

L'énergie

Chacun d'entre nous a pleinement conscience de l'importance vitale de l'énergie. Le physicien R. Feynman considérait qu'il n'y avait pas de tâche plus délicate que de définir ce concept, en considérant dans son livre *La Nature de la physique*, comme extrêmement difficile de décrire ne serait-ce que le mouvement d'un chien sans employer le mot énergie.

Or, face aux défis environnementaux modernes, les économies d'énergie sont constamment invoquées sans qu'il soit précisé réellement ce qui est en jeu. Le citoyen se retrouve alors confronté à la nécessité d'économiser pêle-mêle l'électricité, le carburant, le chauffage et doit par ailleurs limiter sa production de CO₂. L'objectif de cette première série de questions consiste à définir plus précisément les différentes formes d'énergie afin de comprendre comment ces facteurs sont intimement liés.

Pourquoi y a-t-il de l'énergie ?

Voilà une interrogation qui pourrait tout aussi bien constituer la question finale de tout un ouvrage. En effet, fondamentalement, la réponse est à chercher du côté de l'origine de l'Univers, c'est-à-dire de la théorie dite du big-bang qui en décrit l'évolution. Pour comprendre l'origine de l'énergie, il faut tout d'abord avoir à l'esprit que les lois de physique gouvernant notre monde sont totalement décrites à l'aide de quatre interactions fondamentales qui nous sont plus ou moins perceptibles :

- l'interaction gravitationnelle responsable de l'attraction entre deux masses, qui nous est familière : notre poids en est une des conséquences. Sa portée est infinie ;
- l'interaction électromagnétique responsable des phénomènes impliquant des charges électriques. Sa portée est infinie. Elle régit toute la chimie et donc tout le domaine biologique. La lumière en est une autre manifestation.

Les deux autres sont un peu moins familières car elles agissent uniquement au cœur de la matière, c'est-à-dire au niveau des noyaux des atomes. Il s'agit de :

- l'interaction nucléaire forte, responsable de la cohésion des noyaux atomiques, Sa portée est finie et de l'ordre de la taille d'un noyau d'atome (10^{-15} m) ;
- l'interaction nucléaire faible, responsable de certains phénomènes de radioactivité. Sa portée est finie et de l'ordre de 10^{-18} m.

Les physiciens modélisent une interaction entre deux entités en disant qu'elles échangent des particules virtuelles (non observables seules à l'état libre). Par ailleurs, si on fixe l'intensité de l'interaction forte égale à 1, alors l'interaction électromagnétique a pour intensité $1/137$, l'interaction faible $8 \cdot 10^{-7}$, et la gravitationnelle $4,6 \cdot 10^{-40}$. Il n'est donc jamais nécessaire de considérer les quatre interactions simultanément, compte tenu des différences d'intensité. Les physiciens pensent qu'à l'origine, toutes ces interactions n'en formaient qu'une, et que c'est dans les tout premiers instants de la création de l'Univers qu'une distinction s'est opérée.

Dans une première phase, une différenciation est apparue entre la gravitation et les trois autres interactions. Puis, précisément entre 10^{-38} et 10^{-35} seconde après le début du big-bang, la température en forte baisse a atteint le point où l'interaction nucléaire forte a pu être distinguée des deux autres interactions (faible et électromagnétique). Cet événement s'est accompagné en fait de l'injection d'une immense quantité d'énergie dans l'Univers et nous tenons ainsi la réponse à notre question initiale sur l'origine de l'énergie. Par ailleurs, cela a provoqué une accélération foudroyante de l'expansion de l'Univers. Cette phase est appelée l'inflation, les distances relatives dans l'Univers sont alors multipliées par un facteur 10^{35} ! C'est également pendant

l'inflation que l'événement fondateur de notre histoire se produit à travers l'apparition des particules élémentaires qui sont à l'origine du monde tel que nous le connaissons.

Une réponse précise à la question posée sur l'origine de l'énergie est bien entendu très délicate, car le mécanisme en jeu et la mathématisation qui lui est associée sont particulièrement complexes. Il est cependant utile de garder en mémoire le fait simple que, depuis les premiers instants, l'Univers évolue avec ce capital en énergie. Cette dernière va se retrouver sous différentes formes, et le monde que nous observons est un des stades de cette évolution.

Pourquoi l'énergie est-elle, à l'échelle humaine, une ressource assez rare ?

Vous avez certainement remarqué que dès qu'une ressource est recherchée il y a de grandes chances qu'elle soit rare. Les économistes ont des tas de choses à dire concernant l'adéquation entre l'offre et la demande d'un bien. On peut cependant se demander pourquoi l'énergie n'est pas une ressource dont on peut disposer à notre gré sur la Terre.

Il faut tout d'abord parler d'énergie utilisable, c'est-à-dire transformable facilement en chaleur ou travail, car il est clair que les énergies mises en jeu au quotidien sur Terre sont considérables. Cette opération de conversion d'une forme d'énergie en une autre est loin d'être évidente. À titre d'exemple, aussi surprenant que cela puisse paraître, l'énergie nécessaire pour chauffer l'eau d'un bol de thé est de l'ordre de celle qu'il faut fournir pour lever une masse de deux tonnes d'un mètre de haut !

Cet exemple illustre le fait que la conversion d'énergie mécanique (celle correspondant aux barrages hydrauliques par exemple) n'est pas à l'échelle de la consommation humaine. Le gigantisme des barrages est là pour nous le rappeler.

En ce qui concerne le rayonnement, il est totalement impossible de récupérer plus de 350 watts par m² de capteur solaire. À nouveau les grandes tailles s'imposent, même à l'échelle individuelle. Le pétrole n'est pas non plus une source d'énergie très accessible : la chaîne de transformation du puits de pétrole au cylindre du moteur de notre voiture est longue, même si elle nous est familière. Du côté du nucléaire, si l'énergie peut être abondante, la technique employée n'a pas les vertus de la simplicité, c'est le moins que l'on puisse dire. L'énergie disponible à l'échelle humaine est donc rare. Imaginons qu'elle devienne disponible très facilement, par exemple sous forme de rayonnement. Cela ne peut se faire que par une augmentation du rayonnement solaire dont on connaît les conséquences physiologiques. L'excès d'énergie mécanique est également néfaste, mais on a en général la possibilité de s'en protéger. Chacun connaît cependant, la puissance dévastatrice des cyclones, qui correspondent à un excès local d'énergie cinétique due au mouvement de rotation d'immenses masses d'air.

Bref, il semble bien qu'un excès d'énergie soit nuisible par nature à l'espèce humaine. En termes plus physiques, on peut dire que s'il faut une unité d'énergie pour réaliser une structure organisée, la même unité d'énergie disponible par ailleurs pourra donc détruire cette organisation. On peut donc affirmer que, par définition, l'énergie transformable facilement, du point de vue de l'être humain, doit être bien inférieure à celle nécessaire à la pérennité des structures vivantes organisées. Mais quel mécanisme peut-il être qualifié de facile ? Cela peut être le cas d'un rayonnement solaire abondant dont l'énergie, sous forme de photons infrarouge, sera transformée « naturellement » en chaleur aux effets destructeurs au niveau de la peau. À moins que ce soit des photons ultra violets avec les risques mutagènes qu'ils impliquent. Il apparaît que l'énergie facilement transformable doit être au niveau qui a permis la création de structures organisées, et ses fluctuations doivent être de faible ampleur. Notre peau doit être par exemple capable de résister à une exposition d'ultra violet tant que les doses sont celles habituelles. Si cela n'était pas le cas nous ne serions pas là pour l'observer, puisqu'il y aurait destruction systématique de tout embryon de structure complexe.

La nature s'est d'ailleurs construite autour de ces valeurs acceptables : l'énergie caractéristique de 2 eV, qui est celle d'un photon de 0,6 μm au milieu du spectre visible est l'ordre de grandeur l'énergie caractéristique de l'assimilation chlorophyllienne dont on connaît l'importance fondamentale.

Un peu plus de physique

Le terme « facilement » est à l'évidence trop vague. On peut le substituer par « spontanément » dans le cas d'une conversion d'énergie d'origine solaire en électricité. Les photons porteurs de l'énergie liée à la lumière vont céder leur énergie à la matière, avec une certaine probabilité qui a pour conséquence un rendement catastrophique de l'ordre de 15 %. Une vitre transparente illustre d'ailleurs parfaitement le fait qu'il n'y a pas nécessairement d'interaction entre la lumière et la matière. L'origine du phénomène se situe au niveau atomique. Les électrons d'un atome peuvent voir augmenter leur énergie que de façon discrète, dans le sens où ils ne peuvent accepter que certaines quantités d'énergie et pas d'autres (indépendamment de leur importance). Le silicium, sous certaines conditions, a par exemple la capacité de convertir les photons du rayonnement solaire visible en un mouvement de particules chargées conduisant à la production d'un courant électrique.

La notion de rendement implique donc le fait que la conversion n'a qu'une certaine probabilité de se réaliser. La physique statistique nous dit que cette probabilité est étroitement liée à l'énergie du système que l'on considère. La stabilité des structures organisées que nous observons est fondamentalement liée au grand nombre d'atomes mis en jeu. L'énergie, disponible « facilement », provoque des fluctuations d'énergie sans conséquences sur l'état du système. Ce dernier se maintient dans son état le plus probable et peut très difficilement s'en éloigner naturellement. L'apport d'énergie extérieure peut modifier cet état de fait, d'autant mieux que le système est de faible taille. On dit dans ce cas que le nombre d'états accessibles au système considéré augmente. En d'autres termes, son entropie augmente.

Les physiciens ont érigé en principe le fait que tout système isolé voit son entropie inexorablement augmenter. C'est le second principe de la thermodynamique (dont nous reparlerons) qui décrit l'évolution possible de tout système.

Pour conclure, on ne peut que s'étonner de l'îlot de stabilité énergétique de la planète Terre dans l'Univers, même si les fluctuations d'énergie sont rapidement catastrophiques. Pour s'en convaincre il suffit de se rappeler que jaillissent à la surface du Soleil de gigantesques jets comparés à la taille de notre planète dont le diamètre est 100 fois plus petit que celui du Soleil.

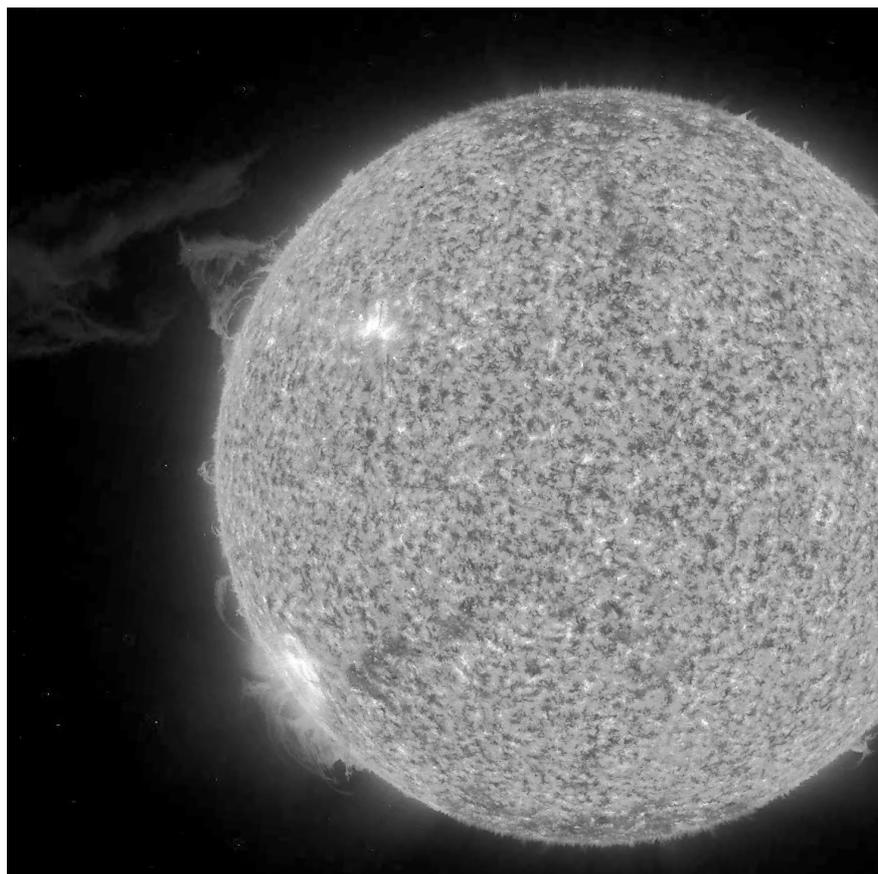


PHOTO 1 — Les protubérances solaires sont gigantesques. Heureusement, la distance Terre-Soleil est de l'ordre de 150 millions de km. Source : NASA.

Le flux de particules émises à cette occasion peut être considérable et un des rôles fondamentaux de l'atmosphère est d'en atténuer les conséquences. Les flots de particules émis lors de ces événements interagissent avec le champ magnétique terrestre pour donner de magnifiques aurores dites boréales au pôle Nord, et australes au pôle Sud.

Un peu d'écologie

La stabilité d'un système est donc liée à la probabilité qu'il a de se transformer en un système encore plus stable. De plus, si le système est petit (quelques atomes par exemple), un faible apport d'énergie peut modifier son état et, dans le cas d'atomes séparés, un supplément d'énergie peut être suffisant pour qu'ils puissent former une molécule stable. Par exemple, la formation d'ozone dans l'atmosphère est provoquée par le rayonnement solaire. Ce sont les photons présents qui vont favoriser la réaction entre atomes et molécules d'oxygène en fournissant l'énergie nécessaire afin de rendre la réaction très probable. De même, les voitures sont souvent munies de pots catalytiques ayant pour but de diminuer la quantité de produits nocifs émis. Fondamentalement, le catalyseur présent va rendre certaines réactions plus faciles d'un point de vue énergétique. La probabilité de réaction va donc augmenter. On peut ainsi transformer de façon plus efficace les produits issus de la combustion dans le moteur.

Pour illustrer le rôle d'un catalyseur, on peut donner l'exemple de la cendre qui est un catalyseur de la combustion du sucre. Chauffer du sucre directement à l'aide d'une flamme ne provoque pas sa combustion. La même tentative sera fructueuse si l'on dépose au préalable de la cendre, par exemple d'une cigarette, sur le sucre.

Un peu de mauvais esprit

Les pots catalytiques sont l'exemple même de la fausse bonne solution. Censés limiter la pollution, ils ne fonctionnent de façon optimale que lorsque la température atteint les 400 °C, la pollution qui est maximale

au démarrage n'est donc pas traitée. De plus, ils n'éliminent pas la production de gaz à effet de serre, bien au contraire ils produisent du N_2O et du CO_2 qui la favorisent.

Plus grave encore : l'utilisation de métaux précieux, type rhodium, platine ou palladium dans la fabrication, conduit à plus ou moins long terme à leur dissémination dans l'environnement, la toxicité de tous ces métaux lourds étant par ailleurs démontrée. Le moins que l'on puisse dire c'est qu'il y a un problème sérieux qui fait songer, même si ce sera de façon beaucoup discrète, aux problèmes de saturnisme lié à l'usage du plomb, ou aux dramatiques conséquences de l'usage de l'amiante.

L'usage généralisé de métaux lourds (catalyseurs, écrans, circuits électroniques, lampes économiques) ou de microparticules (nanotechnologies) est pour le moins inquiétant. Le manque d'effets apparents à court terme explique probablement le manque de réaction de masse face à ce danger.

Un corps froid peut-il céder de la chaleur à un corps chaud ?

Les premiers contacts d'un être humain avec son environnement font intervenir la notion de froid et de chaud. L'homme doit en permanence gérer l'excès ou le manque de chaleur en composant avec le transfert spontané de la chaleur qui se fait toujours du corps chaud vers le corps froid.

Précisons cette notion de chaleur essentielle à la compréhension des mécanismes gouvernant notre environnement. Les hommes ont longtemps cru que la chaleur avait une existence matérielle au même titre qu'un fluide, tant elle semblait s'écouler naturellement d'un point chaud vers un point froid quand on les mettait en contact. Puis on a compris que la chaleur n'avait pas d'existence réelle, mais était une manifestation de l'agitation des atomes et molécules constituant la matière. La chaleur à travers cette agitation a donc été comprise comme une forme d'énergie dite désordonnée, la température étant