

Jean Pierre Brasebin

L'ÉNERGIE

Des sciences
aux techniques



ellipses

Chapitre 1

Énergie

1. Qu'est-ce?

Le mot « Énergie » provient de la langue grecque, il signifiait « travail », mais de nos jours, ce terme possède beaucoup d'autres significations, susceptibles de troubler nos pensées. On l'utilise indistinctement pour désigner une force ou l'action d'une force, mais également une puissance, une vigueur, un élan, un dynamisme, une volonté, une détermination... Énergie, travail, force, puissance et rendement, sont des concepts liés, mais ils recouvrent des usages et des sens différents, parfois, nous les mêlons maladroitement à nos conversations.

Depuis l'Antiquité, les représentations physiques ont considérablement évolué et les mathématiques sur lesquelles elles s'appuyaient se sont sophistiquées. Selon les époques et les degrés de connaissance, les érudits ont forgé des modèles qui ne valent qu'en tant que tels. Ils portent en eux leurs limites. La force, pressentie par Archimède au II^e siècle av. J.-C., pour être identifiée, attendra 1684 avec Isaac Newton et la découverte du mouvement. Ce n'était alors qu'un objet mathématique et non un concept physique. Il est vrai que l'énergie de mouvement ne se perçoit pas pendant le déplacement, mais dès qu'il cesse. Celle d'une particule ne se manifeste qu'au moment de la collision et celle d'une chute à l'instant de l'impact avec le sol. Ce sera au début du XVIII^e siècle, en 1704, dans un traité nommé « Opticks », que Newton évoquera la possibilité pour que la matière se convertisse en lumière et réciproquement (*Un corps grave et la lumière ne sont-ils pas convertibles l'un dans l'autre ?*).

Le mot énergie des anciens n'est plus le nôtre. Ce dernier n'apparaîtra dans la littérature scientifique française qu'en 1875. Entre la physique d'Aristote et celle d'aujourd'hui, on ne sait pas faire de correspondance. Jadis l'énergie incarnait ce que nous nommons maintenant le « Travail d'une force ». À présent, elle représente notre capacité pour effectuer des transformations (Travail et mouvement, température et changement d'état de la matière, couleur et température, consommation de sucre ou de charbon, usure...). Outre l'énergie cinétique liée à la vitesse, on a découvert celle

liée au champ de gravitation et à l'accélération, celle des charges électriques et celle portée par la chaleur...

Le concept d'énergie restera longtemps attaché à la mécanique. Il concernait des forces statiques pour des choses ne se mouvant que très lentement, ou ne bougeant qu'imperceptiblement. Cette notion de déplacement infinitésimal était importante, elle sous-entendait que les systèmes évoluaient dans des suites continues d'équilibres. Avec cette approche, on ne tenait pas compte de l'accélération, c'est-à-dire de la modification de la vitesse au cours du temps.

Lorsque deux systèmes isolés sont en interactions, ils échangent de l'énergie. La quantité perdue par l'un, sera reprise par l'autre, plus précisément la somme des variations de la quantité d'énergie du premier sera toujours égale et opposée à la somme des variations de la quantité d'énergie du second. Finalement, l'énergie globale restera inchangée et sera conservée. C'est à Max Planck que l'on doit la compréhension de cette loi de conservation. (Cf. livre *Le principe de conservation de l'énergie*).

L'observation de cette invariance nous permet d'en retirer une conséquence majeure. Nul n'a jamais produit d'énergie et nul n'en produira jamais. Puisque l'énergie se conserve, pour en avoir, il faut déjà en disposer. Créer de l'énergie impliquerait d'être capable de la produire à partir de rien. Avec l'usage, si la quantité d'énergie reste la même, seule la capacité à être transformée change. On perçoit, là, toute la sensibilité du sujet et les possibles biais médiatiques qui peuvent exister. En réalité, dans une centrale thermoélectrique, on ne « produit » pas d'énergie, mais on transforme de l'énergie chimique ou nucléaire en énergie électrique et calorifique. Les transformations concernent essentiellement des ressources naturelles, celles-ci n'étant pas infinies, il n'y aura pas de plan « B » quand elles seront toutes épuisées.

La caractéristique la plus remarquable de l'énergie, c'est qu'elle se conserve toujours. Lorsqu'elle est transférée d'un système à un autre, ou lorsqu'elle change de nature, il n'y a jamais ni création ni destruction. Quand une chose « perd » de l'énergie, cette même quantité disparue est nécessairement reprise par une autre chose. Puisque dans l'absolu l'énergie ne peut être ni créée ni perdue, c'est donc par pur abus de langage que l'on parle de « production d'énergie », ou de « pertes d'énergie », voire d'énergie « renouvelable ».

Cette remarque nous permet de comprendre qu'il n'y a pas et qu'il ne pourra jamais y avoir une énergie « renouvelable ». Cette assertion peut surprendre, pourtant elle repose sur des réalités physiques. Par sa nature, pour ne pas dire sa consistance, elle met en défaut de nombreux discours politiques au demeurant bien intentionnés. On ne consomme pas d'énergie et l'on n'en produit pas... On ne lui fait changer que de forme, ou bien,

on la fait passer, d'un système à un autre. En réalité, ce qui est « renouvelable », ce peut être la ressource, si elle est en capacité de se régénérer dans un délai compatible avec la vie des humains, et c'est également le processus physique, à partir duquel on va extraire de l'énergie. Tous les systèmes ne sont pas réversibles, on ne peut recréer la lumière que l'on a consommée pour faire de l'électricité, on ne peut pas davantage recréer le vent qui aura servi à faire tourner les éoliennes.

Un peu comme avec le temps, ou le mouvement absolu de la matière, l'énergie absolue n'existe pas. Il n'y a pas d'énergie « zéro » sur laquelle on puisse se référer. L'énergie du vide, l'énergie dite du point zéro d'un système quantique sans matière n'est pas nulle, c'est l'énergie de tous les champs quantiques de l'espace. Même en l'absence de toute matière, le vide possède une énergie de point zéro. Ainsi le vide n'est pas vide et dans ce que nous nommons comme tel existe un champ, le champ de Higgs¹. C'est en 1964 que le physicien anglais, Peter Ware Higgs, considéra l'existence d'un champ isotrope présent dans tout l'Univers, dans lequel les particules baigneraient. Elles seraient en interrelation avec lui, en retour, il aurait pour effet de les doter d'une masse. Ainsi, plus l'interaction d'une particule avec ce champ sera forte, plus elle aura d'inertie, et tout se passerait comme si elle lui apportait davantage de masse. Cette particule d'interaction, posée initialement comme hypothétique, sera identifiée en juillet 2012, on la nommera ultérieurement « boson de Higgs ». Un vide qui serait vide se nommerait le néant, mais nommer le néant, c'est déjà lui prêter une existence et de ce fait, il n'est plus le néant! Dans la cosmogonie japonaise shintoïste, le vide ne symbolise ni l'absence ni le manque, mais l'esprit, la sagesse enfin obtenue. « La forme est vide, le vide est forme », enseignait le Bouddha.

Sans vouloir en aucune sorte meurtrir, ici, le génie de Max Planck, la plupart des découvertes sont le fruit de recherches collectives, d'échanges, de controverses, d'oppositions parfois passionnées, de travaux qui prendront du temps avant de converger vers un point commun, consensuel. Concernant le concept d'énergie, outre les anciens déjà cités, on gardera en mémoire les contributions de Satyendranath Bose, Marcel Brillouin, Maurice de Broglie, Lazare Carnot, Marie Curie, Michael Faraday, Robert Goldschmidt, Friedrich Hasenöhr, Hermann von Helmholtz, Édouard Herzen, Georges Hostelet, Jeans James, James Prescott Joule, Heike Kamerlingh Onnes, Martin Knudsen, Gottfried Leibniz, Frederick Lindemann, Hendrik Lorentz, Walther Nernst, Jean-Baptiste Perrin, William John Macquorn Rankine, Heinrich Rubens, Ernest Rutherford, Ernest Solvay, Arnold Sommerfeld, William Thomson,

1. Un vide dont on retirerait ce qu'il contient d'abstrait serait le néant. Le « vide » et le « néant » sont différents, car « penser le vide, c'est le penser dans un certain volume alors que le néant peut être défini sans faire référence à l'espace ».

Emil Warburg, Wilhelm Wien... Encore faudrait-il ajouter Emmy Noether, une mathématicienne allemande, qui démontra en 1918 la conservation des lois de la physique.

Vue du grand public, l'énergie est le plus souvent perçue comme une commodité qui s'achète, mais ce que l'on paye, c'est de la puissance¹ en regard de la valeur d'un indice inscrit sur un compteur (*électricité, pompe à essence, gaz...*). Malgré les apparences, on ne pourra jamais résumer l'énergie à une simple facture, car tous les postes d'un même budget en dépendent.

Vue d'un physicien, l'énergie est une grandeur qui se mesure en joule². Elle est gouvernée par les lois immuables de la thermodynamique, dont le premier principe pose qu'elle se conserve dans toutes transformations. Ce qui signifie concrètement que les hommes ne peuvent qu'emprunter de l'énergie à l'environnement et s'en servir pour leur profit et pour rien d'autre.

Ainsi, plus le monde change, plus on met d'énergie en jeu, plus l'environnement se transforme et plus on le transforme, plus on utilise d'énergie. Changer de température, de forme, de position, de vitesse, changer une composition chimique... implique de consommer de l'énergie et parfois d'en délivrer sous une autre forme. Mais n'oublions pas qu'en dernier ressort l'énergie s'étant conservée, il en restera toujours la même quantité.

Physiquement, l'énergie mesure le changement d'état d'un système, elle est au cœur de ce qui nous arrive et de tout ce que nous réalisons. Elle représente la quantification des modifications dans notre monde physique, car dès qu'une chose change, il y a inévitablement une dépense d'énergie associée. Dès que l'homme procède à une transformation, on considère par abus de langage qu'il consomme de l'énergie. De ce fait, l'énergie au sens commun que nous lui donnons peut être considérée comme un traceur de nos flux. Si l'énergie est avant tout une grandeur physique, pouvoir en disposer en grande quantité, c'est, et ce sera, se doter d'une grande capacité à maîtriser l'environnement, à le modifier et aussi parfois à l'enlaidir.

Dans ces confusions, la plus ennuyeuse sans doute, c'est que l'on parle communément de l'énergie comme d'un bien de consommation. On la considère comme une vulgaire denrée dont on abuse, on la perçoit sous

1. La puissance représente un débit d'énergie.

2. Cette unité porte le nom du physicien anglais James Prescott Joule, elle correspond au travail d'une force motrice d'un Newton dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force. C'est aussi l'énergie fournie par une puissance d'un watt pendant une seconde. Certaines activités utilisent d'autres unités, notamment l'Électron-volt ($1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$), le kilowattheure ($1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$), la calorie ($4,18 \text{ J}$). La calorie alimentaire définie par le chimiste et physicien français Nicolas Clément en 1824, avait une valeur mille fois plus élevée que la définition actuelle, elle était de 4180 J .

l'angle du prix, alors qu'en réalité, c'est un déterminant de notre monde! De telles pratiques brouillent les cartes, elles troublent les communications, elles ne sont pas les seules. Le GIEC par exemple s'exprime en termes de flux ou de concentration quand il communique en partie par million (ppm), d'autres organismes utilisent le concept de stocks, c'est-à-dire de volumes cumulés ou estimés accumulés dans le temps. Cette diversité de pratiques rend les comparaisons difficiles, mais ce n'est peut-être pas toujours sans desseins?

À la base, communément, l'énergie est gratuite et les ressources le sont également. Par exemple, celles tirées de l'énergie solaire, ou du vent, sont gratuites. Ce qui coûte, ce sont les machines qui utilisent ces ressources. Pareillement, le pétrole et le gaz sont gratuits, ce qui doit être payé, c'est le consentement à s'en défaire, par les états qui possèdent en leurs sous-sols¹ ces richesses. À ces dépenses, il faut ajouter les charges liées aux processus d'extraction, d'exploitation, de transformation, de distribution... Aussi surprenant que cela puisse paraître, « payer l'énergie » c'est uniquement financer des rentes. C'est rétribuer un travail humain ou réalisé avec des machines, rien que pour pouvoir accéder et disposer d'une ressource qui à l'origine est gratuite. De cette observation, on déduit que le prix de ce que nous désignons du mot « Énergie », ne dépendra pas de son abondance. Il découlera des difficultés globales qui devront être surmontées pour l'extraire du milieu où elle se trouve et pour la transformer.

Une certaine presse explique parfois qu'il existe des énergies propres. Cette affirmation est moins triviale qu'il n'y paraît. Pour « faire de l'énergie », (*en réalité, elle ne se fabrique pas*), il faudra non seulement trouver dans la nature une ressource primaire... mais il faudra également construire le dispositif permettant de la transformer, si possible sans pollution, en quelque chose d'utilisable (chaleur, électricité, mouvement). « Choisir une énergie » ce sera choisir un type de transformation, avec ses avantages et ses contreparties, ce sera arbitrer entre inconvénients et commodités.

Toute énergie pourra s'avérer sale si on la porte à un niveau insupportable d'utilisation. Imaginer la terre entièrement recouverte de panneaux solaires, ou d'éoliennes, elle cessera sans doute d'être propre! Une énergie propre sera une énergie utilisée subjectivement de façon réduite pour que les inconvénients qui s'y rattachent soient par ailleurs réduits au juste admissible. Il faut rester conscient que si les atomes sont recyclables et que l'on peut rendre propre une chose qui ne l'était pas, fondamentalement l'énergie en tant que telle ne le sera jamais!

1. Ce qui permet de relativiser la notion d'effondrement du prix des matières premières, quand on l'invoque, et celui de hausse à la pompe. Les transactions sont payées en dollars et impliquent en outre d'introduire des considérations de change en devises.

Énergie, chaleur, puissance, température, entropie sont des éléments liés entre eux, mais différents. L'énergie marque les changements que nous réalisons ou que nous subissons, la chaleur correspond à un déplacement d'énergie, la puissance représente un débit d'énergie et la température une agitation moléculaire. L'entropie exprime la tendance, pour un système isolé, d'évoluer vers un stade d'équilibre thermodynamique.

Énergie et Masse sont inconcevables l'une sans l'autre, elles sont liées. Selon une idée communément admise, c'est en 1905 qu'Albert Einstein démontrera leur équivalence. Elle sera résumée par la célèbre expression mathématique $E = mc^2$. En réalité, l'aboutissement sur cette formule résulte des travaux de plusieurs scientifiques. Le Français Henri Poincaré, dès l'année 1900, posera les bases théoriques, il les publiera en juin 1905 et démontrera l'équivalence masse-énergie-électromagnétique¹. Puis en septembre 1905 viendra Albert Einstein, il reconnaitra, lui-même, en 1906, l'antériorité des travaux d'Henri Poincaré.

La formulation de l'énergie électromagnétique sera établie par la formule $E=mc^2$, pourtant, il faudra attendre l'année 1907 et Max Planck pour, disposer d'une démonstration thermodynamique/relativiste dans le cas d'une absorption ou émission de lumière, ce qui établira une fois pour toutes la célèbre formule. Elle est bien plus qu'une simple expression portée par les lois de l'électromagnétisme. À partir de cette relation, on comprendra également qu'un gramme de matière contiendra une quantité gigantesque d'énergie en réserve. Cette propriété sera utilisée tragiquement, le 6 août 1945, quand une bombe atomique² à l'uranium explosa à Hiroshima !

Il convient cependant de préciser que la réalisation de cette arme n'était pas envisageable en 1907, les connaissances de la physique y étaient insuffisantes. Le mot « électron » n'avait pas, le sens que nous lui donnons aujourd'hui. À cette époque, il désignait n'importe quelle particule, quelle qu'en soit sa charge (positive ou négative). Pour pouvoir physiquement libérer cette puissance de feu, il faudra attendre décembre 1938 et les travaux conjoints du chimiste Allemand Otto Hahn (prix Nobel en 1944), et de l'Autrichienne Lise Meitner. Ils découvriront la fission nucléaire et appliqueront leur découverte à l'atome d'uranium 235.

Sur un tout autre plan, ce ne sera que le premier juillet 1946, que le magazine Time, associera publiquement la formule $E= mc^2$ à la bombe. Il présentera simultanément, en couverture, le portrait d'Einstein, le dessin

-
1. Il affirme qu'un rayonnement pourrait être considéré comme un fluide fictif d'une masse équivalente $m=E/c^2$. En cela, il s'est inspiré de la « théorie des électrons » de Lorentz qui incorporait la pression de radiation de James Clark Maxwell.
 2. Little Boy (« petit garçon » en français) était le nom de code de la première bombe atomique utilisée de manière offensive. Elle contenait un peu plus de 64 kg d'uranium 235, dont « seulement » 700 g entrèrent en fission (soit 1,1 %).

d'un champignon atomique et la formule $E=mc^2$. Dès lors, un lien éternel et direct sera posé, plus d'un siècle plus tard, il continuera de l'être, persistant toujours sans fondement.

Déjà, dès 1704, c'est-à-dire deux siècles plus tôt, dans son traité « *Opticks* », Newton avait évoqué la possibilité pour que la matière puisse se convertir en lumière et réciproquement: « *Un corps grave et la lumière ne sont-ils pas convertibles l'un dans l'autre ?* ». Puis la réflexion se poursuivant, à la fin du XIX^e siècle, des médecins s'interrogeront sur les effets des radiations solaires. Plus tard encore, ce sera l'Anglais Samuel Tolver Preston, physicien et ingénieur, qui proposera que la matière puisse être convertie en énergie. (*Physique de l'éther*, 1875). Il affirma que si la matière était subdivisée en particules d'éther, ces dernières se déplaceraient à la vitesse de la lumière et représenteraient une énorme quantité d'énergie. Ainsi, un grain de matière contiendrait une énergie d'un milliard de pieds-tonnes (un pied-tonne représentait 2 240 pieds-livres anglaises).

On rapporte également qu'en 1903, le physicien italien, Olinto de Pretto, serait le précurseur de la formule $E=mc^2$. Il aurait suggéré que la transformation « lumière – matière – énergie », soit portée par la formule $E=1/2mv^2$. Il l'exprimera en 1904 dans un article intitulé « *L'hypothèse de l'éther dans la vie de l'univers* ». Il en reprendra l'idée dans son livre *Évolution de la matière* qui paraîtra en 1905. Cette année-là, le médecin et anthropologue français, Gustave Lebon publiera le livre *Évolution de la matière*, dans lequel il proposera l'équivalence « masse-énergie ». Il y supposera la désintégration possible de la matière en lumière, et sera sans doute le premier à imaginer une bombe basée sur une telle réaction.

Pour illustrer quantitativement les énergies en jeu, on peut calculer que 25 millions de kWh sont potentiellement portés par un poids d'un gramme de matière, inversement, pour fabriquer un gramme de matière à partir d'énergie, il faudra condenser 25 millions de kWh, dans un volume plus petit que celui d'un insecte... À partir de telles considérations, on peut imaginer que l'énergie des particules circulant dans une machine gigantesque doit être énorme, pourtant ce n'est pas le cas, ces particules ont moins d'énergie de mouvement qu'une grande sauterelle verte. Oui, mais voilà, elles sont extrêmement petites et l'énergie se trouve très concentrée. Si la collision de deux insectes ne produit pas la moindre nouvelle particule, par contre celles de deux protons, ou de deux électrons ayant l'énergie d'un insecte le fera.

L'unité de mesure énergétique utilisée dans de tels systèmes se nomme l'électron Volt et même le gigaélectron volt (GeV). Elle représente un milliard de fois l'énergie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel d'un volt. C'est également l'énergie qu'il faut condenser pour créer un proton. Tout est donc une question d'échelle, l'important n'est pas

tant de donner à un objet une énergie de plusieurs milliards d'électronvolts, mais que celui qui la reçoit soit infiniment petit.

La relation d'Einstein explique que l'énergie peut devenir matière. C'est ce que l'on réalise dans le grand collisionneur de protons (LHC: Large Hadron Collider) où l'on provoque la collision de particules. La destruction du noyau des atomes libère pareillement de l'énergie. Elle sera diffusée sous forme de radiations. Cette assertion implique que la matière devient une pure abstraction que l'on modélisera avec des outils mathématiques. En outre, la mécanique quantique nous expliquera que les particules élémentaires ne sont rien d'autre que des ondes d'information.

Sur un plan connexe et en vertu de la théorie de la relativité, un corps perdant de l'énergie perdra de sa masse proportionnellement à la quantité d'énergie disparue. Plus surprenant peut-être, il découle aussi des lois physiques, qu'un apport d'énergie, comme la tension d'un arc, fera accroître, d'une façon certes infime, mais réelle, la masse du système?

Dans le cas de particules mobiles, la formule décrivant l'énergie totale s'écrit:

$$E^2 - p^2c^2 = m^2c^4 \text{ (a)}$$

Où « p » représente la quantité de mouvement, « m » la masse, « c » la vitesse de la lumière. Elle signifie qu'il y a une équivalence entre la masse et l'énergie, ou autrement dit que la masse équivaut à de l'énergie condensée. Ce qui n'implique, en rien, que tout ce qui a de l'énergie a obligatoirement de la masse. La lumière, en tant que vecteur électromagnétique, n'est constituée que d'énergie, et d'aucune masse. Mais, comme le démontrera Albert Einstein qui recevra pour cela, en 1921, le Prix Nobel de physique pour ses travaux sur l'effet photo électrique¹, on peut, sous certaines conditions, utiliser l'énergie de la lumière, pour éjecter des électrons qui possèdent une masse, c'est alors que cette énergie disparaît, et la lumière avec, puisqu'elle est désormais devenue de la masse. Parce que la masse peut se transformer en énergie, deux particules, qui se collisionnent, pourront créer d'autres particules et ainsi créer de la masse! La masse, au moins à l'échelle corpusculaire, ne se conserve donc pas! Cela signifie que la propriété d'un objet, par exemple sa vitesse, est devenue capable de se changer en un objet, c'est-à-dire dans ce cas, en de la matière!

Si l'on considère un système au repos, alors sa vitesse « v » est nulle, ainsi la quantité de mouvement « p » est nulle, ce qui permet dans l'expression

1. L'effet photoélectrique fut présenté une première fois en 1839, par les Français Antoine Becquerel et son fils Alexandre Edmond. Puis en 1887, l'Allemand Heinrich Hertz démontrera la possibilité d'obtenir une émission de rayons cathodiques et la génération d'ondes porteuses, celles que l'on nomme de nos jours ondes hertziennes.