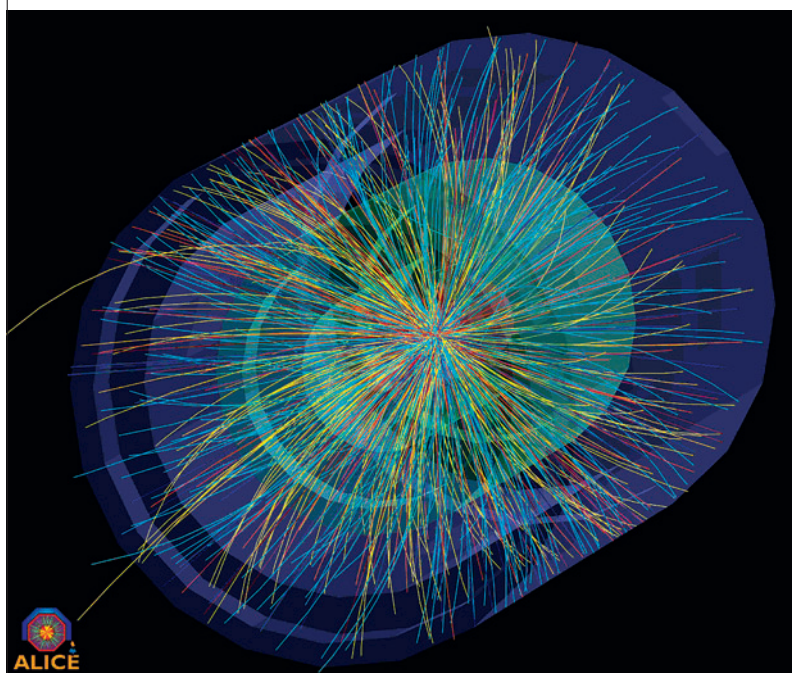




La puissance du concept d'énergie

Concept abstrait dont les applications ont transformé notre vie, l'énergie occupe une place centrale en physique. **Grandeur multiforme obéissant à une loi de conservation** – elle ne se perd pas, ni ne se crée à partir de rien – sa compréhension est le fruit d'un travail conceptuel étalé sur plus de deux siècles et mené par de nombreux chercheurs, physiciens et mathématiciens.



Conséquence de la conservation de l'énergie, l'invariance des lois physiques au cours du temps autorise les physiciens à recréer l'univers primordial en provoquant des collisions de particules, comme ici celles provoquées entre des ions lourds au sein du grand collisionneur de hadrons (LHC) du Cern à Genève.

Le mot énergie figure depuis environ trois siècles dans le vocabulaire de la physique, plus exactement, dans celui de la mécanique. Il n'y est pas entré par la grande porte.

Il est introduit, en français, par des mathématiciens du XVIII^e siècle. Jean Bernoulli est vraisemblablement le premier à avoir utilisé ce terme. Dans une lettre écrite au père jésuite Pierre Varignon, en date du 26 janvier 1717, le physicien et mathématicien suisse 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 que nous appelons aujourd'hui le **travail mécanique**. Cette première conception scientifique de l'énergie, appliquée uniquement aux forces statiques et à l'équilibre, était cependant trop limitée pour prétendre pouvoir coloniser toute la physique. De fait, l'énergie n'est devenue un concept central de cette science qu'un

(1) Cité par l'historien des sciences Yehuda ELKANA dans « The Conservation of Energy: a Case of Simultaneous Discovery? », *Archives internationales d'histoire des sciences*, Paris, 23, 1970, p. 31-60.

siècle et demi plus tard, quand il a été établi de façon claire qu'elle obéit à une règle implacable, celle d'une loi de conservation.

La conservation de l'énergie

Lorsque deux systèmes interagissent, ils échangent de l'énergie. Au cours de cette interaction, la somme des variations d'énergie dans le premier système est toujours l'opposée de la somme des variations d'énergie dans le second, de sorte que **l'énergie globale est conservée**. Ainsi, un ballon chutant dans l'atmosphère terrestre transforme son énergie de pesanteur en chaleur. Cette dernière est 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 le physicien allemand 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, intitulé *Das Prinzip der Erhaltung der Energie* (*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 :



Max Planck (1858-1947), père de la théorie des quanta, selon laquelle les échanges d'énergie entre le rayonnement et la matière se font de manière discontinue, par paquets ou quanta, et Albert Einstein (1879-1955), principal développeur de cette théorie, qui montra notamment que la masse est l'une des formes de l'énergie.

une quantité qui peut être associée à tout système et qui est fonction des divers paramètres caractérisant l'état de ce système à l'instant considéré. Elle dépend en particulier des positions et des vitesses des parties du système et de leurs interactions mutuelles. Sa propriété la plus fondamentale est de rester constante au cours du temps lorsque le système est isolé.

Cette découverte fut le couronnement d'un processus long et laborieux, étalé sur pas moins de 40 ans. Elle n'est guère 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 d'entre eux.

Force, puissance et énergie

Comme c'est souvent le cas en physique, où la dénomination joue un rôle essentiel, la clarification du concept d'énergie a suscité un débat sémantique intense, ponctué d'avancées théoriques, au terme duquel les mots force, puissance et énergie, longtemps mêlés ou confondus, ont pu recevoir chacun une définition bien précise.

En 1847, l'allemand Hermann von Helmholtz publia un mémoire intitulé *Über die Erhaltung der Kraft* (*Sur la conservation de la force*) dans lequel se trouve énoncé ce qui deviendra par la suite le **premier principe de la thermodynamique**, à savoir la conservation de l'énergie. Or Helmholtz n'y parle pas d'énergie, mais de puissance ou de force, ce dernier terme ayant eu longtemps un double sens : à la fois capacité de produire le mouvement et réservoir de potentialités. Il faudra un important travail conceptuel sur ce qu'est la chaleur et la façon dont elle s'échange entre les systèmes, pour que ces notions⁽²⁾ soient clairement distinguées. La **puissance**, c'est le débit de l'énergie, le rythme auquel elle se trouve délivrée. Plus précisément, c'est la quantité d'énergie par unité de temps fournie par un système à un autre. 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).

Le théorème de Noether : la pérennité des lois de la physique

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 mathématicienne allemande Emmy Noether établit qu'à toute invariance selon un groupe de symétrie est nécessairement associée une quantité conservée en toutes circonstances, autrement dit 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 le choix de l'instant de référence, l'origine à partir de laquelle sont mesurées les durées, est modifié. Cela signifie que les lois régissant toute expérience de physique ne sauraient dépendre du moment particulier où l'expérience



Office of Press- and Public Relations, University of Göttingen

Mathématicienne allemande spécialiste d'algèbre abstraite et de physique théorique, Emmy Noether (1882-1935) démontre, en 1918, que les lois physiques et donc, plus particulièrement, la loi de conservation de l'énergie, sont invariantes au cours du temps.

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. Si le théorème de Noether est appliqué à l'invariance par translation du temps, il s'ensuit que son corollaire direct est la conservation de l'énergie. *A contrario*, imaginons que la force de pesanteur varie de façon périodique dans le temps, qu'elle est très faible chaque jour à midi et très forte à minuit. Il serait alors possible de 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 plus conservation de l'énergie.

La loi de conservation de l'énergie se trouve donc avoir une profondeur théorique qui dépasse largement sa formulation habituelle : elle exprime 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 (très haute température et très grande densité d'énergie) qui étaient celles régnant dans un passé très lointain de l'Univers. Comme les lois physiques n'ont pas changé, les particules engendrées par l'énergie du choc⁽³⁾

(2) Dans le langage courant, certaines confusions persistent, 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. Pourtant, un kilogramme de TNT contient dix fois moins d'énergie qu'un kilogramme 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 kilogramme de pétrole contient davantage d'énergie, mais il la libère plus tranquillement : la puissance associée est donc plus faible.

(3) En application de la formule $E=mc^2$, selon laquelle la masse est une forme possible de l'énergie.



Interactions fondamentales et énergie

Quelle quantité de matière faut-il solliciter pour disposer d'une quantité donnée d'énergie ? La réponse à cette question dépend très fortement de l'interaction utilisée. Supposons que l'on souhaite obtenir 1 kWh, c'est-à-dire l'énergie cinétique d'un camion de dix tonnes roulant à 100 km/h.

Si l'**interaction gravitationnelle** est utilisée, ou d'autres forces mécaniques, les quantités de matière nécessaires sont de l'ordre de quelques dizaines de tonnes. Ainsi, il faut faire chuter 10 tonnes d'eau d'une hauteur de 40 mètres pour obtenir 1 kWh d'énergie électrique dans une usine hydroélectrique dont

le rendement est de 85%. Pour obtenir la même quantité d'énergie avec une éolienne, il faut récupérer toute l'énergie cinétique de 20000 m³ d'air – soit 27 tonnes – arrivant à une vitesse de 60 km/h.

Dans le cas où c'est l'**interaction électromagnétique** qui est exploitée, les quantités de matière à utiliser sont de l'ordre du kilogramme. Par exemple, la combustion des carburants fournit de la chaleur, à raison de 1 kWh par dixième de kg. Des chiffres comparables à ceux de l'énergie biologique ou calorifique : un bon repas, soit un kilogramme d'aliments, fournit environ 1 kWh, dissipé ensuite dans l'organisme, et il faut 1 kWh de

chaleur pour faire fondre 10 kg de glace ou faire bouillir 1,5 kg d'eau.

Pour l'**interaction forte** (interaction nucléaire), la quantité de matière nécessaire est encore plus faible. Lors de la réaction de **fission** dans une centrale nucléaire, il faut 10 mg d'**uranium naturel** (il contient 0,71% d'**uranium 235**) pour obtenir 1 kWh de chaleur. Ce chiffre peut être divisé par un facteur 100 dans un **surgénérateur**, en récupérant l'énergie de fission du **plutonium** produit par capture de neutrons par l'**uranium 238**. Enfin, dans le cas de la **fusion**, telle la fusion D-T (**deutérium-tritium**) qui se produit dans un **tokamak**, il suffit d'un milligramme de combustible pour obtenir 1 kWh.

revivent les emportements cinématiques⁽⁴⁾ 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-temps⁽⁵⁾.

Les formes de l'énergie

L'énergie d'un système isolé demeurant constante au cours du temps, il est impropre de parler en toute rigueur, ainsi que cela est trop souvent fait, 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 changements de la forme que prend l'énergie ou de transferts d'énergie d'un système à un autre.

Produire de l'énergie électrique dans une centrale hydroélectrique signifie en fait que l'énergie potentielle de l'eau du barrage est transformée en énergie cinétique dans les conduites d'eau, puis que cette énergie cinétique est transférée aux turbines et au rotor des alternateurs pour être finalement transformée en énergie électrique. La **viscosité** de l'eau, les frottements et l'**effet Joule** soustraient de ce flux une faible partie de l'énergie, qui est transformée en chaleur.

Dans le même ordre d'idée, consommer de l'énergie électrique pour faire fonctionner un téléviseur, c'est en fait 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 de l'énergie susceptibles de se transformer les unes en les autres, sont distinguées d'une part, celles qui sont emmagasinées dans la matière et, d'autre part, celles se manifestant lors d'un transfert d'un sous-système à un autre.

Parmi les énergies emmagasinées dans la matière, citons l'énergie interne d'un fluide, qui est 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 encore l'énergie cinétique d'un véhicule. La plupart de ces énergies ne sont accessibles que très indirectement.

Dans le second cas, il s'agit par exemple de la chaleur rayonnée dans l'air par un radiateur, du travail échangé entre un piston et le fluide qu'il comprime ou de l'énergie électrique circulant dans une ligne.

Maîtriser les formes de l'énergie pour les utiliser

Les technologies de l'énergie ont vocation à contrôler les divers processus de sa transformation afin de réduire la part des formes d'énergie inutiles et d'augmenter la part de la forme que l'on souhaite extraire. Le premier principe de la thermodynamique limite drastiquement les possibilités, la conservation de l'énergie imposant l'équilibre des bilans. D'autres contraintes proviennent du **second principe de la thermodynamique** selon lequel un système fermé perd de sa capacité à évoluer au fur et à mesure qu'il évolue (son **entropie** ne pouvant que croître). D'autres enfin sont liées à la hiérarchie des intensités des forces de la nature (encadré).

On comprend par là qu'en définitive, pour bien parler de l'énergie en physique, il faudrait parler de toute la physique.

➤ Étienne Klein

Institut rayonnement matière de Saclay (Iramis)
Direction des sciences de la matière
CEA Centre de Saclay

(4) La cinématique étudie le mouvement des corps dans l'espace en fonction du temps sans considérer les causes qui produisent ce mouvement.

(5) En physique quantique, le vide n'est pas vide : il contient des particules dites virtuelles, qui sont bel et bien présentes mais qui 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. 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.