

L'énergie : travail et chaleur - de l'économie à la médecine.

Le formatage d'une pensée sur la nature à partir d'impératifs économiques est à la fois le signe de l'inter-fécondation des domaines de connaissances mais surtout le signe - s'il fallait le redire- que la science n'est jamais gratuite et que la forme qu'elle prend jusque dans la nature de ses concepts est totalement dépendante de son contexte d'émergence.

Tentative de synthèse à partir des entrées "Energie", "travail", "chaleur" du «*Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*»¹ et du livre sur la notion de travail de François Vatin², ce petit historique voudrait présenter comment s'est peu à peu unifié le concept d'énergie en physique dans le cadre de la révolution industrielle.

L'énergie s'appréhende à travers les différentes formes qu'elle revêt lors de ses transferts qui manifestent sa présence : déplacement d'objet, de charges électriques ou de fluides, chaleur ou rayonnement (ondes lumineuses, visibles ou pas). Ce sont ces formes qu'elle a prises dans les différents domaines (industrie, chimie, médecine) au cours de l'histoire qui permirent de faire émerger le concept d'énergie.

François Vatin expose clairement comment la dynamique industrielle et l'impératif d'efficacité économique des XVIII^e et XIX^e a généré la notion de *travail* (travail d'une force), notion initiatrice de ce mouvement de formalisation puis d'unification du concept d'énergie : ce mouvement montre l'influence du contexte et de la demande politico-économique dans la mise en forme et donc dans "l'existence" même d'un concept théorique en science c'est à dire d'un outil de langage qui dépasse son champ disciplinaire de création d'autant plus que la graine qu'il y a fait germé venait de l'extérieur (de l'économie vers la physique).

I Emergence de la notion de travail

De la force des hommes...

Petit rappel accessible et utile pour la suite

La notion de force désigne en physique l'action d'un objet sur un autre : pour la représenter sur un schéma, on la modélise par un vecteur (une flèche) \vec{F} de longueur proportionnelle à l'action de valeur F (mesurée en newton, unité de force) et dans la direction et le sens³ de cette action à partir du point où elle s'exerce. Pendant longtemps force et énergie furent longtemps confondues. Jusqu'à Galilée, on confondait même la force avec l'impulsion donnée à un objet lancé, ce que certains continuent de faire en pensant que l'objet a une force du fait de sa vitesse : pour éviter cette méprise et être sûr qu'on désigne une "vraie force", il faut chercher un agissant et un subissant : en l'absence de l'un ou l'autre on ne peut parler de force, ici puisque le lanceur ne touche plus le lancé, l'objet ne subit pas de force du lanceur⁴.

La notion de travail d'une force F exercée sur un objet lors d'un déplacement d

L'expression de *travail* apparut au cours du XVIII^e siècle pour comparer le produit des machines avec celui des hommes. Le physicien Guillaume AMONTONS (1663-1705) l'évoquait à l'Académie des sciences en 1699 : le travail mesurait l'activité humaine du polissage des glaces avec la grandeur *labores*. Il correspondait au produit du poids (une force), de la vitesse et d'un temps (donc d'une force par une distance puisque vitesse×temps=distance) :

$$\text{travail} = F \times d$$

Amontons comparait ainsi la dépense d'une journée de travail de l'homme (salaire), du cheval (nourriture et soins) à celle des machines.

L'ingénieur militaire devenu physicien et membre de l'Académie des sciences Charles Augustin COULOMB

1. dirigé par D. Lecourt- puf, 1999

2. cf. François Vatin, *Le travail, économie et physique. 1780-1830* puf -1993

3. une droite définit une direction dans l'espace, le sens la façon dont on la parcourt : vers la gauche ou la droite

4. on peut lui prêter de la quantité de mouvement $p = mv$ (ou impulsion) et de l'énergie cinétique : cf. infra

(1736-1806) définit en 1799⁵ le travail dans sa dualité c'est à dire l'effet produit relativement à la fatigue subie :

«pour tirer tout le parti possible des forces de l'homme, il faut augmenter l'effet sans augmenter la fatigue. (...) [Il faut] que l'effet divisé par la fatigue soit un maximum».

Il s'agissait bien d'améliorer le rendement en réduisant les frottements, mauvais mouvements ou chocs "parasites". Le travail humain reste chez Coulomb la référence comme chez Amontons : commis de l'Etat, il pense la science comme un instrument de progrès économique et social et mesure les effets mécaniques en "équivalent-homme" dans une physique tournée vers la pratique, faisant écho au travaux de LAVOISIER qui mesurait l'effort physique pour ramener toute activité humaine à son équivalent :

«connaître à combien de livres en poids répondent les efforts d'un homme qui récite un discours, (...) qui joue d'un instrument»⁶.

Ainsi le physicien se fait économiste : un ouvrier de poids Q , transportant un poids P à une hauteur h lors d'une "action journalière" notée a , fournira un effort utile hP tel que :

$$h \cdot P = a - Q \cdot h - b \cdot P$$

qu'on peut traduire par :

énergie utile = énergie totale – énergie pour monter l'ouvrier seul – fatigue de l'ouvrier.

Où bP est relatif à la fatigue ou "perte physiologique" de l'ouvrier qui reste fort difficile à estimer et source de bien des désaccords sur les conditions et le temps de travail comme sur sa rémunération.

Coulomb en cherchant l'optimum de ce transfert parvint néanmoins à trouver un rythme "le plus efficace" pour l'ouvrier (mais comment ?), rythme qui se trouve (étrangement) assez proche de ce qui s'établit naturellement dans l'équipe : finalement, une physique "économique" qui côtoie la sociologie, l'auto-organisation du groupe étant peut-être la plus garante de son efficacité...

Ainsi le caractère économique de cette grandeur était clair pour les ingénieurs mécaniciens du début du XIX^e siècle qui le liront. Comme le soulignait l'inventeur Joseph MONTGOLFIER (1740-1810) en 1808 mélangeant économie et physique :

«la force vive est celle qui se paie».

... à la force des machines.

Dans un mouvement d'unification de cette mesure, Henri Navier (1785-1836) cherche en 1819 un outil pour évaluer *a priori* la production d'une machine indépendamment de la nature du travail exécuté qui ne passerait pas par le prix des marchés :

Comment transformer efficacement un moulin à scier du bois en moulin à moudre du blé ?

Il s'agit là d'une *monnaie mécanique* pour les ingénieurs sortis de la récente Ecole polytechnique⁷ nourris du *cours de sciences des machines*.

Navier compare alors tout effort à *l'élévation des corps pesants* mais il reste dans un cadre d'interprétation économique, s'égarant parfois (curieusement plus que Coulomb) dans la polysémie du mot *travail*. Les notions de *dépense* et *produit* semblent se confondre alors qu'elles restent incompatibles (en économie) dans une société salariale où le travail est une marchandise ne pouvant être les deux à la fois .

La *mécanique industrielle* naît ainsi dans l'environnement intellectuel de la pensée économique libérale de Jean Baptiste SAY (1762-1832) qui intègre alors la dimension technologique. Un promoteur de cette nouvelle discipline, Claude BURDIN (1788-1873) soulignait en 1815 dans le *Journal des mines* qu'il s'agissait :

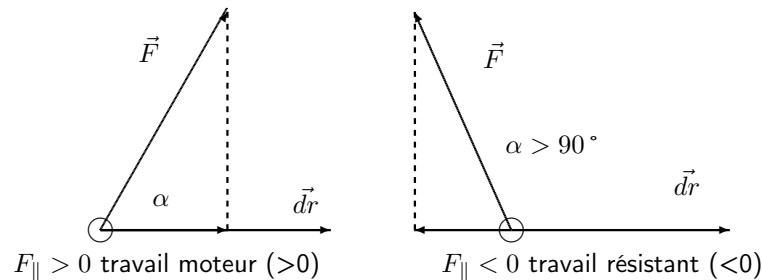
« en rattachant la mécanique à l'économie politique de montrer le véritable point de vue selon lequel cette science doit être cultivée et encouragée ».

5. "Mémoire sur la force des hommes" qu'il commença à rédiger en 1774

6. Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) : *Mémoire sur la respiration des animaux* - 1789

7. Fondée en 1794, ses premiers élèves sont (par exemple) : Coriolis, Dupin, Navier, Chasles ou encore Sadi Carnot

C'est Gaspard CORIOLIS (1792-1843) qui, cherchant à articuler la mécanique des machines à la mécanique rationnelle de Newton et Lagrange, donna en 1829⁸ la définition formelle du *travail* qui reprenant la formulation d'Amontons en introduisant la notion de *travail élémentaire* δW calculé en effectuant le *produit scalaire*⁹ entre la force \vec{F} exercée et le déplacement élémentaire \vec{dr} de l'objet : $\delta W = \vec{F} \cdot \vec{dr}$



Il distingue ainsi :

- le travail *moteur* : force et déplacement vont dans le “même sens”, la force est utile au déplacement d'autant plus qu'elle lui est colinéaire (idéalement si $\alpha = 0^\circ$, ce que prouve l'expérience commune)
- le travail *nul* : force et déplacement sont perpendiculaires, la force ne gêne ni n'aide au déplacement.
- le travail *résistant* : la force est en sens opposé au mouvement (l'angle entre eux est supérieur à 90°).

Sa part “utile” associée au mouvement et appelée à l'époque *force vive* se réduisant dans les chocs et frottements qu'il faudra par souci d'économie chercher à réduire.

Coriolis relate ainsi dans son *principe de transmission du travail* la transformation et la perte de ce “fluide” en comparant la transmission du travail dans le mouvement des machines à :

«un fluide [pouvant] s'accumuler, se diviser ou se réunir. (...) il se perd peu à peu par les frottements (...) ou va se répandre dans la terre.»

II Chaleur

Chaleur et température

Malgré les nombreux thermomètres ou thermoscopes et les diverses échelles de températures élaborées au cours du temps, il n'y avait pas de distinction sérieuse entre chaleur et température avant le XVIII^e siècle. La notion de chaleur n'a pu être précisée qu'une fois celle de température clairement établie. La capacité des corps à stocker un potentiel d'action thermique (fonte de glace par exemple) fût modélisée par le chimiste Joseph BLACK (1728-1799) dans le concept de *capacité calorifique*¹⁰.

Deux corps en contact de températures T_1 et T_2 et de capacités C_1 et C_2 s'équilibrent à la température :

$$T = \frac{C_1 T_1 + C_2 T_2}{C_1 + C_2}$$

d'où : $C_1(T_1 - T) = -C_2(T_2 - T) \Leftrightarrow Q_1 = -Q_2$ modélisant l'échange entre les deux corps : ce que perd l'un est gagné par l'autre lors d'une transformation qui équilibre leurs températures.

La théorie du calorique

La *théorie dynamique de la chaleur* de Robert BOYLE (1627-1691) physicien anglais présentait la chaleur comme liée au mouvement - microscopique- de la matière (la glace fondrait mieux quand on la frotte). Proposition relayée par Daniel BERNOULLI en 1727, instigateur de la théorie cinétique des gaz ou Pierre

8. rédigé des 1819 : *Du calcul de l'effet des machines*

9. “multiplication” de deux vecteurs tenant compte de l'angle α qu'ils forment : $\vec{F} \cdot \vec{dr} = F_{\parallel} \cdot dr = F \cdot dr \cdot \cos \alpha$ où $F_{\parallel} = F \cos \alpha$ est la composante de la force parallèle au mouvement : F_{\parallel} participe au mouvement contrairement à la composante perpendiculaire F_{\perp} .

10. la capacité calorifique mesure la quantité d'énergie nécessaire à élever d'un degré la température de l'objet. Exemple : il faut fournir 4,18 joules à 1g d'eau pour l'élever d'1 °C

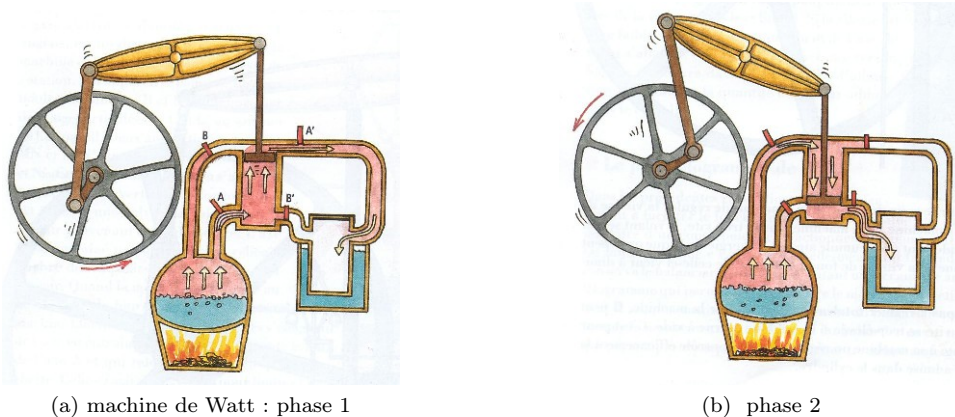
Simon de LAPLACE (1749-1827) qui travailla en calorimétrie avec Lavoisier (*Mémoire sur la chaleur* -1784). Ce mémoire révéla un net désaccord entre les deux : Lavoisier nomma *calorique* ce qu'il supposait être un fluide échangé et l'ajouta même à sa liste des éléments chimiques.

En 1798 Benjamin Thompson, comte de Rumford (1753-1814) étudiant l'échauffement produit lors du forage des canons montra qu'un foret usé continuait à produire un échauffement à l'usage, donc la quantité de calorique qu'il recelait semblait infinie ! Ce non-sens plaidait pour un retour à la théorie de Boyle mais ne fût pas compris avant 1820. il faudra attendre 1840 après les travaux de Joule sur l'équivalent mécanique de la chaleur pour parvenir à une modélisation satisfaisante.

Pour expliquer ce retard, on soulignera que la chaleur radiante (Le rayonnement électromagnétique infrarouge n'était pas modélisé) posait aussi problème à la théorie dynamique puisqu'un objet distant percevait le rayonnement d'une source chaude sans contact. On ne comprenait pas qu'il se transmette à travers l'air ou les solides alors que l'idée d'un fluide "subtil" traversant les corps semblait plus plausible.

III Energie

Des machines ...



- 1/ Le piston monte, poussé par la vapeur qui arrive par A. A' s'ouvre. B et B' sont fermées.
- 2/ B s'ouvre, A et A' se ferment, B' s'ouvre. (cf : www.ac-grenoble.fr/cite.scolaire.internationale)

Les machines à vapeur (Papin en 1681, Savery en 1698, Newcomen en 1712, Watt entre 1764 et 1780) utilisées dans un premier temps pour pomper l'eau des mines, trouvèrent au fur et à mesure de leurs améliorations d'autres applications (usines textiles, transports ferroviaire et maritime..). mais leur fonctionnement restait obscur.

C'est Sadi CARNOT (1796-1832) qui publia en 1824 ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*.

Il y développe l'idée que le calorique (donc un raisonnement basé sur un concept erroné comme on l'a vu) pourrait passer d'une température élevée à une température basse en produisant du travail : opération qui pourrait être réversible. (Ce qui arrive par exemple au fluide caloporteur circulant dans le circuit fermé entre extérieur et intérieur du réfrigérateur qui par compression - donc réception de travail- se liquéfie en cédant dans le radiateur extérieur sa chaleur de changement d'état (liquéfaction) qu'il avait emmagasinée dans l'enceinte du frigo en s'y évaporant).

Ainsi l'efficacité de la machine ne dépend que des températures des deux réservoirs. Ces écrits ultérieurs montreront qu'il réalisa assez vite l'inexistence du calorique mais surtout quelle était la fécondité de sa réflexion :

« la chaleur n'est autre chose que la puissance motrice, ou plutôt que le mouvement qui a changé de forme. »

.. à la physiologie

Du grec *energeia* (*en*= "dans" et *ergon*= "action"; littéralement : "dans l'action"), le concept d'énergie fût introduit dès 1717 par Jean BERNOULLI (1667-1748), comme étant le produit de la force appliquée par le déplacement infinitésimal.

La notion de force, était alors confondue avec celle d'énergie s'appelant tantôt *vis viva* (« force vive » qui désignait l'énergie cinétique), tantôt *potentia* (ou « force potentielle ») chez G.LEIBNIZ¹¹ (1646-1716). Emerge alors un théorème de conservation (Bernoulli) qui ne concerne encore que l'énergie mécanique pour laquelle toute disparition apparente de force vive correspond à l'accroissement d'un pouvoir d'agir *facultas agendi*.

$$\Delta E_c = -\Delta E_p \Rightarrow E_m = \text{constante}$$

La variation (Δ) d'énergie cinétique E_c du système est l'opposée de sa variation d'énergie potentielle ΔE_p . Ainsi l'énergie potentielle se transforme en énergie cinétique. Par exemple, un objet placé en hauteur tant qu'il y reste garde la possibilité de tomber, sa chute traduit une perte du "potentiel" de chute (E_p diminue) et un gain de sa vitesse (E_c augmente) ou l'inverse s'il est lancé vers le haut. Transformation qui se traduit par la conservation de leur somme, l'énergie mécanique :

$$E_m = E_c + E_p = \text{constante}$$

Le physicien recherche souvent à étudier des grandeurs qui se conservent : leur non conservation (accroissement ou diminution) étant le signe qu'il se passe quelque chose (création d'une particule inconnue, apport extérieur ou perte non envisagés) ou que le modèle est incomplet voire invalide.

L'idée de conservation de "quelque chose" était présente en ce début du XIX^e siècle nourri du philosophe Emmanuel KANT (1724-1804) :

« la substance persiste dans tout le changement des phénomènes et sa quantité n'augmente ni ne diminue dans la nature. » (Critique de la Raison Pure - 1781).

Quand elle ne fonctionnait pas, cette conservation signifiait qu'un terme nouveau devait entrer dans le bilan, par exemple dans le cas de la chute le travail des forces de frottement (qui engendrent freinage et échauffement du système) devra être introduit dans le bilan.

Ce qui a permis une modélisation de ces nouvelles formes de transferts : la conservation recherchée de l'énergie (notre substance donc) a ainsi permis la mise en évidence des inter-conversions entre grandeurs physiques :

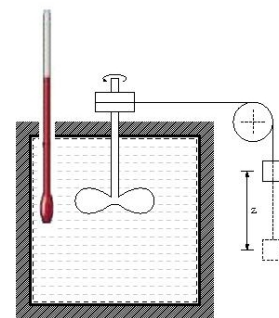
- dans la description des phénomènes électriques et chimiques (pile VOLTA en 1800),
- celle des phénomènes magnétiques (expériences de déviation d'une boussole par un courant électrique, réalisées par ØRSTED en 1820) ;
- la conversion de l' "énergie" cinétique en énergie électrique (dynamo, par FARADAY en 1831),
- conversion de chaleur en travail mécanique dans les machines...

En 1843, James JOULE (1818-1889) détermina l'équivalent entre chaleur et travail : 1 calorie (cal) = 4,18 joules (J) unifiant ainsi ces deux mesures de l'énergie.

En 1847, Hermann HELMOLTZ (1821-1894) énonce le premier principe de la thermodynamique :

« la chaleur est une forme d'énergie mécanique microscopique. Tout travail mécanique effectué par un système s'accompagne d'une diminution équivalente de son énergie interne et vice-versa. »

L'audace de ce médecin physiologiste puis physicien était de supposer que les mêmes principes s'appliquaient à l'univers et aux être vivants : son travail (essentiellement sur le vivant entre 1840 et 1847 : fermentation, consommation de matière lors de l'action musculaire, chaleur animale..) avait pour objectif de donner un outillage théorique à l'avantage des physiologistes face aux tenants du *vitalisme* (théorie selon



Principe de l'expérience de Joule (1843) : La masse descendante entraîne l'axe du moulin dont le frottement avec l'eau produit un échauffement (www.cnrs.fr/sciencespour tous). Conversion du travail en chaleur qui conforte la conception dynamique au détriment de la conception substantialiste : La chaleur est un mode de mouvement de la matière.

11. qui s'opposant à Descartes dans la *querelle des forces vives* rejetait la conservation de la quantité de mouvement d'un système de particules : $\sum m_i \vec{v}_i$, conservée seulement lors d'un choc élastique et retenait seulement celle de la force vive $\sum m_i v_i^2$, devenue force vive absolue ou force motrice *potentia* quant il y inclura les forces (énergies) potentielles

laquelle les processus biologiques relevaient d'une action, d'une force vitale présente dans les êtres vivants, et non des forces physiques et chimiques des organes et substances du corps).

C'est Helmholtz qui le premier, a produit une analyse aux dimensions (comparaison des unités) des différentes formes de *Kraft* (Force plutôt qu'énergie, encore dans ses écrits de 1847) offrant une même unité pour le travail, l'énergie cinétique, la chaleur et le rayonnement.

Dans son mémoire sur *la conservation de la Force*, il formalise la conservation de la force dans un cadre mécanique et réductible à deux formes de bases qui sont :

- La *force vive* : mouvement de masses mais aussi lumière (!), chaleur... donc "associées" à un mouvement ou une propagation ; c'est à dire à peu près l'énergie cinétique microscopique ou macroscopique (à l'exception du rayonnement) .
- La *force de tension* : poids en hauteur, tension élastique ou électrique, affinité chimique.. associées à des positions relatives entre les corps, c'est à dire l'énergie potentielle.

William THOMSON (1824-1907, devenu Lord Kelvin) travailla avec Joule et relia ses travaux basés sur la théorie dynamique de la chaleur et dominés par l'idée de conversion à ceux de Carnot basés sur la théorie du calorique et dominés par l'idée de bilan thermique.

Après 1887, le concept d'énergie et sa conservation sont entérinés par la communauté scientifique, le mot *énergie* retenu à la place de *force* (Kraft).

En 1905, Einstein démontre l'équivalence de la masse et de l'énergie et traduisant la conservation de cette dernière lors des transformations nucléaires où la masse ne se conservait pas. C'est la proportionnalité d'un facteur c^2 entre énergie libérée ΔE (par une fusion ou fission de noyaux d'atomes) et la perte de masse Δm observée entre les noyaux et les produits de la réaction nucléaire :

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s).

Cette énergie considérable est dégagée dans la fission de l'uranium dans les centrales nucléaires ou la fusion des noyaux d'hydrogène dans les étoiles.