Article : 001

L'énergie : une longue histoire

SOUTIF Michel

2015- juillet, Mis à jour 2018

Niveau de lecture : Facile

Rubrique : Bases théoriques

Mots clés :

Physique, Histoire, Sources d'énergie, Usages de l'énergie

Chapeau de l'article

Les sources d'énergie exploitées au 21ème siècle commencent à être bien connues. Mais derrière elles, en quoi consiste réellement l'énergie ? Quelle est sa réalité physique ? Comment les hommes se la sont-ils appropriée pour satisfaire leurs besoins ? La réponse du physicien.

Figure de couverture

Sommaire

1. L'énergie humaine 3

2. L'énergie de l'animal 3

3. L'énergie du vent 4

4. L'énergie de l'eau 4

5. L'énergie potentielle de gravitation 5

6. L'énergie calorifique 5

7. Le charbon de bois 6

8. La transformation de la chaleur en travail mécanique 7

8.1. Watt et la machine à vapeur 7

8.2. Le charbon et la vapeur en France 7

9. La thermodynamique 8

10. Les sources fossiles d'énergie 8

11. Les sources renouvelables d'énergie 8

Notes et références 9

L'idée d'énergie est intuitive et avant tout corporelle : un homme énergique ou plein d'énergie est capable d'effectuer un travail, musculaire en général.

Dès l'origine, donc, les définitions de l'énergie et du travail vont interférer avant de se clarifier longtemps après. (Lire : Qu'est-ce- que l'énergie ?).

Pendant tout le néolithique, l'énergie dont dispose l'homme est avant tout d'origine biologique. Il va dans certaines régions (Eurasie essentiellement) domestiquer quelques animaux, d'abord l'âne et le bœuf, pour transporter du matériel ou tirer un véhicule. Cela n'est d'ailleurs pas général : si, en Amérique du sud, sur les hauts plateaux, le lama (camélidé) a été domestiqué assez tôt, il n'en a pas été de même en Amérique centrale ou du nord, où aucun animal n'a été utilisé pour les transports. Tout se faisait à dos d'homme ce qui limitait le rayon d'action des armées.

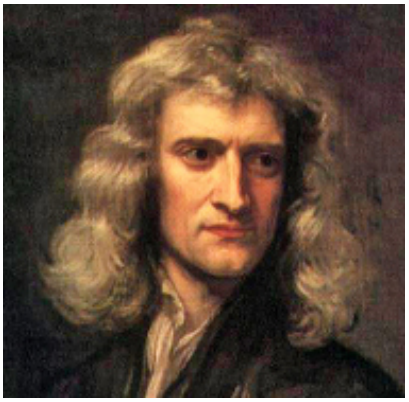

Fig. 1 : Portrait d'Isaac Newton, grand savant de l'énergie. Copie d'une peinture de Godfrey Kneller réalisée par Barrington Bramley – Source : Wikimedia Commons.

1. L'énergie humaine

Le transport à dos d'homme, avec une hotte tenue par un bandeau frontal reste de rigueur en pays très accidenté, tel l'Himalaya, ou cependant circule sur les sentiers praticables un cousin du bœuf, le yack ou plutôt le « dzo », animal moins rétif, issu d'un croisement avec la vache. Les Chinois ont inventé la palanche, pièce de bois portée sur l'épaule et chargée en équilibre aux deux extrémités (Figure 2). Ils ont également inventé la brouette à roue centrale qui permet à un homme d'en déplacer plusieurs.

Un exemple particulier de déploiement de l'énergie musculaire humaine est illustré par la construction des pyramides égyptiennes : celle de Cheops, construite en –2700, renferme à mi-hauteur la chambre mortuaire du Pharaon dont le plafond est formé d'un seul bloc de pierre pesant 30 tonnes. Il semble que sa mise en place ait été faite à partir d'un plan incliné revêtu d'argile sur lequel un traineau était tiré à l'unisson par un attelage de deux à trois cents hommes (Lire Conversion de l'énergie chimique des plantes en énergie musculaire).

Fig. 2 : Transport à dos d'homme au Népal, 2015 – Source : Nipun Sharma , Pixabay.

2. L'énergie de l'animal

Outre quelques animaux de bât ou de trait tels que l'âne, le bœuf (Figure 3), le dromadaire ou le chameau, voire l'éléphant, une domestication essentielle a été faite par les Indo-européens vers –2000, celle du cheval (equus caballus).

Fig. 3 : Attelage de bœufs en Alsace, 1962 – Source : propre.

Initialement, cet animal n'avait pas été sélectionné pour sa force mais pour sa rapidité. Très mal attelé, par une bride autour du cou, il s'étranglait dès qu'il devait tirer, alors qu'attelé à un char léger, il apporta aux Indo-Européens une arme irrésistible.

À partir de –200 environ, les Chinois améliorèrent l'attelage en utilisant la bricole de poitrail, puis, vers 800, le collier qui permet à l'animal d'exercer toute sa force à partir de ses épaules. Cette invention fondamentale, parvenue en Europe par la route de la soie, a permis aux charrues des monastères de défricher l'Europe au XII° siècle.

La puissance est le travail fourni par unité de temps. Comparée aux 45 watts de l'homme pompant ou aux 60 watts de l'homme actionnant une manivelle, celle des animaux s'élève à :

- 680 watts pour le cheval de trait ;
- 400 watts pour le bœuf ;
- 150 watts pour l'âne.

3. L'énergie du vent

Le premier système mu par le vent est un gadget construit par Héron d'Alexandrie et décrit dans *Les Pneumatiques*. Il commandait une pompe qui actionnait des instruments de musique. Il n'y eut aucune suite.

Les inventions suivantes sont arabes. Les frères Banu Musa, célèbres inventeurs persans, décrivent vers 850 des moulins à vent fonctionnant dans le désert de du Sistan où souffle un vent très régulier. Le plan du moulin est horizontal, des murs de maçonnerie canalisant le vent vers une attaque latérale, comme dans une turbine. L'axe de rotation, vertical, entraîne directement la meule du moulin.

En Occident, les premiers dessins se trouvent dans le psautier du moulin à vent écrit à Canterbury vers 1270. Le plan de la roue est devenu vertical et son axe peut être orienté face au vent grâce à une rotation de tout le moulin ou seulement du toit (Figure 4). Les ailes, rigides ou non, ont une orientation de l'ordre de 15 degrés sur le plan de la roue. Mais pour actionner une meule horizontale, il est nécessaire d'avoir un renvoi à 90 degrés grâce à un engrenage généralement en bois, ce qui crée une perte notable d'énergie.

Dès le début du XIII° siècle, la large diffusion de ces moulins à farine rencontre une forte hostilité paysanne. Le machinisme médiéval s'accompagne en effet d'un monopole au profit du seigneur qui en rend l'usage obligatoire et onéreux. En plusieurs endroits, l'autorité du seigneur ou de l'abbé fait détruire les meules à main de ses administrés pour les obliger à porter leur grain au moulin. Ainsi l'abbé de Saint Alban, en Angleterre, fait paver son parloir de meules confisquées à ses paysans.

Fig. 4 : Moulin à vent de Daudet, Fontvieille, 1814 – Source : Gilles Lagnel, Pixabay.

Par la suite, les moulins furent également utilisés pour actionner des pompes, soit pour l'alimentation en eau potable, soit pour l'assèchement des polders gagnés sur la mer. (Lire Production d'électricité éolienne)

C'est en remarquant les limites de la hauteur de pompage qu'Evangelista Torricelli eut l'idée de son tube à mercure et démontra ainsi l'existence du vide.

4. L'énergie de l'eau

Où a été inventée la roue à aubes mue par un courant d'eau ? La question reste entière car ce dispositif apparaît pour la première fois dans les références disponibles à peu près au même moment tant à l'Ouest qu'à l'Est.

À l'Ouest, le moulin à grain décrit par Vitruve en –27 ou Strabon en –24 est attribué à Mithridate. Il comprend une

Fig. 5 : Moulin à eau, Mabry mill, Virginie, USA, 1905 –

roue verticale qui actionne la meule à l'aide d'un engrenage à angle droit. Ce type de moulin se répand lentement en France, en Allemagne et en Angleterre. Une version différente, avec une turbine horizontale montée sur le même axe que la meule, se diffuse à partir de la Syrie vers la Grèce et l'Europe du Nord. Puis les roues se perfectionnent par un choix judicieux de la palette à l'intérieur de la roue ou par l'acquisition d'une forme creuse, en cuillère.

En Extrême Orient, la première description connue est celle de Hou Han Shu en 31. Elle concerne un dispositif beaucoup plus complexe, destiné à actionner des soufflets métallurgiques dans la région de Nan Yang. On obtient un mouvement alternatif à partir d'une roue à aubes horizontale et d'une manivelle. Il est très possible que cette application ait été inspirée par des moulins à grains beaucoup plus simples dont la trace n'apparaît cependant que plus tard avec Du Yi (224-284). L'ingénieur Gao (494-554) développa de nombreuses applications de l'énergie hydraulique afin d'accéder aux hautes températures que nécessitait la fabrication de porcelaine. Ce remplacement de l'énergie humaine par de l'énergie mécanique a certainement beaucoup compté dans l'avance de longue durée acquise par la Chine dans le travail de la fonte et de l'acier.

En dehors de Chine, les soufflets sont en cuir et leur nombre doit doubler pour obtenir une ventilation continue. Des dispositifs de ce type sont décrits en 1540 par Biringuccio mais il faudra attendre les brevets de John Wilkinson pour retrouver des systèmes à double effet. Jusqu'en 1588 dans la métallurgie, les dispositifs resteront le soufflet en cuir et le culbuteur. Vers cette époque apparaissent des marteaux à forger soulevés par des culbuteurs ainsi que les soufflets à double effet avec des montages à manivelle décrits par Ramelli. (Lire Les ouvrages hydrauliques)

5. L'énergie potentielle de gravitation

La chute des corps n'est pas due au désir des graves (liquides et solides opposés aux légers que sont l'air et le feu) de rejoindre le centre du monde, selon Aristote, mais à la force de gravitation dont le travail peut être utilisé. Au contraire, en fournissant le travail nécessaire à l'élévation d'un corps, on lui fournit une énergie potentielle récupérable. L'usage de la chute de l'eau a servi de moteur dans une horloge construite en 724 par le taoïste Yi Xing avant qu'en 976 Zhang Si Xun remplace l'eau par du mercure pour éviter le gel. En 1092, enfin, Su Song construisit la première horloge munie d'un échappement et mue par des godets se remplissant d'eau.

En Europe, le moteur usuel des horloges est la chute d'un poids (Figure 6). Une des premières horloges munies d'un échappement est due à Jean Froissard en 1368. Il sera suivi par Jost Burgi à Prague qui, en 1612, ajoute un contrôle par pendule, puis par Christiaan Huygens en 1673.

C'est le poids de l'opérateur qui grimpe dans une cage d'écureuil qui sert de moteur aux grues du Moyen Age utilisées pour la construction des cathédrales, comme on peut le voir sur les dessins de Villard de Honnecourt.

La chute de l'eau d'un château d'eau ou d'un lac d'altitude dans une conduite alimentant une turbine devient une importante source d'énergie dans les industries naissantes au XVII° siècle puis explose à partir de 1850.

Fig. 6 : Horloge artisanale, La Cheppe – Source : Garitan, 2011, Wikimedia Commons.

6. L'énergie calorifique

Qu'est-ce que la chaleur ? Dès le début, deux conceptions s'affrontent : pour les uns, la chaleur c'est du mouvement, des vibrations ; pour les autres, c'est un fluide, le calorique, qui pénètre partout. Les expériences de calorimétrie qui montrent que la chaleur se conserve plaident plutôt pour le fluide, mais celui-ci n'affecte pas de la même manière les corps qu'il occupe. Dans une série d'études publiées de 1761 à 1765, le médecin écossais Joseph Black (1728-1799) définit les chaleurs spécifiques et les chaleurs de changement d'état.

Antoine de Lavoisier et Pierre Simon de Laplace déterminent les chaleurs spécifiques des solides en les plaçant dans une sphère creuse de glace et en mesurant les quantités d'eau fondue avant l'équilibre de l'ensemble à 0°C. Ils supposent que le fluide calorique dans un corps est partiellement libre et partiellement combiné comme l'eau de cristallisation et l'eau de dissolution dans un sel. Par contre, Benjamin Rumford, en alésant des canons, montre que le travail se transforme en chaleur, ce qui confirme la théorie des vibrations.

Un peu plus tard, en 1840, James Prescott Joule montre que la même quantité de travail, qu'elle que soit son origine, fournit la même quantité de chaleur. Par là, il énonce le principe d'équivalence. Dès le début du XIX° siècle, à partir d'une simple loi de diffusion phénoménologique, Joseph Fourier établit les lois de diffusion de la chaleur et met au point des traitements mathématiques d'une immense portée.

7. Le charbon de bois

On sait désormais qu'à coté des énergies mécaniques, il y a l'énergie calorifique. Ces deux manifestations de l'énergie ont été longtemps utilisées indépendamment. Les sources de chaleur n'ont commencé à être domestiquées qu'avec ce qu'on appelle la découverte du feu. L'homo erectus de Tautavel en –400 000 ne le connaissait pas mais celui de Terra Amata , à Nice, le maîtrisait vers –300 000. Longtemps utilisé simplement pour faire cuire les aliments et se défendre des prédateurs, la maîtrise du feu devient essentielle au Néolithique pour préparer les céramiques puis inventer la métallurgie, d'abord celle du cuivre vers –3 500 à Sumer, puis celle du bronze et enfin celle du fer avec les Hittite vers –1 500.

Fig. 7 : Production de chaleur par combustion de charbon de bois – Source: Alexandra München, Pixabay.

La source de chaleur est d'abord le bois frais ou sec, puis le charbon de bois (Figure 7) qui est obtenu par chauffage en vase clos du bois que l'on veut débarrasser des substances incombustibles. Ce produit sera essentiel jusqu'au XIX^{e} siècle. Il s'agit d'un squelette rigide de carbone pur qui permet d'atteindre des températures dépassant 1 000°C dans les fours à céramique de la culture de Yang Shao en Chine vers –4 000, puis de dépasser à partir de –500 le point eutectique de l'alliage fer-carbone, soit 1 145°C, et d'accéder ainsi à la fonte liquide[1]. L'usage, toujours en Chine, de soufflets à double effet puis de la houille à partir de 400 permettra d'aller jusqu'aux températures nécessaires à la porcelaine, soit 1 280°C, à partir de la dynastie Song.

L'énergie calorifique n'est alors employée que pour le chauffage et les réactions chimiques, essentiellement la réduction des oxydes métalliques. Le charbon de bois est détrôné par la houille en Chine qui devient pour longtemps le premier producteur mondial de fonte : dès 1078, elle en produit 114 000 tonnes alors que l'Angleterre, pays le plus industrialisé d'Europe, n'en produira que 68 000 tonnes en 1788.

Dans ce pays, les évènements se précipitent vers 1650 avec la raréfaction du bois. Il faut alors le remplacer par de la houille dont les gisements affleurent au Northumberland et au Pays de Galles (Figure 8). Mais la houille, comme le bois, renferme en général des impuretés non combustibles et malodorantes. Pour sécher le houblon, les brasseurs de Derby lui font subir le même traitement qu'au bois. En le chauffant en vase clos, ils obtiennent un nouveau squelette carboné, encore plus dur : le coke. Ce combustible va ouvrir la voie d'une nouvelle utilisation de l'énergie calorifique : sa transformation en énergie mécanique. (Lire La consommation mondiale d'énergie avant l'ère industrielle)

Fig. 8 : Affleurement de charbon à Kilgetty au pays de Galle – Source : espace pédagogique, académie de Nantes.

8. La transformation de la chaleur en travail mécanique

Les mines de houille anglaises à ciel ouvert, inaugurées à la fin du XVII° siècle, sont rapidement inondées et deviennent inexploitables. Le problème industriel majeur est donc celui du pompage que Thomas Newcomen résout en 1702 par son invention géniale : la pompe à feu. Au lieu de transformer le travail en chaleur par le frottement, ce que l'on savait faire, il transforme de la chaleur en travail.

La pompe de Newcomen utilise un cylindre et un piston. On introduit dans le cylindre de la vapeur d'eau à 100 °C puis on la condense par un refroidissement ce qui provoque un vide attirant le piston et ainsi de suite. Le piston entraîne une pompe classique. Ce système prit rapidement des dimensions considérables (cylindre de plus d'un mètre de diamètre) et se généralisa à des usines pour lesquelles il alimentait un château d'eau fournissant l'énergie des turbines motrices de toute l'installation.

8.1. Watt et la machine à vapeur

James Watt (1736-1819) apporte trois modifications fondamentales à la machine précédente. Au lieu de refroidir le cylindre principal à chaque aller-retour, il se borne à le mettre en relation par un robinet avec le condensateur, récipient maintenu à basse température et qui impose son vide : à elle seule, cette modification économise 75 % du combustible. Ensuite, la vapeur n'est plus injectée à la pression atmosphérique mais sous forte pression pour pousser le piston. Enfin, la vapeur est introduite alternativement sur les deux faces du piston.

Fig. 9 : Machines à vapeur – Source: Jacqueline Macou, Pixabay.

Il suffit alors de transformer le mouvement alternatif en rotation continue grâce à un système bielle-manivelle pour que toute la partie hydraulique devienne inutile. En 1785, la filature Robinson s'équipe la première. En 1802, plus de 65 grosses machines sont en service. Elles transforment les manufactures en usines et ouvrent la révolution industrielle.

Les nouvelles machines ont aussi une autre application. Les wagonnets sur rail étant très utilisés dans les mines anglaises, George Stephenson (1781-1848) eut l'idée d'employer une machine à vapeur pour tirer des voitures sur une voie ferrée, d'où la locomotive Rocket mise en service en 1829 puis le chemin de fer de Liverpool à Manchester en 1830 (Figure 9).

8.2. Le charbon et la vapeur en France

La situation en France était au XVIII° siècle très différente de celle de l'Angleterre car le bois y était très abondant. Un essai de cokéfier la houille du Creusot en 1785 ayant été un échec, les partisans de la sidérurgie au charbon de bois triomphèrent. En 1826 cependant une première ligne de chemin de fer réservée au transport de la houille sera inaugurée entre Lyon et Saint Etienne.

Dès cette époque, le progrès est ponctué de manifestations écologiques. Le premier essai de transport de voyageurs entre Paris et saint Germain-en-Laye (15 km) rencontre une très vive opposition de la part de ceux qui pensent que les grandes vitesses (40 km/heure) mettent en danger la vie des utilisateurs. En 1840, les législateurs adoptent une loi

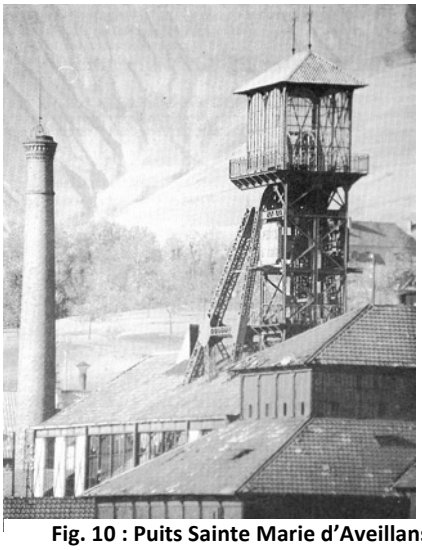

Fig. 10 : Puits Sainte Marie d'Aveillans – Source : Wikimedia Commons.

interdisant aux locomotives d'émettre de la fumée. Seul le coke répondant à cette exigence, il faut s'en procurer en Belgique, d'où la première ligne de chemin de fer depuis Lille, puis en ouvrant les mines du Nord. Le raccordement de Grenoble au réseau PLM (Paris-Lyon-Marseille) en 1858 a été en grande partie motivé par l'existence à La Mure d'un excellent anthracite n'exigeant pas d'être cokéfié (Figure 10). Peu à peu la sidérurgie française va abandonner le bois mais le ravage des forêts se poursuivra en réponse à la demande de traverses de voies ferrées.

9. La thermodynamique

L'existence de dispositifs importants transformant la chaleur en travail soulève de nouveaux problèmes théoriques sur ce qu'est le calorique et sur le calcul des performances que l'on peut espérer.

Sadi Carnot (1796-1832) décompose une machine thermique en trois constituants : une source de chaleur, un fluide transmetteur, un récepteur de chaleur. Il conclut que dans une machine sans frottement, le calorique ne s'échappe pas et que le travail ne provient que de la chute de température. La chaleur n'est autre que du mouvement qui modifie sa forme. Il publie ces résultats en 1824 mais meurt du choléra en 1832.

James Prescott Joule met en évidence la proportionnalité entre le dégagement de chaleur et le travail fourni dont il tire l'équivalent mécanique de la calorie. D'où l'unité de mesure qu'est le Joule (J).

Rudolf Clausius (1822-1898) réalise que Sadi Carnot s'est mal exprimé : le calorique s'est transformé en travail mécanique dans la machine mais le montant total d'énergie, et non de calorique, reste constant. C'est la première loi de la thermodynamique.

Hermann von Helmholtz (1821-1894) généralise les notions de chaleur et de travail en montrant qu'il s'agit de deux formes différentes d'une même réalité, l'énergie, dont la quantité totale reste invariable. C'est la généralisation, en 1847, du principe d'équivalence. La chaleur ne peut cependant se transformer d'elle-même en travail sans cause extérieure. Le système chaleur-travail est irréversible et une nouvelle fonction, l'entropie, en croissant chiffre la dégradation de l'énergie dans les transformations irréversibles. C'est la deuxième loi de la thermodynamique.

William Thomson qui deviendra Lord Kelvin (1824-1907) définit alors une échelle de température à partir du rendement énergétique d'une machine thermique sans pertes par frottement. Puisqu'il ne dépend que des températures des deux sources, ce rendement permet de définir une échelle indépendante de tout fluide et ainsi de sortir des systèmes arbitraires usuels. Kelvin fixe alors cette échelle de façon à avoir 100° C de différence entre la glace fondante et l'eau bouillante. L'échelle de Kelvin coïncide alors avec l'échelle de Celsius à une translation près de 273,1 °C. (Lire La thermodynamique : les lois et La thermodynamique : énergie et entropie)

10. Les sources fossiles d'énergie

L'énergie dont nous disposons à l'heure actuelle sur la planète provient presque exclusivement du soleil. Seule l'énergie nucléaire trouve son origine dans la nucléosynthèse des gigantesques explosions des supernovae. La quantité des sources fossiles étant limitée et finie, elle ne manquera pas de s'épuiser puisque la synthèse du charbon et des hydrocarbures a demandé des millions d'années. Même l'énergie nucléaire utilisée dans des réacteurs surgénérateurs (le thorium est très répandu) finira par s'épuiser.

11. Les sources renouvelables d'énergie

Ces sources proviennent du rayonnement solaire, soit directement, soit indirectement, sous la forme du vent et de la pluie. Elles ont l'immense avantage d'être inépuisables, mais deux inconvénients majeurs : celui d'être réparties à faible densité et celui d'être intermittentes. La valeur fréquemment avancée du rayonnement solaire, soit 1 kW/m^2, doit être complétée par la précision qu'il s'agit d'une valeur maximale par temps clair et

au zénith. De même pour le vent, les valeurs indiquées sont données pour un vent minimum important. Il s'agit donc de sources complémentaires, très utiles, mais en aucun cas de sources de remplacement des sources conventionnelles, sauf à infliger à la nature d'immenses dégâts.

Un avantage important de ces sources renouvelables est d'être aussi non polluantes. L'examen du cycle complet de leur production peut cependant réserver quelques surprises. Ainsi le Danemark, fortement équipé d'éoliennes est resté un pays très pollueur : statistiquement, le vent ne souffle suffisamment que 31 % du temps et, phénomène aggravant, s'interrompt de façon imprévisible. Le système de production d'électricité doit alors être complété par des centrales thermiques à démarrage ultra rapide qui sont extrêmement polluantes.

Notes et références

[1] En chimie, un mélange eutectique est un mélange en solution binaire qui fond et se solidifie à température constante.