

Les chaînes énergétiques

J'ai fait part dernièrement aux Lutins de mon intérêt pour les principales chaînes alimentaires des espèces vivantes dans les cours d'eau¹ et dans la mer².

- 1) *En rivière* : diatomée ► daphnie ► trichoptère ► truite ► loutre ou
Phytoplancton ► zooplancton ► insecte ► poisson ► mammifère
- 2) *Dans la mer* : phytoplancton ► zooplancton ► méduse, hareng, baleine.

Je leur ai expliqué que la nuit, le zooplancton se rapprochait de la surface de la mer pour se nourrir de phytoplancton qui a besoin de la lumière du soleil en raison de son origine végétale (photosynthèse). Lorsque je leur ai dit que j'étais fasciné de savoir que le jour, il migrerait vers les profondeurs pour échapper à ses prédateurs, ils en ont profité pour évoquer le fait que le CO₂, étant un gaz plus lourd que l'air, la surface des mers du globe s'acidifiait de plus en plus et qu'ils étaient très inquiets sur les capacités du phytoplancton, base de la chaîne alimentaire, à s'adapter à un tel bouleversement. Ils ont évoqué le fait que la survie de ces chaînes alimentaires pouvait être tributaire des chaînes énergétiques utilisées pour produire l'énergie et ils ont insisté sur le fait que certaines de ces chaînes énergétiques préservaient plus notre environnement que d'autres. Ils craignent aussi que certaines d'entre elles n'affectent dangereusement notre environnement en rompant les chaînes alimentaires nécessaires à notre survie.

« On ne changera pas l'énergie, ont expliqué les Lutins, elle restera mécanique, hydraulique, électrique, thermique, ce qui changera c'est la façon dont l'homme convertit ces différentes formes d'énergie entre elles pour son propre besoin en profitant des propriétés de la matière. »

Les lutins sont mathématiciens par obligation et, pour me convaincre, ils ont attiré mon attention sur une formule :

$$\left[\frac{(T_c - T_f)}{T_c} \right] \times \left[\frac{T_c}{(T_c - T_f)} \right] = 1$$

A) B)

Ils n'ont pas eu de mal à me convaincre qu'elle était exacte algébriquement. J'ai compris en visualisant le cycle de Carnot, dans le cas d'une machine thermique telle qu'une locomotive à vapeur, une turbine à gaz ou un moteur à combustion fournissant de l'énergie mécanique, et en faisant appel à mes vieux souvenirs sur l'équation des gaz parfaits $PV = nRT$ que le premier terme $(T_c - T_f)/T_c$ correspondait à l'efficacité de ces machines. En effet, d'après l'équation des gaz parfaits, T_c correspond bien à l'énergie consommée puisque $PcVc = nRTc$, et $T_c - T_f$ à l'énergie mécanique produite. Cette dernière étant égale, d'après la loi de conservation de l'énergie, à l'énergie consommée diminuée de ce qui est malheureusement perdu dans la nature et qui est loin d'être négligeable, soit $PcVc - PfVf = nR(Tc - Tf)$. En observant le deuxième terme $Tc/(Tc - Tf)$, on peut se reporter à la page 77 qui prouve que ce terme représente l'efficacité de la pompe à chaleur fonction de la température des sources chaude et froide aussi appelé **COP**¹. On observe que le cycle de Carnot de la chaîne énergétique **A)** se fait dans le sens inverse de celui d'une pompe à chaleur, le système délivrant de l'énergie mécanique au lieu d'en recevoir.

Lorsque je leur ai dit, après cette intense réflexion, que leur formule me faisait donc penser à deux machines thermiques ayant les mêmes températures aux sources chaude T_c et froide T_f , la

¹ Coefficient de performance. COP = énergie thermique produite localement que divise l'énergie électrique consommée

première fournissant de l'énergie mécanique (style turbine à gaz), l'autre en recevant (style pompe à chaleur), ils m'ont dit que j'avais raison. Lorsque j'ai comparé l'efficacité de ces deux machines thermiques devait se calculer indépendamment et qu'il n'était pas nécessaire de connaître l'une pour calculer l'autre. Rien ne prouve, m'ont-ils dit, que l'on puisse créer une machine thermique fournissant de l'énergie mécanique ayant les mêmes températures T_f et T_c aux sources froide et chaude que celles d'une pompe à chaleur. Ils m'ont confirmé que la température était bien représentative de l'énergie et liée à la vitesse des molécules d'après la formule $v^2_{\text{moy}} = 3kT$ avec : k = constante de Boltzmann = constante des gaz parfaits R/n_b d'Avogadro = $1.38 \cdot 10^{-23}$ Joules/K. Dans la machine thermique fournissant de l'énergie mécanique, on élève la température à la source chaude pour accélérer les molécules et récupérer un peu plus d'énergie mécanique, alors que dans la pompe à chaleur, on abaisse au contraire la température de la source chaude pour diminuer l'énergie mécanique que l'on doit payer. Du point de vue physiologique, c'est la température qui est importante, m'ont-ils dit, un peu d'énergie électrique c'est souvent beaucoup trop de température. Pour les êtres vivants, une variation de quelques degrés centigrades est extrêmement importante. Les lutins thermiques ont pour finir insisté sur le fait qu'il fallait se méfier de deux types de chaîne énergétique : celles produisant de l'énergie mécanique ou pire de l'énergie électrique à partir de la combustion des produits fossiles en raison de leur effet néfaste sur le réchauffement climatique.



Image Michel Copin

Et surtout celle, peut-être moins préoccupante à ce niveau mais grave socialement, produisant de l'énergie thermique à partir de l'énergie électrique avec l'effet Joule, compte tenu de son rendement illusoire de 100 %.

Lorsque l'on se chauffe, les procédés **A)** qui utilisent la combustion et **B)** le chauffage thermodynamique sont fondamentalement différents pour la raison suivante :

Dans le procédé **A)** on réchauffe notre environnement en perdant de l'énergie dans celui-ci alors que dans le **B)** on le refroidit en y récupérant de l'énergie. Au moment où l'homme s'inquiète d'être la cause du réchauffement climatique, cette constatation mérite réflexion. Il ferait bien aussi de s'inquiéter du fait que la combustion dissipe dans l'atmosphère une quantité considérable de CO_2 un gaz paradoxalement plus lourd que l'air qui acidifie la couche supérieure des océans ce qui affecte la photosynthèse et nuit à la reproduction du phytoplancton, maillon indispensable de la chaîne alimentaire.

Comparons maintenant les performances de ces deux chaînes énergétiques :

- Une machine thermique type **A)** recevant de l'énergie mécanique du type pompe à chaleur a une efficacité de $COP = 343 / (343 - 283) = 5,7$. (Pour $70^\circ C$ à la source chaude et $10^\circ C$ à la source froide.)
- La machine thermique type **B)** délivrant de l'énergie mécanique ayant des températures aux sources froide et chaude supposées égales à la machine précédente aurait une efficacité de $1/COP = 0,175$ cette machine étant grosso modo 30 fois moins efficace. (5,7/0,175).

On améliore en pratique l'efficacité de cette dernière machine en augmentant la température de la source chaude (eau surchauffée par exemple à 300°C (573 K) à la pression de 85 bar. En détendant à la pression atmosphérique jusqu'à 120°C on obtient un $COP = (573-393) / 573 = 0,314$ au lieu de 0,175. C'est donc tout de même environ 68 % (1 - 0,314) de l'énergie latente contenue dans les combustibles fossiles ou dans l'uranium qui réchauffe notre environnement avec des machines thermiques de ce type et ceci que l'électricité soit produite par le nucléaire ou la combustion des produits fossiles. Avec ce rendement modeste, la dispersion d'énergie thermique dans l'atmosphère qui en résulte, bien que très faible en valeur relative par rapport à l'énergie qui nous vient du soleil, n'est pas négligeable. Particulièrement si l'on ajoute à l'énergie thermique émise par le nucléaire la chaleur émise par les centrales thermiques chinoises et indiennes utilisant la combustion pour produire l'électricité. On peut en tout cas valider les propos de *John Stauber* et *Sheldon Rampton* tenus dans leur livre *L'industrie du mensonge* lorsqu'ils doutent que la production de l'électricité par le nucléaire serait une panacée contre le réchauffement climatique. Si l'homme devait être en partie responsable du réchauffement climatique annoncé par les experts du *GIEC*, on peut penser que c'est plutôt toute cette quantité de chaleur cumulée émise par ces deux procédés qui en serait principalement responsable. Ce n'est pas faire preuve de mauvais esprit que de dire qu'une bougie allumée que l'on rapproche du sol dans une pièce contenant du gaz carbonique a tendance à s'éteindre. Comment de ce fait le gaz carbonique, avec sa densité plus importante que l'air, pourrait-il à ce point se dissiper dans les couches supérieures de l'atmosphère et avoir cet effet de serre si redouté par les climatologues ?

Mise à part l'hydroélectricité sur nos rivières et la pile à combustible évoquée page 122, il ne fait pas de doute que toutes les anciennes chaînes énergétiques encore utilisées actuellement pour produire l'électricité conduisent à une production de chaleur la plupart du temps non récupérable. La chaîne énergétique qui consiste à se chauffer électriquement par effet Joule est probablement la pire de toutes et ceci quelle que soit la façon dont est produite l'électricité.

Au travers de ces chiffres, l'origine humaine du réchauffement climatique – même si elle est faible comparativement aux grands cycles de réchauffement et de refroidissement planétaire – ne semble pas faire de doute. Ceci dit à propos de l'aspect économique et de notre pouvoir d'achat, Claude Allègre faisait justement remarquer dans un de ses nombreux livres que si nous devons produire notre électricité avec des centrales thermiques brûlant du pétrole, nous devrions dépenser chaque année 20 milliards d'euros supplémentaires, soit le double du budget annuel de la France pour son enseignement supérieur.

Toujours est-il que quelle que soit la façon dont est produite l'électricité la chaîne énergétique qui consiste à se chauffer électriquement par effet joule est probablement la pire de toutes. Le plus grave pour l'environnement est lorsqu'une partie non négligeable de l'électricité alimentant le convecteur électrique est d'origine hydroélectrique avec un prix du kWh thermique pour l'utilisateur final inabordable malgré la qualité de la régulation. Comment le législateur français de l'époque a-t-il pu lors de l'établissement de la RT 2005 se laisser entraîner vers cette solution si onéreuse pour l'utilisateur alors que des solutions beaucoup plus économiques étaient déjà envisageables pour le chauffage urbain dans l'ancien à l'époque ? (Voir les trois possibilités de chauffage urbain page *Error! Bookmark not defined.* ainsi que le mauvais point de départ de la feuille de route des réglementations thermiques page *Error! Bookmark not defined.*). Il y a aussi en France des tentatives de mise en place de chaînes énergétiques « idéales » comme celle mise en œuvre dans le nord de l'Alsace, à *Soultz-sous-Forêts* avec la géothermie très profonde

(-5000 m) qui permet maintenant de produire de l'électricité avec des turbines à gaz en utilisant l'eau chaude présente dans le sous-sol à ces profondeurs. L'eau à 200°C sert ici à préchauffer un gaz (l'isobutane) à 160°C, température suffisante pour faire fonctionner les turbines à gaz. Il aurait pu être utilisé des turbines à vapeur mais probablement pour améliorer le rendement le constructeur a prévu un gaz intermédiaire. Ces réalisations ont malheureusement un caractère exceptionnel fonction de conditions locales inhabituelles.

Pour résumer ce chapitre c'est ainsi que la thermodynamique nous apprend :

- 1) Qu'en faisant passer de la chaleur d'une source chaude à une source froide, on peut récupérer de l'énergie mécanique en perdant malheureusement dans l'environnement une grande quantité de chaleur. C'est le principe des moteurs thermiques à vapeur, à explosion ou à combustion avec une source chaude à environ 200 °C. C'est aussi celui des centrales atomiques avec, il est vrai, un rendement sensiblement amélioré en raison de l'élévation de la température à la source chaude.



L'inconvénient du principe tient dans le fait que l'on perd sous forme de chaleur une énergie bien supérieure à l'énergie électrique produite. Dommage que la France ne se soit pas plus interrogée sur la possibilité de récupérer pour le chauffage urbain toute cette énergie thermique perdue dans le cas du nucléaire. Ceci alors qu'elle représente quantitativement tout de même près de deux fois l'énergie électrique produite. Compte tenu de la grande capacité de l'eau en tant que véhicule thermique et sa viscosité cinématique très faible à haute température (Voir page *Error! Bookmark not defined.*) on peut en effet se demander pourquoi un complexe nucléaire de 3 580 MW comme celui de Bugey situé à environ 35 km à l'est de Lyon ne récupère pas les quelque 7 000 MW thermique engendrés par la fission nucléaire pour chauffer l'habitat de la deuxième métropole française et des villes avoisinantes. Les déperditions thermiques d'une eau chaude mettant une dizaine d'heures pour atteindre Lyon en circulant à 1 m/s et quittant Bugey à 90°C ne sont certainement pas négligeables mais perdu pour perdu, il est plus que probable que lorsque l'eau chaude arrive à destination elle peut encore, moyennant un bon calorifugeage être à une température acceptable malgré des pertes thermiques en ligne importantes. Nul doute qu'il y a intérêt à lever le voile sur la capacité des plaques métalliques d'un échangeur thermique à créer une frontière entre l'eau radioactive et celle qui ne doit l'être en aucun cas

- 2) Qu'en fournissant, inversement, de l'énergie électromécanique, on peut faire passer de la chaleur d'une source froide à une source chaude. C'est le principe de la pompe à chaleur. Cette dernière méthode permet d'apporter de la chaleur dans les maisons (source chaude) en la puisant dans des volumes d'eau, d'air ou dans le sol (source froide). Ces volumes d'eau (nappe phréatique, lac, fleuve, océan), air (atmosphère) ainsi que le sol sont très importants devant les volumes à chauffer de telle sorte qu'ils restent à température sensiblement constante. L'intérêt du principe tient dans le fait qu'une faible quantité d'énergie mécanique permet de transférer une grande quantité de chaleur de la « source froide » vers la « source chaude ». La France ferait bien de s'engager, comme la Suisse, dans de tels procédés.

Les coups de gueule des lutins *Énergie électrique d'origine fossile*

La chaîne énergétique assurant la production d'énergie thermique avec des radiateurs électriques alimentés par de l'électricité provenant de la combustion des combustibles d'origine fossile est peut-être la pire :

Combustion > chaleur > énergie mécanique > énergie électrique > chauffage effet Joule
<-----rendement 30 % -----> <----- rendement 98 % ----->

Les performances de cette chaîne, qui incorpore encore majoritairement la combustion du charbon dans des grands pays comme la Chine ou l'Inde, sont mauvaises. Elle est encore parfois assurée sur sa partie gauche en France avec la combustion du gaz et du gasoil. Ceci bien que la performance de cette chaîne énergétique soit particulièrement médiocre en raison du rendement modeste des organes qui la constituent. En augmentant la température des gaz, on arrive à améliorer les performances d'une machine thermique du type turbine à gaz avec des roues à aubes étagées mais le rendement reste modeste et ne dépasse guère 60 %.

Le moteur diesel à combustion interne, composant parfois cette chaîne en délivrant de l'énergie mécanique afin d'entraîner un alternateur, est d'une efficacité comparable. Il y a environ quarante ans, à l'issue d'une thèse sur un moteur diesel 6 cylindres à plat, le professeur de thermodynamique de *Balendard* avait attiré son attention sur le fait que les moteurs à combustion ne pourront guère fournir une énergie mécanique supérieure à 4 kWh par litre de carburant (150 grammes/cheval heure). Force est de constater que les événements lui ont pratiquement donné raison. Si l'on compare cette énergie mécanique aux 10 kWh d'énergie thermique contenus dans ce même litre de gasoil, c'est cette fois sensiblement 60 % de l'énergie totale qui est dissipée en pure perte vers l'atmosphère sous forme thermique par un moteur à combustion interne. Pour éviter leur destruction, les moteurs comprennent d'ailleurs un système de refroidissement qui doit évacuer impérativement cette énergie thermique vers notre environnement. En l'absence de ce dispositif, c'est la surchauffe du moteur et sa destruction ! Malgré le piètre rendement de cette chaîne énergétique, guère supérieure à 40 % et son efficacité plus que modeste, c'est pourtant encore environ 10 % de l'électricité, soit 50 TWh, qui sont ainsi produits ainsi en France pendant la période la plus froide d'hiver pour alimenter les radiateurs électriques à effet Joule entraînant une surcharge du réseau. En estimant le rendement moyen de cette chaîne énergétique à 50 %, tout combustible fossile confondu charbon compris, c'est donc une énergie thermique équivalente à l'énergie électrique produite, soit 50 TWh d'énergie thermique, qui est dissipée le plus souvent en pure perte annuellement en France, soit 750 kWh par habitant (compte tenu de la population française de 65 millions d'habitants). Ce chiffre, très faible par rapport à l'énergie qui nous provient du soleil, représente tout de même près de 2 % des 55 000 kWh consommés annuellement par chaque membre des pays de l'OCDE.

Nota

Il y a bien sûr d'autres chaînes énergétiques complémentaires des cycles de Carnot du moteur à essence et du cycle compression > condensation > détente > évaporation d'une pompe à chaleur principalement évoqués dans ce chapitre. Le lecteur intéressé par cette notion de chaînes énergétiques peut se reporter au [fichier suivant](http://www.infoenergie.eu) du site www.infoenergie.eu qui aborde ce sujet très important d'une façon plus générale

Tribune libre des lutins

Les chaînes A), c'est beaucoup de chaleur perdue dans l'environnement pour produire pas mal d'électricité, alors que les chaînes énergétiques B), c'est un peu d'électricité consommée pour pas mal de chaleur récupérée dans l'environnement en le réchauffant moins. C'est en écrivant cette dernière phrase que l'on comprend l'absurdité de l'effet Joule qui ne produit pas plus de chaleur qu'il ne consomme d'électricité alors que cette électricité a été produite avec le nucléaire en dissipant dans l'atmosphère beaucoup de chaleur. Comprenez qui pourra mais il semblerait bien que l'homme soit à ce niveau aussi responsable du réchauffement climatique comme il l'est avec les gaz à effet de serre avec facteur aggravant la perte progressive de son pouvoir d'achat. Alors que l'on vient d'interdire les lampes électriques à filament, il va dans le mur en espérant généraliser la diffusion de ce mode de chauffage d'un autre âge. Assurer nos besoins thermiques en espérant associer ces deux chaînes pour se rapprocher d'un état d'équilibre dans lequel la chaleur émise par l'homme dans l'environnement est compensée en partie par celle qu'il y prélève en se rapprochant du chiffre $10^0 = 1$ est une argutie sans intérêt. Ce qui importe maintenant, c'est d'alléger la facture énergétique qui représente un poids devenu trop lourd* pour les ménages français.

**Une enquête réalisée par Odoxa pour le compte d'Honeywell fin 2014 auprès d'un millier de personnes majeures montre que 40 % des Français ont du mal à payer leur facture de chauffage avec une proportion qui passe à 60 % lorsque les revenus du foyer sont inférieurs à 1 500 € par mois. Notre consommation en énergie électrique est tributaire de la notion de chaîne énergétique dès lors qu'il s'agit du chauffage de l'habitat autrement que par la combustion.*

*To forget the temperature of the world,
drink warm tea and heat your house taking renewable energy in water*