

L'énergie se conserve et se dégrade

Primaire et collège

Résumé

Le mot « énergie » est sans doute un de ces mots universels que l'on emploie en toute occasion, rarement dans le sens très précis que lui donnent les physiciens, mais toujours en relation avec une idée de mouvement, d'échange, de force, d'impulsion, de puissance, de capacité à produire, à mouvoir, à engendrer, à chauffer, à éclairer, à déplacer, sans oublier les multiples connotations psychiques dans lesquelles le mot quitte définitivement son sens scientifique.

l'énergie se conserve et se dégrade

Jean Matricon

Introduction

Le caractère universel de l'énergie

Le mot ÉNERGIE est sans doute un de ces mots universels que l'on emploie en toute occasion, rarement dans le sens très précis que lui donnent les physiciens, mais toujours en relation avec une idée de mouvement, d'échange, de FORCE, d'impulsion, de PUISSANCE, de capacité à produire, à mouvoir, à engendrer, à chauffer, à éclairer, à déplacer, sans oublier les multiples connotations psychiques dans lesquelles le mot quitte définitivement son sens scientifique.

Même dans l'acception restrictive des physiciens, l'énergie, ce n'est pas seulement celle que nous extrayons, transportons, transformons et dégradons, c'est aussi celle que les scientifiques découvrent dans tous les domaines et à toutes les échelles où ils savent observer. Le physicien poursuit la course vers le zéro absolu de TEMPÉRATURE, cet état d'immobilité absolue qui n'existe nulle part dans l'Univers, où toute énergie a été retirée de la matière. L'astrophysicien observe ces lieux, heureusement fort éloignés de nous, où se produisent des événements mettant en jeu des quantités d'énergie prodigieuses : explosions de supernovae, trous noirs supermassifs

rayonnant autant que cent milliards de soleils. Véritable archéologue de l'Univers, il recherche des traces de la période du big bang, où l'énergie présente dans l'Univers primordial s'est brutalement transformée en matière et en rayonnement lumineux. Tourné vers le futur, le thermodynamicien acquiert une compréhension de plus en plus claire des processus dissipatifs par lesquels de l'énergie s'écoule à travers des systèmes en les modifiant d'une manière qui devient vite imprévisible et que, de ce fait, nous appelons *chaotique*. À nos côtés, le climatologue observe l'énergie qui circule à travers l'atmosphère et les océans, déterminant le climat qu'a connu et que connaîtra l'ensemble de la Terre. Le physiologiste déchiffre le réseau complexe que parcourt l'énergie pour assurer non seulement les contractions de nos muscles et le fonctionnement de nos neurones, mais aussi les infimes mouvements qui, à l'intérieur des noyaux de nos cellules, permettent aux chromosomes de se déplacer, de s'apparier, de se diviser...

Les trois temps de l'énergie

L'attente. L'arc est courbé, la corde est prête à lancer la flèche, rien ne bouge encore. Les *forces* en présence, celle du bras qui tire sur

la corde, et celle du bois qui s'y oppose, sont en parfait ÉQUILIBRE, dans l'attente de l'envol. Fragile moment d'immobilité où rien ne se passe, dans l'imminence du mouvement qui va naître. Pour qu'une force se manifeste sans qu'un mouvement en résulte, il faut qu'elle se heurte à son image, aussi forte qu'elle, mais rigoureusement opposée. Il est des forces qui attendent ainsi, depuis la naissance de l'Univers, que l'étreinte se desserre un peu, qu'elles puissent enfin s'exprimer...

Une force tend à mettre en mouvement l'objet sur lequel elle s'applique. Si la force qu'oppose cet objet lui est strictement égale et opposée, aucun mouvement n'est engendré, mais cet état peut n'être atteint qu'après que des déformations se seront produites.

Une force est caractérisée par son intensité et par sa direction. L'unité internationale de force est le *newton* (N). Une force de 1 N communique à une masse d'un kilogramme une accélération de 1 ms^{-2} , ce qui veut dire qu'en une seconde, elle atteint la vitesse de 1 m/s.

L'action. Le bras tire un peu plus fort que ne résiste le bois. La corde se tend, l'arc se courbe, un *travail* est fourni. La main lâche la prise, la corde est libre de rendre à la mince flèche, au centime près, le travail que lui a livré l'archer. La flèche s'élance. L'œil peut à peine suivre le mouvement, et déjà l'immobilité a repris ses droits. Déjà l'archer a remis la main au carquois, ajusté un nouveau trait, et, lentement, tire sur la corde qui résiste. Les flèches courent l'une derrière l'autre, chacune emportant, sous la forme du mouvement, le travail du bras qui a courbé le bois.

Pour porter jusqu'au sommet son lourd sac à dos, le grimpeur produit un travail. Celui-ci dépend de la force qu'il doit fournir, au moins

égale au poids que portent ses jambes, et aussi de la hauteur de la montagne qu'il escalade. Ce travail est fourni contre les forces de gravitation. Un travail est fourni chaque fois qu'une force produit le déplacement de l'objet auquel elle s'applique.

L'unité de travail, qui est également l'unité d'énergie est le *joule* (J), travail produit par une force de 1 newton qui déplace le point où elle s'applique d'un mètre dans sa direction.

L'éclat. Entre les deux travaux, celui de l'archer et celui de l'arc, la différence tient à la *puissance* mise en jeu. Sans l'arc, l'homme peut-il donner à la flèche cette vitesse foudroyante ? L'homme est fort lorsqu'il tend la corde, lentement, inexorablement. Mais ce même travail dont il fait don au bois courbé, celui-ci l'offre à la flèche, en un temps si court qu'on a peine à la voir partir. L'arc a pour lui la puissance, celle avec laquelle il restitue en un instant au trait l'énergie qu'il a reçue du bras musclé.

La puissance mesure le travail fourni dans un temps donné. Elle est d'autant plus grande que le temps est plus court. La locomotive, capable de mettre en mouvement une longue suite de wagons, de lancer le train à vive allure sur les rails et d'escalader des rampes sans ralentir est un symbole de puissance.

L'unité de puissance est le *watt* (W), qui correspond à une production de travail d'un joule en une seconde.

[Attention : le kilowattheure est une unité, non pas de puissance, mais d'énergie, qui vaut 3 600 000 J.]

L'énergie, qu'est-ce que c'est ?

Il n'est pas inutile de se donner une idée des échelles d'énergie dans lesquelles nous nous situons dans notre quotidien. La plus

petite énergie qui nous soit perceptible, celle d'une lueur fugace reçue la nuit, lorsque nos yeux sont au meilleur de leur sensibilité, représente environ 10^{-18} J, soit un milliardième de milliardième de joule ! Notre consommation énergétique individuelle est en moyenne de l'ordre de 10^7 J par jour, 10 millions de joules qu'il nous faut absorber et transformer pour « vivre » une journée normale. Cette énergie que nous tirons de notre alimentation vient elle-même, après toute une série de transformations, de la fraction de flux solaire, qui atteint et irrigue en permanence la surface de la Terre à raison d'une moyenne d'environ 350 W par m^2 , soit, pour l'ensemble du globe, $1,8 \cdot 10^{16}$ W, ce que nous fourniraient 18 millions d'unités de centrales nucléaires de 1 gigawatt !!! Ce même Soleil, généreux, envoie chaque seconde dans l'Univers $4 \cdot 10^{26}$ joules, et ce depuis 4,5 milliards d'années, et il n'est pas au bout de ses ressources !

L'énergie se conserve et circule

Les différents réservoirs

De nos jours, la puissance d'une nation se mesure à l'aune de ses « ressources en énergie », c'est-à-dire à la quantité de joules, ou plutôt de gigawatts-heure qu'elle peut fabriquer chaque année par ses propres moyens, uniquement à partir de ses propres réserves. L'énoncé de cette proposition sous-tend l'idée qu'elle ne peut pas « créer » de l'énergie à partir de rien, qu'elle doit la « tirer » de son sol, ou du Soleil qui l'éclaire, ou de l'eau qui y coule, ou du vent qui y souffle. Tout ce qu'elle sait faire, c'est *transformer* de l'énergie d'une forme dans une autre, ce qui introduit la notion de *réservoir* d'énergie, de boîte dans laquelle cette énergie est stockée sous

une forme plus ou moins compacte. Une liste exhaustive des réservoirs d'énergie de l'Univers occuperait bien plus que tout cet ouvrage, car tout objet, toute structure, tout système comportant des parties en interaction *est* un réservoir d'énergie. Heureusement, on peut définir des grandes catégories de réservoirs, et la liste devient raisonnablement courte.

L'image que l'on peut se faire de l'énergie dans l'Univers est celle d'un océan d'où émergent des îles séparées les unes des autres, les seules communications étant assurées par des bateaux allant d'une île à l'autre. Ces îles, ce sont les endroits où l'énergie est stockée, les bateaux représentent l'énergie circulante, essentiellement le rayonnement lumineux, qui assure les échanges entre les lieux de stockage.

Cette image suggère l'existence de deux aspects complémentaires pour l'énergie : l'énergie de masse, ou de stock, et l'énergie de mouvement. Cette distinction est explicitement formulée dans l'expression de l'énergie que recèle un objet de masse m animé d'une vitesse v :

$E \approx mc^2 + 1/2 mv^2$ (on suppose que la vitesse de l'objet, v , est petite comparée à la vitesse de la lumière c)

On reconnaît dans le premier terme la formule la plus célèbre de toute la physique, qui représente l'énergie de masse, et dans le second ce que nous avons tous appris sous le nom d'ÉNERGIE CINÉTIQUE, qui associe l'énergie au mouvement.

L'énergie de masse ou de stock, encore appelée ÉNERGIE POTENTIELLE, représente la forme dormante, non active, de l'énergie, qui ne pourra devenir utilisable que lorsque des forces existant entre les stocks auront la possibilité de s'exercer, c'est-à-dire de créer du mouvement.

Énergie de mouvement. Il faut distinguer l'énergie de mouvement des photons, particules dépourvues de masse qui transportent le rayonnement, l'énergie cinétique ordonnée d'un corps en mouvement (chute d'eau par exemple) et l'énergie cinétique désordonnée, qui est la CHALEUR.

Énergie potentielle. Deux objets matériels, au sens le plus large du terme, exercent l'un sur l'autre une force, dont la portée varie suivant sa nature. Les forces nucléaires ont une portée très limitée (moins de 10^{-15} m). La force électromagnétique et la force gravitationnelle ont une portée infinie.

L'énergie potentielle, c'est cette réserve « potentielle » d'énergie que représente la force qui s'exerce entre les objets, qui pourra se transformer en énergie de mouvement si les objets sont libres de se mouvoir.

Encore faut-il qu'ils en aient l'occasion. Un système isolé est précisément dans la situation où il ne trouve la possibilité de manifester ses forces qu'à l'intérieur de lui-même. Dès qu'une connexion s'établit avec un autre système, permettant à la force de s'exercer, un travail est produit, qui assure le TRANSFERT d'énergie. La portée de la force joue dans ce processus de couplage avec d'autres systèmes un rôle important : si elle est grande, les systèmes n'ont pas besoin d'être proches, c'est le cas des forces gravitationnelle et électromagnétique, capables de transférer de l'énergie d'un bout à l'autre de l'Univers.

Quelques exemples d'énergie potentielle vont rendre ce propos plus clair.

Énergie mécanique d'un ressort. Tendue (ou comprimée) et immobile, un ressort constitue un réservoir d'énergie mécanique isolé. Il ne sort de son isolement que si on lui accroche une masse et qu'on le libère. Sous l'effet de la force de tension, la masse se

met en mouvement et acquiert de l'énergie de mouvement utilisable de toutes sortes de façons.

Énergie gravitationnelle. Une masse d'eau d'une tonne située à 2 000 m d'altitude est attirée vers le centre de la Terre avec une force de 9 810 newtons. Si on lui donne l'occasion de dévaler ces 2 000 m, elle transférera une énergie de $9\,810 \times 2\,000$ joules (1 972 kJ) au système adapté pour les recevoir. L'énergie gravitationnelle constitue à l'échelle de l'Univers un réservoir gigantesque d'énergie, malheureusement peu utilisable pour nous, à quelques exceptions près comme les centrales hydroélectriques et marémotrices, car nos moyens de le mettre en œuvre sont limités.

Énergie électrique. La matière est formée de particules portant des charges électriques, en général associées par paires opposées, une charge positive étant étroitement associée à une charge négative qui la neutralise exactement. Il existe des mécanismes qui séparent ces charges, créant des stocks distincts de charges toutes de même signe, lesquelles se repoussent violemment entre elles et attirent tout aussi violemment le stock de charges opposées. Ces mécanismes s'appellent des alternateurs, des piles, des nuages d'orage ou des éruptions solaires. Dans tous les cas, le résultat est le même : la force qui attire les charges opposées et repousse les charges identiques est susceptible d'être canalisée et utilisée pour fournir un travail utilisable, qu'il s'agisse de faire monter un ascenseur, de faire fonctionner un baladeur, de foudroyer un arbre ou d'allumer une aurore boréale.

Énergie chimique. Il est bien connu que le carbone est capable de brûler en s'unissant à l'oxygène présent dans l'air, formant ainsi le redoutable dioxyde de carbone. Celui-ci,

dont la molécule est formée d'un atome de carbone lié à deux atomes d'oxygène, est stable et solide. Il faudra tirer avec force sur ses constituants pour les séparer et reconstituer ainsi le stock initial d'énergie chimique, opération que font les plantes, grâce à leur chlorophylle. Il s'agit d'un processus extrêmement répandu dans notre monde terrestre, en particulier dans les systèmes vivants, qui n'existent que grâce à l'énergie chimique qu'ils tirent de réactions entre des atomes ou des molécules.

Énergie nucléaire. L'image est la même que dans l'énergie chimique, sauf que les objets qui s'unissent (ou se séparent) ne sont plus des atomes mais des protons ou des neutrons, c'est-à-dire les particules dont sont constitués les noyaux des atomes..

On pourrait poursuivre longtemps, mais les schémas seraient tous du même genre. Ces quelques exemples mettent en avant la propriété centrale de l'énergie : sa *conservation*. Tous les mécanismes qui ont été décrits supposent que de l'énergie initialement stockée dans un réservoir a pu, grâce à l'intervention d'une force, se transformer en énergie de mouvement et se transférer à un autre réservoir, en changeant de nature mais en se conservant en quantité. Cette conservation ne va pas de soi, et n'est apparue que depuis 150 ans comme une loi de la physique à laquelle on donne historiquement le nom de *premier principe* (de la THERMODYNAMIQUE).

La conservation au niveau de l'Univers

S'il est impossible de réaliser un système isolé parfait, s'il est difficile d'en concevoir un à notre échelle, il est en revanche possible de concevoir l'ensemble de l'Univers comme formant un système clos et isolé, dans lequel

l'énergie se conserve intégralement. Indifférenciée à l'origine, elle s'est ensuite répartie dans des réservoirs qui ont progressivement perdu le contact les uns avec les autres et sont devenus de ce fait partiellement isolés et peu enclins à échanger de l'énergie. Les échanges ont encore lieu localement, lorsque les éléments susceptibles d'interagir sont suffisamment proches les uns des autres pour que les forces puissent s'exercer, ce qui est le cas à la surface de la Terre, mais aussi au cœur des étoiles.

Le long trajet de l'énergie

Pour résumer ce discours sur le stockage et la circulation de l'énergie, on va regarder, de la production d'énergie au cœur du Soleil jusqu'à son ultime transformation en chaleur sur la Terre, où, quand et comment chacune des quatre forces intervient dans les échanges d'énergie entre réservoirs successifs.

Les réactions de fusion nucléaire qui se produisent dans le cœur très chaud et très dense du Soleil aboutissent à la formation d'un noyau d'hélium à partir de quatre protons, avec dégagement de 4.10^{-12} J. L'énergie utile émise est essentiellement formée de rayonnement gamma (γ). Au cours du long trajet que parcourt cette lumière, pendant des millions d'années, du cœur vers la surface du Soleil, elle ne cesse d'échanger son énergie avec les noyaux et électrons constituant le Soleil en les chauffant, pour sortir sous la forme de la lumière visible à laquelle nos yeux sont sensibles. Finalement, il ressort de la surface autant de puissance qu'il en a été injecté au cœur. Les forces qui interviennent lors de ces collisions sont de nature électrique. La force gravitationnelle se manifeste dans les mouvements de convection qui participent eux aussi au transfert de l'énergie vers la surface.

Du Soleil jusqu'à la Terre, l'énergie est véhiculée par les photons du rayonnement solaire qui pénètrent finalement dans l'atmosphère terrestre. Une partie d'entre eux est absorbée par des molécules de la haute atmosphère, qui, soit se transforment chimiquement, soit s'échauffent. L'absorption d'un photon par une molécule ou par un atome fait intervenir les interactions électriques. Le reste atteint la surface de la Terre. Pratiquement tous les processus de transformation qui suivent font intervenir les forces électriques : les réactions chimiques (synthèse chlorophyllienne dont les produits servent à alimenter des réactions, biologiques ou non, de combustion) se ramènent à des déplacements de charges électriques, ce qui fait que l'énergie chimique n'est rien d'autre que de l'énergie potentielle électrique. Beaucoup de mécanismes physiques de transfert d'énergie font intervenir des forces mécaniques (forces de pression) où des atomes sont en contact les uns avec les autres et se repoussent : là encore, les forces d'interaction sont d'origine électrique.

Dans certains cas, la force de gravitation sert de relais, par exemple lorsqu'elle communique de l'énergie cinétique à une chute d'eau, mais, en fin de course, la pression de l'eau sur les aubes de la turbine, force mécanique, se fait, comme on vient de le voir, par l'intermédiaire des

forces électriques, ainsi que, bien entendu, la génération d'énergie électrique dans l'alternateur.

À la fin de ses multiples avatars, l'énergie se retrouve sous forme d'agitation thermique de molécules à une température sensiblement égale à la température moyenne de la surface du globe. Une nouvelle intervention des forces électriques permet à ces molécules d'émettre une partie de cette énergie thermique sous forme de lumière infrarouge qui quitte la Terre vers le cosmos. Ce processus est indispensable pour que la Terre, qui reçoit chaque seconde du Soleil plus de 10^{16} watts, reste à température à peu près constante en émettant en permanence autant d'énergie qu'elle en reçoit. La dernière expression des forces électriques concerne l'éventuelle réabsorption de cette lumière infrarouge par des molécules introduites indûment dans l'atmosphère, avec pour conséquence un échauffement excessif de l'air et une augmentation catastrophique de la température de la surface de la terre. Cela s'appelle l'« effet de serre » ...

Bibliographie

Jean-Louis BOBIN, $E = mc^2$?, « Les Petites Pommes du savoir », n°72, Le Pommier, 2005.

Cette ressource est issue de l'ouvrage *29 notions clés pour savourer et faire savourer la science*, paru aux Éditions Le Pommier.



Le meilleur des Graines de sciences

Vous êtes enseignant, parent, éducateur... et vous manquez parfois de « munitions » pour répondre aux questions des enfants...

Or, en classe, à la maison, au centre de loisirs, celles-ci fusent : « Le Soleil va-t-il s'éteindre ? » « Est-ce qu'il y a des tremblements de terre sous la mer ? » « Où va l'eau qui tombe du ciel ? » « Pourquoi le ciel est-il bleu le jour ? » « Qu'est-ce que l'effet de serre ? » « Pourquoi les animaux migrent-ils ? » « C'est quoi le clonage ? »

Cet ouvrage de référence va vous aider à répondre à ce bombardement de curiosité... en toute connaissance de cause !

Fruit d'une rencontre entre des scientifiques et des enseignants, désireux de partager savoir et expérience, il est précisément conçu pour vous permettre d'acquiescer ou d'approfondir une culture scientifique, si précieuse pour appréhender le monde qui nous entoure... et pour l'expliquer !

Du Soleil à la cellule, du cycle de l'eau aux énergies renouvelables, de l'origine de l'homme au nanomonde, les 29 notions réunies dans ce volume constituent le bagage indispensable pour pérégriner, avec les enfants, en sciences, et ce, de la maternelle au collège. On les retrouve d'ailleurs dans le Socle commun de connaissances et de compétences, qui définit ce que l'école puis le collège doivent, en France, s'imposer de transmettre à tous les enfants.



Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes
75006 Paris
01 85 08 71 79
contact@fondation-lamap.org

Site : www.fondation-lamap.org

 FONDATION
La main à la pâte
POUR L'ÉDUCATION À LA SCIENCE