



Principes et équations de l'énergie

I. Quelques généralités

L'énergie est une notion familière, mais qui peut se rencontrer sous des formes extrêmement variées.

Certaines formes sont **immédiatement accessibles à nos sens** comme la chaleur (appelée aussi énergie thermique) ou l'énergie liée au mouvement d'un objet, son énergie cinétique. La lumière, et de façon plus générale le rayonnement (visible mais aussi infra rouge, ultra violet, X ou γ) contient également de l'énergie. D'autres formes d'énergies sont **potentielles**, c'est-à-dire qu'elles n'apparaissent pas explicitement, mais peuvent être récupérées par transformation en une forme d'énergie accessible. C'est le cas par exemple de l'énergie chimique contenue dans un carburant, de l'énergie d'une masse d'eau accumulée derrière un barrage, de l'énergie électrique contenue dans une pile ou une batterie, ou même de l'énergie chimique contenue dans les aliments que nous consommons.

Jusqu'au XVIII^e siècle, l'énergie utilisée par l'homme était principalement celle de ses bras et de ses jambes donc celle que lui procure la nourriture qu'il consomme et l'oxygène qu'il respire. On peut d'ailleurs remarquer que l'origine de l'énergie contenue dans la nourriture provient du soleil qui fait pousser les plantes et leur donne ainsi un contenu énergétique de nature chimique. L'homme a très tôt domestiqué le feu qui lui a apporté l'énergie nécessaire à se chauffer et à cuire ses aliments. Ainsi le bois, qui a puisé lui aussi son potentiel énergétique dans l'énergie solaire, la transforme par combustion en énergie thermique. Plus récemment, (dès le moyen âge), les hommes ont commencé à domestiquer l'énergie du vent et celle des cours d'eau en construisant des moulins à vent ou à eau, voire à marée au bord de la mer.

Cependant c'est plus récemment que deux innovations majeures ont bouleversé la gestion de l'énergie, donc les activités humaines dans leur ensemble.

Tout d'abord à la fin du XVIII^e siècle la machine à vapeur, alimentée par du charbon, un combustible fossile, résidus de forêts accumulés pendant des millions d'années. Elle produit une énergie mécanique importante permettant de faire fonctionner toute sorte d'usines, des pompes pour assécher les galeries de mines, les chemins de fer, etc.

Puis à la fin du XIX^e siècle, c'est l'électricité, qui permet d'apporter l'énergie partout où on en a besoin et est de ce fait à l'origine d'une nouvelle révolution industrielle et sociale.

La fin du XX^e siècle a vu quand à elle une troisième révolution s'amorcer, celle de la communication, mais c'est une autre histoire.

Ainsi l'énergie existe sous des formes variées, soit immédiatement utilisables comme les énergies mécanique et thermique, soit potentielles comme l'énergie chimique contenue dans le charbon, le pétrole, l'eau retenue derrière un barrage, les aliments ou l'énergie électrique contenue dans une batterie. On peut verser de l'essence dans un réservoir, c'est donc une énergie facilement embarquable, mais le meilleur vecteur d'énergie, permettant de la distribuer dans les meilleures conditions, reste l'électricité.

Il est donc possible de transformer une forme d'énergie en une autre. Par exemple, l'énergie chimique contenue dans un litre d'essence peut être transformée en énergie mécanique par un moteur de voiture. L'énergie apportée par le rayonnement peut être transformée en chaleur (il suffit de mettre la main au soleil pour s'en rendre compte), la chaleur d'une chaudière peut être transformée en énergie mécanique par une machine à vapeur, toutes les formes d'énergie peuvent être transformées en électricité. L'énergie chimique contenue dans nos aliments et dans l'oxygène que l'on respire permet de faire fonctionner nos muscles, mais également notre cerveau. De même l'énergie électrique qui arrive dans nos appartements permet



de nous chauffer et de nous éclairer, mais aussi de faire fonctionner nos ordinateurs. Il est intéressant de noter que le traitement de l'information, que ce soit dans notre cerveau ou dans nos ordinateurs nécessite pas mal d'énergie.

Cependant, ces transformations répondent à deux règles extrêmement importantes, énoncées dans le cadre de la théorie générale traitant de l'énergie, la thermodynamique.

II. Le premier principe de la thermodynamique

Il stipule que quelle que soit les transformations considérées, l'énergie totale est conservée. En d'autres termes on ne peut pas créer d'énergie à partir de rien. On a vu ci-dessus plusieurs exemples de telles transformations. Rajoutons-en un : les frottements transforment de l'énergie mécanique en énergie thermique.

Pour appliquer correctement ce premier principe, il est bon de connaître l'énergie potentielle susceptible d'être convertie, par exemple en chaleur ou en énergie mécanique. Ceci est relativement facile lorsqu'il s'agit de l'énergie potentielle dans un champ de pesanteur : une masse d'eau M située à une altitude H a une énergie potentielle égale à MgH où g est l'accélération de la pesanteur (environ $9,8 \text{ m/s}^2$). C'est un peu plus compliqué pour un gaz à la température T et sous la pression P , et encore un peu plus pour l'énergie potentielle d'origine chimique d'un litre d'essence, mais la thermodynamique s'applique à tous les systèmes. Sans entrer dans les détails on définit pour un gaz son énergie interne U , et pour un produit chimique son enthalpie H . L'un et l'autre permettent de prévoir l'énergie éventuellement récupérable. Par exemple, la somme des enthalpies de deux espèces moléculaires entrant en réaction permet de prévoir si cette réaction fournira de la chaleur (réaction exothermique) ou en absorbera (réaction endothermique). C'est ainsi que l'on montre que si l'essence permet par combustion de produire de la chaleur donc éventuellement de l'énergie mécanique, l'eau ne permet aucun espoir de ce côté : le moteur à eau est une vue de l'esprit !

Cependant ceci ne permet pas de prévoir ce qui va se passer réellement. Ainsi une réaction endothermique peut très bien se déclencher spontanément en allant chercher la chaleur dont elle a besoin dans le milieu ambiant. Pour en savoir plus, il faut faire aller plus loin.

III. Le second principe de la thermodynamique

Énoncé pour la première fois par le physicien Sadi Carnot, pour expliquer le rendement de la machine à vapeur, ce second principe énonce le fait que, lors de ces transformations d'une forme d'énergie dans une autre, il existe une certaine part d'irréversibilité. Ceci est important car autrement, on pourrait imaginer de ne faire que transformer les énergies les unes dans les autres sans jamais les épuiser. Ainsi si on prend un litre d'essence que l'on brûle dans un moteur de voiture pour la faire avancer, peut-on récupérer cette énergie lors du freinage et la retransformer en un litre de carburant ? La réponse est que l'on peut en effet en récupérer une partie, ce qui est un facteur possible d'économie d'énergie, mais qu'il est physiquement impossible de la récupérer en totalité. Ceci est lié au fait que certaines formes d'énergie sont plus nobles que d'autres, la chaleur étant la forme la plus dégradée. Au fil des transformations, l'énergie finit par se dégrader en une chaleur irrécupérable. Celle-ci, sans disparaître du fait du premier principe, se perd en quelque sorte dans l'espace environnant. Les physiciens ont traduit mathématiquement cette dégradation en définissant une fonction S , appelée entropie, que l'on peut calculer pour tout état d'un système quelconque. Le second principe se traduit par le fait que pour un système isolé considéré dans son ensemble, l'entropie ne peut que, soit rester constante, soit augmenter, mais jamais diminuer. Ce second principe a tout d'abord été appliqué aux machines thermiques, celles qui transforment de la chaleur en énergie mécanique. Il montre que de telles machines ne peuvent fonctionner qu'en présence de deux sources



de chaleur de températures différentes, et que le rendement de la transformation de chaleur en énergie mécanique augmente avec la différence de température entre ces sources. Ainsi par exemple on ne peut pas prendre de l'eau à la mer, en extraire de la chaleur, que l'on transformerait en énergie mécanique, ce qui aurait pour effet de transformer cette eau en glace, puis rejeter cette glace à la mer. En effet dans ce cas il n'y a qu'une seule source de chaleur, la mer. Ce principe permet également de bien comprendre le fonctionnement des machines qui utilisent de l'énergie mécanique pour déplacer de la chaleur, comme les pompes à chaleur ou les réfrigérateurs.

Appliqué à des réactions chimiques, qui pour l'essentiel ne se font pas dans le cadre d'un système isolé, mais échangent de l'énergie avec le milieu extérieur, la fonction qui ne peut que varier dans un seul sens n'est plus l'entropie mais une autre fonction appelée enthalpie libre ou fonction de Gibbs G . Sa connaissance permet de prévoir dans quel sens va se produire une réaction chimique et éventuellement à quel état d'équilibre elle conduit.

IV. Quelques considérations supplémentaires

On peut donner une signification physique plus explicite à ces différentes fonctions en tentant d'en interpréter la signification à l'échelle microscopique. C'est ce que fait la thermodynamique statistique.

Ainsi pour un gaz on peut montrer que l'énergie interne U n'est autre que la somme des énergies cinétiques de toutes les molécules qui le composent plus éventuellement les énergies de vibration et de rotation de ces molécules s'il s'agit de molécules à plusieurs atomes.

Quant à l'entropie, elle est directement liée à la probabilité que ce gaz prenne telle ou telle configuration. Par exemple il est très peu probable que le gaz concentre toutes ses molécules dans une seule partie du récipient qui le contient. L'entropie d'une telle situation est très faible. Au contraire la probabilité la plus grande est que les molécules soient réparties de façon homogène dans tout le volume disponible. C'est l'état d'entropie maximum, correspondant bien à l'état d'équilibre réel du gaz. Ces probabilités se calculent exactement, en tenant compte des effets liés à la mécanique quantique, qui sont essentiels à cette échelle. Une autre interprétation de l'entropie est qu'il s'agit d'une mesure du degré d'ordre ou de désordre d'un milieu. Par exemple une troupe militaire en bon ordre qui se déplace au pas cadencé a une entropie plus faible qu'une foule désordonnée. Le second principe dit donc que tout système isolé évolue vers un désordre de plus en plus grand. Ceci peut paraître curieux si l'on considère l'évolution biologique qui semble produire des systèmes de plus en plus organisés, mais il ne faut pas oublier que le second principe s'applique globalement à un système isolé. Or la surface de la terre n'est pas isolée mais reçoit de l'énergie de la part du soleil. Si l'entropie à la surface de la terre augmente cela signifie qu'elle diminue ailleurs.

Cette interprétation statistique de l'entropie conduit à un troisième principe de thermodynamique. Il postule qu'un cristal parfait à la température du zéro degré absolu (environ moins 273 degrés centigrade) a une entropie nulle. A cette température tous ses atomes sont en effet parfaitement ordonnés et immobiles.

Le physicien franco américain Léon Brillouin, poursuivant dans les années 1940 les travaux du mathématicien américain Claude Shannon, a en outre montré la relation qui existe entre entropie et information : le traitement de l'information consomme de l'entropie.

Enfin, de façon plus métaphysique, le second principe conduit à penser que l'univers tout entier évolue vers un état de désordre maximum dans lequel toute l'énergie serait entraînée vers sa forme la plus dégradée. Cet avenir inquiétant relève cependant pour le moment plus de la métaphysique que de la physique elle-même. On en reparlera dans quelques milliards d'années.

Pour autant, en nous limitant à notre modeste planète, le second principe explique bien la notion d'épuisement des énergies fossiles que sont le charbon, le pétrole et le gaz naturel : Pendant plusieurs dizaines de millions d'années, l'énergie du soleil a fait pousser des plantes qui ont elle-même nourri des animaux, et les résidus de ces espèces organiques se sont accumulés et transformés en combustibles fossiles. Il s'agit



donc d'énergie chimique d'origine solaire, mais accumulée pendant des dizaines de millions d'années. Depuis deux siècles nous récupérons cette énergie chimique pour la transformer en énergie mécanique, en chaleur, en électricité, mais l'essentiel finit sous la forme totalement dégradée d'une chaleur devenue inutilisable car elle est à la température moyenne de notre environnement. Elle est alors définitivement non récupérable. On la nomme parfois chaleur fatale.

V. $E = m.c^2$

Jusqu'ici, nous n'avons considéré que de l'énergie potentielle d'origine thermique, mécanique ou chimique, voire électrochimique. Or on sait depuis un siècle que les noyaux des atomes peuvent eux-mêmes produire de l'énergie soit, pour les plus gros, en se fractionnant (c'est la fission nucléaire), soit, pour les plus petits, en fusionnant entre eux (c'est la fusion thermonucléaire). Il existe donc une énergie potentielle d'origine nucléaire. Celle-ci peut se traiter de façon très analogue à l'énergie chimique, même si les ordres de grandeurs sont différents. Mais se pose alors la question suivante : puisque jusqu'ici nous avons en quelque sorte oubliée la composant nucléaire de l'énergie potentielle, n'y aurait-il pas une définition globale de l'énergie contenue dans une certaine quantité de matière, toutes énergies possibles confondues. La réponse vient cette fois-ci de la théorie de la relativité. Celle-ci arrive à la conclusion que dans toute masse m de matière est contenue l'énergie mc^2 , où c est la vitesse de la lumière dans le vide, soit à peu près 300 000 km par seconde. Cette énergie est considérable, notamment par rapport aux énergies mises en jeu dans les réactions chimiques. C'est ce qui fait que la variation de masse lors de la production d'énergie par voie chimique est totalement négligeable. Ce n'est plus le cas pour les réactions nucléaires, qui illustrent parfaitement cette loi.

Précisons la chose : dans l'équation $E=mc^2$, m est la masse totale des particules considérées. Or la même théorie de la relativité dit que la masse d'une particule augmente avec sa vitesse. Si m_0 est sa masse au repos, lorsqu'elle se déplace à la vitesse v , sa masse devient $m_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$. Si la vitesse v est très inférieure à c , l'énergie mc^2 vaut à peu près $m_0c^2 (1 + \frac{1}{2}v^2/c^2)$ soit $m_0c^2 + \frac{1}{2}m_0v^2$, et l'on retrouve l'énergie relativiste au repos plus l'énergie cinétique habituelle. Dans un réacteur nucléaire, on constate bien que la masse au repos des particules en présence diminue, et que cette perte de masse se retrouve sous forme d'augmentation de la masse des particules en mouvement, notamment des neutrons, dont l'énergie cinétique est convertie en chaleur dans un milieu qui les arrête, cette chaleur étant ensuite convertie en électricité.

La formule $E=mc^2$ est bien une formule universelle.

Peut-on transformer toute la masse d'une particule en énergie ? En fait ceci se produit lors de l'annihilation d'une particule par son anti particule (un électron par un positon) comme on peut l'observer auprès de grands accélérateurs. Les deux particules disparaissent pour donner lieu à l'émission de deux photons, des particules de lumière dont la masse au repos est nulle, et qui de ce fait n'existent qu'en se déplaçant à la vitesse de la lumière. On peut alors leur associer une masse en mouvement et une énergie liée à cette masse.

Le premier principe, celui de la conservation de l'énergie reste toujours valable et se traduit par la conservation de la masse mais en tenant compte de la variation de masse avec la vitesse. Dans la pratique, on ne transforme en énergie utilisable (chaleur, mécanique, électrique) qu'une très petite partie de l'énergie mc^2 . Infime pour les transformations chimiques, nettement plus importantes pour l'énergie de fission nucléaire (celle des centrales nucléaires actuelles), et encore plus importante pour la fusion thermonucléaire, mais dont la maîtrise est encore loin d'être acquise.