

# sciences & avenir


Victoire sur la méningite au Brésil  
Dossier: le stockage de l'énergie  
Médicaments: "l'heure c'est l'heure"

**Mystère au cœur du Soleil**



# le stockage de l'énergie

Marie-Françoise Coulombier  
Université de Stanford, Californie



**C'est une des clefs de l'avenir et l'un des grands axes actuels de la recherche technologique.**  
**Le développement économique actuel est presque entièrement basé sur une prodigieuse opération de stockage, poursuivie depuis des centaines de millions d'années dans les profondeurs de l'écorce terrestre.**  
**Si l'on veut que ce développement se poursuive, il faut que l'homme prenne le relais, et vite.**  
**Les possibilités ne manquent pas. Certaines sont aussi simples qu'inattendues : on peut stocker de l'énergie en chauffant des pierres ou en construisant des piscines. On peut aussi extraire l'hydrogène des océans, on peut encore faire tourner des roues à des millions de tours/minute. Et même, faire pousser des plantes ou élever des algues...**  
**Tout cela commence à peine. Ce que l'on sait déjà, c'est qu'il n'y aura pas de procédé miracle.**

## I. Le stockage thermique

## II. Le stockage physico-chimique

## III. Le stockage mécanique

## IV. Le stockage biologique

*Une solution classique au problème du stockage de l'énergie : la retenue par un barrage (ici celui de Hoover aux Etats-Unis) d'une masse d'eau alimentant une usine hydro-électrique*





Le stockage de l'énergie est aujourd'hui un des verrous du progrès. Ce verrou doit sauter dans la décennie à venir si l'on veut que l'humanité aborde le prochain millénaire avec quelque chance de succès. Recherches et projets abondent, mais qu'en est-il des réalisations et des résultats ? Que peut-on espérer concrètement ?

Jusqu'à une époque fort récente, les hommes ont vécu en puisant l'énergie dont ils avaient besoin dans les réserves accumulées naturellement à travers les âges par les processus biochimiques. On ignorait donc tout problème. Mais les mécanismes naturels de concentration et d'accumulation se révèlent désormais insuffisants face à la boulimie du monde moderne.

L'énergie disponible sur Terre provient essentiellement du Soleil (seules les énergies nucléaire, géothermique ou marémotrice ont une autre origine). Mais le rayonnement solaire, on le sait, a le double inconvénient d'être diffus et intermittent. Aussi l'humanité n'aurait-elle guère progressé si elle n'avait trouvé d'autres sources d'énergie que l'utilisation directe de ce rayonnement. Heureusement les organismes vivants sont de merveilleux capteurs puisqu'ils utilisent cette énergie diffuse pour élaborer une substance à grand pouvoir énergétique. Le bois, en brûlant, restitue l'énergie solaire que l'arbre a accumulée tout au long de sa vie.

L'industrialisation entraîne une

*Feu de forêt : le bois, en brûlant, restitue l'énergie solaire que l'arbre a accumulée tout au long de sa vie.*

consommation d'énergie qui dépasse de très loin les possibilités de la production forestière. Mais l'humanité a pu alors accéder à des réserves accumulées au fil des millions d'années. Des coffres-forts géologiques ont stocké l'énergie solaire rayonnée depuis l'Ere primaire. Cette énergie était là, précieusement conservée sous forme de charbon ou d'hydrocarbures. Ce concentré d'énergie solaire qu'est le pétrole est disponible à toute heure, en tout lieu, dans les quantités désignées et peut fournir la forme d'énergie désirée : calories, kilowatts, chevaux vapeur... Et voilà

qu'il faut trouver encore autre chose. Pour relayer le pétrole et le charbon, on pense avant tout au nucléaire et au solaire. Or ces deux techniques posent immédiatement le problème du stockage. La consommation d'électricité varie énormément durant la journée. La centrale nucléaire fonctionne donc par à-coups. C'est dire que, faute de savoir stocker une surproduction momentanée, on doit construire un parc de centrales correspondant à la consommation de pointe et non à la consommation moyenne. Il y a donc surinvestissement. Qui plus est, l'énergie nucléaire ne fournit pas de carburant. Or un carburant n'est pas autre chose que de l'énergie stockée. La centrale peut fournir en permanence du courant à la locomotive électrique suivant un câble d'alimentation. Elle ne produit pas cette réserve d'énergie qui peut permettre aux véhicules autonomes de fonctionner.

Pour l'énergie solaire, c'est encore bien pis. Quand le soleil brille, il existe une surabondance énorme, mais la nuit, en hiver, l'approvisionnement cesse. Le problème est de pouvoir utiliser cette énergie lorsque le soleil fait défaut. On bute donc, à nouveau, sur un problème de stockage.

Comment stocker de l'énergie ? La question fait penser irrésistiblement aux accumulateurs, système lourd, encombrant et somme toute assez primitif. De fait, on a pu longtemps se contenter de ce système. Ce n'est plus possible aujourd'hui.

Il faut concevoir des mécanismes entièrement nouveaux, couvrant une gamme de besoins extrêmement variés. Car il s'agit tout autant de stocker des quantités énormes dans des installations industrielles que de stocker des quantités modestes pour des utilisations locales. Bref, le dossier apparaît bien essentiel pour l'avenir.

Mais qui dit stockage dit transformation. Les photons du soleil et les électrons du courant électrique ne peuvent se mettre en conserve. Il faut récupérer leur énergie sous une forme qui, elle, soit stockable. A son tour, la forme stockable n'est toujours pas la forme utilisable. On pourra donc être amené à effectuer deux ou trois conversions pour les besoins du stockage. A chaque étape, il faudra payer son impôt à la thermodynamique. Problème : trouver le système à la fois le plus commode et le moins pénalisant sur le plan du rendement.

On peut stocker de l'énergie sous quatre formes différentes : thermique,

mécanique, chimique ou biologique, et l'on choisira l'une ou l'autre en fonction du type d'énergie recueillie et de son utilisation.

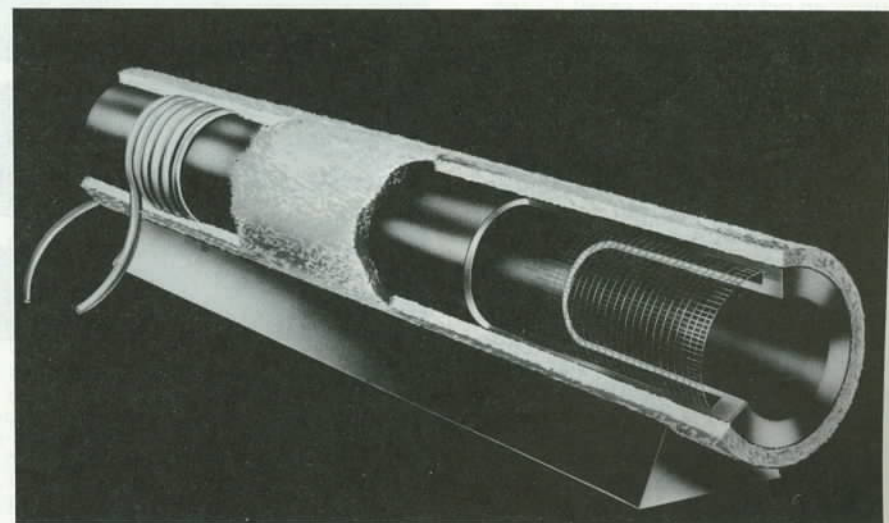
## I. LE STOCKAGE THERMIQUE

La lumière solaire est source de chaleur. Elle pourrait donc assurer le chauffage des habitations si les calories recueillies pendant le jour pouvaient s'accumuler pour être restituées la nuit. La solution la plus simple consisterait à chauffer de l'eau, ou des pierres... système évidemment archaïque et qui trouve vite ses limites. Toutefois, on entrevoit aujourd'hui des méthodes modernes pour en augmenter l'efficacité.

### 1 — Le choix du matériau.

Ce qui intéresse ici c'est la capacité thermique ou chaleur spécifique du matériau : le nombre de calories qu'il peut absorber quand on le chauffe. De ce point de vue, l'eau est le matériau le plus intéressant : un litre d'eau chauffé de 10° à 30° absorbe vingt kilocalories. Viennent ensuite le cuivre, l'aluminium et les cailloux.

*Les conduits de chaleur sont employés depuis plusieurs années dans les engins spatiaux. Ils permettent de transporter l'énergie thermique de manière continue par l'intermédiaire d'un fluide qui s'évapore d'une partie chaude pour se condenser sur une partie plus froide. Le liquide condensé est ramené à la partie froide par capillarité dans une mèche. Une différence de température minime (0,1 °C) entre parties chaude et froide suffit à transporter de grandes quantités de chaleur le long d'un tube.*



Il faut aussi considérer la conductivité thermique. Si cette conductivité est basse, le matériau conservera bien les calories mais les restituera mal. Pour un stockage de courte durée, on prendra donc un matériau à faible conductivité ; on fera le choix inverse pour un stockage prolongé.

Quelque matériau que l'on choisisse, il en faut toujours une grande quantité pour accumuler une quantité appréciable de chaleur. Pour le stockage thermique d'une petite habitation, par exemple, le volume du réservoir doit être d'environ 10 m<sup>3</sup>. C'est dire qu'on ne peut accepter que des coûts extrêmement bas.

### 2. Une solution classique : l'eau.

L'eau est chauffée entre 40 et 80 °C au niveau du capteur solaire, puis envoyée dans un réservoir en attendant d'être utilisée ; une petite pompe est nécessaire pour la faire circuler. Si le réservoir est trop grand, des courants de convection se créent entre les couches de températures différentes, ce qui a pour effet de dissiper la chaleur plus rapidement. La division du réservoir en compartiments assez petits permet de maintenir une température quasiment constante. Les pertes de chaleur les plus importantes se faisant par les parois, le réservoir doit être très bien isolé ; mais quelle que soit la qualité de l'isolant, il y aura toujours une certaine dissipation d'énergie. Mieux vaut donc tirer parti de ces pertes en plaçant le réservoir à l'intérieur

ou sous le sol de l'habitation. La chaleur perdue réchauffera le local et le réservoir d'eau ne risquera pas de geler en hiver.

Un stockage d'eau chaude à très long terme a été proposé en 1969 par l'ingénieur suisse E. Schoenholzer. Il semble très intéressant en théorie mais n'a jamais été réalisé en prati-

piscine d'eau chaude sert à la fois à capter l'énergie solaire et à la stocker. Malheureusement, les pertes sont plus importantes que dans un véritable réservoir car l'isolation thermique d'une piscine est pratiquement impossible. Toutefois, le volume d'eau peut être beaucoup plus important : la piscine d'eau chaude est donc bien

adaptée pour un stockage à moyen et long terme.

Il s'agit d'une piscine classique dont le fond est noir afin de mieux absorber la chaleur. Plusieurs jours d'ensoleillement sont nécessaires pour amener l'eau à la température d'utilisation. Si la piscine est petite, les échanges de chaleur avec les parois seront trop importants et l'eau ne restera pas chaude longtemps. Par contre, dans le cas de grands bassins suffisamment profonds, les pertes de chaleur sont relativement moins importantes ; la chaleur dissipée reste alors stockée dans le sol si celui-ci n'est pas humide — la terre sèche est un bon isolant thermique. Cette chaleur sera par la suite restituée à l'eau en l'absence de soleil. A cause de l'évaporation superficielle, l'eau d'une « piscine solaire » ne peut pas atteindre des températures très élevées. Pour réduire cette évaporation, on peut étendre une mince couche d'huile à la surface ou recouvrir la piscine d'un plastique transparent ; la température de l'eau pourra être alors un peu plus élevée.

Un vaste plan de stockage d'eau chaude serait en projet dans la région parisienne. Il s'agirait de remplir un bassin artificiel, de la taille d'un lac, avec de l'eau chaude provenant d'une centrale thermique. Cette eau serait contenue dans une immense poche



que. Le principe en est simple : plusieurs millions de litres d'eau sont chauffés par le soleil pendant l'été et atteignent ainsi une température de 90°. Stockés ensuite dans de vastes réservoirs enterrés dans le sol et parfaitement isolés, ils sont utilisés au cours de l'hiver. Le cycle total de stockage est de 4 380 heures. La période de charge commence en avril. L'eau, prise à 30°, est chauffée jusqu'en octobre par le soleil. La température atteint alors 90 °C. A partir d'octobre commence la décharge, jusqu'en avril suivant où l'eau retrouve sa température initiale de 30 °C. E. Schoenholzer a calculé qu'un réservoir cylindrique de 6,4 m de haut et 6,4 m de diamètre fonctionnant selon ce principe pourrait, en tenant compte des pertes de chaleur, subvenir aux besoins d'un appartement d'une capacité thermique de 10 milliards de kilocalories. La réserve d'eau chaude nécessaire à 100 appartements pourrait être assurée par un cylindre de 30 m de haut et 30 m de diamètre.

Autre solution : la piscine solaire. Particulièrement attrayante en raison de sa double utilisation éventuelle... La



*Félix Trombe, directeur du centre de recherches solaires d'Odeillo, et l'architecte Jacques Michel ont mis au point une maison solaire dont on voit ci-dessus une vue de la façade et de l'arrière ainsi qu'un chalet (page de droite). Un mur de béton peint en noir, placé derrière une baie vitrée, stocke la chaleur du soleil.*



de plastique et maintenue par des filets de 2 ou 3 m sous la surface. La couche d'eau superficielle isolerait la poche d'eau chaude de l'air ambiant plus froid.

On doit à l'Israélien Tabor la première expérimentation réussie des « piscines à gradient de salinité ». Ces piscines, d'environ 1 m de profondeur, sont remplies avec des couches d'eau de salinités différentes, étendues très soigneusement les unes par-dessus les autres, les couches les plus salées étant naturellement au fond et l'eau douce en surface. Opération longue et très délicate : il faut compter près d'une année pour réaliser une « piscine à gradient de salinité ». Pour ses différentes réalisations, Tabor a utilisé l'eau salée de la mer Morte mélangée à de l'eau ordinaire. La différence de densité entre les couches les empêche de se mélanger, ce qui réduit très sensiblement les pertes de chaleur par convection. De plus la température d'ébullition de l'eau salée étant plus élevée que celle de l'eau douce, on peut théoriquement atteindre, après plusieurs jours de soleil, un peu plus de 100° au fond de la piscine. Il suffit

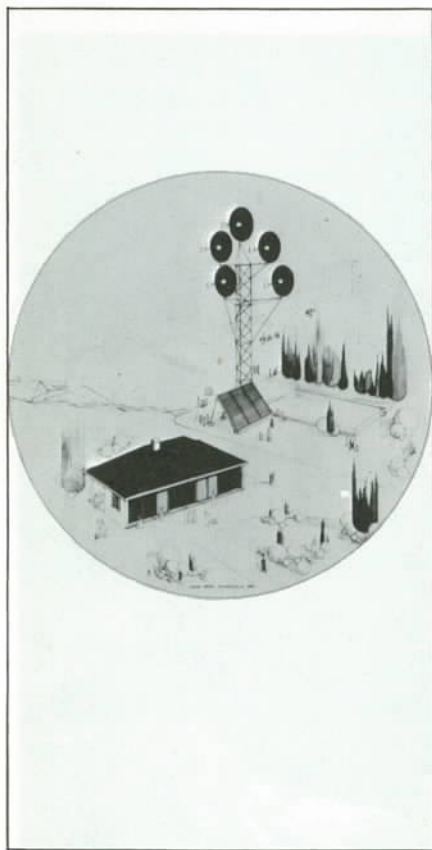
alors de disposer, au fond, des tuyaux où circule de l'eau ordinaire : celle-ci se vaporise et peut actionner une petite turbine. On peut donc théoriquement produire de l'électricité, de jour comme de nuit, avec une telle piscine si l'ensoleillement est suffisant.

Malheureusement, les réalisations tentées jusqu'à ce jour dans d'autres pays ont donné des résultats plutôt décevants. Une des difficultés rencontrées a été l'accumulation de corps en suspension dans l'eau. Ces particules absorbent une partie du rayonnement solaire avant qu'il atteigne le fond noir de la piscine et réduisent ainsi la chaleur stockée. Pour l'éviter, il faudrait recouvrir la piscine avec une large feuille de plastique ou un couvercle de verre. Cette solution empêcherait aussi qu'un caillou tombant dans l'eau détruise en un instant l'équilibre subtil, et péniblement atteint, existant entre les couches de salinités différentes. Mais des Américains, ayant expérimenté ce nouveau type de piscine, prétendent que l'extraction de chaleur par les tuyaux disposés au fond de la piscine créerait un gradient thermique

notable : cette différence de température entre les diverses couches serait suffisante pour entraîner un mélange et détruire le « gradient de salinité » si difficile à obtenir.

### 3. Des cailloux pour stocker la chaleur

La capacité thermique des cailloux est faible. Pour stocker la même quantité de chaleur, le volume de cailloux nécessaire est trois fois supérieur au volume d'eau. En revanche, le stockage de la chaleur dans un lit de cailloux où l'on fait circuler de l'air chaud est facile à réaliser et très économique. De plus, les pertes de chaleur sont réduites car la surface de contact entre les cailloux et les parois est très réduite elle aussi. En général, on utilise des graviers, des roches broyées ou des morceaux de brique. L'air assure l'échange de chaleur avec l'extérieur, aussi bien l'apport en provenance du collecteur solaire que le transfert vers l'habitation à chauffer. Ce courant d'air est créé par un ventilateur. Plus la taille des cailloux est grande, c'est-à-dire plus large



Exposée à la Foire de Paris, cette maison solaire utilise la thermo circulation naturelle de l'air par effet de serre.

est l'espace entre les cailloux, plus la circulation de l'air est facile. Le diamètre optimal est d'environ 5 cm.

Plusieurs maisons solaires ont été réalisées suivant ce système. Aux Etats-Unis, Lof a ainsi construit une maison solaire à Denver (Colorado) dans laquelle les cailloux sont placés dans deux enceintes cylindriques allant du sol jusqu'au toit de la maison ; la chaleur est transmise aux pierres par de l'air soufflé. Un autre Américain, Thomason, utilise un système hybride où le stockage est assuré par un réservoir d'eau entouré de cailloux, le transfert de chaleur se faisant par la circulation de l'eau. Ainsi les cailloux servent-ils à la fois de stockage complémentaire et d'isolation pour le réservoir d'eau. En France, le P<sup>r</sup> Misse-nard a construit à Saint-Quentin, dans l'Aisne, deux maisons solaires, l'une à eau chaude et l'autre à air chaud, où la chaleur est stockée dans un amas de pierres sèches ensevelies sous la maison.

La quatrième réalisation est de loin la plus originale. Elle a été mise au point par Félix Trombe, directeur du centre

de recherches solaires d'Odeillo (Pyrénées-Orientales) en association avec Jacques Michel, architecte français, spécialiste de l'habitat solaire. Le système choisi joue un double rôle : il sert à la fois à collecter l'énergie solaire et à stocker la chaleur recueillie. Il s'agit d'un mur de béton peint en noir placé derrière une vaste baie vitrée qui, par effet de serre, empêche la chaleur de ressortir. Ce mur occupe toute la façade sud de la maison. Au soleil, il s'échauffe et stocke la chaleur. Celle-ci est transmise au reste de l'habitation par convection d'air : l'air chauffé s'élève tandis que l'air plus frais prend sa place avant d'être échauffé à son tour par le mur. Ainsi, la circulation de l'air s'établit-elle naturellement sans nécessité de ventilateur. En été, quand l'air ambiant devient trop chaud, il suffit d'ouvrir des volets d'aération. De plus, le soleil étant alors plus haut, le mur reçoit moins de rayonnement, en particulier aux heures les plus chaudes quand le soleil est au zénith. D'après Félix Trombe, on évite ainsi l'effet de surchauffe, inconvénient assez fréquent dans les maisons solaires lorsque l'ensoleillement est intense. Plusieurs maisons solaires ont déjà été réalisées suivant ce principe, cinq à Odeillo et quelques autres à Chauveny-le-Château, dans la Meuse.

## II. LE STOCKAGE PHYSICO-CHEMIQUE

On peut aussi chercher à stocker non plus de la chaleur sensible, perçue, mais de la chaleur latente. Il y a souvent dégagement de chaleur, en effet, à la suite d'un changement d'état physique ou chimique, par exemple le passage de l'état liquide à l'état solide. C'est ainsi qu'un litre d'eau libère 80 kilocalories en se transformant en glace. L'agitation des molécules, plus grande à l'état liquide qu'à l'état solide, se transforme en chaleur au moment du changement d'état. Le changement d'état peut être aussi chimique. Les modifications dans les liaisons des molécules entre elles peuvent alors produire de la chaleur. C'est ce qui se passe lors de la combustion

d'un corps chimique, l'hydrogène par exemple.

### 1. Les sels eutectiques.

Les sels eutectiques sont des composés chimiques capables de stocker une importante quantité de chaleur latente (chaleur potentielle) lors d'un changement de phase, en passant de l'état liquide à l'état solide. Plus la formule chimique de ces sels contient d'éléments atomiques légers, tels l'hydrogène, le lithium, le fluor ou le sodium, et plus leur chaleur spécifique est élevée. La quantité de chaleur emmagasinée est donc d'autant plus grande.

Plusieurs maisons solaires construites depuis une vingtaine d'années aux Etats-Unis utilisent ce système de stockage. Le sel eutectique utilisé est le sel de Glauber ou sodium sulfate décahydrate, qui se cristallise en-dessous de 32° en donnant du sel, de l'eau et en dégageant de la chaleur. Cette réaction est réversible : en chauffant le mélange d'eau et de sel pendant un certain temps, on obtient à nouveau du sel de Glauber dans lequel est emmagasinée une chaleur latente assez importante pour l'utilisation domestique. Le sel de Glauber est bon marché ; il possède surtout une capacité thermique quatre fois plus élevée que l'eau ou les pierres. C'est le D<sup>r</sup> Maria Telkes qui a calculé et dessiné, en 1964, le système de chauffage destiné à la maison solaire de Dover, dans l'état du Massachusetts, la première à avoir expérimenté cette formule de stockage. Le D<sup>r</sup> Telkes a utilisé un réservoir contenant 20 litres de sels. Ce système a un inconvénient : après plusieurs cycles, le sel de Glauber a tendance à se cristalliser, ce qui empêche la réaction inverse de restitution de la chaleur. Au NCEMP (National Center for Energy Management and Power) de l'université de Pennsylvanie, on tente de suspendre le sel dans un gel inerte ou de lui ajouter un produit épaississant. Jusqu'à présent, ces divers procédés n'ont guère donné de résultat.

Les sels eutectiques ont aussi été étudiés systématiquement par les chercheurs de Philips. Au CNRS, M. Vialaron recommande, dans ses conclusions, le fluorure de calcium, le fluorure de sodium ou la soude, bien meilleur marché et capable de stocker 375 kWh par tonne. Toutefois, ces divers composés chimiques n'ont pas encore été beaucoup expérimentés.

### 2. Les batteries électro-chimiques.

Viennent ensuite les batteries. Si l'on veut stocker de l'électricité dans des batteries électro-chimiques, il est né-



cessaire de transformer l'énergie primaire en électricité, conversion dont le rendement varie d'environ 45 % (pour la conversion du pétrole en électricité dans les centrales thermiques) à moins de 15 % (pour la conversion d'énergie solaire en électricité avec les photopiles actuelles).

Les batteries au plomb sont connues et utilisées depuis fort longtemps pour l'allumage des automobiles, mais leur usage est limité au stockage de faible puissance : si l'on voulait stocker 1 MWh, il faudrait 25 tonnes de batteries au plomb...

Parmi les autres batteries, mises au point plus récemment, on peut distinguer deux types :

— les batteries air-métal (fer-oxygène, zinc-oxygène...) fonctionnant à basse température : leur densité de puissance est de 50 W par kilogramme ;

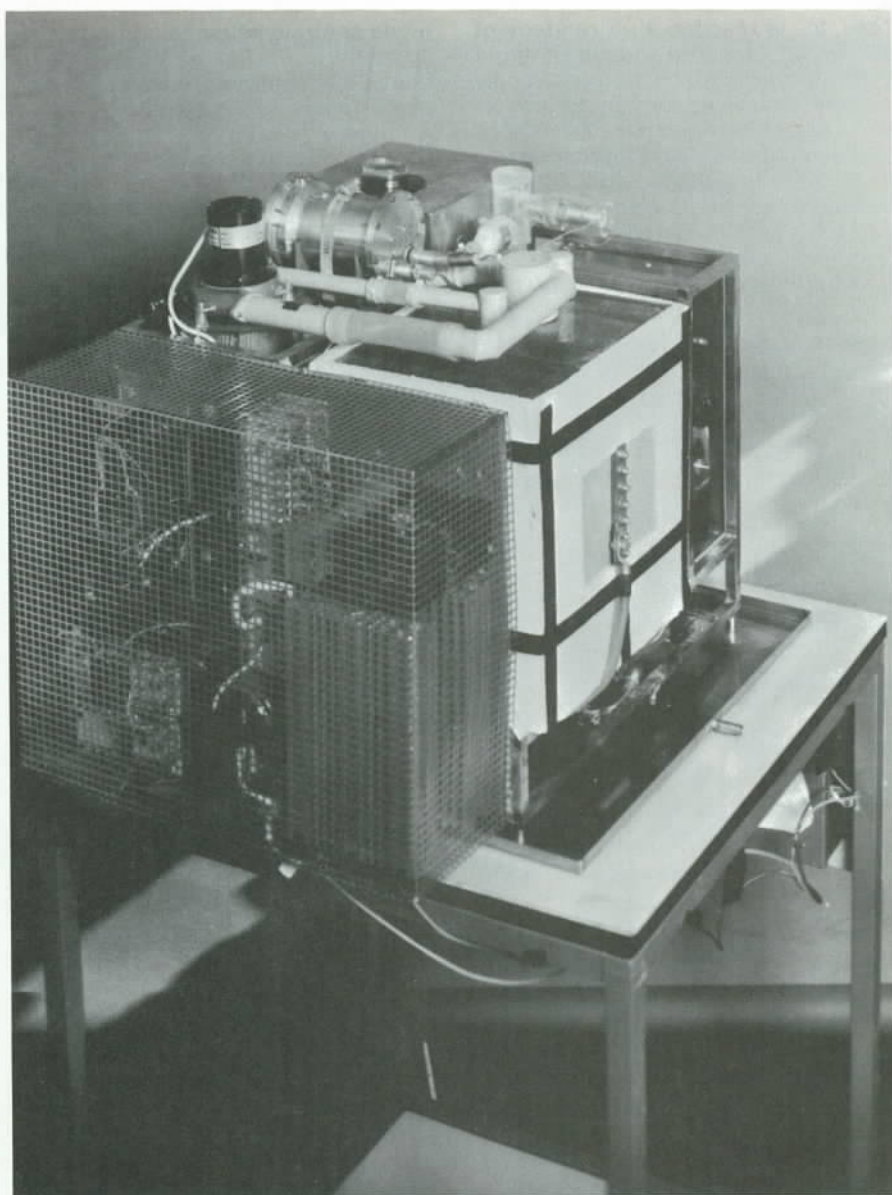
— les batteries fonctionnant à haute température : sodium-soufre, lithium-soufre, ou lithium-chlore. Leur densité de puissance est de 100 W par kilogramme.

On prévoit encore cinq années de développement avant que ces batteries soient commercialisables pour les véhicules.

### 3. L'hydrogène : le stockage de l'avenir.

Le directeur du programme solaire du CNRS, M. Chabbal, a récemment déclaré : « L'avenir de l'énergie solaire devra être envisagé dans le cadre d'une véritable alliance du soleil et de la chimie, c'est-à-dire dans le contexte d'une production de l'hydrogène, qui pourra être stockée et exportée ». Le secteur nucléaire poursuit des recherches dans la même direction. Le centre nucléaire américain d'Oak-Ridge et la firme Allis Chalmers cherchent ainsi à mettre au point un procédé d'électrolyse de l'eau permettant de produire l'hydrogène à partir de l'énergie des centrales nucléaires. Les électrodes utilisées dans ce but sont en nickel poreux, ce qui facilite le dégagement de l'hydrogène produit.

L'hydrogène présente de très nombreux avantages. C'est un gaz transportable, stockable et surtout non polluant. Dans un article publié en janvier 1973, Derek Gregory écrit : « Si nous choisissons l'hydrogène, le monde de demain sera sans aucun doute beaucoup plus propre et agréable à vivre que celui d'aujourd'hui. » Mais c'est une énergie secondaire : pour l'obtenir, il faut convertir une énergie pri-



*Pile à combustible hydrogène-air. Ces engins convertissent directement en électricité l'énergie chimique qu'ils stockent et délivrent à volonté.*

maire (solaire, nucléaire...).

Il existe trois méthodes de conversions possibles et le choix dépend de l'énergie primaire, de la température nécessaire et du rendement. La réaction la moins efficace est la photolyse de l'eau : il s'agit de la dissociation de l'eau  $H_2O$  en hydrogène ( $H_2$ ) et en oxygène ( $1/2 O_2$ ) sous l'effet du rayonnement lumineux. Les Japonais Fujishima et Honda ont mis au point un composant électronique, un semi-conducteur de l'oxyde de titane  $TiO_2$ , qui dissocie une molécule d'eau à chaque fois qu'il absorbe deux photons dans la bande de l'ultra-violet. Toutefois, le rendement de cette réac-

tion est assez mauvais car, le spectre d'absorption étant étroit, ce composant ne transforme qu'une faible partie du rayonnement lumineux. Il existe également une « photolyse naturelle » réalisée par les plantes avec un rendement bien meilleur. En présence d'une enzyme, l'hydrogénase de la plante, au lieu de fixer le carbone provenant du gaz carbonique, fournit de l'hydrogène extrait de l'eau. En définitive, le rendement varie de 0,1 % à 10 % suivant que la photolyse est directe ou fait intervenir une enzyme.

Le second procédé part d'une énergie primaire qui, après transformation en électricité, permet l'électrolyse de

l'eau. Ici, la réaction a un rendement de 76 %. Mais de quelle énergie partira-t-on ? Si, par exemple, on part d'énergie solaire, sa transformation en énergie électrique par des cellules photovoltaïques n'a qu'un rendement de 15 % dans la technologie actuelle. Le rendement final ne sera donc que de 11 % ! Lors du dernier congrès de l'American Geophysical Union, le P<sup>r</sup> W.E. Heronemus a proposé un pro-

jet de centrale éolienne composée de 80 moulins à vent de 45 mètres de haut. Cette centrale pourrait être construite au large des côtes de Nouvelle-Angleterre. Les vents d'ouest particulièrement forts dans cette zone produiraient ainsi de l'électricité, laquelle servirait ensuite à transformer l'eau de mer en hydrogène et oxygène par électrolyse. Transportés à terre par pipes, ces gaz seraient alors recombi-

nés dans des piles à combustibles pour alimenter en électricité les états de Nouvelle-Angleterre et de New York.

Le troisième procédé est la dissociation thermique de l'eau. Aux environs de 3 000 °C, l'opération se fait avec un rendement de 50 %. La température des centrales nucléaires n'est pas assez élevée pour cela. Par contre, on peut atteindre 3 800 °C au foyer du four solaire d'Odeillo.

Si la conversion de l'énergie en hydrogène pose encore de nombreux problèmes techniques, par contre le stockage et le transport de ce gaz sont aujourd'hui simples à réaliser. En France, on a déjà utilisé de vastes poches aquifères présentes dans le sous-sol pour y stocker de l'hydrogène. La poche de gaz de Groningen, quand ses réserves seront épuisées, pourra contenir suffisamment d'hydrogène pour satisfaire les besoins énergétiques de l'ensemble de l'Europe pendant deux ans. Cette méthode de stockage est la moins chère que l'on connaisse. Par contre, l'utilisation de l'hydrogène sous forme liquide à très basse température est à exclure, sauf pour certaines applications particulières (moyens de transport) car les coûts de liquéfaction et de regazéification sont trop élevés. La liquéfaction a certes l'avantage de réduire le volume, mais de nouvelles technologies sont à l'étude pour réaliser des stockages compacts. Ces procédés utilisent des métaux capables d'absorber et de retenir les molécules d'hydrogène. Il suffit ensuite de réchauffer un peu le métal pour qu'il restitue le gaz. Principales applications possibles pour ce genre de stockage : la voiture ou l'avion « non polluants ».

Au groupe Euratom d'Ispra (Italie), on s'intéresse depuis quelques années au développement de l'hydrogène et M. Marchetti écrit : « Avec l'hydrogène, moyennant un effort technologique suffisant, le monde est prêt pour une révolution dans la structure de son système d'approvisionnement en énergie. » On peut alors imaginer, dans un lointain avenir, une solution « écologique » à la crise de l'énergie : les besoins énergétiques de l'humanité seraient assurés par de grandes centrales solaires implantées dans les déserts, le Sahara par exemple. Après sa conversion en hydrogène, l'énergie serait distribuée au reste du monde par pipe-lines. Le transport de l'hydrogène par pipe-lines est simple ; moyennant de légères adaptations, on peut utiliser les gazoducs actuels. Une étude économique récente, réali-



*Près de Douai, l'installation de production d'hydrogène de Frais Marais (ci-dessus). Sur cette photographie, on voit, au fond : à gauche le réservoir de stockage de 50 000 litres d'hydrogène liquide, à droite le liquéfacteur de production. Les structures triangulaires au premier plan servent au stockage gazeux. L'hydrotonne de l'usine de l'Air Liquide d'Isbergues, dans le Pas-de-Calais (ci-contre), produit, à partir de gaz naturel provenant du gisement de Groningue en Hollande, 700 à 3 300 m<sup>3</sup> par heure d'hydrogène pur.*



sée à la demande de la Communauté européenne, a montré que le transport de l'énergie est de cette façon dix fois moins cher que le transport actuel par câbles électriques. De plus, les pertes d'énergie sont bien moindres.

On peut imaginer également ces centrales solaires construites sur des îles flottantes au milieu des océans. Grâce à l'énergie solaire, ces centrales dissocieraient l'eau de la mer, réserve d'hydrogène pratiquement inépuisable. Ainsi l'avenir semble-t-il bien passer par la maîtrise de la technologie de l'hydrogène. Les recherches en ce sens doivent donc être largement développées : le CEA, EDF, le Gaz de France et l'Institut français du pétrole s'y emploient depuis quelques années.

### III. LE STOCKAGE MÉCANIQUE

Seule énergie secondaire universellement distribuée et utilisée actuellement, l'électricité est toutefois très difficile à stocker.

La quasi-impossibilité de mettre l'électricité en réserve n'est pas un inconvénient majeur tant que l'énergie reste stockée sous forme primaire dans les combustibles fossiles. Ceci vaut pour les centrales thermiques utilisant ces combustibles. En revanche, les centrales hydroélectriques ne peuvent pas contrôler aussi facilement leur production, car celle-ci dépend uniquement de la chute d'eau.

#### 1. Une solution classique : le pompage

Dans ce cas, on utilise l'électricité produite aux heures de faible consommation, pour pomper de l'eau et remplir un bassin situé en amont de la centrale. L'énergie mécanique (potentielle) ainsi stockée peut être utilisée immédiatement pour répondre à des demandes de pointe.

Toutes les centrales hydroélectriques implantées au pied d'un barrage modulent leur production d'électricité de cette façon. L'usine marémotrice de la Rance et certaines centrales « au fil de l'eau » disposent d'un bassin complémentaire servant à retenir une importante masse d'eau utilisée comme

appoint aux heures de forte demande.

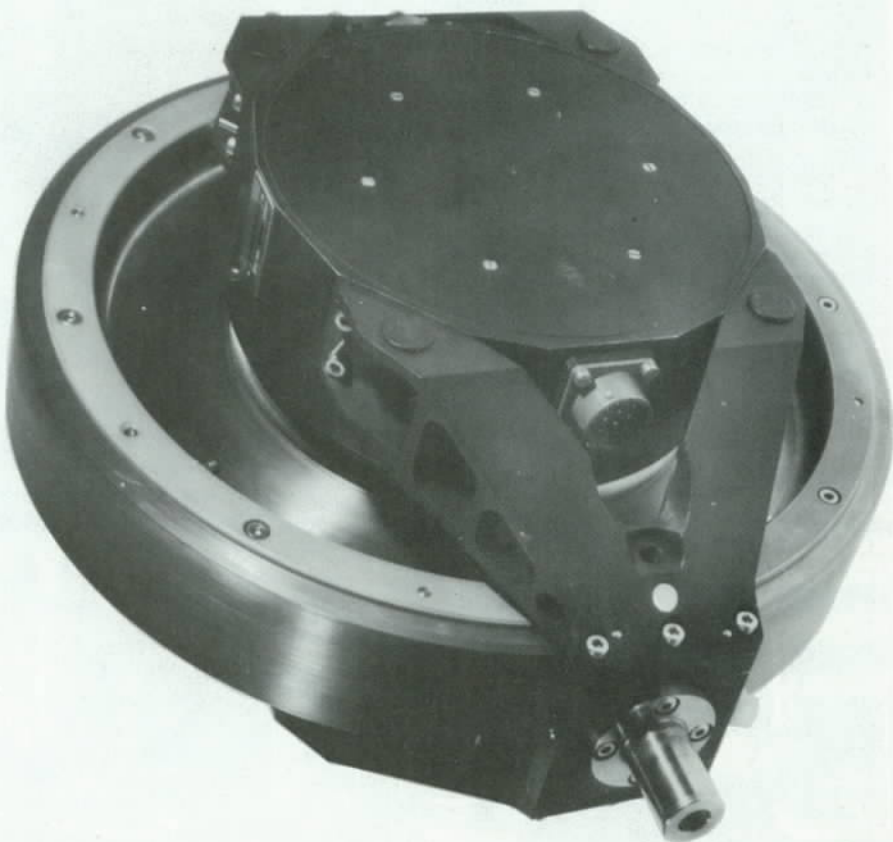
Pour être compétitives avec les centrales classiques, les centrales solaires devront avoir un système de stockage leur permettant de fournir l'électricité aux usagers 24 h sur 24 tout en n'en produisant que pendant le jour. La capacité de stockage nécessaire serait évidemment très importante. Le pompage deviendrait alors insuffisant : il faudrait envisager le stockage par volant d'inertie.

#### 2. Les volants d'inertie

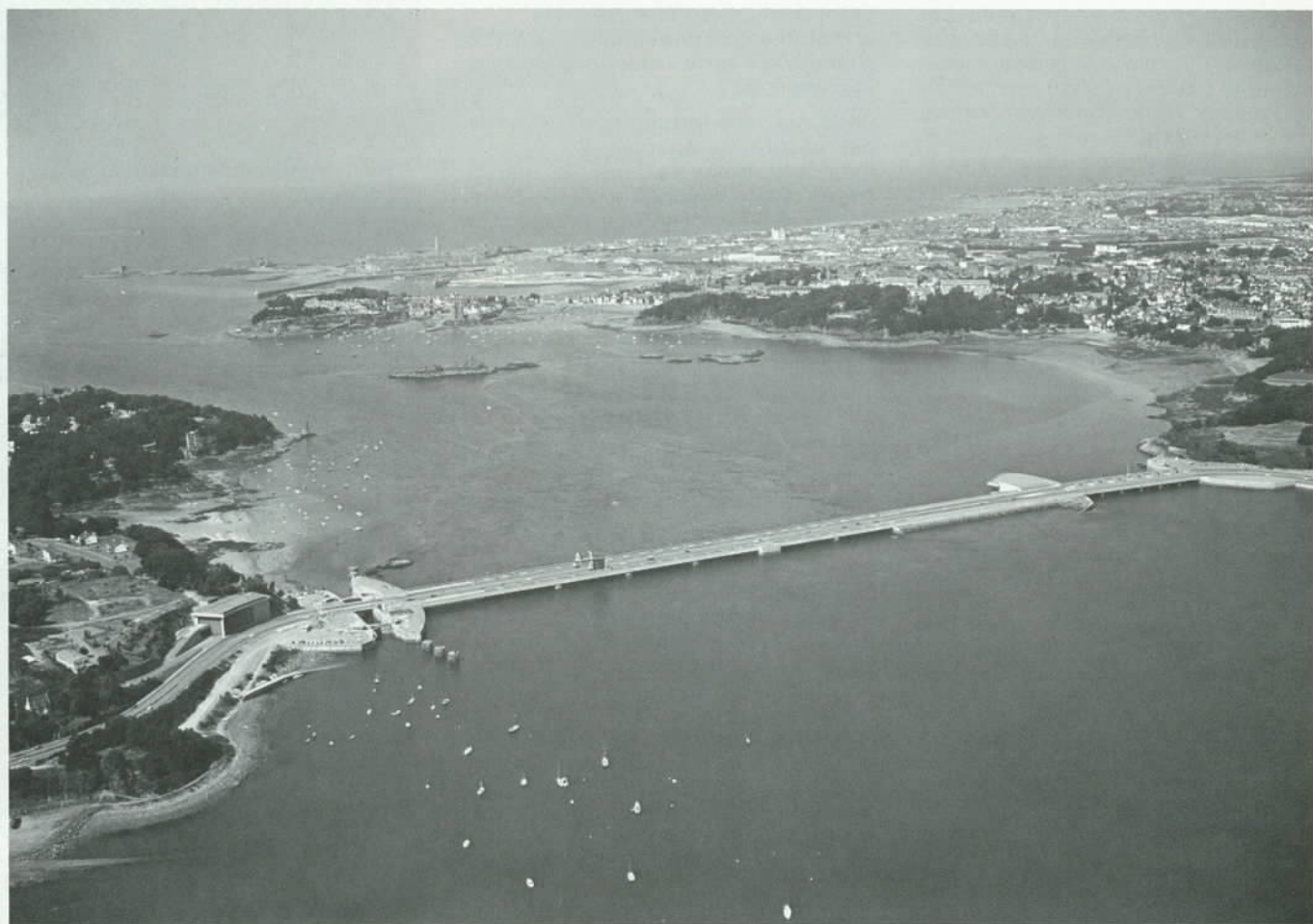
Il existe une seconde forme d'énergie mécanique : l'énergie cinétique, proportionnelle à la masse et au carré de la vitesse d'un corps en mouvement : plus un mobile est animé d'une vitesse élevée et plus l'énergie mécanique stockée est importante. Une voiture à grande vitesse représente une énergie cinétique importante, et l'on sait trop que les dégâts en cas de choc sont plus graves si la vitesse était élevée...

Ce principe peut être appliqué au stockage. La solution adoptée doit occuper le moins de place possible. Plutôt que de déplacer des corps en ligne droite, on les fait donc tourner sur eux-mêmes à plus de 10 000 tours-minute. Les parties les plus excentrées peuvent alors atteindre des vitesses dépassant celle du son. Ces systèmes de stockage s'appellent des volants (= vitesse rotative) d'inertie (= masse). Ces volants sont jusqu'à présent réalisés en fonte ou en acier, montés sur des roulements à bille, lubrifiés et refroidis par une huile spéciale.

Il est théoriquement possible de stocker 10 MWh en utilisant un volant d'inertie de 36 m<sup>2</sup>. Pour stocker la même quantité d'énergie, une installation de pompage demande une superficie 300 fois plus grande. Le débit maximal d'un volant d'inertie est d'environ 3 MW. Cette solution semble donc bien adaptée aux centrales solaires actuellement en projet, dont



*Un volant d'inertie. La masse maintenue en rotation représente une énergie cinétique que l'on prélève en imposant un ralentissement.*



la puissance prévue va de 1 MWe à 25 MWe. Le système de stockage comprendrait ainsi entre 1 et 25 volants d'inertie de 1 ou 2 MW chacun.

Depuis quelques années, de nouveaux types sont en cours d'études dans les laboratoires : il s'agit des « flywheels ». Ce sont des volants d'inertie réalisés en matériaux composites — fibres de carbone, fibres de verre ou silice fondue — et entraînés par un moteur électrique. Leur poids est plus faible ; et leur géométrie a été spécialement conçue pour que ces volants supportent de très grandes vitesses de rotation. En général, ils sont formés d'anneaux concentriques tournant à des vitesses différentes, vitesses de plus en plus grandes quand on se rapproche du centre, ceci afin d'égaliser la force centrifuge qui s'exerce sur chaque anneau. Le plus souvent, les « flywheels » sont placées dans des chambres à vide, afin d'annuler le frottement de l'air. Leur rendement se situe entre 85 et 95 % ; c'est-à-dire que l'énergie perdue par frottement ne dépasse pas 5 à 15 %.

On envisage d'utiliser ces « volants » en un premier temps pour équiper des voitures. Une petite automobile ayant un rayon d'action de 300 km à 90 km/h demande à peu près 30 kWh d'énergie stockée de préférence dans deux « flywheels » tournant en sens inverse pour que leurs effets se compensent (la voiture ne doit pas subir un effet gyroscopique à cause du mouvement de rotation du volant). Le rayon d'action du véhicule peut être accru de 35 à 50 % si les « flywheels » fonctionnent à la fois en générateur et en moteur, ce qui permet alors de récupérer l'énergie cinétique dissipée dans les freins pour recharger les « flywheels » tout au long du parcours. Un système de deux « flywheels » de 30 kWh pèse 65 kilos si ceux-ci sont en silice fondue et 140 kilos si l'on emploie un polymère synthétique appelé PRD-49. Pour stocker la même quantité d'énergie, soit 300 kWh, plus d'une tonne de batteries électriques conventionnelles, ou 7 tonnes de batteries au plomb, seraient nécessaires... Les « flywheels » peuvent atteindre

*Jusqu'à présent unique au monde, la centrale marémotrice de la Rance (Ille-et-Vilaine) prélève l'énergie mécanique des masses d'eau déplacées par les marées*

leur pleine charge en cinq minutes : il suffit donc de brancher la voiture pendant ce temps sur une alimentation délivrant un fort courant électrique pour « faire le plein », l'opération devant être renouvelée tous les 300 km. L'utilisation généralisée des « flywheels » permettrait une économie notable d'énergie, car ils consomment de 85 à 95 % de l'électricité produite avec un rendement de 45 % dans les centrales. Les moteurs à combustion interne, eux, ne convertissent que 10 à 15 % de l'énergie contenue dans l'essence. De plus, les problèmes de pollution disparaîtraient.

### **3. Une solution révolutionnaire : les paliers magnétiques.**

Pour améliorer le rendement et la capacité de stockage des volants d'inertie, certains chercheurs ont déjà pensé

à suspendre ces volants magnétiques dans une enceinte à vide : on annulerait ainsi tout frottement avec l'air et entre les pièces en mouvement. De tels volants utilisent des paliers magnétiques : le rotor est retenu non plus par un axe mécanique mais par un champ magnétique qui le maintient dans sa position en évitant tout contact avec les parois matérielles. Les premiers paliers magnétiques passifs (champ magnétique constant) ont été mis au point en 1958 par le MIT (Massachusetts Institute of Technology) pour réaliser les gyroscopes intégrateurs des tables d'inertie servant au guidage des avions. Dix ans plus tard, le LRBA (Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques) de Vernon (Eure), à la demande du ministère des Armées, construit des paliers magnétiques actifs : l'intensité et la forme du champ magnétique y sont asservies à la position du rotor à chaque instant, afin de maintenir celui-ci dans sa position et éviter des instabilités internes. Il faut un asservissement pour l'axe vertical et deux pour chaque axe horizontal. Ceci demande un équipement électronique de très haute qualité, avec des détecteurs très précis, sans bruit de fond, et une logique transistorisée. Deux prototypes ont été réalisés par le LRBA : une ultracentrifugeuse ayant un bol de 8 kilos tournant à 60 000 tours/minute et une autre ayant un bol de 60 grammes tournant à 1 000 000 tours/minute.

De tels volants d'inertie équipés de paliers magnétiques pourraient tourner presque indéfiniment sans perdre leur énergie cinétique, avec un rendement assez proche de 100 % et à des vitesses beaucoup plus élevées que celles des volants d'inertie classiques : pouvant aller jusqu'à 1 000 000 tours/minute, ils auraient de ce fait une capacité de stockage beaucoup plus grande.

Le palier magnétique a de nombreux avantages :

- pas de risque de corrosion (absence de frottements) ;
- pas de risque de pollution inutile (lubrification inutile) ;
- pas de vibration ;
- couple de freinage extrêmement faible ;
- fiabilité très élevée (les usures mécaniques étant nulles, le temps de vie n'est limité que par le temps moyen

entre pannes de l'électronique) ;

- maintenance très simple (il suffit de changer la « carte » électronique d'asservissement).

Cette nouvelle technologie n'a certes pas encore été adaptée aux problèmes de stockage de l'énergie, mais il ne fait aucun doute qu'elle aura bientôt des applications très intéressantes dans ce domaine.

#### IV. LE STOCKAGE BIOLOGIQUE

Demander à l'agriculture de fournir de l'énergie, c'est une idée qui choque : aujourd'hui, les produits de la terre paraissent trop nobles pour être de simples combustibles. Le feu de bois est devenu un luxe, les produits de la terre fournissent des aliments ou les matériaux de qualité : coton, bois, papier... Mais voilà que la tendance s'inverse. Les chercheurs ont découvert que la photosynthèse pouvait être, dans certaines conditions, le meilleur moyen de stocker l'énergie solaire.

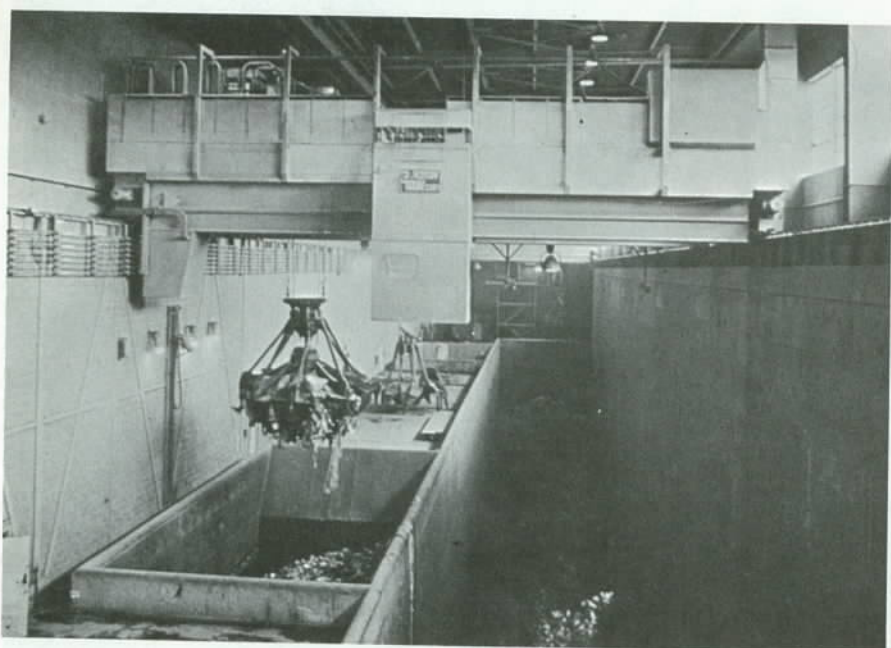
##### 1. La « houille verte ».

A l'INRA (Institut national de la recherche agronomique), on s'applique actuellement à sélectionner certaines variétés d'arbres et de céréales pouvant être utilisées en France à des fins énergétiques. Cette exploitation se fait déjà aux Etats-Unis, principalement en Californie où des forêts d'eucalyptus sont utilisées à cette fin. L'université de Stanford, toujours en Californie, va réaliser prochainement, à la demande du gouvernement américain, un vaste système de production, de transformation et de distribution des « biomasses » pour l'île Hawaï. Ce système combinerait l'exploitation des forêts existantes, la mise en culture de certaines céréales spécialement sélectionnées pour leur haut rendement énergétique et la récupération des « bagasses » de canne à sucre : il s'agira d'alimenter ainsi en énergie des exploitations agricoles, des machines et des usines alimentaires de petite et moyenne dimension.

*Les algues de grande taille pourraient être cultivées pour leur valeur énergétique. Sur cette photographie, prise en infrarouge « fausse couleur », depuis un hélicoptère, on voit des macrocystes en rouge foncé ; la bordure rose est constituée de Durvillea.*







Chargement des trémies dans une usine traitant les ordures ménagères dont la combustion fournit des calories au réseau parisien de chauffage urbain.

De son côté, l'Australie, un des pays les plus ensoleillés du globe avec en moyenne  $200 \text{ W/m}^2$  d'insolation, utilise déjà ses eucalyptus géants et ses hibiscus pour satisfaire une partie de ses besoins énergétiques, surtout dans les régions peu peuplées où l'installation de l'électricité est très difficile vu l'isolement. Rappelons que l'eucalyptus Regnans, poussant en Tasmanie, peut atteindre jusqu'à 100 mètres de haut.

Les pays européens sont moins directement intéressés à développer ce type de biomasse car le peuplement humain très dense laisse peu de terres disponibles. De plus, la crise incite à transformer la cellulose en pâte à papier plutôt qu'en calories. Toutefois la Commission européenne de Bruxelles vient de réunir un groupe d'experts chargés d'étudier cette question et un budget assez important a été voté en vue de l'exploitation des biomasses dans certains pays d'Europe. Il s'agirait, dans ce cas, de récupérer l'énergie des sous-produits agricoles — paille, chaume ou raffle de maïs — plutôt que d'effectuer un véritable stockage d'énergie solaire.

## 2. De nouvelles sources d'énergie : les algues et les ordures.

Le principal handicap au développement des plantes utilisées pour leur valeur énergétique est le manque de terres cultivables, la priorité allant par conséquent aux cultures alimentaires.

Mais alors pourquoi ne pas utiliser les océans ? On y a pensé : c'est l'aquaculture. Des chercheurs s'emploient actuellement à sélectionner des variétés d'algues à croissance très rapide. L'université américaine de Gainesville (Floride) propose des algues microscopiques — la Chlorelle, la Scenedesmus, la Spiruline, l'Ulothrix... — variétés d'eau douce à croissance très rapide dont le rendement maximum atteint un gramme de matière solide par litre d'eau. En France, la Spiruline bleu-vert est cultivée dans le Midi ; elle a un rendement comparable. Plusieurs cultures de Chlorelle à grande échelle sont déjà opérationnelles en URSS, mais on n'en connaît pas les résultats. Les chercheurs de l'université de Stanford s'intéressent, eux, à la jacinthe d'eau : cette algue d'eau douce est bien connue pour gêner le trafic fluvial. Puisqu'il faut la récolter, pourquoi ne pas l'utiliser ?

A côté de ces algues microscopiques, il existe des algues géantes pouvant atteindre des tailles qu'on a peine à imaginer, allant jusqu'à une centaine de mètres. Des chercheurs américains envisagent de récolter une algue de très grande taille qui vit au large des côtes californiennes : la « Giant Sea Kelp ». Si la culture n'est pas vraiment difficile, le ramassage, le séchage et la fabrication de pains d'algues concentrés posent de nombreux problèmes qui ont empêché jusqu'à présent des réalisations pratiques à grande échelle.

La France envisage d'introduire au large de ses côtes une algue brune, très répandue dans l'Antarctique, au large du Chili et de la Californie où elle est exploitée comme source d'alginate pour l'industrie chimique : cette algue — *Macrocystis pirifera* — peut atteindre 50 m de long. Elle forme une forêt très dense à tous les niveaux depuis la surface jusqu'à une profondeur de 50 mètres. La *Macrocystis* a la croissance la plus rapide que l'on connaisse chez les végétaux : elle pousse de 30 cm par jour en début de croissance. Les champs d'algues pourraient être moissonnés trois fois par an sur un mètre de profondeur par des bateaux équipés spécialement. Le coût d'une telle exploitation a été estimé : entre 15 et 50 francs la tonne. Toutefois les autorités françaises hésitent à lancer cette culture car elles craignent l'envahissement des côtes comme le fit une autre algue (*Sargassum muticum*) en Angleterre, ce qui risquerait de gêner le trafic.

## 3. Comment utiliser « l'énergie biologique ».

Il ne suffit pas de stocker l'énergie, il faut encore la récupérer. Or les végétaux, en général, brûlent mal. Il faut tout d'abord bien les sécher, ensuite les compacter et, éventuellement, les enrichir avec d'autres combustibles plus « chauffants ». Il faut surtout choisir des végétaux à haut pouvoir calorifique et rendement élevé. Les plantes dites « au C4 » (cycle photosynthétique de l'acide C4 dicarboxylique), telles que le blé, la canne à sucre ou le maïs, produisent des hydrates de carbone à un rythme accéléré. Leur rendement est en pratique de 2 % : en les brûlant, on récupère 2 % de l'énergie solaire qu'ils ont reçue pendant leur croissance. Ce rendement semble faible ; mais si l'on tient compte du stockage nécessaire, il est comparable au rendement global d'une installation solaire — et même meilleur pour les régions moyennement ensoleillées. L'avantage essentiel des biomasses est leur coût très compétitif : d'après des études américaines, la coupe, le débitage, le transport et le séchage du bois reviendraient environ à cinq millièmes de dollar le kWh. Autre avantage de la conversion biologique : le faible coût des investissements. Par contre, le coût d'exploitation est relativement plus élevé. Avec les autres systèmes d'énergie solaire, les investissements nécessaires sont au moins dix fois plus importants, mais il n'y a évidemment aucun frais de combustible.

Ces biomasses sont difficilement utili-



sables comme combustible. Différentes techniques sont donc étudiées pour les transformer en gaz ou en hydrocarbures d'utilisation plus commode. On peut procéder par pyrolyse, réduction ou fermentation, tous procédés qui sont fort étudiés actuellement.

Il ne s'agit pas de retenir en fin de compte l'une de ces techniques au détriment des autres. De toute évidence, on trouve ici plus de complémentarité que d'exclusivité. Les volants auront leur place à côté de l'hydrogène et la « houille verte » à côté des piscines solaires. Tout dépendra des conditions et des utilisations. L'important est justement de mettre au point une gamme de procédés pour faire face à la diversité des situations. Il n'y aura pas de stockage miracle, mais seulement un grand nombre de recettes qui, prises toutes ensemble, pourraient simplement résoudre les problèmes de l'avenir dans leur diversité.



*Lisière d'une forêt d'eucalyptus (ci-dessus) et récolte de la canne à sucre aux Philippines (ci-dessous) : deux espèces végétales à croissance rapide qui se prêtent particulièrement bien à une exploitation de l'énergie solaire par la voie biologique.*

