C'est la propriété de conservation de l'énergie qui nous permet de mesurer, à l'aide d'une seule et même unité, les diverses formes de l'énergie. L'énergie, dite cinétique, associée



La “production” d'une centrale électrique – ici, la centrale EDF de Penly (Seine-Maritime) – consiste à transformer de l'énergie nucléaire.

“L'Américain consomme en moyenne environ deux fois plus d'électricité que le Français, lequel consomme quatorze fois plus d'électricité que l'Africain.”

au mouvement d'un objet de masse “m” et de vitesse “v” vaut $E = 1/2 mv^2$; lorsque la masse est exprimée en **kilogrammes** et la vitesse en **mètres par seconde**, cette formule donne l'énergie en **joules (J)**, unité légale dans le système international.

À l'époque où l'on n'avait pas encore reconnu que la chaleur était une forme de l'énergie, l'étude des échanges thermiques avait conduit à introduire une unité de chaleur, la **calorie**, définie comme la quantité de chaleur à fournir à 1 gramme d'eau pour élever sa température de 1 degré Celsius. L'expérience a montré que les transformations d'énergie mécanique en chaleur, ainsi que **les transformations inverses, se faisaient toujours avec le même rapport, à savoir 1 calorie pour 4,18 joules**. Il y a donc équivalence entre ces deux formes d'énergie (mécanique et chaleur). Ceci a permis d'abandonner la calorie et de mesurer la chaleur et toutes les autres formes d'énergie, en joules.

LA PUISSANCE

Les échanges d'énergie sont caractérisés, non seulement par la quantité d'énergie transférée ou transformée, mais aussi par la durée du processus. **La notion de puissance est ainsi définie comme une quantité d'énergie échangée par unité de temps. L'unité de puissance, le watt, est donc le joule par seconde**. Un radiateur électrique de 1500 W consomme durant chaque seconde une énergie électrique de 1500 J, et par suite, durant chaque heure (3600 secondes), une énergie électrique de

$3600 \times 1500 \text{ J} = 5400000 \text{ J}$, transformée en énergie calorifique.

Cet exemple montre que le joule est une unité d'énergie trop petite pour nos usages courants. On emploie souvent en pratique le kilowatt-heure (kWh), quantité d'énergie mise en jeu par un appareil d'une puissance de 1000 W pendant un délai d'une heure. Ainsi, 1 kWh vaut $3600 \times 1000 \text{ J} = 3600000 \text{ J}$. Le radiateur électrique considéré ci-dessus consomme, en une heure de fonctionnement, 1,5 kWh et rayonne évidemment pendant la même durée une énergie calorifique de 1,5 kWh.

La consommation annuelle moyenne d'électricité par habitant en France est de plus de 7000 kWh, le double aux États-Unis, soit 14000 kWh, et en Afrique un peu plus de 500 kWh. Les trois quarts de l'électricité produite en France sont d'origine nucléaire, le dernier quart se partageant entre hydroélectrique et thermique (charbon, pétrole). Mais cette électricité représente elle-même moins de la moitié de notre consommation totale. Le reste fait appel à une utilisation directe de pétrole (essence, fioul), de gaz et de charbon; le tiers de nos besoins concerne, en effet, le chauffage des locaux, et le quart concerne les transports.

L'ÉNERGIE SE MANIFESTE DANS UN MOUVEMENT, UNE RÉACTION CHIMIQUE, UN RAYONNEMENT, UN DÉGAGEMENT DE CHALEUR, UN SYSTÈME ÉLECTRIQUE OU LA FISSION D'UN ATOME.

Les diverses formes d'énergie



© PhotoDisc

ÉNERGIE CINÉTIQUE

C'est l'énergie associée au **mouvement** d'un objet. On a vu qu'elle était proportionnelle à la masse "m" et au carré de la vitesse "v" de l'objet (à condition que cette vitesse soit faible devant celle de la lumière, 300 000 km/s).

ÉNERGIE DE GRAVITATION

Deux corps massifs s'attirent. Cette force, dite de gravitation, est faible pour de petits objets, mais devient importante pour des astres. Ainsi le Soleil et la Terre, la Terre et la Lune, s'attirent; la pesanteur n'est autre que la force de gravitation exercée par la Terre sur les objets dans son voisinage. À cette force correspond une énergie de gravitation, plus élevée lorsque les corps sont éloignés l'un de l'autre que lors-

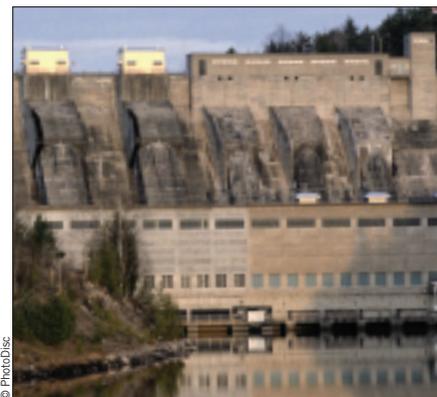
qu'ils sont proches. L'énergie de gravitation est dite **potentielle**, parce qu'elle ne se manifeste à nous que lorsqu'elle se convertit en une autre forme d'énergie. L'énergie potentielle d'une cabine d'ascenseur est plus grande au sixième étage qu'au rez-de-chaussée, car elle est alors plus éloignée du centre de la Terre qui l'attire. Si l'on coupait le câble en neutralisant les freins de sécurité, la cabine tomberait en s'accélégrant, son énergie potentielle se transformerait alors en énergie cinétique, plus visible. De même, l'énergie d'une masse de 1 kg d'eau à la surface d'un lac de barrage est plus élevée que son énergie lorsqu'elle est au pied du barrage. En effet, pour une différence d'altitude de 100 m, la différence d'énergie potentielle est de 981 J. C'est cette énergie qui est exploitée dans une centrale hydroélectrique, où la chute de l'eau actionne des turbines qui entraînent des alternateurs.

ÉNERGIE ÉLASTIQUE

Il s'agit encore d'une énergie potentielle, associée cette fois aux déformations des objets élastiques, par exemple à la tension d'un ressort ou à la compression d'un gaz.

TRAVAIL

Ce terme désigne un transfert d'énergie réalisé en exerçant une force dont le point d'action se déplace. En soulevant un poids, par exemple en remontant de l'eau depuis la base jusqu'au sommet d'un barrage, on lui fournit un travail, qui lui permet d'acquérir une énergie potentielle



© PhotoDisc

Les barrages ont l'avantage d'être utilisés à la fois comme sources et réservoirs d'énergie.

“L'énergie peut changer de forme. Par exemple, la combustion du pétrole se convertit en chaleur.”

plus élevée; le travail fourni à une pompe qui comprime un gaz accroît l'énergie élastique de celui-ci et contribue à l'échauffer.

Les formes d'énergie énumérées jusqu'ici sont des **énergies mécaniques**.

ÉNERGIE CALORIFIQUE

À l'échelle atomique, la chaleur se traduit par un mouvement désordonné et plus ou moins rapide des molécules. À notre échelle, elle constitue la forme d'énergie mise en jeu lorsque la température varie ou lorsqu'un matériau change d'état (fusion de la glace, évaporation de l'eau). Elle peut se transférer de proche en proche sans se transformer en une autre forme d'énergie (conduction calorifique). Elle peut aussi se convertir en énergie mécanique, dans une turbine, une machine à vapeur, ou un réacteur d'avion, mais nous verrons que cette conversion ne peut être que partielle.

ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Les particules chargées exercent les unes sur les autres des forces électriques. De même qu'une énergie potentielle de gravitation était associée aux forces de gravitation ou de pesanteur, une énergie potentielle électrique est associée aux forces électriques entre charges. Le déplacement de celles-ci dans un circuit s'accompagne de transferts plus ou moins rapides d'énergie, mesurés par la puissance électrique. Une énergie électrique peut se transformer en chaleur dans une résistance (radiateur, réchaud), en travail dans un moteur.

ÉNERGIE RADIATIVE

Un rayonnement transporte de l'énergie, même à travers le vide. Le Soleil nous transmet une puissance de l'ordre de 1 kW par mètre carré, sous forme de lumière visible et de rayonnement infrarouge. Un radiateur nous communique sa chaleur par l'intermédiaire de l'air ambiant, mais aussi directement sous forme de rayonnement infrarouge. Dans le filament d'une ampoule électrique, l'énergie électrique se transforme en chaleur, puis cette chaleur est évacuée principalement sous forme d'énergie radiative, lumineuse et infrarouge. Un four à micro-ondes communique de la chaleur aux aliments à partir d'une énergie électrique, par l'intermédiaire d'un rayonnement dit de micro-ondes, analogue à celui d'un radar. Inversement, on peut convertir en énergie électrique une partie de l'énergie lumineuse en provenance du Soleil à l'aide de photopiles solaires. Les ondes radio transportent aussi une énergie, certes faible, mais suffisante pour véhiculer du son, des images ou de l'information.

ÉNERGIE CHIMIQUE

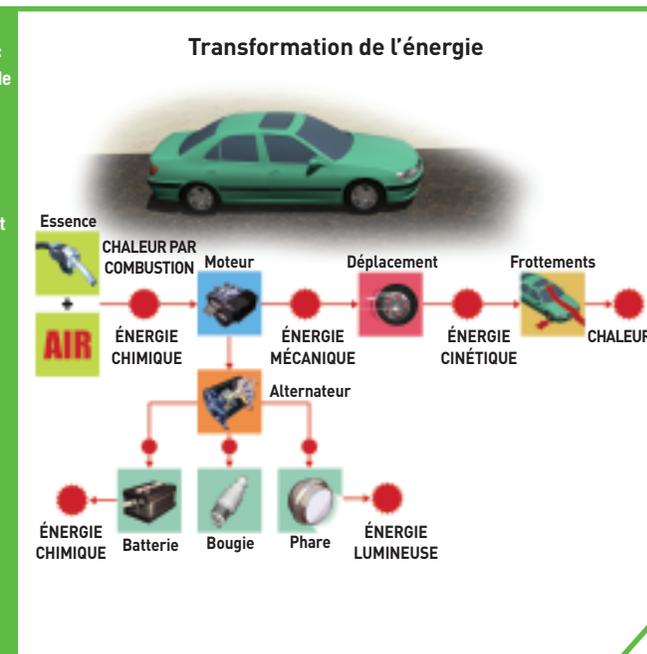
L'énergie chimique est associée à la liaison des atomes dans les molécules. Elle est plus élevée lorsque ces atomes sont séparés que lorsqu'ils sont liés en molécules, et cet écart est d'autant plus grand que la liaison est plus forte. Puisqu'elle modifie l'énergie chimique des corps, une réaction chimique s'accompagne d'une transformation de cette énergie en une autre forme d'énergie, le plus souvent en chaleur. Un réchaud à gaz produit ainsi une certaine quan-

En exemple, les transformations d'énergie produites dans une voiture :

1 L'énergie chimique de l'essence et de l'air est transformée en chaleur par combustion. Celle-ci est transmise, par la production de gaz chauds, aux cylindres, puis aux pistons. À ce stade, elle se transforme en énergie mécanique et déclenche le mouvement de la voiture, qui acquiert une certaine énergie cinétique.

2 Les frottements de l'air sur la carrosserie, et des roues sur le sol, transforment intégralement cette énergie en chaleur (en terrain plat et à vitesse constante).

3 Une partie de l'énergie issue du moteur est convertie en énergie électrique, alimentant un alternateur. Le courant ainsi engendré sert à produire les étincelles dans les bougies pour enflammer le combustible, et à recharger la batterie, dont l'énergie chimique augmente. Il sert aussi à allumer les phares pour émettre de l'énergie lumineuse; on consomme donc, à vitesse donnée, un peu plus d'essence de nuit que de jour.



tité d'énergie calorifique, égale à la différence entre l'énergie chimique du gaz et de l'oxygène consommés et celle des produits de combustion (vapeur d'eau et dioxyde de carbone). Dans une centrale thermique au charbon ou au fioul, une fraction de la chaleur de combustion est transformée en énergie électrique. Dans un accumulateur ou une pile électrique, une partie de l'énergie chimique libérée par la réaction est directement récupérée sous forme électrique. Bien que d'apparence dissemblable, les énergies calorifique, électrique, radiative et chimique ont une origine commune : à l'échelle microscopique, toutes sont reliées aux forces électriques entre des particules chargées.

ÉNERGIE NUCLÉAIRE

L'énergie nucléaire est localisée dans les noyaux des atomes. Ces noyaux, 100 000 fois plus petits

que les atomes eux-mêmes, sont constitués de particules plus élémentaires – les protons et les neutrons – très fortement liés entre eux. De même que la liaison des atomes en molécules est la source de l'énergie chimique, la liaison des protons et neutrons en noyaux par des forces nucléaires est la source de l'énergie nucléaire. Une réaction nucléaire, en transformant les édifices des noyaux atomiques, s'accompagne ainsi d'un dégagement de chaleur. C'est ce mécanisme qui produit au cœur du Soleil, par fusion des noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium, la chaleur qui sera ensuite rayonnée. Dans nos centrales électronucléaires, nous utilisons une autre réaction nucléaire, la fission des noyaux d'uranium, qui les transforme chacun en deux autres noyaux environ deux fois plus petits; une partie de la chaleur produite (33 % comme nous l'avons déjà noté page 6) est convertie en électricité.

PUISSANCE, "PERTE" EN CHALEUR, CAPACITÉ DE RENOUVELLEMENT... CES CARACTÉRISTIQUES DÉTERMINENT L'USAGE QUE NOUS FAISONS DES DIFFÉRENTES ÉNERGIES.

Caractéristiques des diverses énergies



La catégorie intermédiaire des énergies diluées ou concentrées regroupe les énergies calorifique, électrique, radiative et chimique.
Exemple : la combustion de pétrole ou de gaz.



Bien que l'énergie soit une seule et même grandeur physique, ses diverses formes présentent des caractéristiques très différentes. Dans la pratique, le choix de tel ou tel type d'énergie dépendra donc du but poursuivi. Pour un objectif donné, par exemple produire de l'énergie électrique, il est essentiel, selon les circonstances, de peser le pour et le contre de chaque solution envisageable, et les critères de choix sont multiples.

ÉNERGIES DILUÉES OU CONCENTRÉES

De même qu'un billet de 50 euros permet d'acheter la même quantité de marchandises que 50 pièces de 1 euro, certaines formes d'énergie sont concentrées sous un volume beaucoup plus faible que d'autres. On peut de ce point de vue distinguer trois catégories, qui correspondent aux trois types de forces identifiées précédemment.

L'énergie de gravitation

L'énergie de gravitation n'est appréciable que si des masses considérables sont en jeu. On a vu que 1 kg d'eau tombant de 100 m ne fournit que 981 J (voir page 9) et que 1 kWh vaut 3 600 000 J (voir page 7). Pour libérer seulement 1 kWh, il faut faire chuter (3 600 000 J/981 J/kg) soit 3,67 t d'eau de 100 m. Les centrales hydroélectriques sont donc peu efficaces de ce point de vue. Les énergies **mécaniques** apparaissant dans notre vie courante ont aussi des ordres de grandeur très

faibles. L'énergie cinétique d'une voiture pesant 1 tonne roulant à 100 km/h n'est que de 0,1 kWh.

Énergies calorifique, électrique, radiative et chimique

Dans la catégorie intermédiaire figurent les énergies calorifique, électrique, radiative et chimique, qui, pour les usages courants, se mesurent en nombres de l'ordre du kWh par kg de matière. Il faut fournir 0,1 kWh pour faire fondre 1 kg de glace, 0,7 kWh pour vaporiser 1 kg d'eau à 100 °C. Les appareils électroménagers consomment une puissance électrique comprise entre 0,1 et 5 kW. La combustion de 1 kg de pétrole ou de gaz fournit environ 12 kWh. Un homme élabore de l'énergie biochimique, provenant des aliments digérés et de l'air respiré. Il l'utilise pour maintenir sa température à 37 °C et exercer ses

activités; la puissance correspondante est de 100 W au repos, de 500 W en pleine activité physique.

On peut prendre conscience de l'écart qui sépare ces deux premières catégories d'énergie en notant que, si l'énergie mécanique d'un œuf tombant du sommet de la tour Eiffel était entièrement transformée en chaleur et utilisée pour échauffer l'œuf, sa température n'augmenterait que de 0,7 °C.

L'énergie nucléaire

L'énergie nucléaire est de loin une forme d'énergie beaucoup plus concentrée, puisque 1 kg d'uranium naturel fournit une quantité de chaleur de 100 000 kWh dans une centrale électrique courante, alors que 1 kg de charbon fournit en brûlant 8 kWh.

La plupart des centrales nucléaires françaises utilisent des réacteurs à eau sous pression (REP).

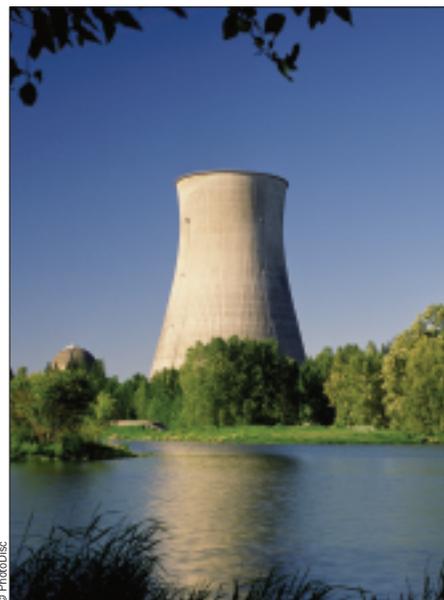
C'est pourquoi on ne manipule que d'assez faibles masses de combustible nucléaire pour la production d'électricité: une centrale électronucléaire d'une puissance de 1000 MW électriques (10⁹ W) consomme 27 tonnes d'uranium enrichi par an, le quart de son chargement, alors qu'une centrale thermique de même puissance consomme 1 500 000 tonnes de pétrole par an. En fait, on ne sait extraire industriellement qu'une assez faible part de l'énergie nucléaire emmagasinée dans la matière. Dans le Soleil, 1 kg d'hydrogène produit, par réactions nucléaires le transformant en hélium, 180 millions de kWh.

Assemblage combustible.



© Framatome

L'énergie nucléaire est l'une des formes d'énergie les plus concentrées.



© PhotoDisc

“La nature ne nous permet de convertir qu'une fraction de chaleur en une autre forme d'énergie.”

LE CALCUL DE L'ÉNERGIE TOTALE

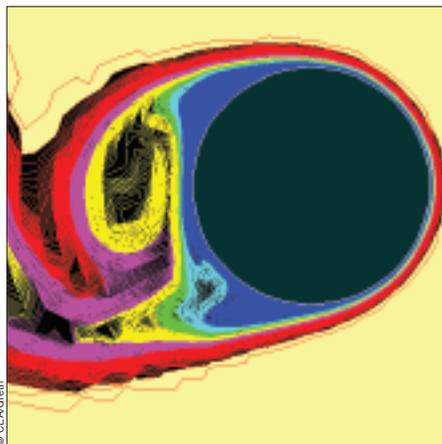
Dans le Soleil, 1 kg d'hydrogène produit 180 millions de kWh. Pour des énergies aussi considérables, on vérifie la célèbre relation d'Einstein $E = mc^2$, qui exprime que l'énergie totale d'un corps est proportionnelle à sa masse, nouvelle propriété d'équivalence; mais le coefficient est énorme, puisque la vitesse c de la lumière vaut 300 000 km/s. De la sorte, une masse de seulement 1 mg équivaut à 25 000 kWh; dans une centrale nucléaire, la transformation de 1 kg d'uranium naturel en d'autres éléments diminue l'énergie nucléaire du combustible de 100 000 kWh, et donc sa masse de 4 mg.

LA DÉGRADATION

L'expérience montre qu'un système physique livré à lui-même tend à devenir spontanément de plus en plus désordonné. Parmi les diverses formes de l'énergie, la chaleur correspond à des mouvements désordonnés des molécules. Au contraire, les autres formes d'énergie, que l'on peut qualifier de “nobles”, sont ordonnées à l'échelle microscopique. Elles ont donc tendance à se changer en chaleur. Ce phénomène est appelé la dissipation, et l'on dit que la chaleur est une forme dégradée de l'énergie. Il est facile de produire de la chaleur à partir d'une quantité équivalente d'énergie noble, par exemple dans des fours et chaudières, électriques ou à combustion, ou des capteurs solaires pour chauffe-eau. Mais les transformations inverses sont impossibles. Si l'on dispose d'une certaine quantité de chaleur, on ne peut pas la convertir intégralement en énergie mécanique,

électrique ou chimique à l'aide d'un appareil qui fonctionnerait en cycle fermé, en revenant périodiquement à son état initial. Cette “interdiction” constitue l'une des grandes lois de la physique, confirmée par d'innombrables expériences: la nature ne nous autorise à convertir en une autre forme d'énergie qu'une fraction de la chaleur disponible, et elle impose à cette fraction de ne pas dépasser une certaine valeur maximale. C'est ce qui limite le rendement des turbines à vapeur dans les centrales électriques, des moteurs de voiture et d'avion, et de tous les engins délivrant de l'énergie mécanique à partir de l'énergie calorifique d'un gaz chaud. La chaleur apparaît souvent comme une “perte” lorsqu'on manie les autres formes d'énergie (sauf, bien entendu, si l'on a en vue le chauffage domestique ou industriel). Afin d'exploiter l'énergie nucléaire ou l'énergie chimique dans une centrale électrique ou une automobile, on commence par produire de la chaleur par réaction nucléaire ou chimique; seule une partie de cette chaleur peut ensuite être reconvertie en énergie électrique ou mécanique. La situation la plus favorable est celle de la conversion directe d'énergie mécanique en énergie électrique, et vice versa. Mais même dans ce cas, il est difficile en pratique d'éviter de détourner une part de ces énergies nobles vers de la chaleur. Si l'arbre d'un moteur entraîne celui d'un alternateur, le premier transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique, et c'est l'alternateur qui reconvertit celle-ci en énergie électrique. Mais on récupère au total moins d'énergie électrique

Étude des échanges thermiques par simulation.



© CEA/Greth

La batterie : un mode de stockage d'énergie électrique sous forme d'énergie chimique.



YUVANDE

qu'on n'en a fourni ; la différence consiste en un **dégagement de chaleur** par effet joule, dans les bobinages ou par frottement, dans les paliers, impossible à éliminer totalement. Cette équivalence entre les énergies est comparable à celle qui existe entre des monnaies convertibles, 1 dollar valant par exemple 0,98 euro. La dissipation en chaleur joue alors le rôle des frais bancaires qui nous empêchent de recouvrer le montant initial si nous changeons des euros en dollars, puis ceux-ci à nouveau en euros. La valeur comme l'énergie sont bien conservées au total, mais pas pour nous.

LE STOCKAGE

L'énergie ne se prête au stockage en quantité appréciable que sous certaines de ses formes. Sa mise en réserve et sa récupération impliquent donc des transformations, et par suite de la dissipation. **L'énergie électrique peut être emmagasinée dans des accumulateurs, sous forme d'énergie chimique.** Mais la décharge d'un accumulateur fournit moins d'énergie électrique que sa charge, car les réactions électrochimiques s'accompagnent d'une assez forte dégradation en chaleur. De plus, les accumulateurs sont coûteux et lourds, puisqu'ils n'emmagasinent que 0,1 kWh par kg, ce qui est, avec le prix, la principale entrave au développement de la voiture électrique. Nos besoins en puissance électrique varient avec l'heure, en croissant par exemple rapidement le soir ; et les centrales nucléaires ont du mal à suivre ces changements. Étant donné la fai-

L'électricité se transforme en quasi-totalité en n'importe quel type d'énergie et se transporte à un coût relativement faible.



© Photodisc

blesse des pertes de chaleur dans les échanges électromécaniques, on a imaginé d'utiliser les barrages non seulement comme sources d'énergie hydroélectrique, mais aussi comme réservoirs d'énergie. En heures creuses, l'eau est pompée du bas du barrage vers la retenue par emploi d'énergie électronucléaire, et en heures de pointe, cette eau redescend, actionne les turbines de l'usine et l'on récupère de l'électricité. Puisque cette forme de stockage passe par de l'énergie mécanique, elle nécessite de brasser de fortes masses d'eau, plusieurs tonnes par kWh emmagasiné.

Les carburants, chimiques ou nucléaires, emmagasinent efficacement de l'énergie. Mais nous ne savons, en pareil cas, récupérer celle-ci que sous forme de chaleur.

LE TRANSPORT DE L'ÉNERGIE

La relative facilité de stockage et aussi de transport sur de grandes distances du charbon, du pétrole et du gaz a été l'un des facteurs primordiaux du développement de l'industrie depuis deux siècles. L'essor de l'automobile repose aussi sur la possibilité d'emporter avec soi assez de carburant pour parcourir plusieurs centaines de kilomètres. **Mais l'électricité** est la seule forme d'énergie susceptible d'être à la fois transformée en quasi-totalité en n'importe laquelle des autres, et transportée au loin en grande quantité à un coût relativement faible. Les pertes de chaleur dans les lignes à haute tension et les transformateurs atteignent cependant 8 %.

LES RÉSERVES

On distingue les énergies **fossiles** des énergies **renouvelables**. Les premières reposent sur l'exploitation de minéraux et combustibles formés durant l'histoire de la Terre et n'existant qu'en quantités limitées. En tenant compte de l'évolution des consommations, et de l'espoir de découvrir de nouveaux gisements, on peut estimer les réserves mondiales à quelques dizaines d'années pour le pétrole, à une centaine d'années pour le gaz ou l'uranium, à quelques siècles pour le charbon. Le développement de techniques comme celles des surgénérateurs suffirait cependant à multiplier nos réserves en énergie nucléaire par un facteur supérieur à 100.

Les éoliennes figurent parmi les énergies renouvelables mais la puissance produite reste limitée.



© PhotoDisc

Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont celles qui nous parviennent directement ou indirectement du Soleil, qui nous envoie en permanence son rayonnement. Il s'agit des énergies solaire, hydraulique, éolienne (celle du vent), mais aussi de l'énergie chimique qui s'accumule dans les végétaux utilisables comme combustibles (bois, déchets, alcool). La puissance totale que l'on peut tirer de ces énergies renouvelables est cependant limitée; par exemple, il ne faudrait pas brûler les forêts à un rythme plus rapide que celui de leur croissance. Bien qu'elles constituent un appoint essentiel, les énergies

renouvelables ne sauraient se substituer qu'en faible proportion aux énergies fossiles.

LES NUISANCES

La manipulation de toutes les formes d'énergie produit sur notre environnement des effets plus ou moins néfastes, qu'il importe de savoir apprécier cas par cas. Certains résidus de combustion du charbon, du pétrole, de l'essence, ou même du gaz s'il brûle mal, sont nocifs pour l'homme. Le principal gaz dégagé, le dioxyde de carbone, s'accumule dans l'atmosphère, ce qui risque d'influer sur notre climat, en accroissant l'effet de serre.

Les réactions nucléaires génèrent des déchets radioactifs, qu'il est essentiel de traiter ou de réduire surtout lorsqu'ils ont une longue durée de vie. Les centrales hydroélectriques noient des vallées. Les éoliennes sont bruyantes, et n'assurent pas une production continue; de plus, elles occupent beaucoup d'espace pour d'assez faibles puissances. Les photopiles solaires ont le même défaut et sont très chères, de sorte que la transformation d'énergie solaire en électricité n'est adaptée qu'à l'alimentation d'habitations isolées ou au fonctionnement de petits appareils portables comme des calculettes; de plus, la fabrication des photopiles est très coûteuse en énergie.

La pollution thermique

La dégradation de l'énergie entraîne une conséquence commune à toutes les énergies non renouvelables, la pollution thermique. La majeure partie des énergies fossiles que nous utilisons se change en définitive en chaleur. Nous avons vu, par exemple, que le bilan global du fonctionnement d'une voiture consiste en une transformation de l'énergie chimique de l'essence en chaleur cédée à l'environnement. Même si la pollution thermique est trop faible pour influencer le climat, elle peut avoir des effets locaux: une centrale thermique ou nucléaire refroidie par l'eau d'une rivière augmente de façon appréciable la température de cette eau en aval et peut ainsi modifier son équilibre écologique. D'importantes économies pourraient être réalisées en

“Les énergies renouvelables sont celles qui nous parviennent directement ou indirectement, du Soleil, du vent...”

recupérant cette chaleur perdue. La moitié de l'énergie que nous utilisons est en effet destinée au chauffage domestique ou industriel, réalisé à l'aide de charbon, de gaz, de fioul ou d'électricité. Ce type de consommations pourrait être réduit par un meilleur emploi de la chaleur issue des centrales. En fait, la consommation moyenne d'énergie par habitant reflète non seulement un niveau de vie, mais aussi un niveau de gaspillage. Cet exemple illustre un point essentiel: la multiplicité des sources d'énergie répond à la diversité des usages, et une approche globale des problèmes énergétiques est indispensable.