

Bibliographie

Le Pétrole, une épopée, Xavier BOIS DE LA TOUR, Presses Pocket, coll. « Explora », 1993.

« Le pétrole des profondeurs océaniques », Alain-Yves HUC, *Pour la science*, mai 2003 (exemple d'une province pétrolière).

« Les polymères », Bernard SILLION, *Graines de sciences 4*, Le Pommier, 2002 (on y parle

de l'utilisation des produits pétroliers pour la synthèse des matières plastiques).

Graines de sciences 5, sous la direction de David WILGENBUS, Béatrice SALVIAT et Marc JULIA, « La physique du tas de sable » (chapitre de Etienne GUYON), Le Pommier, 2003.

les énergies renouvelables

Régis Olivès

L'Homme a recherché sans cesse des sources d'énergie pour répondre à ses besoins. Le développement de l'espèce humaine s'est d'abord basé sur le travail de l'homme. Il est allé au-delà de sa propre force physique en découvrant le feu, en domestiquant les animaux et en maîtrisant les forces hydrauliques et éoliennes. L'utilisation de l'énergie de l'eau et de celle du vent a essentiellement débuté dans les civilisations égyptiennes et mésopotamiennes. Sous l'Ancien Empire égyptien, les grosses barques semblaient déjà être équipées de voiles permettant de remonter le Nil. Au ^ve siècle avant notre ère, l'Extrême-Orient a développé des systèmes complexes : les puits à balancier, les norias ou encore les pompes à chaîne sans fin et à palettes mues par des roues hydrauliques. Les édifices romains dédiés à l'exploitation des sources d'eaux chaudes géothermales sont d'autres témoignages remarquables de l'utilisation d'une ressource renouvelable. Vers 100 ans av. J.-C., Héron d'Alexandrie décrit de nombreuses machines mettant à profit le rayonnement solaire pour échauffer de l'air, le dilater et ainsi pousser une colonne d'eau, premiers témoignages semble-t-il de la transformation de l'énergie solaire en énergie mécanique.

La maîtrise de l'énergie s'avère un élément clé dans l'évolution des sociétés humaines et les énergies renouvelables y prennent une place prépondérante. Quasiment toutes les civilisations ont accordé un statut particulier au Soleil. En dehors de l'aspect religieux – la civilisation égyptienne avec le dieu Râ, mais aussi les civilisations précolombiennes inca, maya, aztèque, pour lesquelles le Soleil était le dieu principal –, on remarque que l'ensemble des civilisations ont basé leur système énergétique sur les énergies renouvelables. En effet, l'intérêt de ces énergies repose sur le fait qu'on les reçoit relativement régulièrement. On les appelle des énergies de flux, c'est-à-dire qu'elles peuvent être assimilées à un revenu énergétique. Néanmoins, elles dépendent du lieu géographique et sont donc fortement liées aux contraintes environnementales.

En augmentant ses besoins, l'Homme a dû diversifier ses sources d'énergie. L'exploitation du charbon puis du pétrole lui a permis, au ^{xix}e siècle, de s'affranchir alors des contraintes liées à l'environnement. Ces sources font partie des énergies fossiles. Elles ont été constituées au cours de plusieurs millions d'années. On les appelle donc des

« énergies de stock ». Elles représentent notre capital énergétique. En consommant les énergies fossiles, nous prélevons dans ce capital qui est, par nature, en quantité limitée. Les grandes quantités d'énergie délivrées par ces ressources fossiles se révèlent nettement supérieures à celles fournies par les énergies renouvelables. La révolution industrielle marque ainsi le passage des énergies renouvelables aux énergies fossiles. Il s'agit d'un bouleversement profond du paysage énergétique.

Aujourd'hui, les chauffe-eau solaires, les panneaux photovoltaïques, les éoliennes ou encore les turbines à biogaz sont des installations très courantes. L'attrait pour les énergies renouvelables est de plus en plus fort. Le respect de l'environnement est devenu un critère essentiel quant au choix de systèmes de production d'énergie. En outre, les énergies renouvelables se révèlent petit à petit économiquement compétitives après avoir passé de nombreuses décennies à l'arrière-plan, loin derrière les énergies fossiles. La technique actuelle permet de profiter encore plus efficacement des énergies renouvelables. Cependant, hormis la biomasse, elles ne sont pas pour autant les sources les plus utilisées. Le pétrole, le charbon, le gaz et les matériaux fissiles comme l'uranium restent les premières sources d'énergie consommées pour la production d'électricité, le transport ou encore le chauffage de l'habitat.

L'omniprésence de l'énergie dans la vie quotidienne doit nous inviter à reconsidérer notre rapport à l'énergie. Jusqu'à maintenant, dans les sociétés comme la nôtre, l'énergie était abondante, accessible et peu chère. Or, avec l'épuisement des ressources et le dérèglement climatique dû aux gaz à effet de serre, le système énergétique actuel est

difficile à maintenir en l'état. Le recours aux économies d'énergie, à la gestion plus efficace de l'énergie et aux énergies renouvelables apparaît inévitable.

Qu'est-ce que l'énergie ?

C'est la capacité à fournir un travail, autrement dit à exercer un déplacement sous l'effet d'une force. Le mot « énergie », introduit par Thomas Young en 1807, est un concept abstrait qui a d'abord reposé sur la notion de travail mécanique. Au cours des décennies suivantes, le concept a été étendu à la chaleur. Au XIX^e siècle, James Prescott Joule, brasseur anglais, a démontré l'équivalence entre l'énergie thermique et l'énergie mécanique. Il existe plusieurs formes d'énergie : mécanique, thermique, rayonnante, nucléaire, électrique, chimique, musculaire. L'équivalence entre toutes ces formes d'énergie s'exprime par le premier principe de la thermodynamique : l'énergie ne peut ni être créée, ni être détruite, elle se transforme. Une forme d'énergie peut être convertie en une autre. Néanmoins, cette conversion est plus ou moins efficace. Cette efficacité peut être déterminée par le second principe de la thermodynamique. Ce principe, apparu au XIX^e siècle, introduit la notion de qualité. Au cours des transformations, l'énergie se dégrade et perd donc de sa qualité. À l'aide de ces deux principes, il est possible d'évaluer les systèmes de conversion de l'énergie et de les concevoir selon les sources d'énergie disponibles et les besoins réels.

Le système qui transforme une énergie en une autre est un convertisseur. Celui-ci peut être naturel comme les végétaux ou artificiel comme une turbine hydraulique, un panneau solaire ou encore une centrale

nucléaire. L'Homme a fait appel depuis très longtemps à des systèmes artificiels afin de satisfaire ses besoins en énergie, qui n'ont cessé de s'accroître. Il a développé des convertisseurs toujours plus performants, toujours plus puissants, comme par exemple les moulins à vent et les roues à eau. La révolution industrielle a été le point de départ de l'exploitation des énergies fossiles. À la suite de l'épuisement des ressources en bois dû à la surexploitation des forêts, le charbon est apparu comme une source d'énergie compétitive. Le développement des machines à vapeur a ainsi vu le jour. La combustion du charbon dégage une chaleur suffisante pour évaporer de l'eau. En injectant cette vapeur dans un cylindre, un piston va pouvoir être déplacé et ainsi générer un mouvement mécanique. Ce type de machine a permis alors d'atteindre des niveaux de puissance jusque-là inaccessibles. Le pétrole a ensuite pris le pas. Après raffinage, celui-ci a la particularité de pouvoir être utilisé dans des moteurs thermiques. Le fonctionnement de ces moteurs est basé sur la combustion violente du pétrole. L'explosion provoquée dans le cylindre pousse le piston. De façon assez similaire, des technologies sont apparues afin d'exploiter le gaz naturel, ce sont les turbines à gaz.

La physique du début du XX^e siècle a fait l'objet d'une révolution avec la découverte de la radioactivité. Ce phénomène décrit par la fameuse équation d'Einstein $E = mc^2$ se traduit par la transformation de la matière en énergie. Lors de la combustion d'un hydrocarbure (charbon, pétrole, gaz), la masse des produits de départ se retrouve dans les produits finaux (dioxyde de carbone et eau). Il s'agit là d'une réaction chimique. Par contre, lors de la fission nucléaire, la masse elle-même se transforme en énergie.

On ne retrouve plus à la fin la masse des matières de départ (uranium, plutonium), une partie a été convertie en énergie. La fission nucléaire met en jeu des énergies considérables, sans commune mesure avec la combustion du pétrole. Partant de cette constatation, des convertisseurs ont été élaborés afin d'exploiter la fission nucléaire, ce sont les centrales nucléaires.

Les hydrocarbures et les minerais radioactifs (uranium, plutonium...) sont des sources fossiles dont les réserves sont, nous l'avons dit, inévitablement limitées. Les raisons qui nous amènent à remettre en question le système énergétique actuel sont nombreuses : épuisement des ressources fossiles, accroissement des gaz à effet de serre, accumulation de déchets radioactifs, risques de prolifération des matériaux fissiles et de détournement de ces matériaux à d'autres fins qu'énergétiques, risques d'accidents nucléaires. L'exploitation des sources d'énergie renouvelable reprend alors toute sa légitimité dans le contexte énergétique actuel.

À l'origine des énergies renouvelables

Une source d'énergie peut être considérée comme renouvelable si elle peut être régénérée ou renouvelée à l'échelle humaine. On recense donc l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et l'énergie géothermique. À l'origine de toutes ces énergies, nous trouvons les astres tels que le Soleil, la Terre et la Lune.

Le Soleil est une immense machine qui, chaque seconde, transforme des millions de tonnes de matière en chaleur. Ainsi, la température au centre s'élève à plusieurs dizaines de millions de degrés Celsius. Cette

chaleur est émise par rayonnement dans tout l'espace.

Une toute petite partie du rayonnement issu du Soleil est intercepté par la Terre. En une heure, le Soleil déverse sur la Terre l'équivalent de l'énergie que les humains consomment en une année. La quantité d'énergie reçue au sol durant une année est constante quelle que soit la météorologie. Cette énergie pourra être convertie en chaleur, en énergie mécanique ou en électricité, comme nous le verrons plus loin.

Ce rayonnement permet aux plantes de croître grâce à la photosynthèse. Cette formidable transformation de la matière à partir de la lumière est à l'origine de tous les végétaux et, par conséquent, de toute la biomasse. La biomasse regroupe donc toute matière organique produite à partir de processus biologiques : les espèces végétales terrestres et aquatiques, les résidus agricoles, les déchets d'élevage... Parfois, les déchets issus des activités humaines et industrielles sont ajoutés à cette catégorie. Le bois est le constituant principal de la biomasse solide. La combustion du bois dans une chaudière permet de chauffer des habitations ou d'alimenter un réseau de chaleur. La biomasse liquide est basée sur la filière huile végétale (palmier à huile, colza, tournesol, arachide) ou sur la filière alcool (canne à sucre, betterave, blé...). Cette biomasse liquide peut alors être utilisée en tant que carburant dans des moteurs thermiques. Actuellement, de nouvelles générations d'agrocaburant voient le jour avec la culture de micro-algues ou l'utilisation des parties végétales qui n'ont aucun débouché dans le secteur agroalimentaire. Précisons que la biomasse est considérée comme une source renouvelable si, par exemple pour

les espèces végétales, on replante plus que ce que l'on consomme.

Le cycle de l'eau est entretenu par la chaleur issue du rayonnement solaire. Sous l'effet de cette chaleur, l'eau s'évapore et forme ainsi les nuages. Les pluies alimentent les mers, les océans et les rivières. En ruisselant sur les pentes des montagnes, l'eau se retrouve dans les fleuves avant de se jeter dans la mer. L'exploitation de l'écoulement de cette eau dans les rivières est à l'origine de l'hydroélectricité, principale forme de production d'électricité d'origine renouvelable actuellement. L'exploitation de l'écoulement de l'eau en mer, qui se manifeste sous forme de courants marins est par contre encore très peu exploitée. L'énergie houlomotrice est l'énergie des vagues engendrées par l'action du vent sur la surface des mers et des océans. À cette élévation du niveau de l'eau s'ajoute celle provoquée par l'attraction gravitationnelle Terre-Lune et Terre-Soleil et qui n'est autre que la marée. On voit donc que l'énergie issue du mouvement de l'eau peut avoir diverses origines.

La chaleur issue du Soleil et captée au niveau du sol ou de la surface des océans contribue aussi à élever la température des masses d'air environnantes et, par conséquent, leur pression atmosphérique. La différence de pression existant entre deux masses d'air provoque un écoulement d'air entre elles. C'est le vent, source de l'énergie éolienne.

Enfin, la désintégration des éléments radioactifs contenus dans le noyau de la Terre dégage une chaleur telle qu'elle maintient le centre à une température de plus de 7 000 °C. L'énergie géothermique est cette énorme quantité de chaleur qui traverse les différentes couches. Elle se traduit par

des manifestations spectaculaires, telles que les volcans ou les sources hydrothermales, mais aussi par un gradient thermique. On constate, généralement, que la température varie de 1°C tous les 30 mètres lorsque l'on creuse vers le centre de la Terre.

Afin de mettre en évidence ces formes d'énergie, nous pouvons décrire par exemple, les positions relatives du Soleil et de la Terre, et plus précisément l'inclinaison de la Terre. En juillet, l'angle que fait l'axe de la Terre avec le Soleil est tel que le rayonnement solaire pointe avec plus de puissance sur l'hémisphère Nord. En effet, le rayonnement qui arrive sur la Terre se répartit sur une surface plus petite dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud. En décembre, c'est l'inverse, l'hémisphère Sud reçoit davantage d'énergie et la température est de manière globale plus élevée. Les saisons sont donc liées à l'inclinaison de la Terre et non pas à la distance Terre-Soleil.

La lumière qui arrive sur un objet est partiellement convertie en chaleur. Le rayonnement interagit donc avec la matière. Si nous soumettons des pâtes à modeler de différentes couleurs au rayonnement solaire, nous remarquons que la pâte noire se ramollit avant les autres. Le noir absorbe toutes les couleurs du rayonnement visible, il convertit ainsi en chaleur une grande partie de l'énergie contenue dans le rayonnement. *A contrario*, le blanc n'absorbe que très peu de rayonnement, il interagit faiblement avec la lumière. Nous pouvons par cette expérience mettre en évidence l'absorption du rayonnement par les pigments qui colorent la pâte à modeler et aussi mieux comprendre comment les surfaces des panneaux solaires sont réalisées.

Si, maintenant, nous plaçons plusieurs miroirs, nous concentrons le rayonnement

sur une cible. La grande quantité d'énergie reçue rend ainsi possible l'obtention de températures relativement élevées. Fondre des métaux tels que l'étain (250 °C), le zinc (420 °C), le bronze... devient alors réalisable. La concentration du rayonnement nécessite de bien orienter les miroirs. Il s'agit donc de suivre la trajectoire du Soleil dans le ciel afin que tous les miroirs renvoient le rayonnement sur la zone à chauffer.

Comment bénéficier de ces sources d'énergie ?

Explorons maintenant les moyens à mettre en œuvre pour exploiter les énergies renouvelables. Pour cela, partons de notre vie quotidienne pour aller jusqu'à la centrale de production d'électricité.

Le chauffage de l'eau par l'énergie solaire

Un chauffe-eau solaire consiste à coupler des capteurs solaires thermiques à un ballon de stockage d'eau. Un capteur solaire est constitué d'une surface sombre absorbant une très grande partie du rayonnement solaire et dans laquelle circule l'eau à chauffer. En isolant la face arrière et en plaçant une vitre en face avant, les pertes de chaleur sont réduites et l'efficacité améliorée. Pour dimensionner une installation (surface de capteurs, volume du ballon), il est nécessaire de connaître l'ensoleillement reçu. Pour un mois donné, la quantité d'énergie reçue est, en première approximation, quasi constante. Ainsi, il est possible d'évaluer, mois par mois, la production d'énergie d'un ensemble de capteurs solaires et l'économie réalisée.

Typiquement, une installation de 5 m² de capteurs solaires permet de satisfaire 40

à 70 % des besoins en eau chaude sanitaire d'une famille en France métropolitaine. Elle nécessite un appoint qui peut être une chaudière au bois, au fioul, au gaz ou électrique. Compte tenu des aides actuelles, la rentabilité financière est obtenue en 6 à 10 ans selon l'emplacement, l'ensoleillement, la consommation...

Si l'objectif est de réduire la consommation d'énergie fossile pour le chauffage de la maison, la surface de capteurs nécessaire sera plus élevée, de l'ordre de 20 m². La réduction de la consommation sera alors de 30 à 40 % selon les cas. Ainsi, en plus de chauffer l'eau, il est possible de chauffer en partie l'habitat.

La production d'électricité par panneaux photovoltaïques

L'énergie solaire photovoltaïque consiste à transformer directement la lumière provenant du soleil en électricité. L'effet photovoltaïque a été découvert par Antoine Becquerel en 1839 et expliqué par Einstein (ce qui lui a d'ailleurs valu le prix Nobel). Le rayonnement solaire provoque le départ d'électrons et donc la génération d'un courant électrique. Les matériaux susceptibles de convertir relativement efficacement l'énergie contenue dans la lumière en déplacement d'électrons sont de type semi-conducteur. Les semi-conducteurs ont la particularité de ne conduire l'électricité qu'à partir du moment où l'énergie incidente (l'énergie solaire) est suffisante. Ces matériaux sont généralement à base de silicium. On en fait des cellules d'une taille de quelques centimètres. L'assemblage de ces cellules conduit aux panneaux photovoltaïques.

Ces derniers permettent d'alimenter des pompes hydrauliques, des sources lumineuses (panneaux d'affichage, éclairage...), des

batteries afin de stocker l'énergie électrique et tout autre appareil électrique de puissance similaire. Pour un fort ensoleillement (de l'ordre de 1000 watts par m²), un panneau d'1 m² fournira au mieux de 100 à 150 watts (compte tenu des rendements actuels compris entre 10 et 15 %). Malheureusement, l'ensoleillement n'arrive pas souvent à ce niveau de puissance. Néanmoins, comme les cellules captent aussi bien le rayonnement issu directement du Soleil que le rayonnement diffus, c'est-à-dire provenant des réflexions sur les surfaces environnantes, elles délivrent un courant souvent suffisant pour recharger des batteries tout au long de l'année. Le stockage de l'électricité dans des batteries permet de s'affranchir des intermittences de l'ensoleillement et de satisfaire les besoins sans interruption. Il s'agit donc d'une source d'énergie intéressante pour les régions reculées qui ont des difficultés à accéder à toute autre forme d'énergie, en particulier fossile. Aussi, des surfaces de panneaux sont-elles installées sur les toits d'habitations ou de fermes isolées, non connectées au réseau électrique. Ces installations exigent de faire un inventaire drastique des besoins tout au long de l'année afin de dimensionner au plus près l'installation.

Dans le cas des installations reliées au réseau, l'esprit est tout autre ; il s'agit plutôt de contribuer à la production d'électricité à partir de sources renouvelables. L'intérêt est essentiellement économique et peut se justifier dans le cas d'utilisation de surfaces de toit ou de façades faciles à convertir. Le développement de la production photovoltaïque dans le domaine du bâtiment conduit de plus en plus à l'intégration architecturale des panneaux.

Lorsque le rayonnement est concentré, les températures atteintes sont plus élevées.



Or, avec une température plus haute, la chaleur a la possibilité d'être convertie en énergie mécanique de façon plus efficace. Ainsi, en associant un ensemble de miroirs appelés « héliostats », le rayonnement réfléchi est envoyé sur une surface noire. Cette surface peut alors absorber efficacement le rayonnement et le convertir en chaleur. Ensuite, il faut transmettre cette chaleur à un fluide, qui peut être de l'air, de l'eau ou de l'huile. Prenons l'exemple de l'eau. En montant en température, elle va se transformer en vapeur. Elle peut alors alimenter une turbine dans laquelle elle se détend et lui fournit ainsi de l'énergie mécanique. La conversion de l'énergie mécanique en électricité est assurée par un alternateur, qui est un système qui s'apparente à la fameuse dynamo de vélo. C'est ainsi que les centrales électrosolaires combinent la concentration par des miroirs à des cycles thermodynamiques rencontrés dans les autres systèmes de production d'électricité plus classiques. Notons qu'un cycle thermodynamique est en quelque sorte le circuit emprunté par un fluide qui subit un certain nombre de transformations

pour revenir à son état initial. Ces transformations se caractérisent par des variations de température, de pression et de volume utiles à la conversion d'une énergie en une autre.

La concentration nécessite de mettre en œuvre des miroirs à la géométrie adaptée. Il existe trois grands types de centrales associant la concentration à un cycle thermodynamique :

les centrales à tour, telles que celle de Thémis à Targassonne dans les Pyrénées-Orientales. Il s'agit d'un ensemble d'héliostats qui suivent

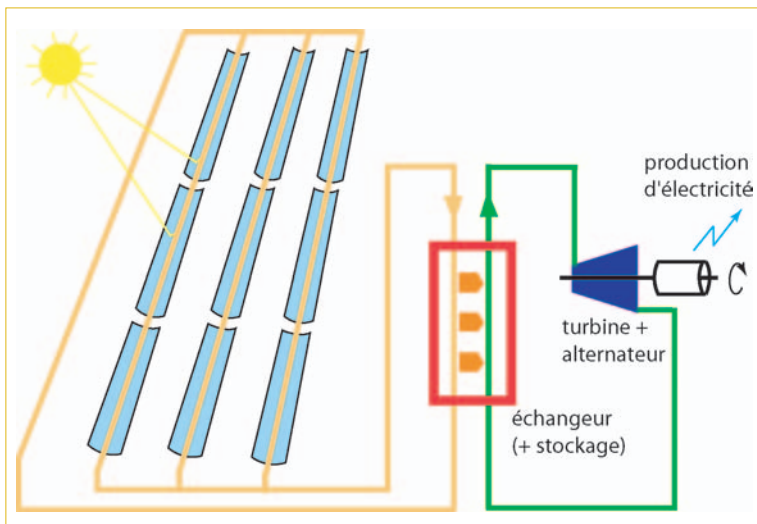
le Soleil tout le long de la journée. Ces héliostats réfléchissent le rayonnement sur un foyer, sorte de caisse ouverte au fond de laquelle un ensemble de tubes noirs collecte le rayonnement. Les tubes transmettent la chaleur au fluide qui y circule. La température peut monter à près de 1000 °C.

les paraboles Stirling, constituées d'un miroir parabolique au foyer duquel est placé un moteur Stirling. La forme parabolique permet de concentrer les rayons venant du Soleil en un point, la partie chaude du moteur Stirling qui atteint des températures de l'ordre de 500 à 800 °C. Ce moteur est basé sur la récupération du travail fourni par la dilatation d'un gaz sous l'effet de la chaleur.

les centrales à miroirs cylindro-paraboliques. La concentration est réalisée à l'aide de miroirs en forme de gouttière dont la courbure est calculée sur la base d'une parabole. Le rayonnement est concentré sur une ligne. Ainsi, l'énergie solaire est captée par un tube placé au foyer des miroirs. Ces miroirs suivent le Soleil au cours de la journée. Les températures atteintes sont

comprises entre 200 et 400 °C.

Par une double réflexion, les températures peuvent être encore plus élevées. C'est le cas par exemple du four solaire d'Odeillo, qui atteint des puissances de l'ordre du million de watts et des températures supérieures à 3000 °C. Le principe consiste à orienter les rayons du soleil à l'aide d'un ensemble de miroirs vers une grande parabole. Cette parabole, qui mesure 40 mètres de haut, renvoie à son tour le rayonnement vers une cible de quelques dizaines de centimètres. Cependant, le four n'est pas exploité pour la production d'énergie mais pour l'élaboration et la caractérisation de matériaux soumis à des conditions extrêmes de température. L'intérêt de ce grand instrument est de pouvoir solliciter



la matière dans des conditions totalement maîtrisées et souvent difficiles à reproduire par d'autres moyens.

La géothermie

La chaleur contenue dans les couches terrestres peut être mise à profit pour la production d'énergie. Compte tenu des immenses quantités de chaleur et de la température au centre de la Terre, la géothermie constitue



Il est possible de mettre en évidence la géothermie et en particulier celle à basse température malgré les faibles valeurs du flux de chaleur. La mesure de la température du sol (dans un bac à sable par exemple) à différentes profondeurs et à différents moments de la journée montre l'influence de l'énergie solaire absorbée par le sol et la température de l'air ambiant.

une source d'énergie inépuisable à l'échelle de l'humanité. Les principes de fonctionnement sont différents selon la profondeur et la température de la couche terrestre qui est sollicitée.

Le sol, en stockant l'énergie solaire dans les premiers mètres de profondeur, peut restituer la quantité de chaleur nécessaire pour faire fonctionner des pompes à chaleur avec des rendements élevés et permettre ainsi de chauffer efficacement les habitations. C'est le géosolaire. En pratique, un tube est placé dans le sol à moins d'un mètre de profondeur et recueille la chaleur de la terre. Ce tube joue le rôle de capteur horizontal. La chaleur récupérée évapore le fluide qui circule dans une pompe à chaleur. Afin de remonter la pression du fluide, la pompe à chaleur est munie d'un compresseur. Le fluide se condense alors et fournit de la chaleur à l'intérieur de l'habitat. La consommation d'électricité de ces pompes à chaleur est fortement réduite par rapport aux convecteurs électriques. Elle l'est d'autant plus que la température de la chaleur récupérée dans le sol est élevée.

Le cycle complet d'une pompe à chaleur est similaire à celui d'un système frigorifique tel qu'un réfrigérateur domestique ou un climatiseur. Il suit un enchaînement de quatre phases :

- évaporation
- compression
- condensation
- détente.

L'évaporation permet d'extraire de la chaleur au milieu environnant. Passé à l'état de gaz, la compression l'amène ensuite

dans des conditions telles qu'il puisse passer à l'état liquide. Cette condensation s'accompagne d'un dégagement de chaleur. Enfin, la détente conduit le liquide dans des conditions telles qu'il passe à l'état de gaz. Et le cycle peut alors recommencer.

Afin de bénéficier de plus fortes températures, des sondes géothermiques (dites aussi « capteurs verticaux ») sont implantées dans des forages de plus de 80 mètres de profondeur. Certaines pompes à chaleur géothermiques peuvent fonctionner l'hiver en mode chauffage et l'été en mode rafraîchissement. La géothermie est caractérisée par un flux de chaleur constant traversant les couches terrestres. Néanmoins, lors de l'exploitation d'un site et afin de préserver le caractère renouvelable, nous ne devons pas extraire davantage de chaleur que ce qui est apporté naturellement par le sous-sol et l'absorption du rayonnement solaire en surface.

L'exploitation de l'énergie géothermique à haute température se rencontre dans les endroits où l'affleurement du magma entretient des températures élevées. Un exemple français d'une telle exploitation est la centrale de Bouillante, en Guadeloupe, qui fournit près de 15 % de l'électricité de l'île. L'Italie a mis en place un grand nombre de centrales géothermiques qui exploitent la vapeur d'eau générée par la remontée du magma pour alimenter des turbines de production d'électricité.

L'énergie éolienne

L'objectif est de capter la force exercée par le vent sur des surfaces mobiles pour générer une énergie mécanique transformée ensuite



en électricité. La conception des pales repose sur la même technologie que celle mise en œuvre dans l'aéronautique. Il s'agit de développer une géométrie telle que la pale puisse convertir efficacement la force du vent tout comme l'aile d'avion qui exploite l'effort de portance. Les éoliennes les plus courantes sont à axe horizontal. Elles sont généralement constituées d'une nacelle comportant un rotor muni de deux ou trois pales. La nacelle est placée sur un pylône qui peut atteindre plus de 80 mètres de hauteur. Elle peut avoir la possibilité d'être orientée pour pouvoir bénéficier de vents quelle que soit leur direction. Le rotor actionne un multiplicateur de vitesse qui entraîne à son tour un alternateur. Les pales ont des diamètres de l'ordre de 100 mètres conférant à l'éolienne une puissance de l'ordre de 1000 à 2000 kW. Les performances atteintes par ces éoliennes sont parmi les meilleures.

Il existe d'autres types d'éoliennes. Certaines ressemblent à des bidons coupés en deux et décalés entre eux. D'autres sont constituées par deux ou trois lames (métalliques ou en matériau composite) profilées et assemblées autour d'un axe de rotation qui peut être vertical. Ces éoliennes ont la particularité de pouvoir fonctionner quelle que soit la direction du vent.

La puissance est proportionnelle à la masse volumique de l'air, à la surface balayée

(c'est-à-dire à la surface du disque couvert par les pales en rotation) et au cube de la vitesse de l'air. Un gisement éolien est intéressant si la vitesse du vent est souvent élevée et la plus constante possible. En mer, les vents vérifient souvent ces critères. Le potentiel du site et l'énergie que pourra fournir une éolienne sont évalués en mesurant la vitesse, la fréquence, la direction du vent tout au long de l'année. Une éolienne est caractérisée par une vitesse de démarrage, une vitesse nominale, à laquelle correspond la puissance nominale, une vitesse de coupure (vitesse maximale à partir de laquelle l'éolienne est mise en drapeau ou désorientée pour réduire l'effort exercé et éviter la rupture mécanique). Typiquement, les éoliennes tournent entre 20 et 30 % du temps à la puissance nominale.

L'énergie hydraulique

Les turbines hydrauliques installées dans les barrages ou les fleuves sont de différents types. Elles sont conçues pour exploiter au mieux l'écoulement de l'eau dû à la hauteur de la chute d'eau et de son débit. Par exemple, en région montagneuse, l'eau d'un barrage peut être récoltée par une conduite forcée. Celle-ci est un tube pouvant mesurer plus d'un mètre de diamètre et qui aura pour rôle d'amener l'eau plusieurs



L'expérimentation sur l'énergie liée aux courants marins ou aux vagues est aussi très enrichissante. Prenons l'exemple de la récupération de l'énergie des vagues. Dans un bac d'eau, générons des vagues. En plaçant un flotteur dans un tube vertical à demi enfoncé dans l'eau, nous remarquons un va-et-vient du flotteur que nous pouvons relier à une poulie. Une autre façon de procéder consiste à relier un flotteur à un pivot horizontal suffisamment désaxé et placé au dessus de l'eau. L'oscillation due à la vague provoque une rotation du pivot qui peut être convertie en un mouvement linéaire à l'aide d'une roue à cliquet. Le système Pelamis, basé sur ce phénomène, associe plusieurs paires de flotteurs qui sont articulés entre eux à l'aide de vérins hydrauliques.

centaines de mètres plus bas. L'énergie du jet d'eau issu de la conduite forcée est alors transformée en énergie mécanique de rotation grâce à une turbine Pelton. Pour des raisons d'efficacité, ce type de turbine est constituée d'un ensemble d'augets en forme de cuillère.

La biomasse

Les végétaux sont capables de capter l'énergie solaire pour fabriquer la matière nécessaire à leur croissance. Cette matière organique peut être utilisée directement. Il s'agit par exemple de la combustion du bois. Afin de réaliser une combustion propre et efficace, il est souvent intéressant de transformer la matière organique. Cette transformation peut consister à la putréfaction en vue d'obtenir du biogaz. Ce biogaz pourra alors être utilisé comme combustible dans une turbine à gaz. Comment peut-on produire du biogaz ? Des déchets tels que des épluchures, des croûtes de fromages, de l'herbe... peuvent très bien convenir. Placés dans un réservoir (bidon de 3 à 4 litres) fermé hermétiquement, ils vont pouvoir commencer à rentrer en putréfaction. En posant le réservoir sur une source de chaleur (30-35 °C) durant quelques semaines, les déchets se tassent et noircissent. Un ensemble de réactions chimiques associé à des bactéries dites « mésophiles » ont ainsi conduit à la dégradation de la matière organique. Se forme alors du biogaz, un mélange de méthane et de dioxyde de carbone. Attention,

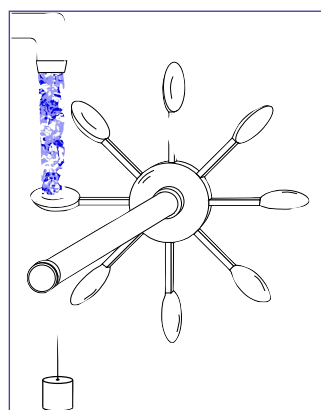
l'approche d'une allumette génère une flamme caractéristique de la combustion du méthane.

On peut aussi évoquer la transformation des graines végétales en carburant. Des réactions chimiques ou des distillations sont nécessaires afin d'aboutir à des substances utilisables dans les moteurs thermiques. En termes de contenu énergétique, la matière organique a des capacités analogues à celles des hydrocarbures. Ceci en fait une source d'énergie *a priori* très intéressante. L'inconvénient est de rentrer en concurrence avec le secteur alimentaire. De nouvelles générations d'agrocarburants sont développés afin de n'avoir que le secteur énergétique comme débouché et d'occuper le moins de place possible pour ne pas mettre en péril les cultures destinées à l'alimentaire. On peut citer les micro-algues, mises en cultures dans des réservoirs sous le soleil.

Enfin, le bois est la matière végétale solide utilisée depuis très longtemps en tant que combustible. De nouvelles technologies sont conçues pour convertir le bois en énergie de façon encore plus efficace. On peut noter les chaudières brûlant des granulés obtenus par compression des déchets de l'industrie du bois. La transformation du bois en substances gazeuses constitue aussi une voie intéressante pour obtenir une combustion plus propre du bois. Dans ce secteur, on assiste actuellement à l'apparition de nombreuses innovations technologiques contribuant à la valorisation énergétique des déchets végétaux.



La récupération de l'énergie issue de l'écoulement de l'eau est intéressante car la masse volumique de l'eau est environ 700 fois plus élevée que celle de l'air. La mise en évidence de cette forme d'énergie est plus aisée que pour l'éolien alors que les vitesses sont souvent plus faibles. Les pales d'une turbine peuvent être obtenues à partir de cuillères en plastique (voir le schéma ci-contre). Cette turbine peut avoir comme axe un bouchon aux extrémités duquel nous aurons planté deux clous. Placé sous un robinet, ce montage met en évidence la conversion de l'énergie liée à l'écoulement de l'eau en énergie de rotation. Cette énergie peut mettre en mouvement un petit poids via un système de poulie.



Conclusion

Les énergies renouvelables ont été les principales sources d'énergie durant des siècles. Remplacées par les énergies fossiles depuis le XIX^e siècle, elles reviennent sur le devant de la scène du fait de notre prise de conscience quant à l'épuisement des ressources fossiles et à la dégradation de l'environnement. L'exploitation des énergies fossiles nous a permis de nous extraire des contraintes liées au caractère bien souvent diffus et intermittent des énergies renouvelables. En effet, la quantité d'énergie susceptible d'être exploitée à partir d'une tonne d'eau qui tombe de 300 mètres de haut est équivalente à la combustion de 100 grammes de pétrole. Autre exemple illustratif, l'énergie solaire reçue par ciel clair sur un mètre carré pendant une heure est comparable à la chaleur dégagée par 0,05 milligrammes d'uranium radioactif. Lorsque des nuages arrivent, l'ensoleillement chute et l'énergie reçue au sol diminue fortement. La vitesse du vent, et donc la production d'électricité d'une éolienne, est elle aussi très fluctuante. Le caractère aléatoire de la météorologie pénalise ces systèmes à énergie renouvelable. Afin de répondre aux demandes en énergie, il s'avère nécessaire de développer des systèmes d'appoint qui permettent de combler les manques inéluctables et de mettre en œuvre des moyens de stocker l'énergie. Ainsi, l'exploitation des énergies renouvelables implique des investissements souvent plus lourds. L'utilisation des énergies renouvelables nous conduit à revoir notre système énergétique et à mieux adapter la production aux réels besoins. De nouvelles problématiques à la

fois scientifiques, techniques, économiques, environnementales s'entrechoquent et rendent forcément plus délicat le passage à des systèmes de production à partir d'énergies renouvelables. Pourtant, il s'avère nécessaire d'investir dans ces énergies pour préparer ce que certains appellent l'« après-pétrole », et donc notre avenir.

Cet avenir devra reposer sur la pluralité des sources d'énergie, chacune ayant des avantages et des inconvénients.

Mais le choix de ces énergies n'est pas que technologique, économique ou environnemental. Il est aussi, et surtout, social : l'accès à l'énergie est une composante essentielle dans l'organisation de la société. Or, pour arriver à orienter cette dernière vers un système énergétique respectueux de l'environnement, viable économiquement et acceptable socialement, le défi est essentiellement politique.

Il s'agit d'un véritable enjeu de civilisation.

Bibliographie

- Paul MATHIS, *Les énergies renouvelables ont-elles un avenir ?*, « Les Petites Pommes du savoir », n°45, Le Pommier, 2004.
- Jean-Christian LHOMME, *Les énergies renouvelables*, Delachaux & Niestlé, 2004
- Patrick PIRO, *Guide des énergies vertes pour la maison*, Terre vivante, 2006.
- Francis MEUNIER, *Adieu pétrole - vive les énergies renouvelables !*, Dunod, 2006.
- Marek WALISIEWICZ, *Les énergies renouvelables, un guide d'initiation sur les énergies du futur*, Pearson Education France, 2^e édition, 2007.