

ET SI ON VIVAIT AUTREMENT ?

1€

Les  
**Energies**  
renouvelables



Nature  
& Découvertes



# Collection « Et si on vivait autrement ? »

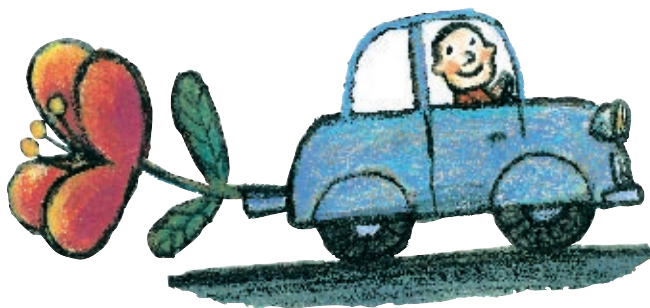
Ces guides présentent des informations sur notre environnement proche, à la fois précises, « exemplaires » et dénuées de tout catastrophisme. Ces informations, privilégiant une approche active et participative, ont pour but d'offrir des outils de réflexion et de choix, pour des citoyens qui ne sont pas seulement des consommateurs, mais aussi des acteurs décideurs à leur échelle. Des personnes qui ont leur conscience, leur libre arbitre et leur capacité d'agir. À chacun, donc, de faire ses choix, pour vivre autrement, dans le plus grand respect de l'environnement...

## sommaire

Énergies et réchauffement climatique . 2	La géothermie ..... 18
Petite histoire de l'énergie.....2	L'enfer sous nos pieds.....18
Le CO <sub>2</sub> et l'atmosphère .....2	Géothermie de haute énergie .....19
CO <sub>2</sub> et changement climatique .....3	Géothermie de basse énergie.....19
Des émissions différentes par pays .....3	Les pompes à chaleur .....20
D'où viennent les énergies	L'énergie solaire ..... 22
renouvelables ?.....3	La longue histoire
Renouvelables et propres ? .....4	de l'énergie solaire .....22
Des potentiels variables .....5	Le grand retour du solaire .....23
La planète renouvelable d'aujourd'hui.....5	Les engins solaires .....23
La biomasse..... 6	Centrales solaires thermiques.....24
La photosynthèse .....6	Capteurs solaires
Première ressource	basse température .....26
renouvelable mondiale ? .....6	Architecture bioclimatique .....27
Bois-énergie en Europe.....7	Le photovoltaïque .....29
La France et son bois .....7	L'énergie du vent..... 32
De la qualité du bois .....8	Les vents de la Terre .....32
Cheminées ou poêles ? .....8	Bateaux et moulins .....32
Chauffage central et chaudières à bois...8	Vent d'aujourd'hui.....33
Des aides importantes .....9	Une éolienne, qu'est-ce que c'est ? ...34
Huiles et agrocarburants.....10	Au fil du vent .....34
Agrocarburants à base d'alcools .....10	Le monde de l'éolien .....35
Des résultats décevants .....10	Les petites éoliennes .....36
E85 et voitures « Flexfuel » .....11	L'éolien en débat .....37
Agrocarburants	L'énergie en 2050..... 40
de seconde génération .....11	La réduction des besoins
Méthane et biogaz .....12	en énergie .....40
Des sources variées .....12	Un meilleur aménagement
Des avantages marqués .....13	de la ville .....40
L'énergie de l'eau ..... 14	La maison à énergie positive .....41
La longue histoire des roues à eau .....14	Le basculement des transports.....42
Centrales hydroélectriques	Une agriculture proche
et barrages.....15	du consommateur.....42
L'énergie des mers.....16	Le vecteur hydrogène .....43
Les petites centrales	Vers de nouvelles énergies ? .....44
hydroélectriques (PCH).....16	Pour aller plus loin .....46
Une implantation difficile .....16	Index.....48

ET SI ON VIVAIT AUTREMENT ?

# Les Énergies renouvelables



textes de Robert Pince  
dessins de Lionel Le Néouanic



Nature  
& Découvertes

# Énergies et réchauffement climatique



**L'utilisation très importante depuis deux siècles des énergies fossiles, faites d'accumulations d'animaux ou de plantes très anciennes, a provoqué une augmentation continue du pourcentage de CO<sub>2</sub> présent dans l'atmosphère. Le changement climatique qui en résulte nous impose désormais d'utiliser plus souvent les énergies renouvelables.**

## Réchauffement

Depuis un siècle, plusieurs facteurs jouent sur le climat de la Terre, soit pour le réchauffer (émissions de CO<sub>2</sub>, de méthane, etc.) soit pour le refroidir (aérosols, nuages, etc.). Le bilan global est déséquilibré du côté du réchauffement et estimé entre 0,5 et 1 W/m<sup>2</sup>. Ce déséquilibre paraît faible, mais devrait augmenter à terme la température moyenne de la Terre de 1,2 °C (actuellement, l'augmentation est de 0,75 °C).

2

## Petite histoire de l'énergie

Jusqu'en 1800 environ, les besoins énergétiques de l'humanité sont assurés en quasi-totalité par des énergies renouvelables : le feu dès la préhistoire, la force motrice des animaux, puis le vent et l'eau avec les bateaux à voile et les norias, suivis des moulins à vent ou à eau. C'est seulement au XIX<sup>e</sup> siècle que l'utilisation des énergies fossiles se développe, d'abord avec le charbon, puis avec le pétrole, enfin avec le gaz et le nucléaire dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle. Cette révolution énergétique accompagne et accélère la révolution industrielle. Si bien qu'un habitant d'une société industrielle consomme 115 fois plus d'énergie que celui d'une société dite primitive.

Source : Agence internationale de l'énergie

## Le CO<sub>2</sub> et l'atmosphère

La combustion des carburants fossiles se traduit par le rejet dans l'atmosphère de divers gaz et en particulier du CO<sub>2</sub> ou dioxyde de carbone. Ce gaz, qui ne présente aucun danger pour

la santé humaine, a été présent autrefois en très grandes quantités (90 %) dans l'atmosphère de la Terre. Mais le vivant, et en particulier le plancton des océans, a contribué à la fixation de ce carbone sous forme de carbonates, si bien que l'atmosphère « normale » n'en contient plus « naturellement » que des quantités infimes : 0,027 %, soit 270 parties par million en volume.

## CO<sub>2</sub> et changement climatique

Grâce à l'analyse de « carottes », ces cylindres de glace prélevés dans les profondeurs de l'Antarctique, ainsi que par des mesures directes menées à Mauna Loa (Hawaï), nous savons aujourd'hui que le taux de CO<sub>2</sub> a oscillé régulièrement entre 180 et 290 ppm pendant les derniers 400 000 ans. Puis, il a commencé à augmenter vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, pour atteindre 367 ppm aujourd'hui. Et comme malheureusement le CO<sub>2</sub> est un gaz à « effet de serre » qui a la propriété de « piéger » la chaleur dans l'atmosphère, l'augmentation du pourcentage de CO<sub>2</sub> est en grande partie responsable du réchauffement climatique observé aujourd'hui.

## Des émissions différentes par pays

Si l'on examine les émissions de CO<sub>2</sub> exprimées en « équivalent carbone » par habitant dans les divers pays du monde (année 2002), on constate qu'elles sont extrêmement différentes : Qatar, 15 tonnes ; USA, 5,5 ; Japon 2,5 ; France 1,7 ; Chine 0,74 ; Inde 0,3 ; Côte d'Ivoire 0,11 ; Rwanda 0,0002...

Source : Division statistique des Nations unies.

## D'où viennent les énergies renouvelables ?

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle suffisamment vite pour qu'elle puisse être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'humanité. La plupart des énergies, qu'elles soient fossiles ou renouvelables, proviennent des réactions de fusion nucléaire présentes dans le cœur du soleil : seules la géothermie (chaleur de la Terre) est liée à la désintégration

## Serviteurs énergétiques

L'énergie fossile nous fournit, même pour les plus modestes d'entre nous, une quantité d'énergie très importante : un peu comme si le nombre de serviteurs et d'animaux qui se trouvent à notre service avait beaucoup augmenté. Ainsi, la possession d'un simple cyclomoteur représente l'équivalent de 15 serviteurs en train de pédaler. En France, chacun de nous dispose en permanence de l'équivalent d'un peu moins de 100 personnes : 26 pour les transports, 20 pour l'agriculture, 17 pour l'industrie, 16 pour l'électricité, 4 pour le chauffage, 3 pour les raffineries et centrales, 2 pour l'eau chaude.

## À CONSULTER

Fiche explicative sur l'effet de serre  
> <http://www.ecologie.gouv.fr>

3

**La Suède et la fin du pétrole**

La Suède veut être le premier pays au monde à éliminer complètement le pétrole comme combustible, en se concentrant sur les sources d'énergie renouvelables. Pour se libérer des combustibles fossiles avant 2020, le pays a pris des mesures fiscales en faveur des combustibles renouvelables, investit dans le chauffage par quartier (géothermique ou biomasse), et vise à devenir une société renouvelable. Aujourd'hui, les sources renouvelables assurent 26 % du total de son approvisionnement en énergie.

**Réduire les émissions de CO<sub>2</sub>**

Pour éviter d'enrichir l'atmosphère en gaz carbonique, il faut que les émissions humaines ne dépassent pas ce que les « puits de carbone », que constituent les océans et les écosystèmes continentaux, sont capables d'absorber. Il faut donc n'émettre que 3 milliards d'équivalent carbone par an pour le CO<sub>2</sub> : ce qui correspond pour 6 milliards d'individus, et si nous répartissons équitablement les efforts, à 500 kg d'équivalent carbone par habitant et par an.

Pour y parvenir, les efforts de chaque pays seront bien différents : le Qatar doit donc diviser ses émissions par 30, les USA par 11, le Japon par 5, la France par 3,4, la Chine par 1,5, etc.

Ainsi, avec les technologies d'aujourd'hui, il suffit de faire un simple aller-retour Paris-New York en avion pour consommer entièrement le droit annuel maximal de chacun de nous à émettre sans perturber le climat ! Plutôt que de mesurer le poids de gaz carbonique émis, on utilise l'équivalent carbone, c'est-à-dire le seul poids du carbone contenu dans le CO<sub>2</sub>.

naturelle des roches de la croûte terrestre, tandis que l'énergie marémotrice (énergie des marées) provient des mouvements respectifs des astres, comme la Terre, la Lune et le soleil.

**Renouvelables et propres ?**

Une filière énergétique « propre » doit avoir un fonctionnement sans impact sur l'environnement, et ne pas produire de déchets.

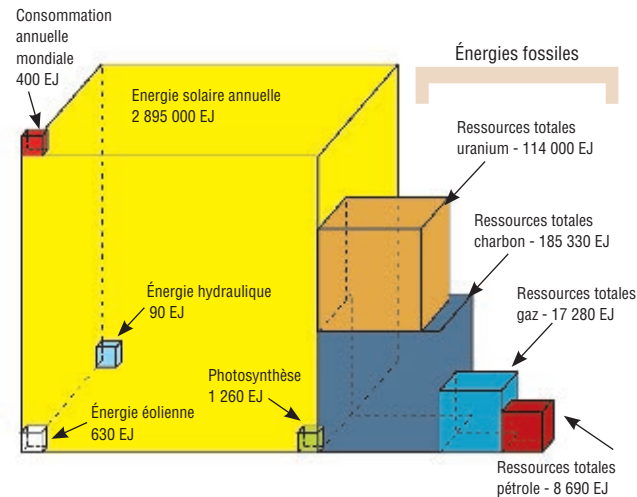
*Énergies renouvelables et propres ne coïncident pas toujours.*

Renouvelables et propres ne coïncident donc pas toujours. La production d'électricité dans une centrale à charbon avec filtrage des fumées et piégeage du CO<sub>2</sub> est une filière propre utilisant une énergie fossile, tandis que le solaire photovoltaïque utilise une énergie renouvelable mais génère des déchets contenant par exemple du cadmium ou du tellure qui doivent être recyclés en fin de vie.

**Des potentiels variables**

La planète Terre reçoit chaque année du soleil une énorme quantité d'énergie, soit 2 895 000 exajoules (10<sup>18</sup> joules), alors que les hommes (pendant le même temps) consomment au total 400 exajoules, soit à peine les 7 millièmes de cette énergie. L'énergie solaire possède donc un énorme potentiel, à comparer avec celui de l'hydraulique (90 EJ), de l'éolien (630 EJ) et de la photosynthèse (1 260 EJ). L'ensemble des réserves estimées d'énergies fossiles représente approximativement : charbon (185 330 EJ), uranium (114 000 EJ), gaz (17 280 EJ) et pétrole (8 690 EJ).

Source : « Resources of the Earth : origin, use and environmental impact » de J. R. Craig, D. J. Vaughan et B. J. Skinner, Prentice Hall (1996).



**La planète renouvelable d'aujourd'hui**

La contribution des énergies renouvelables à l'approvisionnement énergétique mondial est encore bien faible : bois et biomasse solide (végétaux et déchets) fournissent 11 %, l'hydroélectricité 2,4 %, la géothermie 0,47 %, l'utilisation de déchets municipaux 0,2 %, les agrocarburants 0,11 %, le biogaz 0,05 %, le solaire thermique 0,04 %, l'éolien 0,02 %, l'énergie marémotrice et le photovoltaïque étant encore au-dessous de 0,001 % ! Au total, la contribution des énergies renouvelables représente 14,46 % de l'approvisionnement mondial.

**Conditions géographiques et énergies renouvelables**

L'énergie renouvelable est par nature diffuse et irrégulière. D'où la nécessité de tenir compte des conditions géographiques plus ou moins favorables. Ainsi, la Grande-Bretagne est favorisée pour l'éolien, l'Islande pour la géothermie, les pays du Sud pour l'énergie solaire thermique ou encore photovoltaïque (conversion directe de la lumière en énergie par l'intermédiaire de semiconducteurs)...

À CONSULTER  
Énergies renouvelables d'aujourd'hui  
> [http://www.manicore.com/documentation/part\\_eolien.html](http://www.manicore.com/documentation/part_eolien.html)

# La biomasse

**La biomasse constitue l'ensemble des matières organiques produites grâce à l'énergie solaire, qui peuvent devenir des sources d'énergie. La biomasse peut être utilisée soit directement (bois-énergie), soit après une méthanisation de la matière organique (biogaz) ou de nouvelles transformations chimiques (agrocarburants).**



## Forêts de France

Les surfaces de forêt françaises sont passées de 9 millions d'hectares au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle à 11 millions d'hectares en 1950, puis à 15,5 millions d'hectares en 2005, grâce à l'expansion de la mécanisation agricole qui permet une production plus importante sur des parcelles plus réduites.

6

## La photosynthèse

La photosynthèse est le processus qui permet aux plantes de pousser en exploitant l'énergie solaire. C'est une fabrication de matière carbonée organique à partir de carbone minéral (CO<sub>2</sub>) en présence de lumière. Les besoins nutritifs de la plante sont le dioxyde de carbone de l'air, l'eau et les minéraux du sol. Au cours de cette photosynthèse, la plante prélève donc du gaz carbonique dans l'air et rejette de l'oxygène.

## Première ressource renouvelable mondiale ?

Le bois et la biomasse solide sont la première ressource renouvelable, avec 77 % du total des énergies renouvelables mondiales. Cependant, il convient de préciser que le bois n'est pas nécessairement une énergie renouvelable : pour que ce soit le cas, il faut que le volume de bois coupé ne soit pas supérieur à l'accroissement naturel de la forêt, afin d'éviter toute déforestation. À cette condition (mais elle est impérative), le bois est effecti-

vement une ressource renouvelable, et l'arbre lorsqu'il repousse réabsorbe tout le CO<sub>2</sub> qui a été émis lorsque le bois coupé précédemment a brûlé.

## Bois-énergie en Europe

Si la France se situe au premier rang de l'UE à 15 pour la consommation de bois-énergie en 2003 (soit 20 % de la consommation totale de l'UE à 15), elle n'occupe que le sixième rang pour sa consommation par habitant, loin derrière la Finlande, la Suède et l'Autriche.

Source : EUROSTAT, guide statistique de l'Europe

## La France et son bois

La forêt en France couvre 15,5 millions d'hectares, soit 28 % du territoire national. L'accroissement naturel de cette forêt produit chaque année 87 millions de m<sup>3</sup> de bois, qui sont ensuite utilisés soit dans la filière bois (sciage, construction, ameublement, pâte

### Le label NF bois chauffage

Ce label fournit les quatre informations nécessaires pour estimer la qualité du bois :

**1** - le groupe d'essences, classé en trois groupes en fonction de la chaleur qu'on peut tirer d'un volume de bois donné :

- groupe 1 (chêne, charme, orme, hêtre, frêne, érable)
- groupe 2 (châtaignier, robinier faux-acacia, merisier et fruitiers divers)
- groupe 3 (peuplier, bouleau, platane...)

**2** - la longueur ;

**3** - la quantité livrée en stères ;

**4** - le niveau d'humidité : 20 % pour la classe d'humidité H1 (bois sec prêt à l'emploi) et 35 % pour H2 (bois à stocker avant utilisation). Pour obtenir un bois sec, à 20 % d'humidité, à partir d'un bois de classe H2, il faut le stocker à l'extérieur, sous un abri bûcher, ou encore sous une bâche, en veillant bien à laisser les côtés ouverts. Le temps de séchage minimum sous abri est alors de 15 à 17 mois.

### Le stère

Le stère (symbole st) est une unité de mesure de volume utilisée pour les bois (de chauffage et de charpente). Le stère équivaut à un mètre cube « apparent », soit un empilement de rondins de 1 m de long qui forment un cube d'un mètre de côté. Une valeur donnée en stères fournit le volume apparent du bois, car elle ne tient pas compte de l'espace existant entre les bûches.

Ainsi, 1 stère en 1 m de long correspond à 1 m<sup>3</sup> ; mais si l'on recoupe les rondins en 2, on n'obtient plus qu'un volume de 0,80 m<sup>3</sup> et si les rondins sont recoupés en 3 un volume de 0,70 m<sup>3</sup> ! Car plus les bûches sont courtes, plus le tas de bois « se tasse », et moins il y a de vides entre les bûches.

### À LIRE

**Se chauffer au bois**  
par P.-J. Bellin  
Éd. Eyrolles.

7

### Le label Flamme verte

Les principaux constructeurs d'appareils de chauffage au bois, avec le concours de l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et du Gifam (Groupement interprofessionnel des fabricants d'appareils ménagers) ont signé la charte qualité « Flamme verte » : les entreprises concernées s'engagent à commercialiser des appareils économiques et sûrs, dont les performances énergétiques et environnementales sont élevées. Pour plus de renseignements, consulter le site : [www.flammeverte.org](http://www.flammeverte.org)

à papier), soit dans la filière « bois-énergie » pour se chauffer ; 35 millions de m<sup>3</sup> sont ainsi brûlés chaque année. Les feuillus durs (chêne, hêtre, frêne, charme, noyer, fruitiers...) sont les plus appréciés pour le chauffage domestique. Les feuillus tendres et les résineux (peuplier, saule, sapin, pin, épicéa...) ont l'inconvénient de brûler rapidement mais l'avantage de monter plus vite en température.

Source : Guide pratique ADEME « Le chauffage au bois »

## De la qualité du bois...

Il ne suffit pas de bien choisir l'essence de bois à brûler, il faut encore éviter d'utiliser du bois humide, pour des raisons environnementales (la combustion d'un bois vert libère des substances polluantes), d'efficacité (le bois humide fournit deux fois moins d'énergie) et pour des raisons d'entretien (encrassement plus rapide et risque de détérioration du matériel).

Enfin, l'utilisation de bois de récupération (chantiers, vieux meubles) – qui contient souvent des produits de traitement, des vernis ou des peintures – libère dans l'atmosphère de nombreux polluants : à éviter !

## Cheminées ou poêles ?

La présence d'une cheminée ouverte déjà installée dans un appartement ou une maison permet d'envisager sa modernisation en y installant un insert : celui-ci, dont la taille et la géométrie dépendent de l'ouverture du conduit et de la disposition de la cheminée, permet de doubler le rendement et de faire passer l'autonomie à 10 heures et plus. Sinon, un simple conduit de fumée permet l'installation d'un poêle à bûches de conception récente : il sera fabriqué en acier et fonte, ou encore en fonte et matériaux réfractaires. Les premiers ont un rendement assez élevé en régime normal, mais une inertie thermique limitée et un rendement plus faible au ralenti. Les seconds sont les plus performants, avec des rendements élevés et une inertie thermique importante.

## Chauffage central et chaudières à bois

Les chaudières à bûches sont bien adaptées au chauffage central de grandes maisons. Elles peuvent fonctionner en tirage na-

tural ou encore en tirage forcé grâce à l'utilisation d'un ventilateur. Les plus performantes sont les chaudières dites « turbo » qui utilisent une turbine pour admettre l'air du foyer, ou bien un extracteur qui aspire les fumées.

Ce sont celles qui procurent le meilleur rendement, avec des valeurs comprises entre 75 et 85 %. Certaines chaudières installées en milieu rural utilisent du bois déchiqueté (les plaquettes), tandis que des chaudières à alimentation automatique brûlent des granulés de sciure compactée : on peut obtenir ainsi une autonomie de trois jours lorsque la température n'est pas trop basse.

## Des aides importantes

La fourniture et l'installation d'un poêle à bois ou d'une chaudière individuelle à bois, ainsi que l'achat du bois de chauffage bénéficient d'un **taux réduit de TVA à 5,5 %**.

Si le rendement du poêle ou de la chaudière à bois dépasse 65 %, et s'il respecte les normes françaises et européennes, l'acheteur peut bénéficier d'un **crédit d'impôt de 50 %** des dépenses TTC payées entre le 1<sup>er</sup> janvier 2006 et le 31 décembre 2009 (ces dépenses s'entendent hors main-d'œuvre). Sous certaines conditions, en particulier de ressources, l'Anah (Agence nationale de l'habitat) peut accorder une **subvention** pour l'installation d'un appareil de chauffage au bois labellisé Flamme verte, ou de toute chaudière à bois.

Enfin, certains conseils régionaux encouragent l'utilisation d'appareils de chauffage au bois en accordant eux aussi des subventions aux futurs utilisateurs.

### L'impact des fumées

Les fumées qui se dégagent d'un foyer sont une source importante de polluants dans l'atmosphère : on y trouve du monoxyde de carbone (CO), des composés organiques volatils (COV), des particules fines, des oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et des hydrocarbures aromatiques polycycliques.

### La cogénération urbaine

La cogénération est une technique permettant de produire de la chaleur et de l'électricité à partir d'une même source de combustible (bois, déchets, biogaz, gaz naturel, etc.) et avec un minimum de perte d'énergie. Contrairement à une centrale électrique classique où les fumées sont directement évacuées par la cheminée, les gaz d'échappement de la cogénération sont d'abord refroidis, cédant leur énergie à un circuit d'eau chaude ou de vapeur. Ces centrales peuvent atteindre un rendement énergétique de l'ordre de 90 %. Ainsi, la chaufferie de Felletin, située en Limousin, a été mise en place en 2003 : elle utilise les déchets de bois produits par les scieries de la région pour alimenter ses abonnés en eau chaude, tout en produisant 2,8 à 3,5 MW d'électricité revendus à EDF. Depuis les années 1990, la ville de Francfort mise sur la cogénération urbaine : en 2002, la ville comptait 70 centrales de cogénération fournissant une énergie totale de 24 000 kW. La centrale du jardin botanique assure l'approvisionnement en chaleur de toutes les serres, avec un rendement total de plus de 95 %.

### Des carburants sans émissions de GES ?

On pourrait penser que les agrocarburants sont neutres du point de vue de l'effet de serre : en effet, le CO<sub>2</sub> libéré dans l'atmosphère par les véhicules roulant aux agrocarburants a été pompé précédemment par la biomasse qui a servi à les fabriquer. Malheureusement, les tracteurs, les engrais, les procédés de distillation consomment de l'énergie fossile. Dans le meilleur des cas, on peut simplement éviter 30 % environ des émissions de GES d'un carburant fossile.

## Huiles et agrocarburants

Des combustibles peuvent être fabriqués à partir de plantes oléagineuses, essentiellement le colza et le tournesol. On peut fabriquer de « l'huile pure » en pressant directement la graine, et utiliser directement cette huile (après filtration) dans les moteurs diesel existants. On peut aussi faire réagir cette huile avec de l'alcool méthylique pour obtenir de l'ester méthylique d'huile végétale (EMHV). Cet EMHV est rarement utilisé pur mais incorporé au gazole (dans des proportions qui peuvent atteindre 30 %) pour donner du diester.

## Agrocarburants à base d'alcools

Les cultures qui fournissent des matériaux susceptibles de fermenter peuvent permettre d'obtenir des alcools : ce sont les cultures sucrières (comme la betterave ou la canne à sucre) et celles qui fournissent de l'amidon (puisque l'amidon, par hydrolyse, donne du sucre). Les alcools obtenus peuvent être utilisés purs, en modifiant les moteurs de voitures, ou transformés en les faisant réagir avec l'isobutène : on obtient alors l'ETBE (Ethyl tertio butyl éther) et le MTBE (Methyl tertio butyl éther).

## Des résultats décevants

L'énergie brute (en tonnes équivalent pétrole ou TEP) produite par hectare d'agrocarburant cultivé est pour l'huile de colza 1,37 ; l'huile de tournesol 1,06 ; l'éthanol de betterave 3,98 ; l'éthanol de blé 1,76 : à comparer aux 3 TEP produites par hectare de forêt.

Malheureusement, il convient de soustraire de cette énergie brute l'énergie nécessaire pour fabriquer les engrais, réaliser les cultures et mettre en œuvre les procédés de distillation éventuellement nécessaires. L'énergie nette produite par hectare n'est plus alors que de 0,87 tonne équivalent pétrole pour le colza, 0,77 pour le tournesol, 0,76 pour la betterave et 0,04 seulement pour le blé. Finalement, si la France voulait simplement produire la consommation actuelle des transports avec des agrocarburants, il lui faudrait

*Soustraire l'énergie nécessaire pour fabriquer les engrais...*

mobiliser 3 à 4 fois la surface totale de ses terres agricoles... Sans oublier que les agrocarburants posent plus globalement un problème planétaire, puisque leur culture entraîne la déforestation (c'est le cas de l'huile de palme en Indonésie), entre en compétition directe avec l'agriculture traditionnelle et risque donc d'accroître la faim dans le monde.

## E85 et voitures « Flexfuel »

En Europe, le carburant E85 constitué d'un mélange de 85 % d'éthanol et de 15 % de super sans plomb 95 est en plein essor, avec un développement important du nombre de pompes installées. Ce carburant doit être impérativement utilisé dans des véhicules « flexfuel » qui peuvent consommer indifféremment SP 95 ou E85. L'avantage du système est un prix à la pompe moins élevé (fiscalité allégée) et des émissions de GES par litre consommé moins importantes (30 % environ dans le meilleur des cas), mais au prix d'une surconsommation de l'ordre de 25 % : le gain en émission de GES est donc faible.

## Agrocarburants de seconde génération

D'intenses recherches sont menées un peu partout dans le monde, pour mettre au point de nouveaux agrocarburants. On peut ainsi citer la transformation de la lignine et de la cellulose (du bois ou de la paille) pour produire industriellement de

### À CONSULTER

Agrocarburants  
> [http://www.manicore.com/documentation/carb\\_agri.html](http://www.manicore.com/documentation/carb_agri.html)



### Interview

### Fabrice Nicolino

Auteur du livre *La Faim, la bagnole, le blé et nous* aux Éditions Fayard

***Vous avez récemment écrit un livre très hostile aux agrocarburants. Pourriez-vous nous préciser pourquoi ?***

D'abord, pour une raison morale : alors que de nombreux habitants de la Terre souffrent de malnutrition ou de famine, l'idée que des plantes alimentaires puissent être détournées de leur utilisation naturelle, et cesser de nourrir des humains pour être consommées par nos voitures m'est tout simplement insupportable... D'autre part, cette « solution » au problème du rejet dans l'atmosphère des gaz à effet de serre n'en est pas une : Paul Crutzen, Prix Nobel de chimie 1995, affirme dans une étude récente publiée dans la revue *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* que le développement massif

de la production d'agrocarburants augmenterait fortement les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Enfin, on plante aujourd'hui massivement partout dans le monde des palmiers à huile, du manioc, du soja, du maïs, etc., pour produire des agrocarburants, ce qui provoque une déforestation catastrophique. Les agrocarburants, tels qu'ils sont développés aujourd'hui dans le monde entier, sont donc responsables d'un problème planétaire. Je partage tout à fait l'opinion de Jean Ziegler, rapporteur spécial pour le droit à l'alimentation de l'ONU, qui a réclamé un moratoire de 5 ans sur leur culture et n'a pas hésité à affirmer : « Dans ce monde tel qu'il est aujourd'hui, brûler de la nourriture et la transformer en carburant, c'est un crime contre l'humanité. »



## Biogaz au Danemark

Le Danemark a développé à la fin des années 1980 des programmes de méthanisation des lisiers d'élevages de porc et des déchets industriels dans des unités collectives centralisées.

Les producteurs sont généralement regroupés en coopératives et produisent environ 25 millions de m<sup>3</sup> de biogaz par an, ce qui permet de fournir chaleur et électricité aux foyers et d'envoyer le surplus sur le réseau. Sur la cinquantaine d'installations centralisées en fonctionnement en Europe, 25 sont au Danemark, une dizaine en Allemagne, quelques-unes au Royaume-Uni, en Suède, Italie Portugal.

Leur production totale est de l'ordre de 43 000 TEP par an. (Source : Jens-Bo Holm-Nielsen, *The future of Biogas in Europe, a general overview*).

l'alcool cellulosique. Ou encore l'utilisation de *Jatropha curcas*, un arbuste qui produit de l'huile et pousse sur des sols impropres aux cultures ou de *Pongamia pinnata*, un arbre lui aussi producteur d'huile qui résiste à la sécheresse et supporte les sols salés.

*D'intenses recherches sont menées pour mettre au point de nouveaux agrocarburants.*

Enfin, c'est probablement à partir de la culture de microalgues en atmosphère enrichie en CO<sub>2</sub> (30 à 100 fois plus efficaces que les oléagineux terrestres) qu'on

pourra envisager une production importante d'agrocarburants sans déforestation massive et sans concurrence avec les cultures alimentaires.

## Méthane et biogaz

Le biogaz résulte de la fermentation de n'importe quel matériau organique (déchets de bois, paille, déchets alimentaires, etc.) hors de la présence d'oxygène.

En pratique, il suffit de mettre les matériaux organiques choisis dans une enceinte à l'abri de l'air, puis de laisser agir les bactéries qui vont décomposer ces produits. Ensuite, on extrait du gaz dégagé par la fermentation le méthane (qui représente 50 à 90 % du gaz dégagé, le reste étant du CO<sub>2</sub> et de la vapeur d'eau).

Ce méthane peut s'utiliser pur pour faire fonctionner des véhicules au gaz (comme le GNV, « gaz naturel véhicule ») ou encore servir à fabriquer des combustibles liquides (par le procédé Fischer-Tropsch).

## Des sources variées

Les sources potentielles les plus courantes de biogaz proviennent des divers stockages de matière organique :

- les décharges ou plusieurs milliers de m<sup>3</sup>/h de méthane peuvent être récupérés et utilisés (1 m<sup>3</sup> méthane = 1 litre d'essence). (Source : *Les nouvelles techniques de recyclage et de valorisation des déchets ménagers et industriels banals, rapport du Sénat, 1999*) ;
- la collecte sélective des déchets putrescibles qui permet une méthanisation plus rapide qu'en décharge en utilisant des bio-réacteurs spécifiques (digesteurs) ;

- les boues des stations d'épuration, ce qui permet d'éliminer les composés organiques et de rendre la station autonome en énergie ;

- les effluents d'élevages ou d'industries agroalimentaires, le but étant d'éviter le rejet dans l'environnement de matières organiques trop riches, et d'obtenir une valorisation énergétique.

## Des avantages marqués

L'utilisation du biogaz comme carburant (plutôt que de le laisser se dégager dans l'atmosphère) a de nombreux avantages : d'une part elle se

substitue aux énergies fossiles, d'autre part, elle permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre (puisque la combustion transforme le méthane en CO<sub>2</sub> dont l'impact sur le climat est 25 fois moindre, et enfin de produire du compost. (Source : <http://www.manicore.com>)

Le biogaz est souvent brûlé dans un moteur à gaz ou une petite turbine, pour produire de l'électricité injectée sur le réseau (il existe plus de 4 000 installations en Allemagne) ; il produit aussi souvent de la chaleur en cogénération.

Enfin, il peut être utilisé comme carburant vert pour véhicules GNV, en substitution au gaz naturel du réseau qui est une ressource fossile.

À CONSULTER  
Avantages du biogaz  
> <http://www.manicore.com>

## Biogaz au Mali

La région de Kayes, grande ville de l'ouest du Mali, sur les rives du fleuve Sénégal, est menacée par l'avancée du désert et la diminution des ressources forestières car les besoins des populations en bois de chauffe sont importants. L'ONG AMCFE (Association malienne pour la conservation de la faune et de l'environnement) a donc voulu expérimenter un projet pilote sur le biogaz pour tenter de résoudre ce problème. Début 2005, des digesteurs souterrains réalisés grâce à des briquettes en ciment ont été construits dans quatre villages. Dans ces digesteurs, le gaz produit est stocké dans une cloche métallique flottante qui communique avec chaque foyer grâce à un raccord souterrain. Lorsque les utilisateurs alimentent les digesteurs avec de la bouse mélangée d'eau, ils récupèrent du biogaz. Les résultats du projet ont été très positifs : l'utilisation du biogaz a permis de réduire les dépenses des ménages en achat de bois de chauffe. De plus, l'extension de l'utilisation du biogaz à la réfrigération a permis d'améliorer la conservation des aliments et d'envisager des petites activités génératrices de revenus, telles que l'eau glacée, les jus et autres produits agroalimentaires. La diminution des coupes de bois pour la consommation des ménages a entraîné la régénération de la forêt et permis un éveil des consciences sur les questions environnementales.

# L'énergie de l'eau

**Née de la chaudière solaire qui anime le cycle de l'eau, l'énergie hydraulique a permis de faire tourner pendant des siècles les moulins, puis plus récemment les turbines des centrales. Aujourd'hui, l'installation de très grands barrages est ralentie, tandis que les installations « au fil de l'eau » ont encore un fort potentiel de développement.**



## La longue histoire des roues à eaux

Dès l'Antiquité, on se sert de l'énergie hydraulique des rivières, en utilisant des moulins à eau pour moudre le grain. La roue de ces moulins va connaître des progrès constants, en changeant de forme et d'implantation : d'abord roue à palettes, puis roue horizontale et enfin verticale.

Au Moyen Âge, on invente l'arbre à cames, qui va permettre, par l'intermédiaire des roues hydrauliques, d'écraser le chanvre, de fouler les draps, marteler le fer, scier les grumes, broyer les minéraux, actionner des soufflets, etc.

La mécanisation des manufactures est en marche. Et finalement, malgré un rendement faible, les roues hydrauliques ont été utilisées pendant près de deux millénaires.

Au XIX<sup>e</sup> siècle, la réalisation des turbines hydrauliques permet un gain d'efficacité spectaculaire : une des premières de ces turbines, réalisée par Benoist de Fourneyron, développe 45 000 W (à comparer aux 350 W fournis par les roues traditionnelles !).

### À LIRE

Ademe, *Guide pour le montage de projets de petite hydroélectricité*, réf. 4809 téléchargeable sur [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

## Centrales hydroélectriques et barrages

Depuis l'invention de l'électricité, les roues à eau permettent la production hydroélectrique : soit grâce à des lacs de barrage situés en altitude, soit au moyen d'installations situées sur les grands fleuves, encore nommées « au fil de l'eau ».

La première ressource est la plus précieuse qui soit, car elle est disponible à tout moment, et mobilisable en quelques minutes seulement (le temps d'ouvrir les vannes).

Elle permet donc d'ajuster en permanence la production à la demande.

En France, par exemple, les deux contributions (barrages et fil de l'eau) sont à peu près équivalentes en ordre de grandeur. Sous ces deux formes, l'hydroélectricité fournit environ 18 % de l'électricité mondiale (12 % en France).

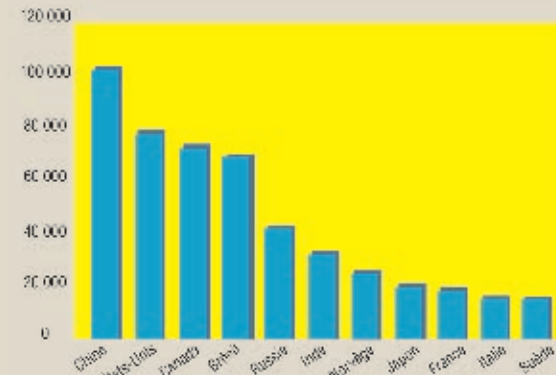
### Réaction rapide

Contrairement à l'énergie nucléaire, l'électricité hydraulique obtenue à partir de barrages atteint sa production nominale très vite (en 3 minutes contre environ 40 heures pour un réacteur nucléaire). On peut ainsi agir lors des pannes de grande ampleur comme celle qu'a connue l'Europe le 4 novembre 2006 : 5 000 MW de barrages avaient alors permis de limiter au maximum la durée de la panne.

## Grandes puissances hydroélectriques

La proportion de l'électricité qui est produite avec des installations hydroélectriques est évidemment très variable d'un pays à l'autre. Les « grandes puissances hydroélectriques » sont des pays où coulent des fleuves lents et à fort débit, comme le Canada, les États-Unis ou le Brésil. La Chine, avec le barrage des Trois-Gorges, se prépare à disposer d'une puissance supplémentaire installée de 18 200 MW, au prix d'un impact écologique et social considérable.

Capacité hydroélectrique installée (en millions de kW)



## Problèmes écologiques des grands barrages

L'hydroélectricité est considérée comme une énergie propre et inépuisable, contrairement au pétrole ou au gaz naturel. Cependant, la création de grands barrages provoque des impacts environnementaux (déplacements de population, modification ou destruction des écosystèmes) qui peuvent être très importants. Enfin, on a longtemps pensé que le bilan en gaz à effet de serre des barrages hydroélectriques était favorable, mais certaines recherches récentes mettent en doute ces résultats : l'activité bactériologique présente dans l'eau des barrages (essentiellement en régions tropicales) relâcherait d'énormes quantités de méthane (gaz ayant un effet de serre 25 fois plus important que le CO<sub>2</sub>).  
**Source : « Methane Quashes Green Credentials of Hydropower » Nature, 524-525 (30 November 2006).**

## L'énergie des mers

Pour exploiter l'énergie des mers, les ingénieurs ont d'abord pensé à exploiter celle des marées. La plus connue des usines marémotrices est celle de la Rance, installée en Bretagne sur un site où les marées peuvent atteindre une amplitude de 13 mètres. Le barrage est doté d'une digue creuse de 730 m et de 24 groupes de forme « hydrodynamique » qui fonctionnent « dans les 2 sens » avec turbine et alternateur. Depuis son raccordement au réseau, l'usine de la Rance produit 544 millions de kWh par an. Malheureusement, les sites favorables à de telles implantations sont rares, et les scientifiques envisagent d'autres types de centrales, avec entre autres :

- des centrales à déferlement utilisant l'énergie des vagues,
- des machines oscillantes utilisant les ondulations de la houle,
- des turbines hydrocinétiques, sortes d'éoliennes subaquatiques fonctionnant au fil des courants.

## Les petites centrales hydroélectriques (PCH)

Une PCH est une installation hydroélectrique d'une puissance inférieure à 10 000 kW. Ce type d'installation est viable du point de vue économique, respectueux de l'environnement et permet le développement des régions enclavées. L'électricité ainsi produite est propre (ni déchets en rivière, ni pollution de l'air) et renouvelable. De plus, elle présente un avantage sur la « grande hydroélectricité » : celle d'avoir un impact environnemental très faible et d'assurer une production d'électricité décentralisée, permettant un meilleur maillage du réseau et une diminution des pertes en ligne. Les petites centrales hydroélectriques permettent de créer des emplois de proximité (pour la surveillance et la maintenance des installations) et participent à l'entretien des rivières : enlèvement des déchets flottants, surveillance hydrographique, réhabilitation d'anciennes installations hydrauliques...

## Une implantation difficile

Les microcentrales nécessitent souvent d'importants ouvrages de génie civil : classiquement, un barrage (qui permet de dériver une partie du débit vers la centrale), un canal de dérivation qui alimente en eau le bâtiment abritant les équipements de production du courant, et enfin un canal de fuite qui ramène l'eau à la

rivière. Autant d'ouvrages qui rendent la réalisation par un particulier onéreuse. En revanche, la possession d'un ancien moulin permet plus facilement d'envisager l'utilisation de l'énergie hydraulique en rénovant l'installation. Malheureusement, obtenir l'autorisation de construire une PCH est long et difficile : la constitution du dossier est suivie d'un parcours jonché d'obstacles. Ce fameux dossier doit recueillir l'avis favorable d'une multitude de services (service des eaux, de la pêche...), de la DDE et des utilisateurs de la rivière (pêcheurs, sportifs...).

### COÛT ET AMORTISSEMENT DU PROJET

Les études préliminaires, préalables à l'installation d'une PCH, ont un coût qui varie de 7 500 à 30 000 €. Si cet obstacle est franchi, le prix moyen d'une PCH est de 1 220 à 3 050 €/kW installés, tandis que les recettes probables varient entre 150 et 230 €/kW. La durée de vie d'une centrale étant de plusieurs dizaines d'années et les frais d'entretien réduits (si l'installation a été bien conçue), la rentabilité brute peut s'évaluer à partir de 7 à 12 ans d'exploitation. Si le lieu d'implantation dépend du régime rural d'électrification, l'installation peut faire l'objet d'un dépôt de demande de financement au Face (Fonds d'amortissement des charges d'électrification). Si la demande est acceptée, les aides proviennent :

- du Face (65 % du montant de l'assiette finançable TTC),
- éventuellement de l'Ademe,
- de la commune (récupération de la TVA).

Des aides complémentaires peuvent exister dans certaines régions, en provenance de l'Union européenne, du conseil régional ou du conseil général.

## Rachat d'électricité par EDF

Pour les installations de moins de 12 MW les nouveaux tarifs d'achat par EDF pour l'électricité d'origine hydraulique garantissent aux producteurs une rémunération minimale de 6,40 c €/kWh pour les centrales inférieures à 500 kW et de 5,76 c €/kWh pour les autres, pendant une durée de 20 ans (tarifs 2004). Ce qui pourrait favoriser l'installation d'au moins 300 MW dans les 5 ans.

### Petite hydroélectricité et développement

Ce sont presque 2 milliards d'humains qui n'ont aucun accès à l'énergie électrique, en particulier dans les zones rurales des pays pauvres. Or la fourniture de 50 kWh par famille et par mois procure des avantages importants : éclairage, transformation agricole, diffusion de l'information par la radio ou la TV. Selon l'expérience de l'ONG *Practical Action* la petite hydroélectricité est l'un des modes de production d'énergie renouvelable les plus adaptés aux pays en voie de développement. Bien accompagné, un tel projet peut être entièrement géré par ses utilisateurs, réduisant ainsi les frais de fonctionnement et favorisant le développement local. L'ONG a aussi démontré qu'en ayant recours à des technologies appropriées et des modes de gestion efficaces, le coût du kWh généré par une micro centrale hydroélectrique pouvait atteindre la moitié seulement du coût généré par une petite éolienne construite localement, le dixième de celui généré par une installation photovoltaïque domestique et de la moitié au quart de celui généré par un groupe thermique diesel.

<http://practicalaction.org>

# La géothermie

**La géothermie, ou chaleur de la Terre, a été utilisée par les hommes dans des réseaux de chauffage et d'eau chaude depuis des milliers d'années en Chine, dans la Rome antique et dans le Bassin méditerranéen. Aujourd'hui, elle sert toujours à se chauffer, mais aussi à produire de l'électricité, et à permettre le fonctionnement des pompes à chaleur géothermiques.**



## L'enfer sous nos pieds...

Lorsque l'on s'enfonce dans la terre, par exemple dans une mine, on constate que la température augmente régulièrement, c'est le « gradient géothermal » : en moyenne de plus de 3 degrés par 100 m, ce chiffre atteint 10 degrés par 100 m dans le nord de l'Alsace, et seulement 2 degrés par 100 m au pied des Pyrénées. Cette chaleur provient essentiellement de la désintégration d'éléments radioactifs présents dans les roches (uranium, thorium, potassium) et aussi du noyau de la Terre (4 200 °C) et du manteau de roche en fusion qui l'entoure (entre 1 000 et 3 000 °C).

*Cette énergie est renouvelable, écologique, et est présente partout.*

Cette énergie est renouvelable, écologique, ne dépend pas des conditions atmosphériques et est présente sur tous les continents, même si son extraction est plus ou moins facile. Car dans les zones fragiles de l'écorce terrestre, à la frontière des plaques, le magma brûlant remonte, rendant la chaleur beaucoup plus facile à utiliser.

### À CONSULTER

Le guide pratique de l'Ademe

« Les pompes à chaleur géothermiques »

téléchargeable sur le site

> <http://www.ademe.fr/particuliers/fiches/pacg>

## Géothermie de haute énergie

Cette géothermie profonde est contenue dans des réservoirs localisés généralement à plus de 1 500 mètres de profondeur et dont la température est supérieure à 80 °C. Dans les zones volcaniques, les températures sont beaucoup plus fortes et peuvent atteindre plusieurs centaines de degrés à de faibles profondeurs. Des forages très profonds, où de l'eau est injectée sous pression dans la roche, permettent d'obtenir de la vapeur. L'utilisation de celle-ci permet ensuite de produire de l'électricité et aussi de la chaleur (cogénération) sur la même unité, ce qui augmente le rendement de l'installation. La géothermie haute énergie est exploitée dans le monde à hauteur de 8 900 mégawatts installés, dont 44 % en Amérique et 37 % en Asie.

Source : *European Geothermal Congress 2007*

## Géothermie de basse énergie

C'est une géothermie des nappes profondes dont les températures sont situées entre 30 et 100 °C. Sa principale utilisation est constituée par les réseaux de chauffage urbain. Sauf dans le cas des stations thermales qui profitent de la remontée naturelle des eaux chaudes au travers de failles, il faut aller chercher ces gisements de chaleur en forant et en pompant. En France, les forages implantés pour chauffer les logements descendent à 1 000 ou 2 000 m de profondeur pour capter l'eau chaude qui s'y trouve (température entre 50 et 90 °C). L'exploitation s'inspire des techniques pétrolières en utilisant souvent deux puits : l'un, équipé d'une pompe de production, permet de remonter l'eau chaude, qui va ensuite céder ses calories au contact de l'eau de chauffage des immeubles. Puis cette eau remontée qui vient de se refroidir est réinjectée dans la nappe par l'intermédiaire du second puits. Les deux puits doivent être

### Centrale de Soultz-sous-Forêts

Lancé en 1987, le projet expérimental européen de géothermie profonde de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin) a nécessité 16 années d'études. De l'eau est injectée à 5 000 m de profondeur, afin qu'elle s'échauffe au contact des roches sèches fracturées profondes dont la température avoisine 200 °C. Elle ressort ensuite en surface à cette température avec un débit de 100 litres/s pour entraîner une centrale de production d'électricité de 1,5 MW.

### Trésor géothermique français

La France recèle dans son sous-sol d'immenses ressources géothermiques dont une infime partie est exploitée. Les deux grands bassins sédimentaires (Bassin parisien et Bassin aquitain) sont les régions les plus propices à l'exploitation de l'eau chaude. Les réservoirs du Bassin parisien couvrent une vaste zone allant d'Angers à Metz et d'Amiens à la Sologne. Ils abritent des eaux qui atteignent une température de 60 à 100 °C à des profondeurs comprises entre 1 000 et 3 000 mètres. Dans le Bassin aquitain, deux zones très favorables se situent l'une au nord et au nord-est de Bordeaux, l'autre vers le Pays basque et au pied des Pyrénées.

## Pompe à chaleur géothermique pratique

L'installation d'une PAC géothermique à capteurs horizontaux nécessite d'enterrer les capteurs à une profondeur de 1 m environ, sur une surface de 1,5 à 2 fois la surface habitable de la maison. Le système doit être installé dans un sol perméable, meuble, pas trop pentu. Les capteurs doivent se trouver à au moins 1,5 m des réseaux enterrés non hydrauliques, au moins 2 m des arbres, au moins 3 m des fondations, puits, fosses septiques et réseaux d'évacuation. La PAC est la plupart du temps installée dans le sous-sol de la maison.

suffisamment éloignés l'un de l'autre pour que l'eau froide réinjectée ne modifie pas le gisement.

## Les pompes à chaleur

### UN PRINCIPE SIMPLE

La pompe à chaleur est une cousine du réfrigérateur : dans un réfrigérateur, de la chaleur est prélevée à l'intérieur, puis rejetée à l'extérieur dans la pièce qui le contient. Dans une pompe à chaleur, de la chaleur est prélevée dans l'environnement extérieur puis transmise à l'intérieur du logement, qui se réchauffe. La pompe à chaleur (PAC) est formée d'un circuit fermé et étanche destiné à faire circuler un fluide frigorigène mis en mouvement par un compresseur électrique. Ce fluide passe à l'état gazeux ou liquide selon qu'il absorbe ou libère l'énergie thermique disponible. La chaleur peut être restituée au logement par une ventilation, un réseau de radiateurs ou encore un plancher chauffant.

*La pompe à chaleur est une cousine du réfrigérateur.*

### GÉOTHERMIQUES OU AÉROTHERMIQUES ?

Les PAC peuvent puiser leurs calories dans le sol ou l'eau d'une nappe (les géothermiques) ou encore directement dans l'air ambiant, qu'il soit intérieur ou extérieur au logement (PAC aérothermiques). L'idéal est d'associer ces PAC à des émetteurs de chaleur basse température, comme un plancher chauffant en construction neuve, ou encore des radiateurs de grande dimension : ce qui permet un fonctionnement satisfaisant malgré la faible température de l'eau. Enfin, certaines pompes à chaleur dites réversibles permettent, en inversant le cycle, de refroidir le logement en été (3 à 4 °C de moins qu'à l'extérieur).

### UNE QUESTION DE CLIMAT

Les PAC géothermiques sont bien adaptées aux régions froides, car elles puisent leur chaleur dans le sol, un milieu où la température est beaucoup plus constante que dans l'air. Ces systèmes existent en deux versions. La première, qui est dotée de capteurs horizontaux, nécessite une surface au sol de 1,5 à 2 fois la superficie de la maison à chauffer : elle est adaptée aux maisons individuelles bâties sur un grand terrain. La seconde possède des capteurs verticaux : l'emprise au sol est réduite, mais le coût plus élevé, car un forage à 50 ou 80 m de profondeur doit être

réalisé. Les PAC aérothermiques sont bien adaptées aux climats cléments (60 % du parc français). Leur prix est raisonnable mais certaines d'entre elles ont l'inconvénient d'être bruyantes.

### PERFORMANCES

Le coefficient de performance (COP) d'une pompe à chaleur est défini comme le rapport entre la quantité de chaleur produite et l'énergie électrique consommée. Lorsqu'une PAC consomme 1 kWh d'électricité et restitue 4 kWh de chaleur, son COP est de 4 : la performance est donc d'autant meilleure qu'il est plus élevé. Le COP de toute pompe à chaleur augmente avec la température de la source froide (air extérieur) et diminue avec celle de la source chaude : il est donc meilleur en été ! Pour les PAC aérothermiques, les fabricants fournissent des valeurs normalisées de COP calculées pour un air extérieur à 7 °C et de l'eau de chauffage à 35 °C. L'Ademe conseille une installation ayant le COP le plus élevé possible et toujours supérieur à 3.

### AIDES FINANCIÈRES

La pose d'une PAC coûte cher. Prévoir, selon les formules, entre 70 et 150 euros du m<sup>2</sup> habitable, soit un budget de 10 500 à 22 500 euros pour une maison de 150 m<sup>2</sup>. On peut bénéficier d'un crédit d'impôt de 50 % pour l'achat d'une PAC destinée à la résidence principale, à condition que son COP soit supérieur ou égal à 3. Un taux réduit de TVA à 5,5 % peut être aussi obtenu pour la fourniture et l'installation d'une PAC si la résidence a été achetée depuis plus de 2 ans. D'autres aides existent, comme les subventions versées par l'Agence nationale d'amélioration de l'habitat (Anah) aux propriétaires de logements de plus de 15 ans, ou les aides d'EDF.

### CONTACT

Association française pour les pompes à chaleur

> <http://www.afpac.org/html>



### Interview

#### Sébastien Barde

Ingénieur au CNES, propriétaire d'une pompe à chaleur géothermique

***Vous êtes propriétaire d'une PAC géothermique depuis quelques années. Pourriez-vous nous donner votre sentiment d'utilisateur sur ce système de chauffage ?***

Nous possédons cette PAC depuis 6 ans. Elle a nécessité d'installer un capteur horizontal enterré de même surface que la maison, à une profondeur de 60 cm environ. Ce capteur est associé à un plancher chauffant qui joue un rôle de régulation grâce à sa masse. J'ai fait le choix d'avoir plusieurs compresseurs (7 pour le chauffage, et un huitième pour le ballon d'eau chaude), ce qui permet de moduler la température par zones dans la maison. Le fluide

caloporteur est un gaz, car son rendement est meilleur.

#### ***Et le bilan financier ?***

Au moment de l'achat, le système était à peu près deux fois plus cher qu'un chauffage « classique » équivalent. Les aides actuelles n'existaient pas encore, mais EDF apportait une aide proportionnelle au coefficient d'économie de la maison, ce qui nous a permis de réduire l'écart de prix avec l'installation classique. Pour une maison de 240 m<sup>2</sup>, nous dépensons aujourd'hui en électricité 1 200 €/an, pour le chauffage, l'éclairage et l'eau chaude sanitaire. Avec une grande facilité d'utilisation, puisqu'il n'y a pas d'entretien de la chaudière. L'ensemble a été amorti en 5 ans.

# L'énergie solaire

**L'énergie solaire est aujourd'hui de retour : les centrales solaires permettent la production de vapeur et sa conversion en électricité ; les capteurs solaires chauffent l'eau et les capteurs photovoltaïques convertissent directement la lumière du soleil en électricité.**



## La longue histoire de l'énergie solaire

En 1747, Buffon expérimente un miroir composé de 168 glaces étamées, d'environ 20 cm de côté. Chacune de ces glaces est mobile et peut ainsi renvoyer la lumière du soleil vers le même point. Il parvient ainsi à fondre un morceau d'argent à 20 m (l'argent fond à 1 044 °C). En 1767, le Suisse H.-B. de Saussure invente la « boîte

*En 1839, on observe pour la première fois la réaction photovoltaïque.*

chaude » avec des parois isolées et un ou plusieurs vitrages, sorte de précurseur des capteurs solaires plans. À la fin du siècle, le chimiste Lavoisier fabrique un four solaire associant lentilles et miroir parabolique destiné à fondre les métaux, et atteint la température de fusion du platine, soit près de 1 800 °C. En 1839, Antoine César Becquerel observe pour la première fois la réaction photovoltaïque. En 1878, Augustin Mouchot expose à Paris une machine dotée d'un réflecteur en cuivre argenté qui réchauffe un circuit hydraulique. L'engin produit assez de chaleur pour faire fonctionner un moteur à vapeur actionnant une presse d'imprimerie.

### À CONSULTER

Revue bimestrielle  
« Systèmes solaires »  
146, rue de l'Université  
75007 Paris  
> [www.energies-renouvelables.org](http://www.energies-renouvelables.org)

## Le grand retour du solaire

Mais la facilité d'utilisation du charbon puis du pétrole font retourner ces techniques au sommeil. L'aventure spatiale va favoriser le grand retour de cette énergie : en 1955, des chercheurs de Bell Telephone mettent au point une cellule dont le rendement de conversion énergétique atteint 6 %, marquant ainsi véritablement la naissance de la photopile solaire. Dès 1959, les Américains lancent un satellite *Vanguard* qui est alimenté par des piles photovoltaïques. Depuis cette époque, les rendements ont plus que doublé et des recherches intenses sont menées pour les augmenter encore tout en diminuant les coûts de fabrication.

## Les engins solaires

Les panneaux photovoltaïques peuvent fournir de l'énergie pour propulser un avion, une voiture ou un bateau. Le premier avion solaire *Gossamer Penguin* a pris son envol le 18 mai 1980. Puis, ce fut le *Solar Challenger*, un monoplane de 14,2 m d'envergure couvert de 16 128 cellules solaires : le 7 juillet 1981, il relie Pontoise-Cormeilles près de Paris à la base RAF de Manston à côté de Londres en 5 heures 23 minutes, couvrant 262 km avec l'énergie solaire pour seule source et sans aucun stockage. Bertrand Piccard et André Borschberg, responsables du projet *Solar Impulse*, comptent même, dans quelques années, effectuer un tour du monde en avion solaire. Du côté des voitures, le *World Solar Challenge* (défi solaire mondial) est une course d'engins propulsés à l'énergie solaire. Depuis 1987, ces véhicules parcourent un circuit de

### Grandes centrales photovoltaïques

Beaucoup de centrales photovoltaïques sont en projet : à Moura, au Portugal, 350 000 modules solaires sur 114 hectares fourniront une puissance de 62 MW en 2009. En Sicile, à Noto, une centrale de 40 MW en 2009. La même année, à Brandis, en Allemagne, 550 000 modules à couches minces, plus économiques, produiront 40 MW. En 2010, à Sarnia, en Ontario (Canada), un million de modules produiront 40 MW.

### Quand solaire rime avec social

Bon nombre d'organismes de gestion de logements sociaux sont à la recherche de solutions innovantes pour réduire les charges locatives. Et un nombre croissant de ces décideurs se tournent vers le solaire. Ainsi, en 2003, l'office public d'HLM de Strasbourg a mis en place une installation de capteurs solaires pour douze bâtiments du quartier du Kircheld, puis en 2005 une autre installation dans le quartier du Neuhof. À Montreuil, en banlieue parisienne, l'office municipal HLM a fait installer des capteurs solaires dans deux immeubles, ainsi que 220 m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques sur la terrasse d'un édifice de la rue Jules-Ferry. À Paris, dans le xiv<sup>e</sup> arrondissement, 1 000 m<sup>2</sup> de toits équipés de panneaux thermiques constituent l'installation la plus vaste de France pour du logement social. Citons encore, parmi beaucoup d'autres, les 622 m<sup>2</sup> de capteurs solaires de la cité HLM Saint Jean-Saint Pierre à Narbonne, ou la toiture écologique en zinc et panneaux de cellules photovoltaïques intégrés de l'ensemble *Le Mouv'York* à Dijon.

Kramer  
Junction

Les capteurs cylindro-paraboliques fournissent l'énergie solaire à la plus grande centrale thermique solaire au monde située à Kramer Junction en Californie : 5 SEGS (Solar Electric Generating Systems) de 30 MW chacun, soit 150 MW de capacité électrique solaire totale sont raccordés au réseau californien. Les centrales thermiques solaires en Californie représentent au total une puissance de 354 MW. Source : <http://www.outilssolaires.com/pv/principaleA.html>

3 021 km à travers l'Australie centrale, entre les villes de Darwin et d'Adélaïde. Le record de l'épreuve est d'un peu plus de 32 heures, soit une moyenne de près de 100 km/h.

Centrales solaires  
thermiques

## CENTRALES À CAPTEUR CYLINDRO-PARABOLIQUES

La production d'électricité solaire à partir de vapeur ressemble beaucoup à ce qui se passe dans les centrales thermiques ou nucléaires. Un gaz porté à haute température et haute pression (ici, par l'intermédiaire de l'énergie du soleil) fait tourner une turbine, puis cette turbine entraîne un alternateur. Les centrales

*La température du fluide qui sert à transporter la chaleur peut monter jusqu'à 500 °C.*

solaires thermiques les plus courantes possèdent des collecteurs cylindro-paraboliques : ce sont des alignements parallèles de miroirs en forme de demi-cylindres, posés en rangées est-ouest, et qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Ces miroirs concentrent les rayons solaires sur un tube horizontal, dans lequel circule le fluide qui servira à transporter la chaleur vers la centrale elle-même. La température de ce fluide peut monter jusqu'à 500 °C.

## LES CENTRALES À TOUR

Un ensemble de miroirs orientables situés au sol concentrent le rayonnement solaire très précisément sur une chaudière installée en haut d'une tour. La température obtenue peut alors dépasser largement 600 °C. L'Espagne a démarré la production du

*La température obtenue peut alors dépasser largement 600 °C.*

plus grand complexe de centrales solaires thermiques d'Europe sur le site de Sanlúcar La Mayor, près de Séville. Un espace de près de 70 hectares est aujourd'hui occupé par 624 héliostats (des miroirs orientables), d'une surface de 121 m<sup>2</sup> chacun, disposés au pied d'une tour de 115 mètres. Ces miroirs, qui concentrent les rayons du soleil sur la chaudière située en haut de la tour, permettent d'obtenir une température variant entre 600 °C et

1 000 °C. Cette première centrale d'une capacité de 11 MW a été inaugurée en mars 2007. Huit autres centrales sont prévues sur le site...

## LES CENTRALES À COLLECTEURS PARABOLIQUES

Ces centrales ont la même forme que nos antennes paraboliques, mais sont d'un diamètre respectable de 10 à 20 mètres et peuvent être orientées. Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome et suivent automatiquement le soleil afin de concentrer le rayonnement sur le foyer de la parabole réfléchissante, et ainsi produire de la vapeur. La concentration d'énergie est alors telle que la température peut dépasser 750 °C.

## LE JOUR ET LA NUIT

Les centrales solaires ne produisent que le jour. Pour leur assurer un fonctionnement continu, on peut stocker du fluide caloporteur chaud dont on se servira la nuit : le stockage se faisant dans des cuves contenant une saumure (de l'eau fortement salée pour mieux conserver la chaleur).

L'énergie stockée sous forme de chaleur (500/600 °C), permet à la centrale de continuer à fonctionner en l'absence de soleil.

Ainsi, la centrale Solar 3 en construction à Almería en Espagne va disposer d'une autonomie sans soleil de 16 heures, ce qui lui permettra de fonctionner nuit et jour lors des périodes de fort ensoleillement.

Les centrales solaires ont évidemment besoin :

- de beaucoup de soleil pendant la plus grande partie de l'année ;
- d'une bonne transparence de l'air ;
- de beaucoup d'espace libre pour installer miroirs et paraboles (2 ha/MW de puissance).

## À CONSULTER

Centrales thermiques  
> <http://www.sses.ch/fr/technique/centralestherm.html>

## « Cheminée » solaire de Fuente el Fresno

La centrale à « cheminée » solaire est une sorte de serre circulaire ouverte en périphérie, formée d'une couverture transparente tenue à une certaine hauteur du sol. La couverture vient faire la jonction avec la base d'une cheminée centrale de grande hauteur. Lorsque le soleil chauffe la serre, l'air chaud plus léger monte dans la cheminée, ce qui a pour effet d'aspirer violemment l'air extérieur, permettant ainsi d'entraîner les turbines des générateurs. Un prototype expérimental d'une centrale de ce type a été construit en 1982 et a fonctionné correctement pendant sept ans. En 2008, une centrale solaire à effet de cheminée de 40 MW sera construite à Fuente el Fresno, en Espagne. La surface de la serre occupera 650 hectares, la cheminée en béton armé sera haute de 750 m et la centrale conçue pour fonctionner jour et nuit. Cet équipement devrait permettre de couvrir la demande en électricité de 120 000 personnes, et d'économiser en un an 250 000 barils de pétrole !

Source : <http://www.ingenieriacampo3.com/> (en espagnol)

Economies  
à attendre

Pour un système solaire combiné, et avec une surface de capteurs de 15 à 20 m<sup>2</sup>, installés plein sud et inclinés à 45 degrés, on peut tabler sur un taux d'économies de 30 à 50 % sur l'ensemble des dépenses.

Dans le cas d'un chauffe-eau solaire, la couverture des besoins en eau chaude dépend de la surface des capteurs : elle est comprise entre 50 et 70 %.

Source :

**Le chauffage et l'eau chaude solaire, guide Ademe.**

## Capteurs solaires basse température

### LES CAPTEURS THERMIQUES PLANS

Un simple tuyau d'arrosage plein d'eau, abandonné sur la pelouse au soleil, et l'on obtient sans difficulté de l'eau chaude,

*Laisser pénétrer le rayonnement solaire et retenir la chaleur comme dans une serre.*

d'autant plus chaude que la couleur du tuyau est sombre. Ce système très simple d'obtention de la chaleur est à la base du principe du capteur thermique plan, qui comprend :

- Un absorbeur qui reçoit le rayonnement solaire et qui s'échauffe ; il est formé d'une plaque et de tubes métalliques noirs, qui constituent le cœur du système.

- Un coffre rigide et thermiquement isolé destiné à recevoir l'absorbeur. La partie supérieure du coffre est vitrée pour laisser pénétrer le rayonnement solaire et retenir la chaleur comme dans une petite serre. L'ensemble est en général placé sur un toit.

### CHAUFFE-EAU SOLAIRES

Le capteur thermique plan permet d'échauffer un mélange d'eau et d'antigel qui se dirige vers un ballon de stockage grâce à l'action d'un circulateur. Là, grâce à un échangeur thermique en forme de serpentin, il cède ses calories à l'eau sanitaire contenue dans le ballon, une cuve métallique bien isolée. Le liquide qui, refroidi, quitte l'échangeur, repart vers le capteur, où il est chauffé à nouveau tant que l'ensoleillement reste suffisant.

De plus, un dispositif de régulation surveille les températures respectives du ballon et du capteur pour couper la circulation lorsque la température du capteur est inférieure à celle du ballon. Pendant les périodes défavorables (hiver, demi-saison, période de mauvais temps) et pour pallier l'insuffisance d'ensoleillement, le ballon est équipé d'un dispositif d'appoint, comme une résistance électrique, qui prend le relais en cas de besoin, et reconstitue le stock d'eau chaude.

### DE L'EAU CHAUDE ET DU CHAUFFAGE

En plus des besoins d'eau chaude, l'énergie solaire peut assurer une partie des besoins de chauffage d'un bâtiment, à condition que les capteurs solaires plans soient dotés d'une surface beaucoup plus importante (10 à 20 m<sup>2</sup>) que dans le cas d'un simple

chauffe-eau solaire. On parle alors de « système solaire combiné ». Ces capteurs permettent d'alimenter en eau chaude un système de stockage de l'énergie, qui peut être constitué soit d'un « ballon tampon » (appelé aussi système à hydro-accumulation), soit encore d'une dalle chauffante nommée plancher solaire. Dans le premier cas, le volume d'eau tampon permet de chauffer le ballon d'eau chaude sanitaire et aussi de réchauffer un circuit d'eau de

chauffage. Dans le second cas, qui est le plus courant en France, le fluide en provenance des capteurs circule directement dans le ballon d'eau chaude et dans les tuyaux du plancher chauffant, qui sert à la fois à émettre la chaleur et à la stocker.

### CAPTEURS SOLAIRES EN EUROPE

En Europe, pendant l'année 2006, la croissance du marché solaire thermique a été de 47 % par rapport à 2005, avec plus de 3 millions de mètres carrés de capteurs vendus et une puissance installée de 2,1 MWth. En 2006, les pays champions de la croissance du marché (par rapport à 2004) sont respectivement le Royaume-Uni (+ 93 %), la France (+ 81 %), la Belgique (+ 76 %), l'Espagne (+ 64 %), l'Allemagne (+ 58 %). Enfin, le pays européen le plus équipé en surface de capteurs par millier d'habitants est Chypre, suivi de l'Autriche, la Grèce, l'Allemagne et le Danemark. *Source Solar thermal markets in Europe - ESTIF Juin 2007.*

## Architecture bioclimatique

### LA MAISON DANS SON ENVIRONNEMENT

Une maison bioclimatique vise à profiter au maximum de son environnement et des apports naturels d'énergie pour approcher l'autonomie. Elle sera donc, si possible, implantée sur le flanc

### Aides à l'installation

Les aides envisageables sont d'abord un crédit d'impôt de 50 % pour l'achat d'équipements de chauffage ou de production d'eau chaude sanitaire fonctionnant à l'énergie solaire, à condition que les capteurs soient d'un modèle agréé (certifiés CSTBat ou Solar Keymark). Pour des installations réalisées dans des logements achevés depuis plus de 2 ans, un taux réduit de TVA à 5,5 % est applicable sur l'achat des équipements et la main-d'œuvre d'installation. Les propriétaires d'un logement depuis plus de 15 ans peuvent bénéficier d'une subvention de l'Anah (Agence nationale de l'habitat) qui varie en fonction du montant des ressources et de la localisation du logement. Enfin, certaines régions, départements ou collectivités locales dispensent des subventions complémentaires.

Pour plus de renseignements, consulter le site de l'Ademe

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr) et celui de l'Anah [www.anah.fr](http://www.anah.fr)



### Puits canadien

Le puits canadien consiste à faire passer l'air entrant dans la maison par des tuyaux enterrés dans le sol, à une profondeur de 1,5 m environ. En hiver, comme le sol à cette profondeur est plus chaud qu'à l'extérieur, l'air entrant est donc tiédi ; en été, c'est l'inverse : le sol est plus frais que l'air extérieur, ce qui contribue à le refroidir. Ce système simple permet de « climatiser » la maison à peu de frais.

### Toitures végétalisées

Les toitures vertes sont des toits sur lesquels sont installées de la terre végétale et des plantes. Le système fournit une isolation supplémentaire contre la chaleur ou le froid, permet d'éviter le ruissellement des eaux de pluie et offre des avantages esthétiques évidents.

sud d'une colline ou à l'abri d'un talus placé au nord pour une meilleure protection contre le vent froid et une meilleure utilisation de l'ensoleillement. Des arbres et des haies plantés côté nord la protègent du vent. Des arbres à feuilles caduques plantés côté sud limitent la pénétration du soleil en été.

Afin de réduire les déperditions, il faut minimiser les surfaces en contact avec l'extérieur, l'enveloppe du bâtiment devant être la plus compacte possible.

Des zones tampons aménagées, sous forme d'espaces peu ou pas chauffés (garage, cellier) côté nord, se comportent comme une isolation thermique et diminuent les pertes de chaleur.

#### CAPTER LA CHALEUR L'HIVER

Dans l'hémisphère Nord, en hiver, le soleil reste très bas sur l'horizon (environ 30°). Pour capter son énergie, il suffit donc de placer les ouvertures vitrées principales plein sud. La lumière du soleil traverse le verre, puis est convertie en chaleur

*Il suffit de placer les ouvertures vitrées principales plein sud.*

par les surfaces sombres de la maison. Et cette chaleur est « piégée » par l'effet de serre dû à la vitre. En été, le soleil est haut sur l'horizon à midi, et ses rayons frappent obliquement les surfaces vitrées verticales. Une partie du rayonnement est donc réfléchi

vers l'extérieur. De plus, pour éviter une surchauffe, il suffit de prévoir une avancée de toit bien dimensionnée (casquette) qui arrête le rayonnement solaire direct en été mais laisse passer le soleil bas de l'hiver.

#### DIFFUSER LA CHALEUR

Les matériaux de forte inertie, à la fois denses et lourds, servent à retenir la chaleur incidente reçue pendant la journée pour la restituer la nuit. Ces matériaux constituent le véritable « radiateur » de la maison : radiateur qui fonctionne à basse température, et rayonne sa chaleur sur toute la surface. Sous nos climats tempérés, une maison bioclimatique bien conçue peut se passer de chauffage central. Un insert ou un poêle suffisent à assurer un appoint de chaleur lors des journées peu ensoleillées.

#### CONSERVER LA CHALEUR

Pour conserver la chaleur reçue, il faut très bien isoler les parois. Et pour être efficace, cette isolation sera de préférence « répartie » (le mur est isolant dans toute son épaisseur) ou

« extérieure » (l'isolant recouvre comme une peau toute la maison par l'extérieur). Enfin, pour assurer un meilleur confort à l'intérieur du logement, il convient de favoriser la circulation de l'air par convection ou au moyen d'une VMC. L'installation d'un puits canadien (voir encart) permet d'assurer l'entrée d'un air à température douce l'hiver et fraîche l'été.

Des plantes disposées aux endroits appropriés de la maison contribuent à régler le degré d'humidité de l'air intérieur.

## Le photovoltaïque

### LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE AU SILICIUM

Une cellule photovoltaïque est une sorte de pile qui tire son énergie de la lumière solaire. La partie centrale est constituée de deux couches accolées de silicium : l'une, formée de silicium pur auquel on a ajouté du phosphore, est chargée négativement ; l'autre, formée de silicium pur auquel on a ajouté du bore ou de l'aluminium, est chargée positivement. Lorsque la lumière frappe cette jonction, les photons arrachent les électrons de la couche négative et ceux-ci migrent vers la couche positive, ce qui permet de créer un courant électrique continu, comme s'il s'agissait effectivement d'une pile.

### MODULES PHOTOVOLTAÏQUES

Chacune des cellules ne peut donner naissance qu'à une quantité limitée d'électricité. Elles sont donc assemblées en série pour obtenir des modules photovoltaïques et protégées des agressions extérieures par deux plaques de verre. Les cellules de base de ces

### À CONSULTER

Photovoltaïque

> <http://www.sses.ch/fr/technique/photovoltaïque.html>

### Immeubles bioclimatiques

Les architectes commencent à appliquer les principes de l'architecture bioclimatique pour réaliser des immeubles écologiques de grande hauteur. Ainsi, la tour *Gherkin* située à Londres est dotée de systèmes de ventilation et d'éclairage naturels, ainsi que d'un chauffage solaire passif.

Construite à partir de matériaux à économie d'énergie facilement recyclables, elle utilise 50 % d'énergie de moins qu'un immeuble de bureau standard. La tour de verre de l'*Edificio Malecon* à Buenos Aires (Argentine) possède un profil étroit et élancé, orienté est-ouest, et conçu pour minimiser le chauffage excessif du soleil d'été.

Les cages d'escalier sont ventilées naturellement, et les fenêtres orientables permettent d'utiliser la brise rafraîchissante provenant de la rivière voisine. Le siège social d'IBM en Malaisie, *Menara Mesiniaga*, possède des persiennes extérieures apportant de l'ombre sur les murs chauds du bâtiment, une ventilation naturelle et un toit végétalisé réduisant l'accumulation de chaleur. Les terrasses et atriums abritent de nombreuses plantes qui augmentent les quantités d'oxygène et assurent une ventilation naturelle au cœur même du bâtiment.

## Bilan énergétique

Faire le bilan énergétique d'un panneau photovoltaïque, c'est déterminer le temps que le panneau doit fonctionner pour fournir l'énergie qui a été nécessaire pour le fabriquer. Il ne faut pas confondre ce bilan avec le « retour sur investissement » qui est un calcul financier étroitement tributaire des aides fournies et du tarif de rachat de l'électricité produite. Plusieurs études ont répondu à cette question en établissant qu'il faut de 2 à 4 ans (suivant l'insolation et l'inclinaison des capteurs) pour « rembourser » l'énergie de fabrication.

## Aides financières et rentabilité

Les aides à l'installation de générateurs photovoltaïques ressemblent beaucoup à celles des autres énergies renouvelables : crédit d'impôt de 50 % de l'investissement en matériel (à condition que l'installation soit réalisée par un professionnel), aides supplémentaires possibles des collectivités territoriales, et TVA à 5,5 % sur la pose des panneaux solaires photovoltaïques, à condition que le logement ait plus de 2 ans et que l'électricité produite alimente le logement.

Finalement, le temps d'amortissement d'un système photovoltaïque posé de 2 000 Wc s'échelonne entre 15 ans (sud de la France) et 18 ans (nord). Si le même système est intégré au bâti, il est amorti entre 9 et 11 ans.

<http://www.outilssolaires.com/pv/prin-couts.html>

panneaux peuvent être **monocristallines, polycristallines** ou **amorphes**. Comme leur nom l'indique, les premières sont élaborées à partir de silicium cristallisé en un seul cristal. Ces cellules ont un rendement de 12 à 16 % mais leur production est coûteuse.

Les secondes sont fabriquées à partir de silicium cristallisé en cristaux multiples. Leur rendement est de 11 à 16 % mais leur coût de fabrication est moins élevé. Enfin, les modules amorphes sont bien meilleur marché, mais leur rendement se situe entre 6 et 10 %. Ils peuvent être déposés en couches très minces sur du verre, du plastique souple, du métal, ou des matériaux de toiture.

### DES APPLICATIONS MULTIPLES

Les générateurs photovoltaïques peuvent fournir du courant à la place d'une pile, comme dans les calculettes, montres, etc. Dans les sites isolés, ils permettent, souvent associés à des accumulateurs, de faire fonctionner des balises en mer, des lampadaires, des clôtures électriques, etc.

Les maisons isolées peuvent être aussi alimentées en courant alternatif, grâce à un onduleur.

Enfin, le générateur photovoltaïque peut être connecté au réseau de transport d'électricité : on évite alors le coût et l'entretien des batteries nécessaires pour stocker l'électricité, puisque le réseau dans son ensemble sert de réservoir d'énergie.

## PRODUCTIVITÉ ET COÛT DES MODULES

La puissance des modules photovoltaïques est exprimée en Watts crête (Wc) et correspond à la puissance délivrée dans les meilleures conditions d'ensoleillement. Pour 16 à 20 m<sup>2</sup> de modules bien orientés correspondant à une puissance de 2 000 Wc, on peut tabler sur une production annuelle de 1 800 kWh au nord de la France, et 2 200 kWh au sud. D'après l'enquête réalisée en octobre 2006 par « Outils solaires » le coût moyen d'un tel système photovoltaïque raccordé au réseau s'établit à 15 640 € HT dans le cas de modules posés en toiture, et à 17 122 € HT pour des modules intégrés à la construction. Au total, fourniture du matériel et pose reviennent donc à 7,80 €/Wc dans le cas des modules posés, et 8,60 €/Wc pour les intégrés. *Source : <http://www.outilssolaires.com/pv/prin-couts.html>*

## L'ÉLECTRICITÉ PHOTOVOLTAÏQUE ET LE RÉSEAU

Le prix de vente de l'électricité photovoltaïque vers le réseau est supérieur au prix d'achat en provenance du réseau : si bien qu'un particulier raccordé au réseau a tout intérêt à vendre la totalité de l'électricité solaire qu'il produit, et à acheter celle qu'il consomme ! L'énergie électrique fournie au réseau est achetée 0,30 €/kWh. De plus, lorsque les équipements de production électrique sont intégrés au bâti, ils peuvent bénéficier d'une prime de 0,25 €/kWh, soit dans ce cas un total de 0,55 €/kWh. Pour vendre cette électricité voltaïque, il faut suivre une procédure complexe et qui peut être longue, afin de mettre en place deux contrats : un contrat de raccordement technique au réseau et un contrat d'achat de l'électricité. Pour plus de renseignements, visiter le site de l'association à but non lucratif *Hespul*. <http://www.hespul.org>

## À CONSULTER

- > <http://www.outilssolaires.com>
- > <http://www.hespul.org>



## Interview

### Pierre Barriac

Agriculteur-éleveur, propriétaire d'une ferme-découverte sur les énergies renouvelables

**Que pensez-vous du nouveau tarif de rachat de l'électricité qui est passé en juin 2006 de 15 centimes d'euro à 55 centimes, si les capteurs photovoltaïques sont intégrés au bâti ?**

C'est un tarif beaucoup plus intéressant, qui permet de rentabiliser l'installation en 10 à 15 ans (au lieu de 30 auparavant). C'est l'expression d'une volonté politique de décentraliser la production d'électricité, et on ne peut qu'être d'accord avec cet objectif. Je n'ai qu'une critique

à faire à cette mesure : elle devrait s'insérer dans une démarche globale, qui vise d'abord à réaliser un bilan complet des dépenses, puis à chiffrer les économies possibles en donnant la priorité à la sobriété énergétique, aux économies d'énergie par l'intermédiaire de l'isolation, puis au chauffage sans utilisation d'électricité (bois-énergie et capteurs solaires). Ensuite seulement, les applications électriques « nobles » devraient être réservées aux capteurs photovoltaïques.

<http://www.soleil-vie-vent.com>

# L'énergie du vent

**L'utilisation de l'énergie du vent pour mettre en œuvre des applications mécaniques est très ancienne, en particulier pour la propulsion des bateaux et la mise en rotation des moulins. Aujourd'hui, la plupart des sites ventés sont consacrés à la production d'électricité par des éoliennes.**



## Le premier moulin vertical

Le moulin à vent a été inventé par les ingénieurs musulmans au VII<sup>e</sup> siècle, en Afghanistan. Ces premiers moulins à vent sont des tours circulaires implantées en des lieux élevés. Ils comportent à leur sommet une pièce qui abrite les meules et, en partie inférieure, un rotor à axe vertical destiné à entraîner celles-ci. Les murs de la partie inférieure sont percés d'entonnoirs qui canalisent et accélèrent le vent pour qu'il actionne plus efficacement le rotor.

## Les vents de la Terre

L'énergie éolienne provient à l'origine du soleil, comme toutes les énergies renouvelables (à l'exception des énergies géothermique et marémotrice). Or la Terre reçoit en moins d'une heure l'équivalent en énergie solaire de la consommation annuelle de l'humanité, tous types d'énergies confondus. Et ce sont entre 1 et 2 % de cette énergie énorme provenant du soleil qui sont convertis en vent, soit

25 à 50 fois plus que l'énergie convertie en biomasse par la photosynthèse.

Source : *Ressources of the Earth : origin, use and environmental impact* de J. R. Craig, D. J. Vaughan et B. J. Skinner, Prentice Hall (1996).

## Bateaux et moulins

Les premières utilisations du vent comme énergie concernent la propulsion des bateaux, et les premiers bateaux à voile datent de 3 000 ans avant Jésus-Christ. Les premiers moulins à vent font leur apparition en Orient à la fin du VII<sup>e</sup> siècle : leur axe est

vertical et la meule située juste au-dessus. Depuis cette époque, de nombreux moulins à vent convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique, généralement pour mouler du grain ou pomper de l'eau et ainsi irriguer des zones sèches, assécher des zones humides, ou abreuver le bétail.

## Vent d'aujourd'hui

En 1888, Charles F. Brush construit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, tandis que la première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est développée par Paul La Cour en 1890 : il s'agit de produire de l'hydrogène par électrolyse.

Ensuite, pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne sert à produire de l'énergie électrique dans des endroits reculés non connectés à un réseau électrique.

Depuis les années 1990, l'amélioration de la technologie des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 1 MW, qui servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour alimenter les réseaux électriques.

## Les éoliennes off-shore

Pour bénéficier d'un vent plus fort et plus régulier, tout en entraînant un impact moindre sur le paysage, il est possible d'implanter les éoliennes en pleine mer (off-shore). Cependant, cette installation est beaucoup plus coûteuse qu'à terre : les mâts doivent être étudiés pour résister à la force des vagues et du courant, et la protection contre la corrosion (particulièrement importante du fait des embruns) doit être renforcée. D'autre part, le raccordement électrique oblige à utiliser des câbles sous-marins coûteux et fragiles, et la moindre opération de maintenance peut se révéler très difficile. Heureusement, une éolienne off shore peut fournir jusqu'à 5 mégawatts (à comparer aux éoliennes terrestres qui sont limitées à 3 MW dans des sites favorables). Finalement, lorsque la mer est peu profonde (moins de 20 mètres) et à des distances à la côte inférieures à 18 km, il est assez simple de les installer, et elles bénéficient d'un bon rendement.

Le Danemark possède des installations éoliennes off-shore importantes et, aujourd'hui, des grands parcs off-shore sont en construction au large de l'Angleterre, ainsi qu'en Écosse, pour une puissance d'environ 4 000 MW au total.

## Records des voiliers d'aujourd'hui

Les voiliers contemporains sont des engins de haute technologie dont les performances sont tout à fait remarquables. Pour en prendre conscience, il suffit de constater le bond des performances réalisées depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. À cette époque, les clippers traversaient l'Atlantique depuis New York en 12 à 13 jours. En 1905, Charlie Barr sur sa goélette met 12 jours et 4 heures, alors qu'en 2007, le trimaran de Franck Cammas réalise ce même parcours en 4 jours et 4 heures. Rappelons aussi le tour du monde en équipage d'ouest en est réussi en 2005 par le grand catamaran de Bruno Peyron en un peu plus de 50 jours, ou encore le récent tour du monde en solitaire de Francis Joyon en 57 jours, sur un trimaran.

Horizontal  
ou vertical ?

La plupart des éoliennes possèdent un axe horizontal. Celles qui possèdent un axe vertical sont rares, et la seule qui a été fabriquée pour être commercialisée est l'éolienne de Darrius caractérisée par ses pales de rotor en forme de C qui la font un peu ressembler à un fouet à œufs. Une machine à axe vertical a l'avantage de ne pas nécessiter de mâts ni de mécanisme d'orientation pour faire face au vent, et elle supporte une plage de vitesses de vent plus étendue. Malheureusement, son efficacité est souvent inférieure et son démarrage pas toujours automatique, sans parler de l'usure prématurée des roulements de pied de rotor ou des phénomènes de résonance de l'axe. Les améliorations de ces éoliennes à axe vertical en sont encore au stade expérimental, ce qui les rendra peut-être dans peu de temps plus compétitives.

## Une éolienne, qu'est-ce que c'est ?

Les éoliennes modernes visent à transformer l'énergie du vent en énergie électrique : ce sont des systèmes très complexes à la pointe de la technique. Elles sont composées des éléments suivants :

- une hélice, le plus souvent à trois pales, qui est l'élément moteur de l'ensemble ;
- une nacelle, qui sert à transformer le mouvement des hélices en électricité, mais aussi à orienter au mieux l'éolienne ou à la mettre en position de repos ;
- un mât, qui permet de positionner l'hélice dans une zone de vent plus fort et plus régulier et qui permet aussi de bénéficier d'une grande longueur de pale ;
- une assise de béton, la fondation, qui permet d'assurer la stabilité de l'ensemble de la structure de l'éolienne ;
- un poste de livraison situé à proximité du parc éolien qui permet de relier ce parc au réseau pour y injecter l'énergie produite.

## Au fil du vent

Une éolienne fonctionne d'autant mieux que les vents sont réguliers et fréquents. Elle ne démarre que si le vent dépasse la vitesse de 14 km/h et doit être arrêtée lorsque la vitesse de vent dépasse 90 km/h. Entre ces deux seuils, on fait varier l'angle des pales pour optimiser la puissance fournie.

Un site avec des vents d'environ 30 km/h de moyenne est environ huit fois plus productif qu'un autre site avec des vents de 15 km/h de moyenne.

En France, un projet est considéré comme rentable économiquement si la vitesse moyenne annuelle du site est supérieure à 6 ou 7 m/s, soit 21 à 25 km/h.

*Une éolienne fonctionne mieux si les vents sont réguliers et fréquents.*

Sur un site disposant d'une vitesse moyenne annuelle de vent de 7 m/s, le nombre d'heures de fonctionnement d'une éolienne est en moyenne de plus de

7 000 heures par an. L'éolienne produit donc de l'énergie pendant 80 % du temps.

## Le monde de l'éolien

Les milliers d'éoliennes qui fonctionnent à l'heure actuelle dans diverses régions du monde possèdent au total une capacité de plus de 73 900 MW, et l'Europe en est le leader avec 65 % de la production mondiale fin 2006.

*L'éolien est actuellement la filière énergétique la plus dynamique dans le monde.*

L'éolien est actuellement la filière énergétique la plus dynamique dans le monde et plus particulièrement dans l'Union européenne où la production d'électricité éolienne

a augmenté de 37,8 % par an en moyenne de 1993 à 2002, et de 28,9 % en 2003 et 2004.

L'Allemagne est le pays « champion » de l'éolien avec 20 622 MW de puissance installée à la fin de l'année 2006, et une moyenne de 2 GW de puissance ajoutée chaque année.

Le deuxième producteur est l'Espagne (11 615 MW) avec 2 GW d'augmentation par an

Les États-Unis (11 603 MW) envisagent des projets gigantesques, mais certaines associations écologistes s'y opposent et multiplient les actions en justice.

Le Danemark a quasiment stoppé son développement éolien et assure aujourd'hui environ 20 % de sa production d'électricité. La France était en 2006 le 10<sup>e</sup> producteur d'énergie éolienne en Europe avec 1 567 MW seulement.

Source : World Wind Energy Association <http://www.wwindea.org/home/index.php>

### À CONSULTER

L'association World Wind Energy  
> <http://www.wwindea.org>



### Interview

Jean-Marc Jancovici  
Expert climatique

**Quelle est aujourd'hui la place de l'éolien dans l'ensemble des énergies renouvelables dans le monde ?**

C'est le bois et l'hydroélectricité qui dominent les énergies renouvelables. L'éolien, pour sa part, ne « pèse » qu'environ 0,35 % du total de la production renouvelable dans le monde et seulement 0,05 % de l'approvisionnement énergétique mondial.

**Mais son potentiel futur n'est-il pas beaucoup plus important ?**

Si nous imaginons un taux de croissance annuelle moyenne de 10 % pendant les 50 ans à venir, cette source d'énergie ne représenterait dans 50 ans que 2,5 % du total mondial, et encore à condition que la consom-

mation d'énergie reste stable au niveau d'aujourd'hui. Si la consommation d'énergie continuait à croître de 2 % par an pendant 50 ans, alors l'éolien ne représenterait plus qu'à peine 1 %. À l'éolien ne nous permettra pas de nous débarrasser d'une fraction significative des combustibles fossiles dans les 50 ans qui viennent !

**Pourtant, le Danemark a massivement investi dans l'éolien ?**

Oui, et en 1999, l'éolien représentait 1,3 % de la consommation d'énergie.

Mais comme la consommation d'énergie a augmenté sur la décennie 1990 de 1,3 % en moyenne, dix ans d'effort ont tout juste servi à absorber une année de hausse de la consommation d'énergie !

Tempêtes  
et cyclones

Dans les zones soumises à des vents extrêmement violents, on installe des éoliennes haubanées spécialement conçues pour pouvoir être couchées sur le sol en moins de 45 min dès qu'un cyclone est annoncé. Ces éoliennes sont aussi allégées et conçues pour résister aux tremblements de terre les plus courants.

## Éolien urbain

Pour produire au plus près des besoins, les ingénieurs ont envisagé d'installer des éoliennes en milieu urbain.

Cependant cette implantation présente de nombreuses contraintes : il faut, pour des raisons de flux de vent, installer les éoliennes sur le toit des immeubles de grande hauteur.

Mais ces sites élevés présentent des turbulences importantes, ce qui impose souvent l'utilisation d'éoliennes à axe vertical.

En France, la dernière née des opérations (2005) a été réalisée à Equihen-Plage (Pas-de-Calais) : un éolien de 6 kW a été installée sur le toit d'un immeuble de logements collectifs.

Malheureusement, les contraintes de coûts, les incertitudes réglementaires et les contraintes d'usage freinent l'installation de ces systèmes en ville.

## Les petites éoliennes

## DES ÉOLIENNES DOMESTIQUES

Les petites éoliennes ont une puissance comprise entre 100 W et 20 kW, et leur hauteur se situe entre 10 et 35 m.

Elles peuvent produire de l'électricité décentralisée en site isolé, avec un système de stockage formé de batteries. Mais elles peuvent aussi produire « au fil du vent » pour alimenter le réseau électrique, le consommateur d'électricité devenant alors également un producteur d'électricité.

Ces petites éoliennes sont généralement à axe horizontal et comportent le plus souvent une hélice dotée de deux ou trois pales.

## DÉMARCHES ET AIDES

Actuellement, et jusqu'à 12 m de hauteur, le petit éolien peut être installé librement.

Au contraire, au-dessus de 12 m, un permis de construire est nécessaire et les procédures administratives peuvent se révéler extrêmement lourdes.

D'autre part, en France, les conditions de rachat de l'électricité produite par le petit éolien sont actuellement trop faibles (aux alentours de 8 centimes €/kWh). Ce qui est bien inférieur

au tarif de rachat des autres pays européens, qui se situe entre 15 et 20 centimes €. Le petit éolien bénéficie de la mesure du crédit d'impôt (50 % du prix des équipements TTC).

## L'éolien en débat

## INTERMITTENCE DU VENT

La production éolienne est une production intermittente. Cependant, en France, deux gisements indépendants permettent un lissage de la production : celui du littoral atlantique et celui du littoral méditerranéen.

Pour pallier complètement cette intermittence, il est nécessaire de stocker l'énergie : ce qui est possible sous forme hydraulique, ou dans des batteries, ou en produisant de l'hydrogène.

Le meilleur système de stockage est un système hydraulique nommé STEP (station de transfert d'énergie par pompage).

En période de basse consommation, le stockage s'effectue en pompant l'eau d'un bassin inférieur pour la transférer vers un bassin supérieur.

Lors des périodes de forte demande, l'eau coule du bassin supérieur vers l'inférieur en actionnant une turbine.

## ÉCONOMIE DE L'ÉOLIEN

L'énergie éolienne est créatrice d'emplois, et un parc éolien offre des revenus intéressants pour les collectivités locales.

Ainsi, une éolienne de 1 MW rapporte par an environ



## Interview

## Robert Laurent

Propriétaire  
d'une petite éolienne

**Votre site est-il favorable à cette installation ?**

Pas vraiment. J'habite en Dordogne, région moins favorable que la Bretagne par exemple. Mais j'avais la conviction que mon installation était possible, et j'ai donc installé une éolienne sur un mât de 24 m, de manière à ce que son fonctionnement ne soit pas perturbé par la proximité des arbres. Cependant, une étude de faisabilité est à conseiller. Elle est remboursée si on achète l'éolienne.

**Pourriez-vous me parler de votre installation ?**

Il s'agit d'une éolienne Krug de 1,5 kW. Le diamètre du cercle décrit par les pales de l'hélice est de 3,6 m. Le coût total s'est élevé à 12 000 € pour l'éolienne et 5 000 € pour les ouvrages de génie civil (ancrage). Nous n'avons pas installé de batterie, car l'électricité générée est utilisée en autoconsommation. La

production totale sur deux ans a été de 2 500 kWh.

**Avez-vous eu besoin d'un permis de construire ?**

Oui parce que l'éolienne dépasse les 12 m. La demande a été déposée en mairie, puis étudiée par la DDE locale et soumise pour avis à la direction de l'aviation civile à Bordeaux et à la région aérienne atlantique. L'ensemble des démarches a duré quatre mois. On m'a simplement imposé d'installer une balise à éclats diurne/nocturne.

**Et le bruit ?**

Mes voisins sont à 200 m et l'éolienne installée à 15 m de la maison. À l'intérieur de la maison, elle est totalement inaudible. Lorsqu'on sort on entend un bruissement léger. Le bruit n'est absolument pas gênant, environ 30 décibels dans un rayon de 30 mètres.

<http://www.e-eolienne.info>

## Rumeurs éoliennes

L'énergie éolienne a « bénéficié » d'un certain nombre de rumeurs relatives à ses effets sur l'environnement, les hommes et les animaux. À tel point que l'Ademe a édité en 2004 une petite brochure intitulée « Les bruits de l'éolien, rumeurs, cancans, mensonges et petites histoires » destinée à faire un point scientifique et raisonné sur ces questions cruciales pour l'avenir de cette énergie renouvelable. Cette brochure peut être commandée en écrivant à : Ademe Éditions Régisseur de recettes 2 square La Fayette BP 406 49004 Angers cedex 01.

## Petit éolien dans l'Aude

Dans l'Aude, le département le plus venté de France, les acteurs du monde rural ont décidé de rechercher dans le petit éolien un moyen de dégager un complément de revenu.

Cependant, les obstacles techniques et administratifs étant importants, les agriculteurs ont décidé de se lancer dans cette aventure avec le soutien du CAUE (Conseil d'architecture d'urbanisme et de l'environnement).

Cet organisme, chargé de mutualiser les coûts et les risques, a décidé d'installer des éoliennes de 10 à 36 kW de puissance et de 20 à 30 m de haut sur deux sites pilotes situés sur deux coopératives agricoles du secteur : AudeCoop et le Groupe coopératif occitan.

Si les essais sont concluants, la profession agricole prévoit de mettre en place plusieurs dizaines d'éoliennes d'ici à un an environ.

6 000 € à la commune, 6 000 € au département et 1 200 € à la région.

Le temps de retour énergétique d'une éolienne (c'est-à-dire le temps nécessaire pour que l'éolienne produise l'énergie de sa fabrication) est de moins d'un an, alors qu'elle va pouvoir continuer à produire de l'énergie pendant 20 ans. L'investissement nécessaire pour installer de l'éolien est approximativement de 1 000 €/kW.

Le prix de revient du kilowatt heure produit est ensuite de 6,48 centimes d'euros. À comparer à celui produit par une turbine à gaz en cycle combiné (3,48 c€), une centrale à charbon (3,65 c€), ou une centrale nucléaire (8,83 c€).

Source : Öko-Institut, Institute for Applied Ecology, <http://www.oeko.de>

## L'ÉOLIEN ET L'ENVIRONNEMENT

Le débat sur les éoliennes s'organise autour de trois grandes questions : leur intégration dans le paysage, leur bruit et leur impact sur les oiseaux.

Du XVI<sup>e</sup> au XVIII<sup>e</sup> siècle, tous les littoraux européens de l'Atlantique ont été couverts de nombreux moulins destinés à assécher les

marais ou à moudre le grain. Cependant, l'installation d'éoliennes se heurte aujourd'hui à de nombreuses réticences, peut-être dues aux photographies largement diffusées des gigantesques champs expérimentaux d'éoliennes de Californie : pourtant ces images montrent des éoliennes déjà anciennes (250 kW), alors que les éoliennes modernes les plus puissantes dépassent les 2 500 kW.

Il n'est donc plus nécessaire d'installer des champs d'éoliennes aussi denses : on profite souvent aujourd'hui de la proximité d'autoroutes pour installer les éoliennes dans des paysages moins susceptibles d'être dénaturés.

Le bruit des éoliennes est aujourd'hui peu important, puisque leur perfectionnement technique a permis la diminution de la

*Il n'est plus nécessaire d'installer des champs d'éoliennes aussi denses.*

vitesse de rotation des pâles, et le capitonnage de la nacelle. Finalement, une éolienne produit un bruit de 55 décibels au pied de sa tour, ce qui correspond à l'ambiance sonore d'un bureau. Enfin plusieurs études sur les éoliennes montrent que

le nombre d'oiseaux tués par celles-ci est très faible par rapport au nombre d'oiseaux qui meurent en raison d'autres activités humaines.

Par exemple au Royaume-Uni, les quelque centaines d'éoliennes tuent chaque année quelques centaines d'oiseaux alors que pendant le même temps 10 millions de ceux-ci sont tués par les voitures.

## Démantèlement des éoliennes

Afin de limiter les nuisances résiduelles sur l'environnement, le démantèlement des installations éoliennes comprend obligatoirement le démontage de l'éolienne elle-même, celui des équipements annexes, et l'arasement des fondations.

Cette dernière opération permet de ne laisser aucune trace sur le site.

Les estimations du coût de démantèlement montrent qu'il est inférieur à celui du prix de rachat du métal récupéré sur le site, aussi bien dans la tour que dans les composants.

## Pannes de vent

Le vent est une ressource aléatoire, si bien que les éoliennes produisent de façon intermittente. Lors de la canicule de 2003, l'Allemagne en a fait la triste expérience : la capacité des éoliennes est alors tombée à moins de 10 % de la valeur nominale, et le pays a dû importer une importante quantité d'électricité, de l'ordre de 1 000 MW. De la même manière, lors de la vague de chaleur nord-américaine de 2006, la production d'énergie éolienne de la Californie est tombée à 5 % de sa valeur théorique de production !

# L'énergie en 2050

**Pour diviser par 4 nos émissions de CO<sub>2</sub>, il faudra surtout réduire nos besoins énergétiques.**

**Nous y parviendrons en transformant l'organisation de nos villes, en améliorant les transports publics, en isolant nos maisons et en favorisant une agriculture plus proche des consommateurs. En attendant que de nouvelles énergies viennent prendre la relève...**



## La réduction des besoins en énergie

Nous ne pouvons pas compter sur les seules technologies pour répondre au défi qui nous est posé : nous développer et maîtriser le réchauffement climatique. La priorité absolue est donc d'obtenir une maîtrise de notre consommation d'énergie. Dans les pays européens, la majorité des dépenses énergétiques (70 %) est imputable aux citoyens et consommateurs pour l'habitat, le tertiaire et les transports. Nous pourrions parvenir à éviter une dérive du climat en améliorant l'efficacité énergétique de nos outils, en modifiant nos comportements, et enfin en transformant les infrastructures du développement (urbanisme, transports, habitat, aménagement du territoire).

## Un meilleur aménagement de la ville

Plus la ville est étendue et plus les dépenses énergétiques par habitant y sont élevées : ainsi, les agglomérations américaines

consomment trois fois plus d'énergie pour la mobilité urbaine que les agglomérations européennes et cinq fois plus que les villes asiatiques développées. Dans les villes européennes, de

*Dans les villes européennes, la moitié des trajets automobiles font moins de 3 km.*

nombreux transports effectués en automobile sont courts : la moitié correspondent à des trajets de moins de 3 km, un cinquième à des trajets de moins de 1 km. Une véritable place devrait donc être faite au vélo et à la marche à pied.

Un aménagement durable de la ville consisterait à limiter la vitesse de circulation des véhicules pour privilégier le nombre et la vitesse de circulation des modes alternatifs de transport (bus, métro ou tramway). Les futurs aménagements urbains devront privilégier la densité d'habitations resserrées autour d'axes de transport en commun.

## La maison à énergie positive

En France, une maison de 100 m<sup>2</sup> équipée de 20 m<sup>2</sup> de capteurs solaires peut restituer une énergie utile de 6 000 kWh par an. Or, dès aujourd'hui, nous savons concevoir des maisons qui demandent en moyenne 50 kWh par m<sup>2</sup> et par an pour le chauffage et l'eau chaude. Si bien qu'une telle maison, qui consomme en moyenne 5 000 kWh par an, fournit 1 000 kWh excédentaires disponibles pour les usages électroménagers et l'éclairage. Une telle maison dite « maison à énergie positive » est ainsi susceptible de fournir de l'énergie à un microréseau décentralisé.

### Cyber cars

Les Cyber cars sont de petits véhicules urbains partagés, destinés à réduire les émissions de gaz carbonique dues aux transports. Le projet résulte d'un constat simple : une automobile individuelle n'est utilisée que 600 heures par an, tandis que le temps d'utilisation d'un avion ou d'une locomotive est 10 fois plus long (5 000 à 6 000 heures/an). Un véhicule partagé permet de se rapprocher de ces temps d'utilisation. Ces véhicules légers (200 kilos) à vitesse réduite (40 km/h) peuvent fonctionner avec un guidage automatique. Ils transportent un ou deux passagers puis retournent pendant les heures creuses aux points où ils sont le plus demandés. Ce type de véhicule est testé aujourd'hui dans la ville d'Antibes (sud de la France).

### Piles à combustible d'immeubles

Des piles à combustible pourront dans l'avenir fournir des sources d'énergie délocalisées permettant la production d'électricité collective et d'eau chaude domestique. De telles piles réversibles seraient installées en pied d'immeubles et couplées à des sources d'énergies renouvelables (solaire, éolien). Lorsque la production d'énergie renouvelable est supérieure à la demande, il est possible d'alimenter la pile en électricité, ce qui lui permet par électrolyse de produire de l'hydrogène stocké dans un réservoir. Lorsque la production d'énergie baisse, la pile prend le relais et consomme l'hydrogène stocké pour fournir du courant.

### À CONSULTER

Aménagement du territoire et économies d'énergie  
> <http://www.science-decision.net>

## Piles à combustible et portables

Des piles à combustible miniatures vont permettre dans très peu de temps d'alimenter téléphones et ordinateurs portables afin de pallier l'absence d'autonomie des batteries de lithium actuelles. L'utilisateur rechargera sa pile à combustible, comme il peut le faire aujourd'hui pour un briquet ou un stylo, tout en profitant d'une autonomie trois à cinq fois plus importante qu'avec une batterie actuelle.

## Le basculement des transports

En matière de mobilité individuelle, l'avenir est aux véhicules hybrides, électriques, à piles à combustible ou à hydrogène. Pour les marchandises, la hausse continue des distances et des vitesses de transport consécutive à la mondialisation va devoir être revue. Le renchérissement des coûts de l'énergie va imposer une réorganisation des transports entraînant à la fois une baisse de leur vitesse et un raccourcissement de leur distance : on substituera la proximité à la vitesse. Dans l'avenir, il est probable que le pétrole sera progressivement réservé au transport aérien à très longue distance.

## Une agriculture proche du consommateur

L'industrie agroalimentaire et la commercialisation de produits alimentaires transformés entraînent des dépenses d'énergie importantes si bien que, autant pour la santé que pour l'environnement, il est recommandé de consommer des fruits et des légumes frais et de saison. Les ceintures agricoles des grandes villes pourront désormais se consacrer à la production de fruits et légumes, permettant ainsi un acheminement plus court des marchandises.

Dans les pays industrialisés, 70 à 80 % des surfaces agricoles sont consacrées à l'alimentation des animaux, dont les 3/4 pour les bovins, alors que 2 % des terres seulement suffisent

*On peut donc s'attendre à une généralisation des cultures bio.*

à produire la totalité des fruits et légumes nécessaires à l'alimentation humaine ! La consommation excessive de viande est nocive à la fois pour la santé des consommateurs et pour la qualité de leur environnement, puisqu'elle nécessite le maintien d'une agriculture intensive et peu durable. On peut donc s'attendre à une généralisation des cultures bio, ainsi qu'à une diminution de la consommation de viande dans tous les pays industrialisés. À plus longue échéance, pour s'adapter au climat, les principales plantes annuelles qui alimentent les hommes vont peut-être évoluer en plantes vivaces dotées de racines profondes, ce qui permettra l'avènement d'une agriculture à grande échelle véritablement durable.

## Le vecteur hydrogène

### LA PILE À COMBUSTIBLE

Pour remplacer les carburants fossiles, de nombreux experts envisagent d'utiliser l'hydrogène : car l'hydrogène peut être brûlé en présence de l'oxygène de l'air, ce qui produit de l'énergie et un simple dégagement de vapeur d'eau et de quelques oxydes d'azote. Mais la véritable innovation consiste à utiliser l'hydrogène dans une pile à combustible. Le principe de la pile à combustible date de 1839, il correspond à un processus inverse de l'électrolyse. Dans l'électrolyse, un courant traverse une solution et sépare les composés qui y sont dissous. Dans une pile à combustible, on met des composés dans une solution, et leur réaction chimique produit un courant.

### MOINS DE POLLUANTS

Avantage de ce système : la combustion est remplacée par une réaction chimique, ce qui évite la montée à de hautes températures et donc la production de polluants. Toutes les piles à combustible fonctionnent avec de l'hydrogène. Malheureusement, l'hydrogène n'existe pas à l'état natif sur la Terre, et il faut donc le produire. On peut le faire par craquage à haute température d'hydrocarbures (dans des usines ou des véhicules), mais aussi par électrolyse de l'eau (ce qui nécessite de disposer d'importantes quantités d'électricité) ou encore par décomposition de la molécule d'eau à haute température.

### AUTOMOBILES ET PILES À COMBUSTIBLE

Les premières piles à combustible automobiles utiliseront l'hydrogène extrait d'hydrocarbures (comme le gaz naturel ou le méthanol). Le chauffage à haute température de ces composés entraîne leur craquage. Le carbone est ensuite oxydé en gaz carbonique (qui est émis dans l'atmosphère) et l'hydrogène

### À CONSULTER

Pile à combustible  
> [http://www.manicore.com/documentation/pile\\_combustible.html](http://www.manicore.com/documentation/pile_combustible.html)

### l'Islande et l'hydrogène

L'Islande a affiché une volonté forte de s'affranchir des énergies fossiles à l'horizon 2040. Pour y parvenir, elle a créé une structure chargée de la production et de la distribution de l'hydrogène pour tous ses véhicules : Icelandic New Energy. La production d'hydrogène est réalisée par électrolyse de l'eau de mer grâce à la présence d'une électricité hydroélectrique abondante épaulée par de l'éolien et du géothermique. Le choix a été fait de privilégier de petites unités de production d'hydrogène situées dans les stations-service et dans les dépôts, tandis que le stockage de l'hydrogène est réalisé sous forme solide. Les premiers utilisateurs des piles à combustible à hydrogène ont été les transports urbains et la flotte de véhicules légers de Reykjavik. La deuxième étape consistera à équiper les chalutiers islandais de piles à combustible et de moteurs électriques.



## La photosynthèse artificielle

De nombreux chercheurs travaillent à imiter la photosynthèse : il s'agit de fabriquer des systèmes artificiels bon marché capables, grâce à la lumière et au dioxyde de carbone de l'air, de synthétiser des sucres et de l'éthanol. Cela réduirait la quantité de dioxyde de carbone de l'atmosphère tout en permettant de produire de l'énergie. Des chercheurs de l'université de Kyoto ont développé un nouveau matériau à base de manganèse. Selon eux, ce nouveau matériau devrait pouvoir réduire le dioxyde de carbone de l'atmosphère 300 fois plus efficacement que les plantes.

est récupéré. Ce système permet de diminuer la pollution locale (NO, CO, hydrocarbures aromatiques, particules, etc.) mais ne permet pas de diminuer sensiblement les émissions de gaz carbonique. La seule manière d'arriver à de meilleurs résultats consistera à alimenter la pile à combustible grâce à de l'hydrogène lui-même obtenu sans recourir

aux hydrocarbures. C'est possible si l'on produit l'hydrogène par électrolyse de l'eau grâce à de l'énergie hydroélectrique, solaire, ou éolienne. Reste encore à résoudre le problème du transport et du stockage de l'hydrogène qui représente un défi difficile à relever.

## Vers de nouvelles énergies ?

### LA FUSION NUCLÉAIRE ET ITER

Au cœur du soleil et des étoiles, les noyaux légers fusionnent pour former des noyaux plus lourds. Ce processus dégage une énergie énorme qui est à l'origine de la chaleur et de la lumière que nous recevons sur Terre. Pour imiter cette fusion sur notre planète, il faut rapprocher suffisamment les noyaux, ce qui exige de très hautes températures (plus de 100 millions de degrés). L'intérêt est que l'on récupère énormément d'énergie à partir d'une masse de combustible faible. La fusion nucléaire présente un avantage en sûreté puisque l'emballement de la réaction est impossible. D'autre part, l'énergie de fusion ne produit pas de gaz à effet de serre ni de déchets.

Le projet I. T. E. R. (International Thermonuclear Experimental Reactor) de réacteur expérimental à fusion nucléaire est en cours de construction sur le site de Cadarache. Son exploitation commencera en 2015 seulement pour s'étendre sur 20 ans environ.

L'objectif de ce réacteur est de générer, à partir de 50 MW fournis, une énergie de 500 MW pendant 400 secondes. Cependant, de nombreuses critiques s'élèvent contre ce projet pharaonique qui a peu de chances d'aboutir à des applications industrielles dans un délai raisonnable.

### LA CENTRALE SOLAIRE ORBITALE

Depuis plus de 30 ans, Américains et Russes étudient la faisabilité d'une centrale solaire en orbite géostationnaire, dotée de gigantesques panneaux solaires, et qui transmettrait son énergie vers la Terre au moyen d'un faisceau de micro-ondes. L'avantage étant qu'à 36 000 km d'altitude, les panneaux recevraient huit fois plus d'énergie solaire qu'au sol.

Le Japon élabore lui aussi un projet de centrale solaire orbitale depuis 2001. Il prévoit le lancement avant 2040 d'une centrale de 20 000 tonnes qui permettra d'obtenir 1 GW de puissance. Les principales difficultés de ces divers projets se situent au niveau de la sécurité : le mode de transmission de l'énergie vers la Terre ne pouvant s'effectuer que par faisceau de micro-ondes ou laser. D'autre part, l'encombrement de l'orbite géostationnaire constitue aussi une autre des difficultés.

### CENTRALE OSMOTIQUE

Le principe de ces centrales est simple : si une masse d'eau salée est séparée d'une masse d'eau douce par une membrane semi-perméable, l'eau douce migre vers l'eau salée en générant un surcroît de pression qui peut être transformé en énergie par l'intermédiaire d'une turbine.

Le groupe énergétique norvégien Statkraft a annoncé récemment que le premier prototype de centrale osmotique au monde serait construit à Hurum, dans le sud-est de la Norvège.

Cette centrale prototype devrait produire entre 2 et 4 kWh.

Selon la société norvégienne constructrice, à l'échelle mondiale, cette technologie nouvelle pourrait produire dans l'avenir environ 1 600 TW heures.



## Interview

### Jean-Marie Fraysse

Délégué régional de l'Ademe en Midi-Pyrénées

### *Pensez-vous que les énergies renouvelables permettront de faire face aux défis du changement climatique et de la diminution des réserves d'énergies fossiles ?*

À elles seules, évidemment non. Nous devons avoir conscience que les changements à venir passeront obligatoirement aussi par une maîtrise de l'énergie. Et pour cela il nous faudra mettre en place une batterie d'actions :

- 1- Isoler l'habitat existant, ce qui représente un enjeu énorme.
  - 2- Basculer vers les transports collectifs et densifier nos villes.
- Rappelons-nous qu'un habitant de Londres consomme pour ses déplacements huit fois moins d'énergie qu'un habitant de

Houston, parce que sa ville est moins étendue.

3- Transporter les marchandises par ferroutage. Passer du camion au train permet de diviser la quantité d'énergie consommée par un facteur 10. La maîtrise du changement climatique passe à la fois par des actes individuels et collectifs. Individuellement, il est sage d'isoler sa maison, de réguler son chauffage, puis de s'intéresser aux énergies renouvelables. Et pour les transports, de pratiquer le vélo, la marche à pied ou d'utiliser les transports en commun. Collectivement, au moyen de son bulletin de vote, on peut influencer les politiques publiques pour inciter nos dirigeants à remodeler les villes, aménager les transports et promouvoir le ferroutage.

## À CONSULTER

Centrale solaire orbitale  
> <http://www.futura-sciences.com/fr/sinformer/actualites>

# Pour aller plus loin

**Pour dépasser la simple lecture de ce guide, nous vous proposons de consulter cette page pour approfondir les notions abordées.**

## SITE

### ADEME

Ce site incontournable et très complet offre aux particuliers comme aux professionnels une quantité impressionnante d'informations : il permet de se renseigner sur le développement durable, de devenir un écoconsommateur, ou d'apprendre comment acheter des produits écolabellisés pour le bureau, la chambre, la cuisine, etc.

Dans la partie « Bâti facteur 4 », de nombreux guides pratiques sont consacrés à la maison, aux aides, au confort et à la santé des occupants, aux énergies renouvelables, aux économies de chauffage, à la gestion des déchets. Des jeux permettent aux enfants de 7 à 12 ans d'apprendre à protéger la planète ou encore de construire une ville en harmonie avec son environnement. Enfin, des tests permettent même d'évaluer notre comportement actuel par rapport aux problèmes de la planète.

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

## LIVRES

### LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

par **Jean-Christian Lhomme**

Éditions Delachaux et Niestlé

Jean-Christian Lhomme n'hésite pas à entraîner son lecteur dans l'histoire : que ce soit celle des hommes, de l'univers, des étoiles, du soleil

et de la Terre. Cet ouvrage encyclopédique à la tonalité originale étudie les énergies renouvelables en commençant par l'énergie solaire et ses applications, avec différents types de capteurs thermiques ou photovoltaïques.

L'auteur ne cache pas son intérêt pour les applications de cette énergie aux pays en voie de développement. Dans le chapitre sur l'énergie du vent, il étudie les voiles et voiliers, le vol à voile, les moulins et les aérogénérateurs.

S'appuyant sur une vaste culture, il expose ensuite systématiquement les applications de l'énergie de l'eau, avec les barrages, les moulins à eau, les centrales et les usines marémotrices. La géothermie lui est prétexte à raconter l'histoire des sources chaudes, et l'architecture bioclimatique à comparer les réalisations des hommes à celles des termites. Un livre-somme qu'il convient de recommander.

### L'AUTONOMIE ÉNERGÉTIQUE : UNE NOUVELLE POLITIQUE POUR LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

par **Hermann Scheer**

Éditions Actes Sud

L'auteur de ce livre est résolument optimiste : pour lui, un mélange des énergies renouvelables est la solution idéale aux problèmes énergétiques. Car les bénéfices des énergies renouvelables sont largement sous-estimés, notamment dans les domaines sociaux et stratégiques (indépendance énergétique).

L'avantage majeur de ces énergies réside dans

le fait que leur production et leur distribution sont locales, ce qui permet des gains énergétiques, économiques, sociaux et stratégiques énormes. Cependant le développement de ces énergies ne pourra véritablement se réaliser qu'au moyen d'une révolution dans la façon de penser leur création et leur distribution.

### LA VIE APRÈS LE PÉTROLE : DE LA PÉNURIE AUX ÉNERGIES NOUVELLES

par **Jean-Luc Wingert**

Éditions Autrement

Un livre clair, précis et argumenté sur l'évolution du marché du pétrole, et son probable renchérissement. L'auteur estime qu'à partir de 2015, l'offre de pétrole va diminuer lentement. Si bien que nous pouvons nous attendre à une hausse importante des prix de l'or noir, hausse qui devrait provoquer des bouleversements d'une ampleur comparable à ceux de la révolution industrielle. Cette pénurie qui nous guette donne l'occasion à Jean-Luc Wingert de passer en revue les différentes énergies qui pourraient se substituer au pétrole : sans doute un cocktail composé d'énergies renouvelables et de nucléaire.

Ce qui ne nous dispensera pas de l'obligation de réviser nos modes de vie en abandonnant les voitures trop gourmandes ainsi que les voyages en avion gros consommateurs de kérosène. La meilleure façon de se préparer à ces transformations étant d'instaurer sans tarder une taxe supplémentaire sur le pétrole afin de faire baisser sa consommation et de financer une transition jugée inéluctable.

### LE PLEIN, S'IL VOUS PLAÎT

par **Alain Grandjean** et **Jean-Marc Jancovici**

Éditions du Seuil

La poursuite d'une consommation débridée d'énergies fossiles est évidemment incompati-

ble avec les limites physiques de notre Terre, et nous expose à un double danger : une crise économique majeure due à l'épuisement des ressources, et une crise écologique dramatique provoquée par le changement climatique. De plus le recours à d'autres énergies est illusoire, si la consommation actuelle n'est pas fortement ralentie.

Pour éviter ces aléas, les auteurs plaident donc pour une augmentation progressive de la fiscalité sur les énergies fossiles, seule susceptible de faire évoluer profondément (et progressivement) notre façon de vivre et de consommer.

### LA FAIM, LA BAGNOLE, LE BLÉ ET NOUS

par **Fabrice Nicolino**

Éditions Fayard

Cet essai est une dénonciation virulente de l'expansion fulgurante des agrocarburants de première génération dans le monde. L'auteur dénonce avec pertinence la stérilisation de millions d'hectares de terres agricoles et l'aggravation tragique de la faim.

Pour Fabrice Nicolino, les agrocarburants sont des armes de guerre et de mort : l'extension des cultures destinées aux agrocarburants menace les cultures céréalières et alimentaires dont le cours explose.

Elle conduit aussi à la destruction des forêts tropicales : en Indonésie, le palmier à huile menace l'homme, l'orang-outan et l'éléphant d'Asie.

Au Brésil et en Amérique latine, on supprime des forêts pour planter de la canne à sucre ou du soja. Pour l'auteur, les agrocarburants qu'il nomme nécro-carburants, présentent donc un bilan écologique et humain désastreux.

# Index

- Aérothermiques ..... 20, 21  
Agrocarburants ..... 5, 10, 11, 12, 47  
Aides ..... 9, 17, 21, 27, 30, 36, 46  
Architecture bioclimatique ..... 27, 29, 46  
Atmosphère ..... 2, 3, 4, 8,  
..... 9, 10, 11, 12, 13, 43, 45  
..... 30, 31, 32, 35, 41, 45, 46, 47
- Gaz à effet de serre ..... 11, 13, 16, 44  
Géothermie ..... 3, 5, 18, 19, 20, 46  
Géothermiques ..... 18, 19, 20
- Huiles ..... 10, 11, 12, 47  
Hydroélectriques ..... 15, 16
- Immeubles bioclimatiques ..... 29
- Matières organiques ..... 6, 13  
Mer ..... 31, 33, 43  
Méthane ..... 12, 13, 16  
Microcentrales ..... 16  
Moulin ..... 2, 14, 17, 32, 33, 38, 46
- Oxygène ..... 6, 12, 28, 43
- Performance ..... 8, 20, 33  
Petites centrales hydroélectriques ..... 16  
Petites éoliennes ..... 36  
Photosynthèse ..... 5, 6, 32, 45  
Photovoltaïque ..... 4, 5, 17, 22,  
..... 23, 29, 30, 31, 47  
Planète ..... 4, 5, 45, 46  
Poêles ..... 8, 9, 28  
Pompes à chaleur ..... 18, 20  
Propres ..... 4, 12  
Puits canadien ..... 28, 29
- Réchauffement climatique ..... 2, 3, 40  
Recherches ..... 11, 12, 16, 23, 40  
Réseaux de chauffage ..... 19
- Soleil ..... 3, 4, 5, 22,  
..... 24, 25, 26, 28, 29, 31, 32, 44, 46  
Subventions ..... 9, 21, 27
- Terre ..... 3, 4, 5, 11,  
..... 18, 28, 32, 33, 36, 43, 44, 45, 46, 47  
Toitures végétalisées ..... 28  
Turbines ..... 14, 25  
Turbines hydrauliques ..... 14, 16
- Vent ..... 3, 29, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 39, 47
- Barrages ..... 14, 15, 16  
Besoin ..... 25, 37  
Biogaz ..... 5, 6, 9, 12, 13  
Biomasse ..... 4, 5, 6, 10, 32  
Bois ..... 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 31, 35  
Bois-énergie ..... 7, 8, 32
- Canal de dérivation ..... 16  
Capteurs ..... 19, 20, 22, 23,  
..... 25, 26, 27, 31, 41, 47  
Carburants ..... 2, 5, 6, 10, 43, 47  
Centrales ..... 9, 15, 16, 17, 22, 24, 25, 45, 46  
Chaleur ..... 3, 7, 9, 12,  
..... 13, 18, 19, 20, 21, 28, 29, 39, 44  
Changement climatique ..... 2, 45, 47  
Chaudière solaire ..... 14  
Chaudière à bois ..... 9  
Chauffage central ..... 8  
Chauffe-eau solaire ..... 26, 27  
Cheminées ..... 8  
Climat ..... 4, 13, 20, 21, 27, 28  
CO<sub>2</sub> ..... 2, 3, 4, 6, 10, 12, 13, 16, 40  
Collecteurs paraboliques ..... 25  
Consommateurs ..... 40, 42, 47  
Crédit d'impôt ..... 9, 21, 27, 30, 37  
Cycle de l'eau ..... 14
- Développement ..... 11, 14, 16, 17,  
..... 35, 40, 46, 47
- Eau chaude ..... 9, 18, 19, 21, 26, 27, 28, 41  
Électricité ..... 3, 4, 5, 13, 15, 16, 17,  
..... 18, 19, 20, 21, 22, 24, 29, 30,  
..... 31, 33, 34, 35, 36, 37, 41, 43  
Émissions ..... 3, 4, 10, 11, 40, 41, 44  
Énergie éolienne ..... 5, 32, 33, 35, 37, 39  
Énergies solaires ..... 5, 6, 22, 23,  
..... 24, 26, 32, 45, 46  
Énergies fossiles ..... 2, 5, 13, 43, 45, 47  
Énergies renouvelables ..... 2, 3, 5, 6,

## Comment est né ce livre ?

Il a été réalisé par les **éditions Plume de carotte** au printemps 2008 pour les magasins Nature & Découvertes.

**Robert Pince** l'a écrit.

**Lionel le Néouanic** en a fait les dessins.

**Geneviève Démereau** en a créé la maquette, qui a été réalisée par **Catherine Racine**.

**Audrey Calvo-Guiochet** en a fait le suivi éditorial avec l'aide de **Laura Puechberty**.

**Henri Taverner** en a corrigé les textes.

Le tout sous la supervision de **Françoise Vernet** et de **Carine Evano**, de Nature & Découvertes.

Il a été imprimé à Toulouse par l'**imprimerie Ménard** en mars 2008.



Le livre que vous avez entre les mains a été réalisé par **Plume de carotte**, première maison d'édition française certifiée ISO 14001 (certification de qualité environnementale sur la conception et la réalisation de livres).

Il a été imprimé par **Ménard**, société labellisée **Imprim'vert**, dans ses locaux à Labège (31), à moins de 20 km des bureaux de Plume de carotte.

Il est composé d'un **papier respectueux de l'environnement, blanchi sans chlore** et certifié **PEFC** (Pan European Forest Council), garantissant une gestion des forêts économiquement viable, respectueuse de l'environnement et socialement respectueuse.

Ce **papier** provient d'un papetier situé à 300 km de chez l'imprimeur et a été fabriqué spécialement au format pour éviter les chutes de papier.

L'impression s'est faite avec des **encres à base d'huile végétale** et la finition avec des **verniss non plastiques**.

Les **eaux de mouillage** des machines, les **plaques** et les **produits de développement** ont été **recyclés**.

**[www.natureetdecouvertes.com](http://www.natureetdecouvertes.com)**  
**Pour être plus proche de la nature...**

Le site de Nature & Découvertes propose du contenu informatif et pédagogique sur la nature et l'environnement ainsi qu'une large sélection d'offres de produits.

De quoi compléter les informations contenues dans ce guide, donner mille et une idées pour des activités et des sorties, trouver des renseignements sur un sujet qui vous passionne et plus de 1 500 articles, livres et équipements qui combleront les petits et les grands...

Chauffage, éclairage, transports... Notre vie est consommatrice d'énergie.  
Certes, nous devons faire des économies pour préserver nos ressources, mais comment, chacun à son niveau, peut-on s'y prendre ?

Ce livre vous présente les différentes sources d'énergies naturelles et renouvelables, et les explications pratiques, vous permettant de les mettre en œuvre... à votre échelle.

## dans la même collection

Être Écocitoyen  
Éduquer à l'environnement  
Votre Habitat au naturel  
Le bio dans votre assiette  
Vivre avec la nature  
La Cosmétique BIO  
Être Écovoyageur  
Être Consom'acteur  
Être solidaire  
Le Commerce équitable  
Jardiner autrement



**Nature  
& Découvertes**

1, avenue de l'Europe  
78117 Toussus-Le Noble  
Tél. : 33 (0) 1 39 56 01 47  
Fax : 33 (0) 1 39 56 91 66  
nature@nature-et-decouvertes.com  
www.natureetdecouvertes.com



00153430

Prix : 1 €

*Le siège social, les entrepôts et les magasins de Nature & Découvertes sont certifiés ISO 14 001  
pour le respect de l'environnement.*