



Les énergies renouvelables au fil des siècles

Jean Hladik, Claude Marcel Hladik

► **To cite this version:**

Jean Hladik, Claude Marcel Hladik. Les énergies renouvelables au fil des siècles. J. Hladik. Les énergies renouvelables aujourd'hui et demain, Editions Ellipses Paris, pp.19-38, 2011. <hal-00603412>

HAL Id: hal-00603412

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00603412>

Submitted on 6 Mar 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Hladik, J. & Hladik, C.M. (2011) — Les énergies renouvelables au fil des siècles. In J. Hladik (Ed.) *Les énergies renouvelables aujourd'hui et demain*. Ellipses, Paris. pp. 19-38.

Un campement Pygmée en République Centrafricaine où le bois de feu reste la principale source d'énergie utilisée. Les foyers non structurés dont les traces disparaissent rapidement correspondent à ceux qui furent vraisemblablement utilisés avant l'émergence des hommes actuels (photo C.M. Hladik)



1. Les énergies renouvelables au fil des siècles

Jean HLADIK, Claude-Marcel HLADIK

Bien avant l'apparition des humains sur Terre, il y a de cela moins de 10 millions d'années, la nature avait déjà commencé à stocker dans le sol de l'énergie solaire sous forme de matériaux combustibles : charbon, pétrole et gaz naturel. Le charbon, par exemple, s'est surtout formé au cours de la période dite du *Carbonifère*, à la fin de l'ère primaire, il y a environ 300 millions d'années. Il y a seulement quelques milliers d'années que *Homo sapiens* a commencé à utiliser ces stocks d'énergie, puis il s'est mis à les gaspiller de plus en plus rapidement au cours des deux derniers siècles. Ces réserves d'énergie seront épuisées dans le courant des XXI^e et XXII^e siècles ; ce sont des *énergies non renouvelables*. Ces stocks d'énergie, donnés par la nature avant toute transformation humaine, sont appelés des *énergies primaires non renouvelables*.

Les énergies primaires renouvelables

Ces stocks d'énergie solaire mis en réserve dans des végétaux terrestres et marins soumis à diverses transformations très lentes, seront épuisés rapidement après avoir largement pollué l'environnement. Par contre, les énergies dites renouvelables seront inépuisables durant des centaines de millions d'années.

Énergies d'origine solaire

L'énergie solaire arrive sur la Terre sous forme d'un rayonnement électromagnétique pouvant être capté directement sous différentes formes : chaleur, électricité, action photochimique. C'est l'*énergie solaire directe* que l'on peut considérer comme une énergie inépuisable puisque le Soleil produira encore une telle énergie durant 4 à 5 milliards d'années. On dira que c'est une *énergie primaire renouvelable*.

La biosphère transforme elle-même, de manière continue, une partie de l'énergie solaire directe sous d'autres formes exploitables par l'homme. Le rayonnement solaire chauffe l'atmosphère, les eaux et les sols de la Terre. De plus, il fait croître naturellement les végétaux terrestres et marins.

Le chauffage de l'atmosphère entraîne des déséquilibres entre les masses d'air atmosphérique. Il en résulte des déplacements de ces masses, les vents, qui ont une certaine énergie cinétique, appelée *énergie éolienne*. Le chauffage des eaux, principalement des mers et des océans, engendre une évaporation qui porte en altitude une importante quantité d'eau ; après condensation, cette masse d'eau a acquis une énergie mécanique potentielle, appelée *énergie hydraulique*.

En chauffant le sol terrestre, une partie de cette chaleur se transmet vers l'intérieur du sol qui est plus froid et elle reste emmagasinée tant que la surface est plus chaude que les couches internes ; c'est une quantité de chaleur stockée sur quelques mètres de profondeur, que l'on peut appeler simplement *énergie calorifique du sol*. Par abus de langage, l'énergie solaire ainsi stockée en surface est appelée parfois *énergie géothermique* alors que cette appellation concerne traditionnellement la chaleur interne des couches profondes de la Terre en provenance du noyau central. Enfin le chauffage de l'eau des mers et des océans entraîne également un certain stockage naturel d'énergie calorifique.

La croissance des végétaux s'effectue grâce à un ensemble complexe de réactions chimiques initiées par l'action du rayonnement solaire, appelées *réactions de photosynthèse*. Il en résulte globalement la formation de matière carbonée qui constitue l'essentiel de la structure de tous les végétaux, ces derniers formant ce qu'on appelle la *biomasse végétale*. Les végétaux accumulent ainsi une partie de l'énergie du rayonnement solaire directe sous la forme d'une *énergie biologique*, encore appelée *bioénergie*.

Ces quatre transformations naturelles de l'énergie solaire directe conduisent à des *énergies solaires indirectes* : éolienne, hydraulique, calorifique de surface du sol et des eaux, de biomasse végétale. Comme ces énergies se forment en permanence, sans intervention humaine, on les appelle également des *énergies primaires renouvelables*.

Énergies autres que solaires

Une force fondamentale agit pour former toutes les structures de l'Univers [H1a3]. C'est la force dite d'*attraction universelle*, encore appelée *gravitation*. Cette attraction entre tous les corps matériels a été à l'origine de la formation des systèmes planétaires et, entre autres, d'un système qui nous est particulièrement cher : le système solaire.

La Terre est soumise en permanence à l'attraction du Soleil, de la Lune et, avec une moindre importance, des autres planètes du système solaire. Les eaux terrestres des mers et des océans subissent cette attraction et se déplacent selon le rythme bien connu des marées. Ces mouvements de grandes masses d'eau possèdent une énergie mécanique importante, appelée *énergie des marées*.

Lors de la formation du Soleil et des planètes, les gaz et les poussières constitutives ont vu leur température et leur pression augmenter considérablement lors de leur accréation sous l'influence de la force d'attraction universelle. Le centre du Soleil va atteindre ainsi jusqu'à environ un million de degrés, permettant le déclenchement des réactions thermonucléaires qui sont à l'origine du gigantesque rayonnement qui nous éclaire et nous chauffe. Ce phénomène d'échauffement lors de la contraction des gaz a lieu pour toutes les planètes gazeuses mais les températures atteintes sont bien inférieures. Dans le cas de la plus grosse des planètes du système solaire, Jupiter, sa masse est environ le millième de la masse du Soleil ; la température interne de Jupiter ne s'élève seulement qu'à 150 000 degrés.

Quant à la Terre qui est une petite planète ayant une surface solide, alors que les grosses planètes sont gazeuses, elle possède un noyau à la température d'environ 6 650°C. L'apport de chaleur au noyau terrestre est principalement dû à

des désintégrations radioactives d'éléments à courte durée de vie au cours de ses trente premiers millions d'années d'existence. Rappelons que le système solaire date d'environ 4,5 milliards d'années. Le noyau terrestre est entouré du *manteau* qui représente un peu plus de 80 % du volume de la Terre ; le manteau est une couche intermédiaire entre le noyau planétaire et la croûte terrestre. Des désintégrations radioactives continuent de chauffer l'intérieur de la planète. La chaleur contenue dans la croûte terrestre provenant du noyau et des fissions radioactives est appelée *l'énergie géothermique*.

Enfin, une autre source d'énergie est celle qui se trouve dans la constitution même de la matière. Dans la théorie du Big Bang [H1a4], on imagine que la création de l'Univers ne s'est pas faite *ex nihilo* mais à partir d'une énergie fondamentale, venue d'on ne sait où, qui s'est littéralement *matérialisée* pour créer toutes les particules élémentaires nécessaires à la formation des atomes, constituants de toute matière. Réciproquement, on montre expérimentalement que toutes les particules matérielles peuvent s'annihiler en énergie pure.

Une énergie E peut être mise en rapport avec la masse m de matière dont elle dérive grâce à la fameuse formule : $E = mc^2$ (H1a5), où c est la vitesse de la lumière. C'est une *énergie d'annihilation de la matière*.

On a donc trois types d'énergies non solaires. Ce sont : l'énergie des marées, l'énergie géothermique et l'énergie d'annihilation de la matière. Ce sont des énergies primaires renouvelables. Récapitulons les diverses énergies primaires renouvelables dont nous venons de voir les origines.

Énergies primaires renouvelables

Énergies d'origine solaire : énergie solaire directe ; énergie éolienne ; énergie hydraulique ; énergie calorifique du sol et des eaux ; énergie de la biomasse végétale.

Énergies d'autres origines : énergie des marées ; énergie géothermique ; énergie d'annihilation de la matière.

Voyons à présent quelles furent, au cours des millénaires passés, les principales utilisations par l'homme de ces énergies primaires renouvelables. Pour répondre à ses besoins, l'homme transforme ces énergies primaires en énergies secondaires. Par exemple, la combustion de la biomasse végétale produit une certaine énergie calorifique qui est une énergie secondaire. L'énergie éolienne est transformée en énergie mécanique de rotation par l'utilisation d'un moteur éolien ; cette énergie mécanique est une énergie secondaire. Ces énergies secondaires peuvent à leur tour être transformées en énergies tertiaires selon les besoins. Ainsi, une énergie calorifique secondaire peut servir à faire tourner une machine à vapeur, celle-ci produisant comme énergie tertiaire de l'énergie mécanique.

L'énergie renouvelable fondamentale utilisée par l'homme est celle de l'alimentation humaine contenue dans la biomasse végétale et animale ; nous l'étudierons en détail par la suite. La première utilisation non biologique par les hommes de la biomasse végétale fut celle de la production d'énergie calorifique par le feu. Outre son emploi pour le chauffage, le feu permit la cuisson des aliments qui deviennent ainsi plus digestes et faciles à assimiler.

Dans l'ouvrage *Aux origines de l'humanité, volume 2, le propre de l'homme*, réalisé sous la direction de Pascal Picq et Yves Coppens [Pic1], le problème des relations entre la cuisson des aliments et l'évolution du cerveau des hominidés est analysé par Claude-Marcel Hladik et Pascal Picq dans leur article : *Au bon goût des singes*. Une théorie étudiant ce problème d'évolution avait été élaborée par d'autres chercheurs qui mettaient en avant l'influence d'une consommation accrue de viande. Mais les auteurs précités se basent sur une interprétation très différente :

Plus récemment, des chercheurs réunis autour de Richard Wrangham ont émis l'hypothèse du rôle prépondérant de l'utilisation du feu et de la cuisson des aliments dans le développement du cerveau. La cuisson permet en effet de libérer davantage d'énergie. Elle rend la chair animale plus digeste, mais surtout multiplie presque par deux la possibilité d'assimiler l'amidon après cuisson. [...] Cette hypothèse prend le contre-pied de toutes celles qui, jusqu'à présent, associent l'encéphalisation à la consommation de viande.

Claude-Marcel Hladik précise ci-après l'importance de la révolution culinaire que constitua la cuisson des aliments et son impact sur l'encéphalisation des hominidés.

La cuisson des aliments : une révolution culinaire fondamentale pour le développement du cerveau humain

Claude-Marcel Hladik

Il nous faut remonter dans l'histoire de l'humanité vers des périodes beaucoup plus lointaines que celles des moulins à vent, de la fusion et de la forge des métaux ou même de la découverte et de l'utilisation des premiers récipients de terre cuite, pour comprendre le rôle des énergies fossiles ou renouvelables. Ce rôle ne se limite pas au développement des techniques car il apparaît comme une contribution essentielle à l'émergence des être humains, dans le cadre des seules théories actuelles qui résistent aux critiques.



Campement de pygmées Aka en Afrique centrale

On remarque, devant la case de gauche, les restes d'un feu de bois sans structure

Les premiers êtres humains n'appartenaient pas à l'espèce *Homo sapiens* qui habite la planète Terre depuis environ deux cent mille ans. D'autres espèces du genre *Homo* les avaient précédés et plusieurs de ces espèces humaines ont cohabité sur notre planète pendant des centaines de milliers d'années ; et certaines d'entre elles ont constitué le lignage de nos ancêtres.

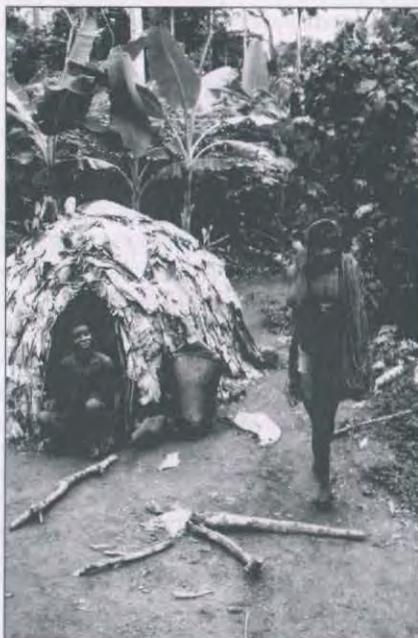
Ce qui caractérise notre lignage humain, c'est l'accroissement progressif du poids de notre cerveau par rapport à celui du reste du corps, mais c'est également la réduction de la taille des dents, depuis *Homo ergaster* et *Homo erectus* qui vivaient sur le continent africain il y a un ou deux millions d'années, jusqu'aux néandertaliens et aux hommes actuels. Les liens entre ces deux caractéristiques, gros cerveau et petites dents, semblent contradictoires car un cerveau de grande taille nécessite beaucoup d'énergie pour son métabolisme de base (supérieure à 10 fois celle d'un même poids de muscles) et cette énergie provient nécessairement de la nourriture ingérée ; or l'efficacité énergétique de la nourriture dépend non seulement de sa composition (protéines, sucres et graisses) mais également de la finesse avec laquelle nous la réduisons en fins éléments, en éclatant les parois cellulaires et en dilacérant les fibres végétales au cours de la mastication, ce qui dépend évidemment de la taille et de la forme des dents.

Nous connaissons les caractéristiques des dentures des primates sauvages actuels comme les chimpanzés, ainsi que leurs régimes alimentaires pour les avoir suivis dans les forêts équatoriales. Leurs énormes incisives peuvent trancher la fibre des écorces et les cuspidés acérées de leurs prémolaires peuvent finement broyer les fruits et feuillages, leur procurant chaque jour suffisamment de calories pour un bon équilibre métabolique.

Les dentures des fossiles pré-humains et humains ont été également bien étudiées par nos collègues paléontologues ; mais nous sommes évidemment beaucoup moins bien documentés sur les régimes alimentaires auxquels ces ancêtres étaient adaptés. Et le point essentiel sur lequel portent les controverses actuelles est de savoir combien de temps devrait durer la mastication pour obtenir un apport calorique suffisant... car avec les aliments actuellement disponibles en forêt ou en savane, compte tenu de leur teneur en fibres et de la taille des dents des espèces du genre *Homo*, le temps de mastication quotidienne devrait dépasser 24 heures pour obtenir une alimentation assimilable couvrant les besoins énergétiques. Cette dernière extrapolation a été présentée au Muséum d'Histoire Naturelle par notre collègue Richard Wrangham, un primatologue de renommée internationale qui a passé la plus grande partie de sa vie à étudier des groupes de chimpanzés et leur environnement naturel.

Aussi, la question se pose-t-elle en ces termes : pourquoi observe-t-on une réduction progressive de la denture dans la lignée des primates qui ont précédé *Homo sapiens* ? La réponse a été proposée dans un document écrit par R. Wrangham en collaboration avec des paléontologues qui avaient effectué des fouilles sur des sites datant de 1,5 à 1,7 millions d'années où des charbons de bois sont présents à côté de restes de fossiles du genre *Homo* dont la taille du cerveau n'était alors pas beaucoup plus grande que celle d'un chimpanzé. L'utilisation du feu pour la cuisson des aliments aurait donc permis, dès cette période très lointaine, de rendre les aliments plus faciles à mâcher et beaucoup plus assimilables. On sait, par exemple, que l'amidon cuit apporte deux fois plus de calories que lorsqu'il est

cru ; et l'amidon est présent dans des graines et dans des tubercules abondants et facilement accessibles.



Campement de pygmées Aka en Afrique centrale

Au premier plan, reste de feu de bois utilisé pour la cuisson des aliments.

Les traces laissées par les foyers des peuples forestiers actuels s'effacent après quelques semaines, comme ce fut certainement le cas au cours des centaines de milliers d'années d'occupation humaine de ce milieu.

Ces observations publiées dans le journal scientifique *Current Anthropology* sont toutefois encore loin de convaincre beaucoup de nos collègues qui pensent que les charbons de bois pourraient provenir d'incendies de forêt et n'auraient pas de relation directe avec la présence des fossiles du genre *Homo* sur les sites étudiés. Pour eux, l'utilisation du feu ne remonterait pas à plus de cinq cent mille ans, période où l'on observe des traces de foyers bien structurés, entourés de pierres et avec les traces d'une longue utilisation par l'homme de Neandertal.

Pourtant, si l'on observe les restes d'un campement des Pygmées qui vivent encore actuellement dans les forêts d'Afrique centrale et qui cuisent leurs tubercules et leur viande directement sur le feu et abandonnent les lieux après quelques semaines, on constate que la dispersion des charbons de bois et de quelques restes de gibier qui pourraient être retrouvés par des archéologues dans quelques milliers d'années correspond très précisément à la situation décrite par Wrangham et ses collègues paléontologues.

Et que peut-on proposer d'autre, pour expliquer la diminution de la taille des dents, que l'utilisation d'aliments cuits très tôt dans l'histoire de l'humanité ? Il n'y

a pas d'hypothèse alternative qui soit plausible et les observations de terrain confirment cette maîtrise du feu par des espèces au cerveau encore peu développé comme *Homo ergaster* et *H. erectus*.

Faire du feu, c'est déjà utiliser de l'énergie accumulée dans du bois, avec une certaine maîtrise technique. Et cette énergie utilisée pour la cuisson des aliments serait celle de nos origines, ouvrant la possibilité des transformations qui ont suivi, notamment la réduction de la mâchoire qui accompagne l'accroissement du volume cérébral.

L'alimentation cuite est une caractéristique humaine essentielle, ainsi que Claude Lévi-Strauss l'avait bien compris. Et, plus récemment, un collègue ethnologue s'insurgeait contre les interdictions d'accès au bois de feu dans certaines régions, en présentant comme un droit humain imprescriptible l'accès à une nourriture cuite et chaude. Nous sommes bien loin de l'alimentation dite « naturelle » car les transformations physico-chimiques de la cuisson portent non seulement sur les amidons, mais également sur la structure des protéines et les nouveaux composés que la réaction de Maillard fait apparaître, donnant un goût totalement nouveau aux viandes rôties. Bien que la tendance actuelle prône un retour partiel vers la « nature », les aliments totalement synthétiques proposés par Hervé This, comme ces assemblages de gelées artificielles, ne semblent pas moins humains que toutes les étapes qui, par l'apport d'une énergie externe ont transformé l'alimentation avant de transformer les espèces humaines.

Il en est de ces transformations comme de toute évolution des espèces pour lesquelles la cause et les effets sont simultanés, souvent progressifs et avec des effets rétroactifs. La maîtrise technique sera plus efficace par les individus au cerveau plus développé (dont les dents seront réduites). Cela implique aussi l'organisation de la vie en groupes et le plaisir de partager une nourriture appétissante. Le travail de collecte des aliments de base, graines et tubercules, par les femmes, et le travail complémentaire du chasseur est encore la caractéristique des groupes isolés de Pygmées. Mais on oublie trop souvent que l'énergie consommée sous forme de bois de feu le fut dès l'origine et fut très certainement notre origine.

La bioénergie

Les biocombustibles solides

La biomasse végétale est formée par des composés carbonés qui peuvent être utilisés comme combustibles. Traditionnellement le bois fut le principal combustible utilisé au cours des millénaires remontant aux origines de l'humanité. Selon les régions du monde, d'autres combustibles furent cependant utilisés, et le sont toujours, lorsque le bois est rare ou fait complètement défaut ; c'est le cas, par exemple, de la bouse des bovins.

La combustion du bois est un processus complexe qui se déroule en plusieurs phases : séchage, dégazage et combustion du *charbon de bois*. Le bois, au sens propre, ne brûle pas. Il se décompose et ce sont les produits issus de cette décomposition qui brûlent.

Même lorsque le bois est considéré comme convenablement sec après une ou deux années de séchage naturel, il contient encore au moins 15 % d'humidité. Lorsqu'on allume un feu, il faut chauffer le bois pour qu'il dégage cette humidité. Cette première phase consomme donc de l'énergie calorifique. Puis, à partir d'environ 200 °C, une partie du bois se décompose en gaz combustibles qui brûlent en présence d'air, cette combustion entretenant le processus de dégazage. La température monte alors vers 800 °C. Lorsque tous les gaz sont brûlés, il reste le charbon de bois qui représente environ 30 % du poids sec initial, et qui peut se mettre alors à brûler si l'arrivée d'air est suffisante.

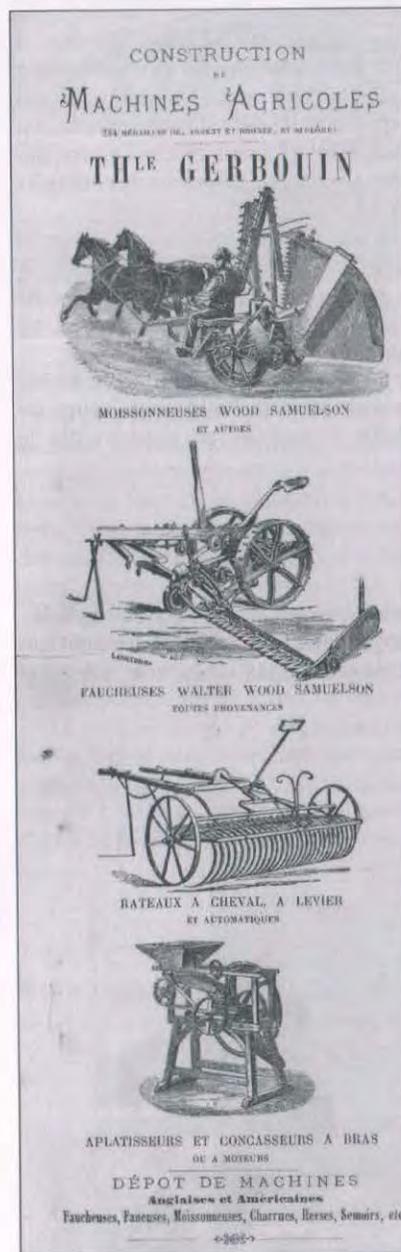


Montage d'une meule de branches pour la fabrication du charbon de bois

Dès la Préhistoire, le bois fut utilisé pour le chauffage, la cuisson des aliments et divers artisanats, la fonte des métaux, par exemple. Des consommations massives du bois de chauffage eurent lieu jusqu'aux XVI^e et XVII^e siècles pour les industries naissantes, le charbon se substituant alors au bois. Actuellement la biomasse végétale est, de toutes les énergies renouvelables, celle qui est la plus utilisée dans le monde, représentant environ 10 % de la consommation énergétique mondiale.

De l'Antiquité jusqu'au XVIII^e siècle, le charbon de bois a été très employé tant pour les besoins domestiques qu'industriels. De nos jours, il est encore largement utilisé pour la cuisson des aliments dans de nombreux pays en voie de développement.

Lors de la combustion du bois, il y a production de charbon de bois après la phase de dégazage. Si l'on ne fournit pas d'air pour commencer la combustion du charbon de bois, celui-ci ne brûle pas. La fabrication artisanale du charbon de bois est réalisée en montant une meule de branches approximativement de même longueur, serrées debout les unes contre les autres. Le dôme ainsi formé s'ouvre à sa base de canaux de circulation d'air pour accélérer ou ralentir la combustion. Le tout est recouvert de terre humide. Une cheminée centrale permet d'allumer le feu. Le charbonnier contrôle la combustion partielle à laquelle il met fin en obstruant les orifices de circulation d'air. Il laisse refroidir environ une semaine puis il trie le charbon de bois selon son calibre et le met en sacs.



Machines agricoles, tirées par des chevaux, fabriquées en 1880

Le charbon de bois présente divers avantages, par rapport au bois, pour des utilisations domestiques ou artisanales. Il est plus concentré en énergie que le bois puisqu'il dégage environ 28 mégajoules par kilo contre 18 par kilo de bois sec. Il dégage beaucoup moins de fumée que le bois puisque les gaz ont déjà été brûlés. Par suite, le charbon de bois a été utilisé durant des siècles dans les grandes villes de toute la planète et il le reste dans les villes des pays en voie de développement.

D'autres biocombustibles solides, comme la bouse de vache séchée, furent longtemps utilisés. Les *bousettes* furent employées en Vendée jusqu'au XIX^e siècle. Au Tibet, la bouse de yak fait toujours partie des biocombustibles traditionnels.

La bioénergie animale

La nourriture apporte à un animal la quantité d'énergie nécessaire en premier lieu à son métabolisme de base, c'est-à-dire à la vie cellulaire indispensable au fonctionnement des différents organes et tissus de l'organisme, à la réparation des tissus et au travail musculaire irréductible dû au tonus musculaire. Une autre partie de l'énergie nutritionnelle est employée en dépenses liées à l'acte alimentaire ainsi qu'à la thermorégulation de l'organisme. Le reste peut être utilisé pour des activités musculaires.

En ce qui concerne l'homme, les apports énergétiques journaliers conseillés par l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments sont de 11,4 mégajoules par jour (soit 2 700 kcal/j) pour un homme de 70 kilos ayant les activités habituelles de la majorité de la population. Pour une activité physique très importante, la nourriture doit apporter environ 14 mégajoules par jour. Compte tenu des dépenses énergétiques de base citées précédemment, l'activité musculaire d'un homme ne peut être que de 20 à 25 % des

apports nutritionnels, soit moins de 4 mégajoules par jour.

À partir du moment où l'homme commença à domestiquer des animaux, il utilisa, en Europe, le cheval et le bœuf pour effectuer des travaux demandant des énergies bien plus importantes que celle qu'il pouvait fournir. Pour les mêmes raisons, le buffle et l'éléphant furent mis à contribution dans d'autres parties du monde. Les apports nutritionnels de ces animaux étant fournis gracieusement par la nature, l'homme utilisa des animaux de traits qui pouvaient fournir des énergies 15 à 20 fois supérieures à la sienne.

Les siècles passant, la machine à vapeur fit son apparition et sa puissance fit concurrence à celle des animaux. Un kilo de bois brûlé dans une machine à vapeur, en tenant compte d'un rendement de 25 %, produit une énergie mécanique de l'ordre de celle d'un homme durant une journée. En brûlant une tonne de bois, on obtient un travail mécanique fourni par environ une cinquantaine de chevaux.

La bioénergie animale fit alors place à la bioénergie végétale, tout au moins dans certains secteurs d'activité. Puis, ainsi que nous le verrons au cours du prochain chapitre, la pénurie de bois nécessita le recours au charbon dès le XVIII^e siècle.

L'énergie éolienne

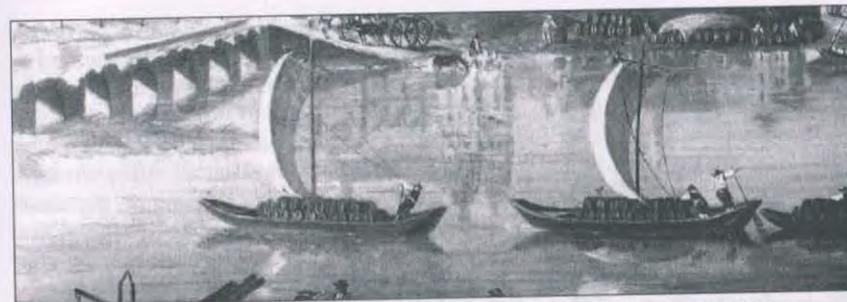
Le vent est un déplacement d'une masse d'air possédant une importante énergie mécanique, sous forme d'énergie cinétique. Les pays maritimes, ou qui disposaient d'un vaste réseau de fleuves, utilisèrent sans doute très tôt cette énergie pour la navigation.

La navigation à voile



Bateaux touristiques dans la baie de Ha Long (2008)

Les voiles rigidifiées par des lattes de bois et installées parallèlement à l'axe du bateau étaient typiques des anciennes jonques.



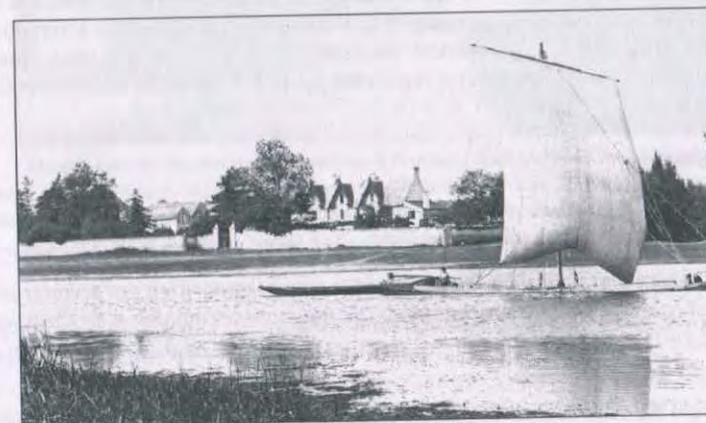
Transport de tonneaux de vin sur des gabarres remontant la Loire au XVIII^e siècle

La navigation sur la Loire était très active. Les vents d'ouest permettaient la remontée du courant.

La plus ancienne représentation connue d'un voilier serait celle qui figure sur un vase égyptien remontant à 3300 ans avant J.-C. Les reliefs sculptés et les inscriptions hiéroglyphiques fournissent une documentation très ancienne sur les navires et l'art de la navigation dans l'Égypte ancienne. Environ 2500 ans avant notre ère, aux esquifs fabriqués en papyrus succédèrent des bateaux de mer dérivés des embarcations fluviales sur le Nil. Une vingtaine d'avirons et une voile carrée, hissée sur un mat rabattable, assuraient la propulsion.

Avec ses grandes artères fluviales, comme le Yangzi (5 300 km) et le Xijiang (2 100 km), la Chine était également prédisposée pour un développement de la batellerie. C'est en Chine que naissent, dès le III^e siècle avec notre ère, les premiers canaux permettant de traverser les reliefs.

La jonque marine se développa en adoptant un profil plus effilé que le bateau fluvial à fond plat. Des mats multiples équipèrent les jonques dès le III^e siècle. La puissance navale de la Chine se développa à tel point qu'au XIII^e siècle, elle aligna jusqu'à 4 500 navires hérissés d'une imposante artillerie face aux côtes japonaises. C'était également à cette époque une superpuissance commerciale.



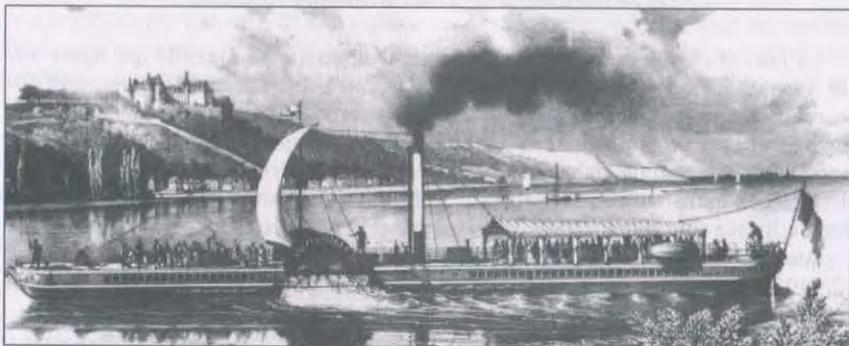
Un chaland transporte de lourds matériaux sur la Maine en 1908

La batellerie fluviale à voile est encore active à cette époque malgré la concurrence de la vapeur.

En Scandinavie, les Vikings construisirent les fameux drakkars à partir du IX^e siècle. C'étaient des bateaux de haute mer, propulsés à la fois par des avirons et par des voiles. À bord de ces bateaux, ils entreprirent des raids fructueux sur les côtes de l'Europe occidentale.

De nombreux types de navires hauturiers furent construits en Europe. La caravelle, immortalisée par Christophe Colomb, était un vaisseau de faible tonnage, doté de trois ou quatre mats ; la plus grande de la flotte de Colomb ne dépassait pas les 27 mètres de long.

Au fil des siècles, les dimensions des navires à voiles devinrent de plus en plus importantes. Les *clippers*, qui apparurent au cours de la guerre d'indépendance américaine, acquièrent une renommée internationale en raison de leur rapidité. Ils furent utilisés dans le commerce de longue distance jusqu'au XIX^e siècle.



Concurrence entre la voile et la vapeur. La voile devient anecdotique

Construit en 1841, ces bateaux « inexplosibles » restent à voile et à vapeur.

Le *Ville d'Angers* mesure 45 mètres de long et a une puissance de 40 chevaux-vapeur. Il est capable de faire l'aller et retour Angers-Nantes dans la journée avec 250 passagers à son bord.

L'avènement des bateaux à vapeur marqua le déclin de la voile pour les transports fluviaux ainsi que ceux de haute mer. Cependant des cargos en acier, dotés de quatre ou cinq mats, continuèrent de rivaliser avec ceux à vapeur jusqu'au XX^e siècle ; les derniers spécimens voguèrent jusqu'à la veille de la Seconde Guerre mondiale.

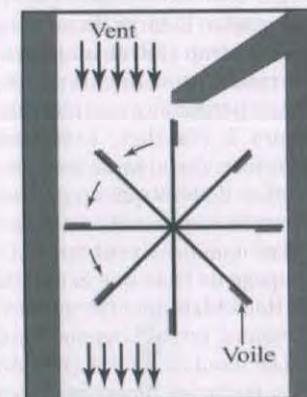
Les éoliennes

Ainsi que le fait remarquer Jean-Christian Lhomme dans son ouvrage consacré aux énergies renouvelables [Lho1] :

Plusieurs centaines de millions d'années avant l'apparition des premières ailes, l'énergie du vent transportait la vie. En poussant les nuages et en transportant les graines des plantes, elle a été un vecteur essentiel à la colonisation de la Terre.

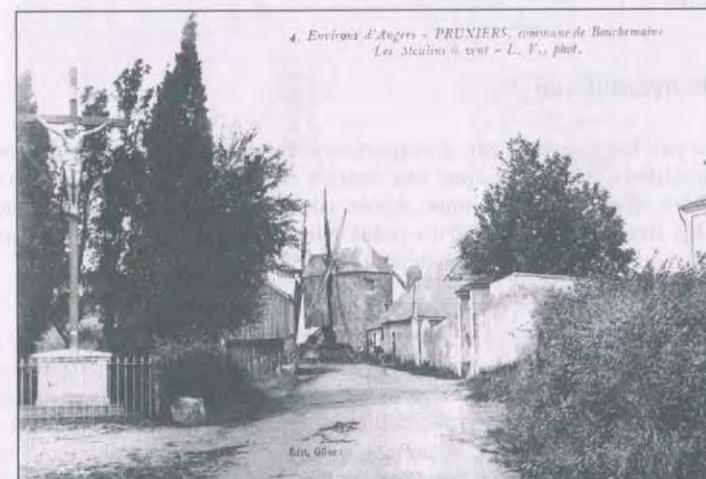
L'énergie du vent a ainsi été utilisée bien avant sa domestication par l'homme qui inventa la navigation à voile et le moteur éolien. La première conception documentée d'éolienne connue est celle d'un moulin persan datant de neuf siècles

avant J.-C. Il s'agit d'une éolienne, appelée *panémone*, comportant un axe central vertical auquel sont attachées des « voiles » verticales faites de roseaux ou de bois. La figure ci-contre montre une coupe horizontale du système tournant. Celui-ci est enfermé dans une tour verticale qui canalise le vent sur les pales situées sur la gauche de la figure. La tour était orientée face aux vents dominants.



Principe du panémone persan

Dans l'ouvrage *Les Pneumatiques* de l'Égyptien Héron d'Alexandrie, au premier siècle avant J.-C., on trouve la description d'une éolienne à axe horizontal. Cependant, la technologie du moulin persan à axe vertical semble la seule utilisée jusque vers le XII^e siècle où elle fut sans doute importée au temps des Croisades, puis évolua sous la forme connue des moulins à vent à axe horizontal.



Moulin-tour et moulin-pivot en Anjou, à Pruniers, commune de Bouchemaine

Ces deux moulins étaient situés sur une éminence, lieu-dit La Butte. Ils ont tournés jusque dans les années 1910 pour la meunerie. Seul subsiste actuellement le moulin-tour. Il existait déjà un moulin à cet endroit au moins depuis 1420, date à laquelle on note l'arrentement de deux quartiers de vigne « au clou du Moulin, à Pruniers ».

Deux types principaux de moulins pour moudre le grain se développèrent en Europe. Les moulins de type « à pivot » constitués d'un bâtiment en bois portant les ailes et le mécanisme de mouture et pivotant sur un socle conique. Les moulins construits sous forme d'une tour en pierres sur laquelle la toiture porte les ailes et pivote afin de placer la voilure face au vent.

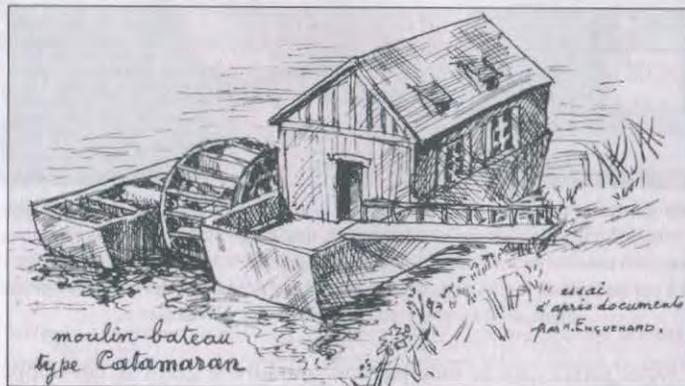
Les ailes des moulins portaient une voilure en toile qu'il fallait replier plus ou moins selon la force du vent. Le meunier ne devait pas s'endormir lorsque le vent devenait trop violent, ainsi que le rappelle la fameuse chanson : « Meunier, tu dors, ton moulin, ton moulin va trop vite... ». En 1842, l'ingénieur Pierre-Théophile Berton permit aux meuniers de passer des nuits plus tranquilles, en inventant une voilure à planches, à surface réglable automatiquement, commandée depuis l'intérieur du moulin par un système de tringles. Chaque aile est formée de lamelles de bois qui, en glissant les unes sur les autres peuvent plus ou moins se recouvrir, diminuant ou augmentant ainsi la surface offerte au vent.

Les moulins à vent furent utilisés rapidement dans toute l'Europe, tant pour le pompage de l'eau que la mouture des grains, mais aussi le sciage du bois d'œuvre. Les Hollandais apportèrent des améliorations aux moulins qui, outre leurs emplois classiques, furent largement utilisés pour l'assèchement des polders.

Les moulins à vent comportent quatre pales alors que de petites éoliennes à pales multiples furent mises en œuvre pour le pompage de l'eau en milieu rural. Les pales sont en général au nombre d'une vingtaine. Ces éoliennes tournent lentement et peuvent être couplées, par une longue tige métallique, à une pompe à piston situé dans un puits et dont la tenue mécanique nécessite des mouvements à vitesse lente.

L'énergie hydraulique

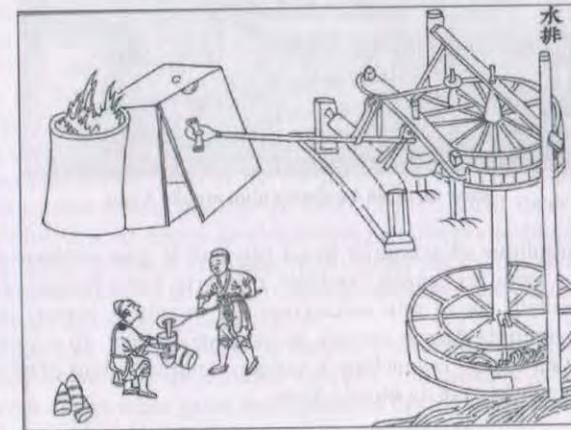
Portée par les nuages, l'eau d'évaporation des lacs, des mers et des océans monte en altitude, acquérant ainsi une énergie mécanique potentielle de gravitation, appelée énergie hydraulique. Après condensation, les masses d'eau qui forment les fleuves s'écoulent d'un point haut à un point bas, engendrant un courant plus ou moins rapide selon la pente.



Les cours d'eau furent utilisés dans les Balkans, peu avant l'ère chrétienne, pour faire tourner une roue à palettes disposée horizontalement dans le lit du fleuve. Cette roue était solidaire d'un axe vertical qui traversait une meule inférieure gisante et faisait tourner une meule supérieure pour le broyage du grain.

Les Romains adaptèrent l'idée du moulin en positionnant la roue à aubes verticalement et en amenant l'eau sur les aubes par un aqueduc. Lors du siège de Rome par les Ostrogoths, au VI^e siècle, les assiégeants coupèrent l'eau de l'aqueduc. Le général Bélisaire fit alors construire des moulins flottants sur lesquels une roue à aubes était entraînée par le courant du Tibre. Le moulin-bateau était inventé et se répandit ensuite sur tous les grands cours d'eau européens.

Amarrés à la rive, ces engins flottants (figure page précédent) peuvent suivre les variations fluviales entre les niveaux des basses eaux estivales et des crues hivernales ou printanières, variations qui peuvent être de plusieurs mètres. La roue entraînait des meules situées dans l'habacle flottant. Les derniers moulins-bateaux disparurent en France au début du XX^e siècle.



Soufflerie d'un haut fourneau à énergie hydraulique
(gravure chinoise du XIV^e siècle du traité de Wang Zhen)

La Chine ne fut pas en reste pour l'utilisation de l'énergie hydraulique. Sous la dynastie des Han, entre 206 avant J.-C. et 220 après J.-C., l'utilisation de l'énergie hydraulique est déjà répandue. Elle permet d'actionner des souffleries pour les hauts fourneaux de l'époque (figure ci-dessus). Une roue à palettes est entraînée par le courant d'une rivière. La roue est reliée à un système mécanique qui transforme le mouvement de rotation en translation pour le soufflet. Les Chinois ne cesseront de perfectionner le moulin à eau, l'employant pour de multiples usages : broyage des minerais, décorticage des graines, etc., la technologie sidérurgique du fer et de l'acier déjà bien développée fournissant des pièces métallurgiques de qualité pour ces opérations.

En Europe, l'usage de l'énergie hydraulique va largement se développer au cours du Moyen Âge. À partir du milieu du XII^e siècle, le nombre de moulins à eau va se multiplier. Il n'y eut guère d'innovations à cette époque mais elle bénéficia des techniques que lui avait légué l'Antiquité : les engrenages, l'arbre à cames, les soufflets à contrepoids, les ressorts, la technique des mouvements rectilignes alternatifs à partir de mouvements circulaires. Avec un retard considérable par rapport à la Chine, l'Europe redécouvre au XIV^e siècle la soufflerie mécanique, mise en mouvement par la roue hydraulique, pour les hauts fourneaux.



Roue verticale à palettes d'un moulin à eau

La roue hydraulique va actionner peu à peu tout le gros outillage du métallurgiste : machine à forer les canons, laminoir, tréfilerie. Cette fameuse roue devient également le moteur de la scie mécanique, du moulin à papier, de la pompe aspirante, de la remonte dans les mines, du broyage du malt, du moulin à chanvre, etc. Jusqu'à l'invention de la machine à vapeur, l'industrie tout entière puise son énergie dans celle de la roue du moulin à eau.

L'énergie solaire directe

Les énergies que nous venons de voir : bioénergie, éolienne, hydraulique, sont des énergies solaires indirectes. L'énergie solaire directe fut techniquement peu utilisée, au cours des siècles. L'effet de serre pour le chauffage fut la seule utilisation qui se développa grâce aux progrès des techniques de fabrication du verre plat.

La fabrication du verre plat

La découverte du verre est estimée à quelques 1500 ans avant notre ère où apparaissent les premiers objets creux en verre coulé. Les premiers exemples du verre coulé plat se retrouve dans les vitrages d'habitations de Pompéi. L'invention de la canne à souffler le verre, au premier siècle avant J.-C., contribua grandement au développement d'un artisanat de vases en verre.

Le verre plat ne prit son essor qu'à partir de l'invention du soufflage en couronne, au V^e siècle. C'est un vase soufflé à fond plat que l'on fait tourner face à l'ouverture d'un four et qui s'étire et s'aplatit par rotation. Le soufflage en manchon apparut au X^e siècle ; c'est un cylindre de verre, fendu puis aplati. Ces procédés furent utilisés durant tout le Moyen Âge pour la fabrication des vitraux.

Une innovation importante apparaît à la fin du XVII^e siècle en France grâce à Bernard Perrot. Il a l'idée de couler une masse de verre fondu sur une plaque de métal. Un rouleau sert à aplatir le verre fluide. La découverte s'ébruite rapidement et devient la méthode essentielle de fabrication du verre plat en grandes surfaces

Les vitrages dans l'habitat et les serres

Lorsque le verre plat commence à être produit industriellement, les fenêtres vitrées vont se multiplier. À partir du moment où des fenêtres d'habitations, bien orientées par rapport au Soleil, sont munies de vitrage, elles vont jouer le rôle de capteur de chaleur par effet de serre.

L'usage des serres de culture ne date que de l'époque où des relations suivies furent établies entre l'Europe et des pays tropicaux, c'est-à-dire à la fin du XV^e siècle. La plus ancienne serre à usage horticole aurait été construite dans le jardin botanique de Padoue. La Belgique et la Hollande en construisirent de nombreuses au XVI^e siècle. La mode s'en répandit en France principalement à partir du XVII^e siècle.

Au cours du XIX^e siècle, les hauts fourneaux mettent sur le marché des quantités de plus en plus importantes de fer. La production est passée de 15 tonnes par jour en 1806 à 2 000 tonnes par jour en 1850. Ce fut à partir de cette époque que les grandes constructions dotées de charpentes métalliques se développèrent. Mais l'usage de la fonte, lourde et empâtée, fera oublier les chefs-d'œuvre architecturaux du siècle précédent. Il faudra attendre la seconde moitié du XIX^e siècle pour voir une nouvelle attention portée au décor.

La renaissance va s'amorcer avec le fameux *Crystal Palace*, serre monumentale de l'exposition universelle de Londres en 1851. Uniquement construit en fonte, verre et acier, il s'inspire des gares ferroviaires et des serres. Reconstitué au sud de Londres, il disparut dans un gigantesque incendie en 1936.



Le Crystal Palace en 1851

Conçu par Joseph Paxton (1803-1885), ingénieur et architecte anglais. L'audace de cette construction fait de Paxton un précurseur de l'architecture moderne.

Les concentrateurs solaires

L'optique théorique des lentilles et des miroirs concaves était connue depuis de nombreux siècles, et aurait permis d'utiliser de hautes températures produites par ces moyens optiques, mais ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle qu'une première installation à concentration solaire est réalisée par Augustin Mouchot (1825-1911) pour des usages domestiques ou industriels.

À l'aide d'un miroir conique et d'une chaudière placée sur l'axe du cône, (figure ci-contre) Mouchot fabriqua, en 1870, un appareil qui lui permit de cuire « au soleil de Paris un bœuf à la mode ou un pot au feu en une heure et demie » [Mou1].

Par la suite, Mouchot présenta à l'exposition de 1878 un appareil identique à son cuiseur mais dont la surface d'entrée du miroir conique était de 20 mètres carrés environ. Au cours de diverses expériences, il utilisa la vapeur produite par cet appareil pour faire tourner une petite machine à vapeur.

Au début du XX^e siècle, une pompe, actionnée par une machine à vapeur de type solaire, fut utilisée pour l'irrigation en Égypte. Le moteur à explosion vint concurrencer ce système et stoppa le développement des machines solaires.

Ce n'est que durant la seconde moitié du XX^e siècle que furent de nouveau étudiés des systèmes à concentration de l'énergie solaire, soit pour obtenir de très hautes températures, soit pour faire tourner des machines à vapeur pour les centrales solaires.

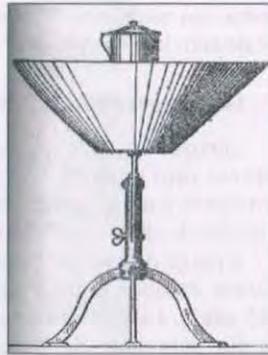
Transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique

L'étude du rayonnement solaire direct pour produire de l'énergie électrique n'a pas d'antécédents historiques très lointains, remontant seulement au XIX^e siècle. On appelle *effet photoélectrique* un ensemble de phénomènes électriques qui sont provoqués par l'action de la lumière sur la matière.

Les principaux effets photoélectriques sont l'émission photoélectrique, la photoconductivité et l'effet photovoltaïque, ces trois effets ayant en commun le processus primaire d'absorption de la lumière. Les photons qui transportent l'énergie lumineuse la transmettent à la matière et disparaissent. Ce sont les effets secondaires qui différencient les phénomènes observés. L'historique des cellules photovoltaïques sera détaillé au cours d'un chapitre spécifique.

L'énergie des marées

Selon les positions respectives du Soleil et de la Lune par rapport à la Terre, les marées auront des amplitudes différentes. Ce phénomène intéresse l'ensemble de la planète mais les amplitudes des marées sont cependant extrêmement variables



Concentrateur conique à chaudière centrale fabriqué par Augustin Mouchot en 1870

d'un littoral maritime à un autre car la force génératrice des marées s'amplifie sur les côtes par suite du passage de la marée sur un socle continental peu profond. De plus, des amplifications localisées sont dues à la configuration plus ou moins découpée des rivages. Le maximum des amplitudes dans la baie du Mont-Saint-Michel est de 15,5 mètres alors qu'il n'est que de 5,3 mètres à Royan, et 4,4 mètres à Arcachon ; il est de 17 mètres dans la baie de Fundy au Canada.

Les moulins à marée



Ancien moulin à marée en Bretagne

La forte amplitude des marées en Bretagne explique que ce fut la principale région française où se construisirent le plus grand nombre de moulins à marée, environ une centaine d'ouvrages répartis sur le littoral breton. Les premiers furent bâtis dès le XII^e siècle mais leur construction se développa au cours des XVI^e et XVII^e siècles, par suite de l'essor des activités artisanales et de la culture du sarrasin. Les minoteries industrielles ne leur succéderont qu'au cours du XIX^e siècle.

Le principe de fonctionnement des moulins à marée est simple : une digue ferme une petite baie peu profonde, créant ainsi un bassin fermé ; des vannes permettent le remplissage du bassin à marée montante ; lorsque la marée descend, les vannes sont fermées ; lors du reflux, l'eau de mer entraîne une ou plusieurs roues à aubes qui assurent le vidage du bassin, produisant une certaine énergie motrice, appelée *énergie marémotrice*.

Des centaines de moulins à marée furent construits dans les pays européens, et à travers le monde. Ainsi, par exemple, la multiplicité des côtes à rias du Portugal a permis l'installation de nombreux moulins à marée du nord au sud du pays ; une soixante de moulins tournait rien que dans l'estuaire du Tage.

L'énergie géothermique

Les eaux chaudes géothermiques ont été utilisées depuis très longtemps au cours de l'Histoire et sans doute de la Préhistoire. Les bains romains sont les plus connus mais dans d'autres pays où le volcanisme fait jaillir des sources chaudes,

ces calories gratuites furent amplement exploitées pour des usages domestiques ou sanitaires. C'est le cas, par exemple, de l'Islande et du Japon.

En France, en 1330, à Chaudes-Aigues, dans la Cantal, un réseau de distribution d'eau chaude géothermique fut installé afin d'alimenter plusieurs maisons avec une eau à environ 80°C. La ville d'Ax-les-Thermes, possède actuellement sept sources chaudes dont les températures vont de 23 à 74°C. Libres d'accès et d'usage à toutes les époques, les eaux chaudes d'Ax-les-Thermes servaient, bien avant le Moyen-âge, tout autant à laver la laine, ébouillanter le cochon et faire la soupe, qu'à soigner les corps. De nos jours, certaines fontaines d'Ax-les-Thermes mettent en garde contre les brûlures par leur eau ainsi que le montre la photo ci-dessous.



L'énergie thermique des eaux chaudes naturelles ne fut utilisée qu'à partir du XIX^e siècle pour l'extraction de l'acide borique. Celle-ci se faisait initialement par évaporation d'une eau riche en acide, chauffée au feu de bois. C'est un Français, François de Larderel qui, lors d'un voyage en Italie en 1827, eut l'idée d'utiliser la chaleur de la vapeur d'eau, jaillissant du sol à environ 120°C, pour réaliser l'extraction de l'acide borique. Le lieu d'exploitation de ces sources de vapeur a été baptisé en italien *Larderello*, du nom de ce Français industriel.

La vapeur d'eau géothermique fut utilisée à Larderello en 1905 pour faire tourner une machine à vapeur actionnant une génératrice d'électricité servant à l'éclairage du village. En 1915, une première centrale électrique géothermique, avec deux groupes de 2 570 kW de puissance, est mise en service.