

QUELQUES MOTS SUR L'ÉNERGIE

Etienne Klein

Avant de définir ce que présente le concept d'énergie, je voudrais rappeler quelques données factuelles concernant la situation mondiale.

- 1,3 milliards de personnes vivent aujourd'hui sans électricité. 2,7 milliards des humains ont des difficultés d'approvisionnement. Or, le fait de disposer des énergies a des effets bénéfiques sur d'autres grandes ressources : l'eau, l'éducation, la santé.
- On observe une variation linéaire de l'espérance de vie en fonction de la consommation d'énergie, du moins au début de la courbe. Ensuite, on attende une saturation : le fait de consommer davantage d'énergie n'augmente plus l'espérance de vie.
- Aujourd'hui, 80 % des besoins mondiaux en énergie sont couverts par les combustibles fossiles : le pétrole (31 %), le gaz naturel (22 %) et le charbon (27 %). Les 20 % restants sont satisfaits par la biomasse (8%) – essentiellement le bois de chauffage et les déchets organiques -, le nucléaire (5%), et l'hydraulique (6 %). Bien qu'elle progresse, la contribution de l'éolien et du solaire demeure marginale (1 %).
- La vitesse de croissance de la consommation d'énergie augmente rapidement : au début du XVIIIe siècle, la consommation mondiale d'énergie était de 0,25 GTEP, elle est devenue 1 GTEP à la fin du XIXe, 2 GTEP au milieu du vingtième. Elle dépasse aujourd'hui 13 GTEP...
- Le modèle actuel se heurte à deux contraintes majeures : la raréfaction des ressources conventionnelles de pétrole et de gaz naturel, les plus faciles à exploiter au meilleur coût, et le changement climatique.

La lente montée en puissance du concept d'énergie

Le mot « *énergie* » figure depuis environ trois siècles dans le vocabulaire de la physique, plus exactement dans celui de la mécanique. Il y a été introduit (en français) par des mathématiciens du XVIII^e siècle, Jean Bernoulli étant

vraisemblablement le premier à utiliser le terme : dans une lettre écrite au père jésuite Pierre Varignon, en date du 26 janvier 1717, il définit l'énergie comme le produit de la force appliquée à un corps par le déplacement subi par ce corps sous l'effet de cette force (ce qu'aujourd'hui nous appelons le travail mécanique). Mais cette première conception scientifique de l'énergie était d'application trop limitée pour qu'elle puisse coloniser toute la physique. L'énergie n'a pu devenir un concept central de la physique qu'un siècle et demi plus tard, à partir du moment où il a été établi de façon claire qu'elle obéit à une règle implacable, une loi de conservation. Qu'est-ce à dire ? Lorsque deux systèmes interagissent, ils échangent de l'énergie ; au cours de l'interaction, la somme des variations d'énergie dans le premier système se trouve toujours être l'opposée de la somme des variations d'énergie dans le second, de sorte que l'énergie globale est conservée. Par exemple, un ballon qui chute dans l'atmosphère terrestre transforme son énergie de pesanteur en chaleur, transmise à l'air via les forces de frottement dues à la force électromagnétique. Il y a conversion de l'énergie potentielle de la force de gravitation du ballon en énergie potentielle électromagnétique puis en énergie cinétique des molécules de l'air.

C'est Max Planck, le futur inventeur du quantum, qui a le premier compris la portée essentielle de cette loi : au-delà de ses diverses manifestations empiriques, l'énergie doit d'abord et surtout être abstraitement considérée comme une grandeur qui se conserve. Dans un ouvrage publié en 1887 (*Das Prinzip der Erhaltung der Energie, soit Le Principe de conservation de l'énergie*), il écrit : « Je ne traiterai du concept d'énergie que dans la mesure où il peut être rattaché au principe qui donne son titre à cet essai, supposant donc que le concept d'énergie en physique tient avant tout sa signification du principe de conservation qui le concerne.¹ » L'énergie trouve là sa définition formelle moderne : une quantité que l'on peut associer à tout système et qui est fonction des divers paramètres caractérisant l'état de celui-ci à l'instant considéré ; elle dépend en particulier des positions et vitesses des parties du système et de leurs interactions mutuelles, et sa propriété la plus fondamentale est de rester constante au cours du temps lorsque le système est isolé.

¹ Cité par Y. Elkana, « The conservation of energy : a case of simultaneous discovery ? », Archives Internationales d'Histoire des Sciences, 23, 90 et 91, Paris, 1970.

Cette découverte fut le couronnement d'un processus long et laborieux, étalé sur pas moins de 40 ans. Elle n'est pas attribuable à un auteur particulier, mais à plusieurs chercheurs qui travaillaient de façon relativement isolée et avaient des préoccupations fort différentes (Faraday, Carnot, Joule, Mayer, Helmholtz, Thomson ou Rankine figurent parmi les plus célèbres). Comme c'est souvent le cas en physique, où la dénomination joue un rôle essentiel, la clarification du concept d'énergie a nécessité un débat sémantique intense, ponctué d'avancées théoriques et au terme duquel les mots *force*, *puissance* et *énergie*, longtemps mêlés ou confondus, ont pu recevoir chacun une définition bien précise. En 1847, Helmholtz publia un mémoire qui s'intitule *Über die Erhaltung des Kraft (Sur la conservation de la force)*. C'est dans cet ouvrage que se trouve énoncé ce qui deviendra par la suite « le premier principe de la thermodynamique », à savoir la conservation de l'énergie. Or Helmholtz ne parle pas d'énergie, mais de force ou de puissance. Il faudra un important travail conceptuel sur ce qu'est la chaleur, la façon dont elle s'échange entre les systèmes, pour que l'on parvienne à distinguer clairement ces notions². La puissance, c'est le débit de l'énergie, le rythme auquel elle se trouve délivrée. Plus précisément, la puissance est la quantité d'énergie par unité de temps fournie par un système à un autre. En conséquence de cette définition, deux systèmes de puissances différentes pourront fournir le même travail (la même énergie), mais le système le plus puissant le fera plus rapidement que l'autre. D'un point de vue mathématique, la puissance est égale au produit d'une grandeur d'*effort* (une force, un couple, une pression, une tension,...) par une grandeur de *flux* (une vitesse, une vitesse angulaire, un débit, une intensité).

Quand une loi de conservation sert de définition

Au début du XX^e siècle, un théorème crucial est venu encore renforcer la puissance conceptuelle de la loi de conservation de l'énergie. En 1918, la

² Mais dans le langage courant, certaines confusions demeurent, les notions d'énergie et de puissance n'étant pas toujours distinguées. C'est ainsi qu'aux yeux de l'imaginaire collectif, le TNT demeure le symbole de l'énergie chimique. Or un kilo de TNT contient dix fois moins d'énergie qu'un kilo de pétrole... Ce qui ne l'empêche pas de pouvoir délivrer une forte puissance : au contact de l'air, il explose, de sorte que toute son énergie se trouve libérée en un temps très court. Un kilo de pétrole contient quant à lui davantage d'énergie, mais il la libère plus tranquillement : la puissance associée est donc plus faible.

mathématicienne Emmy Noether établit qu'à toute invariance selon un groupe de symétrie est nécessairement associée une quantité conservée en toutes circonstances, c'est-à-dire une loi de conservation. Postulons par exemple que les lois de la physique sont invariantes par translation du temps, c'est-à-dire qu'elles ne changent pas si l'on modifie le choix de l'instant de référence, « l'origine » à partir de laquelle sont mesurées les durées. Cela consiste à dire que les lois régissant toute expérience de physique ne sauraient dépendre du moment particulier où l'expérience est réalisée : pour elles, tout instant doit en valoir un autre, de sorte qu'il n'existe aucun instant particulier qui puisse servir de référence absolue pour les autres. Lorsqu'on applique le théorème de Noether, on découvre que cette invariance par translation du temps a pour corollaire direct la conservation de l'énergie. Prenons un exemple : imaginons que la force de pesanteur varie de façon périodique dans le temps, qu'elle soit par exemple très faible chaque jour à midi et très forte à minuit. On pourrait alors monter quotidiennement une charge au sommet d'un immeuble à midi, puis la projeter dans le vide à minuit. L'énergie ainsi gagnée serait plus élevée que l'énergie dépensée. Il n'y aurait donc plus conservation de l'énergie.

La loi de conservation de l'énergie a donc une profondeur théorique qui dépasse largement sa formulation habituelle : elle exprime rien de moins que la pérennité des lois physiques, c'est-à-dire leur invariance au cours du temps. Les physiciens en tirent notamment parti pour explorer l'univers primordial : en provoquant de très violentes collisions de particules, ils créent – ou plutôt *recréent* – dans un tout petit volume et pendant une durée très brève les conditions physiques extrêmes qui étaient celles régnant dans un passé très lointain de l'univers (très haute température et très grande densité d'énergie). Comme les lois physiques n'ont pas changé, les particules engendrées par l'énergie du choc (grâce à $E = mc^2$) revivent les emportements cinématiques torrides qui furent exactement ceux de leurs congénères dans la prime jeunesse de l'univers, offrant ainsi une cure de jouvence spectaculaire à une infime portion de l'espace-temps³.

³ En physique quantique, le vide n'est pas vide : il contient des particules dites « virtuelles », qui sont bel et bien présentes mais... n'ont pas assez d'énergie pour exister vraiment. Si deux particules provenant d'un accélérateur de haute énergie entrent en collision, elles offrent leur énergie au vide quantique, et du coup, les particules virtuelles qu'il contenait deviennent réelles et s'échappent. Le vide, qui était froid du fait de l'expansion de l'univers qui n'a cessé d'abaisser sa température, soudain se réchauffe et les particules qui y étaient endormies retrouvent la vitalité qu'elles avaient dans l'univers primordial.

En toute rigueur, l'énergie d'un système isolé demeurant constante au cours du temps, il est impropre de parler comme on le fait trop souvent de « production » ou de « consommation » d'énergie, comme si l'énergie pouvait émerger du néant ou y disparaître. Dans tous les cas, il ne s'agit jamais que de changement de la forme que prend l'énergie, ou de transfert d'énergie d'un système à un autre. Par exemple, « produire » de l'énergie électrique dans une centrale hydroélectrique signifie transformer l'énergie potentielle de l'eau du barrage en énergie cinétique de cette eau dans les conduites, puis transférer cette énergie cinétique aux turbines et au rotor des alternateurs, qui en définitive la transforment en énergie électrique. La viscosité de l'eau, les frottements et l'effet Joule soustraient de ce flux une faible partie, transformée en chaleur. Et « consommer » de l'énergie électrique pour faire fonctionner un téléviseur, cela n'est jamais que la transformer en énergie lumineuse émise par l'écran (en passant par l'énergie cinétique des électrons issus de la cathode), en énergie acoustique diffusée dans l'air ambiant (par l'intermédiaire des énergies cinétique et potentielle de la membrane du haut-parleur) et surtout en chaleur inutile (principalement par effet Joule).

Parmi les diverses formes d'énergie susceptibles de s'échanger les unes en les autres, il convient de distinguer :

- celles qui sont emmagasinées dans la matière : l'énergie interne d'un fluide, fonction de sa température et de sa pression, l'énergie chimique d'un carburant, l'énergie nucléaire d'un morceau d'uranium, l'énergie électrochimique d'une batterie, l'énergie potentielle de l'eau d'un barrage dans le champ de pesanteur ou l'énergie cinétique d'un véhicule. La plupart de ces énergies ne sont accessibles que très indirectement.

- celles qui se manifestent lors d'un transfert d'un sous-système à un autre : la chaleur rayonnée par un radiateur, le travail échangé entre un piston et le fluide qu'il comprime ou l'énergie électrique circulant dans une ligne.

Les technologies de l'énergie visent à contrôler ses divers processus de transformation, afin de réduire la part des formes d'énergie inutiles face à la forme d'énergie que l'on souhaite en définitive extraire. Le premier principe de la thermodynamique limite drastiquement les possibilités, puisque la conservation de l'énergie impose que les bilans soient équilibrés. Des contraintes supplémentaires proviennent du second principe de la thermodynamique, qui

énonce qu'un système fermé perd de sa capacité à évoluer à mesure qu'il évolue (son entropie ne pouvant que croître), et d'autres encore de la hiérarchie des intensités des forces de la nature (voir encadré).

Finalement, parler de l'énergie en physique, c'est parler... de toute la physique.

ENCADRE

Si l'on souhaite par exemple disposer de 1 kWh, c'est-à-dire de l'énergie cinétique d'un camion de dix tonnes roulant à 100 km/h, la quantité de matière qu'on devra solliciter dépend très fortement de l'interaction utilisée.

Si l'on utilise la **gravitation ou d'autres forces mécaniques**, il faudra disposer de 10 tonnes de matière.

Deux illustrations :

- Pour obtenir 1 kWh dans une usine hydroélectrique, dont le rendement est de 85 %, il faut faire chuter 10 tonnes d'eau d'une hauteur de 40 mètres.
- Pour obtenir 1 kWh avec une éolienne, il faut récupérer toute l'énergie cinétique de 20 000 m³ d'air (soit 27 tonnes) arrivant à 60 km/h.

Si l'on utilise **l'interaction électromagnétique**, il faudra environ 1 kilo de matière.

Trois illustrations :

- Combustion chimique : les carburants fournissent de la chaleur à raison de 1 kWh par 0.1 kg.
- Les chiffres sont comparables pour l'énergie biologique : un bon repas (un kilo d'aliments) fournit environ 1 kWh, dissipé ensuite dans l'organisme.
- 1 kWh permet de faire fondre 10 kg de glace ou de faire bouillir 1.5 kg d'eau.

Si l'on utilise **l'interaction nucléaire (forte)**, la réponse dépend du type de réaction utilisée : fusion ou fission.

- **Fission**

- 1 kWh de chaleur est dégagé par la fission de 10 mg d'uranium naturel (0.7 % d' U_{235}).

- Ce chiffre peut être divisé par un facteur cent dans un surgénérateur en récupérant l'énergie de fission du plutonium produit par capture de neutrons par l'uranium 238.
- **Fusion Deutérium-Tritium**
- Dans ce cas, un mg de combustible suffit pour produire 1 kWh.