

Quelques notions de base sur l'énergie

Apporter de l'énergie, c'est, par exemple, prendre un objet au sol, et le monter plus haut.

De la force ...

C'est ce que fait la houle : elle est capable, soit de prendre « au creux de la vague » un élément d'un système de production d'énergie, et de le soulever jusqu'au sommet de la même vague, soit simplement d'élever l'eau de la vague elle-même.

Les autres formes de l'énergie peuvent aussi être décrites de la même manière :

- apporter de l'énergie électrique, c'est prendre des charges électriques (positives) à un endroit où le nombre de volts est bas, et les emmener à un endroit où il est plus élevé ;
- une hélice d'avion ou de bateau est un convertisseur d'énergie dans lequel on prend un fluide là où la pression est basse pour l'emmener là où elle est plus forte ;
- pour dessaler de l'eau de mer, on pourrait prendre le sel là où il est moyennement concentré (dans l'eau de mer), et le faire passer de l'autre côté d'une membrane, où il est plus concentré (saumure, que l'on rejette à la mer), de manière à ce que l'eau devienne presque pure⁴ ;
- dans 90 % des cas, les spécialistes des panneaux photovoltaïques peuvent se contenter de se dire que la lumière prend les électrons sur un niveau d'énergie qui est bas, et les propulse sur un niveau d'énergie plus élevé (les mêmes notions peuvent être utilisées dans le domaine plus difficile de la chimie solaire, ou pour décrire la photosynthèse à l'origine des énergies renouvelables extraites des plantes) ;
- enfin, il faut aussi apporter de l'énergie pour prendre de la chaleur à un objet qui est froid (et donc le refroidir encore plus) et la transférer à un objet pourtant plus chaud (donc le chauffer).

... et du rythme

Les systèmes les plus pratiques sont souvent ceux qui produisent de l'énergie selon un processus continu (les moteurs de voitures et de camions constituant une exception). On peut alors les analyser en utilisant, non pas

⁴ Dans la pratique, c'est l'inverse, c'est l'eau qui traverse la membrane et non pas le sel, mais thermodynamiquement ça revient au même.

l'unité des objets que l'on prend en bas pour les monter plus haut, mais cette unité divisée par des secondes :

- le flux d'électricité, c'est la charge électrique (en coulombs, C) qui passe à chaque seconde en un point donné ; on l'appelle intensité électrique (I), et on la mesure en ampères, A : $1 \text{ A} = 1 \text{ C} / 1 \text{ s}$;
- le flux d'un fluide, c'est le nombre de m^3 qui, à chaque seconde, traversent une section donnée (par exemple, le disque balayé par une éolienne) ;
- la production d'un système de désalinisation d'eau de mer se mesure naturellement par le flux de matière, par exemple en kg/s , qui traverse une membrane semi-perméable ;
- pour les besoins de la comparaison, on peut analyser l'énergie lumineuse qui atteint une cellule photovoltaïque en évaluant combien elle apporte, à chaque seconde, de grains de lumière, ou photons ;
- et la chaleur qu'un frigidaire ou une pompe à chaleur prend à la source froide pour la transporter à la source chaude se mesure en watts (W), c'est-à-dire en unité de chaleur (le joule, J) par seconde : $1 \text{ W} = 1 \text{ J} / 1 \text{ s}$.

De la force fois du rythme

Pour qu'un système soit très énergétique, il faut que ces flux que l'on vient de décrire soient grands, mais aussi qu'on les prenne très bas et qu'on les relève très haut, c'est-à-dire qu'il y ait une grande difficulté à passer du point de départ au point d'arrivée. En fait, c'est le produit de ces deux grandeurs (le flux multiplié par la mesure de l'écart entre points de départ et d'arrivée) qui donne, très simplement, la puissance (P, en watts) de chacun de ces systèmes :

- pour un système électrique, la différence entre le nombre de volts du point haut et le nombre de volts du point bas, ou « différence de potentiel », s'appelle aussi la tension (U), et se mesure toujours en volts (V) ; la puissance se calcule alors par : $P \text{ (W)} = I \text{ (A)} \times U \text{ (V)}$;
- la puissance d'une turbine (toujours en W) est égale au flux de fluide qui la traverse, en m^3/s , multiplié par la différence de pression entre amont et aval, en pascals (Pa) ;
- c'est le même produit qui caractérise la puissance nécessaire à la désalinisation de l'eau de mer (le nombre de m^3/s d'eau traversant une membrane, multiplié par la différence de pression osmotique, en Pa, entre les deux côtés de cette membrane, différence de pression qui est directement proportionnelle à la différence de salinité entre l'eau douce produite et la saumure rejetée à la mer) ;
- la puissance lumineuse d'un ensemble de photons capables (pour cela, il faut en principe qu'ils soient de la même couleur) de faire faire le même saut

d'énergie à des électrons, est égale au nombre de photons par seconde, multiplié par la hauteur de ce saut d'énergie ;

- enfin, pour faire passer une puissance thermique P_{th} d'une source froide de température T_f (en kelvins, K, c'est-à-dire sur l'échelle où le zéro absolu vaut 0 K et non pas $-273,15^\circ\text{C}$, et où la température ambiante vaut 300 K au lieu de $+26,85^\circ\text{C}$), à une source chaude T_c , il faut apporter une puissance non thermique (c'est-à-dire sous forme mécanique, électrique, etc.) au moins égale à : $P = P_{th} \cdot (T_c - T_f) / T_f$.

Quelques remarques

- Le dernier exemple se distingue des précédents dans la mesure où la puissance thermique (celle qui est à l'œuvre pour le chauffage et pour la climatisation) est d'une nature différente des autres types de puissance. Si T_c est assez proche de T_f , il n'est en principe pas très difficile de prendre de la chaleur à l'intérieur d'un réfrigérateur ou d'un logement en été, et de la rejeter à l'extérieur, donc une puissance électrique assez faible peut suffire : l'« efficacité » qu'on peut ainsi définir pour ce système est supérieure à 100 %.

La même théorie nous dit que l'on doit pouvoir se chauffer à l'économie en prenant de la chaleur à une source froide (sol, eau, air) et en l'introduisant dans un logement tiède⁵ (le rendement d'une pompe à chaleur est toujours supérieur à 100 % puisqu'on ajoute la chaleur que l'on prend à l'extérieur et la puissance consommée par la machine qui la prend). Inversement, si on veut produire de l'électricité à partir de chaleur, il faut d'une part disposer à la fois d'une source de chaleur et d'un moyen de refroidir la machine (source chaude et source froide⁶), et d'autre part s'attendre à des rendements nettement inférieurs à 100 %, et ce d'autant plus que la différence de température entre ces deux sources sera faible⁷.

⁵ Selon cette théorie, qui conduit à la notion d'exergie, il n'y a rien de plus absurde que de se chauffer : soit à l'aide de combustibles capables de produire des températures de plusieurs centaines de degrés alors qu'on n'a besoin que d'une température supérieure de quelques dizaines de degrés à la température extérieure ; soit à l'électricité qui est elle aussi capable de produire des températures très élevées et qu'on utilise pour un objectif beaucoup plus modeste. Tous ceux d'entre nous (plus de 99 %) qui se chauffent sans pompe à chaleur ni cogénération vivent donc de manière absurde. Soit.

⁶ La terre est elle aussi une machine thermique en contact avec deux sources thermiques dont le quotient des températures thermodynamiques est d'environ 4000, quand il n'est que de 3 ou 4 au maximum dans les meilleures machines construites par l'homme. La source chaude, c'est naturellement le soleil, et la source froide, c'est l'espace intersidéral. C'est pourquoi l'évacuation de la chaleur de l'atmosphère sous forme de rayonnement infrarouge dirigé vers le haut, a une telle importance que ce soit pour le fonctionnement des vents (énergie éolienne), des pluies (énergie hydraulique), de l'effet de serre (à cause duquel il est essentiel de ne pas trop émettre de CO_2 , et donc de développer des énergies propres), ou encore d'une énergie renouvelable qui fera l'objet de plusieurs chapitres de ce livre, les cheminées solaires.

⁷ Cf. la notion de rendement d'une machine thermique réversible fonctionnant entre une source froide et une source chaude, ou « rendement de Carnot ».

Mais si vous avez bien lu ce qui précède, vous aurez noté que des dispositifs faisant intervenir de la chaleur peuvent avoir trois utilisations possibles, comme on le verra dans le chapitre 3, « Changer de chauffage en fonction du vent », alors que les autres types de puissance peuvent au mieux fonctionner dans deux sens (une même jonction p-n peut transformer de la lumière en électricité – effet photovoltaïque – et vice-versa – c'est alors une led ; un même dispositif électromécanique peut agir comme moteur pour accélérer un tramway et comme générateur pour récupérer son énergie de freinage et la renvoyer dans le réseau électrique).

- L'idée selon laquelle la puissance d'une turbine est égale à un flux en m^3/s , multiplié par une différence de pression en Pa, étonnera peut-être les spécialistes des éoliennes, qui ont plutôt l'habitude de calculer des puissances à partir de l'énergie cinétique de l'air, qui se déduit de la mesure de sa vitesse. De fait, nous avons fait le choix d'ignorer cette autre présentation de la notion d'énergie.

Nous l'avons fait exprès, car dans les variantes d'énergie éolienne qui seront présentées plus loin (cheminées solaires), beaucoup de gens arrivent à des résultats faux en partant de la notion d'énergie cinétique, alors qu'on trouve des résultats exacts si on calcule des m^3/s multipliés par des Pa. Et même pour l'énergie éolienne, il n'est pas inintéressant de réfléchir au fait que pour que de l'air qui se trouve en aval de l'éolienne puisse revenir en amont, il doit suivre un cycle largement déterminé par les différences de pression qui naissent dans les colonnes d'air situées aux centres des dépressions et des anticyclones.

- Nous avons aussi ignoré ce qui est l'origine commune de toutes les présentations de la notion de puissance, à savoir la multiplication (produit scalaire pour être très précis) de la vitesse d'un point matériel, par la force que subit ce point.

Une variante un peu plus opérationnelle est celle qui remplace la vitesse en m/s d'un point matériel, par la vitesse angulaire (ω , en rad/s) d'une machine tournante, et la force en newtons (N), par le moment du couple qui fait tourner cette machine (T, en N.m), d'où la puissance : $P = \omega \times T$.

- Enfin, dans tous les cas, on a retrouvé pour la puissance le produit de deux termes, dont l'un inclut l'idée de division par le temps. Inversement, une puissance multipliée par un temps, ça doit avoir un sens. D'ailleurs, le kWh n'est-il pas une unité importante ?

En fait, c'est la puissance multipliée par le temps qui, en physique, s'appelle « énergie » et se mesure en joules (sous ses deux formes : la chaleur qui autrefois justifiait l'unité « calorie », laquelle aurait dû disparaître depuis longtemps des notices alimentaires et des régimes diététiques ; et le travail pour tout ce qui n'est pas de la chaleur).

Quelques ordres de grandeur

Le joule est cependant une unité beaucoup trop petite, 3,6 millions de fois plus petite que le kWh qui, lui-même, n'est facturé que quelques centimes sur votre facture d'électricité ou de gaz.

Cela nous montre que l'énergie fossile ou nucléaire est très bon marché : 1 kWh, c'est, puisque vous y tenez, l'énergie cinétique d'un wagon de huit tonnes roulant à 108 km/h, et sa production dans une centrale à charbon dégage pratiquement 1 kg de CO₂ : ce n'est donc pas rien, et pourtant ça ne vaut presque rien. C'est toute la difficulté à laquelle sont confrontées les énergies renouvelables : arriver elles aussi à ne coûter que quelques centimes le kWh.

Leur avantage, c'est bien sûr de ne pas avoir besoin de combustible (sauf quand elles sont elles-mêmes le combustible, comme pour les biocarburants). La principale composante de leur coût, c'est donc l'investissement initial. Compte tenu de leur longévité (qu'on considère généralement autour de 30 ans, comme pour la plupart des systèmes industriels robustes, sauf cas particuliers tels que le photovoltaïque en couches minces), et du niveau des taux d'intérêts, il faut pouvoir étaler cette dépense sur 15 à 20 ans.

Pour un système qui produirait du courant jour et nuit, été et hiver, cela représente autour de 150 000 heures. Donc, quelques centimes le kWh, cela correspond à quelques milliers d'euros (ou de dollars) le kW. Pour les systèmes très intermittents (photovoltaïque, éolien), il faut arriver à descendre en-dessous de 1 k\$/kW, c'est-à-dire 1 \$/W. En effet, l'énergie, qui ne se stocke pas et qui ne se transporte ni gratuitement ni sans pertes, n'a pas une valeur constante et uniforme. Disponible à proximité des grandes villes et quand la demande est forte ou que l'offre est insuffisante, elle vaudra cher. Associée à des actions de régulation de l'offre et de la demande, elle présentera aussi de l'intérêt. Éloignée et totalement imprévisible, ou disponible seulement quand on n'a pas trop besoin d'elle, il est normal de ne pas pouvoir la vendre aussi cher.

Ces deux ordres de grandeur : quelques centimes le kWh, et 1 \$/W, rappellent la différence entre kW et kWh, qui est si souvent oubliée, en particulier par les journalistes, même les plus sérieux : le kW est l'unité de puissance, et son équivalent monétaire mesure le coût de l'investissement, tandis que le kWh est l'unité d'énergie, et que son prix se réfère aux factures bimestrielles des consommateurs.

On peut enfin chiffrer nos besoins en énergie : pour les pays développés, un bon ordre de grandeur est : 1 kW par personne, soit de l'ordre de 10 000 kWh/an. Pour trouver l'équivalent à l'échelle d'un pays, on obtient, pour 1 million d'habitants, 1 gigawatt (GW), ou encore dix milliards de kWh/an : 10 TWh (térawatt-heures) par an. Et, à terme, à l'échelle de l'humanité, qui n'a pas de raison de ne pas vouloir vivre comme nous, dix mille fois plus, soit 10 000 GW (10 TW) ou 100 000 TWh/an.

(Les puristes préfèrent utiliser les multiples du joule, ce qui donne, pour nos besoins globaux, de l'ordre de 300 milliards de milliards de joules, ou plutôt 300 exajoules par an... quand on vous disait que le joule, c'est tout petit !).

Que nous envoie le soleil, pendant ce temps-là ? Encore un chiffre rond : environ 1 kW (notre besoin individuel d'énergie) par m², mais seulement par beau temps et mesuré à la perpendiculaire des rayons lumineux. Ce chiffre n'est donc pas à multiplier par la superficie de notre terre sphérique, mais par un disque plat de 6400 km de rayon : on trouve environ 100 000 TW, dix-mille fois nos besoins.

Ceci permet en théorie soit de nous en remettre au potentiel mondial d'énergie solaire et de ne pas trop nous inquiéter de manquer de place, soit de compter sur les énergies que la nature produit à partir de l'énergie solaire avec un rendement très médiocre, mais encore suffisant compte tenu de la marge qui existe entre 10 et 100 000 TW : les énergies hydraulique et éolienne, et la photosynthèse (biomasse).

1 - 200 m de chute d'eau dans chaque estuaire ?

La valorisation du gradient de salinité par osmose est une des énergies marines les moins connues. Son principe s'inscrit dans l'idée générale, décrite au chapitre précédent, selon laquelle il y a besoin d'énergie quand on veut prendre quelque chose quelque part et l'amener là où elle ne va pas spontanément. Prendre de l'eau mélangée à du sel et faire en sorte qu'elle ne le soit plus, rentre bien dans cette catégorie.

Cette action, c'est le dessalement de l'eau de mer, et une des techniques possibles est celle de l'osmose inverse : au-dessus d'une certaine différence de pression entre de l'eau salée d'un côté d'une membrane et de l'eau douce de l'autre, l'eau se déplace du côté salé vers le côté de l'eau douce.

Réciproquement, en dessous de la différence de pression limite (25 bars), l'eau passe dans l'autre sens. Au lieu de consommer de l'énergie, on en produira, et la puissance théorique, en W, va, très simplement, être égale au flux d'eau en m³/s, multiplié par 2,5 millions de pascals (1 bar = 1 atmosphère = 1000 hPa = 100 000 Pa).

Pour se convaincre de l'intérêt d'un tel système, on peut imaginer le dispositif suivant : à l'embouchure d'un grand fleuve, la quasi-totalité de son débit alimente une usine hydroélectrique et en sort... 200 m plus bas, à l'air libre, au fond d'un puits ; puis elle traverse un ensemble de membranes et se mélange à l'eau de la mer, comme si elle n'avait pas plongé si bas ! Elle est libre de repartir, et on a gagné la chute de 200 m.

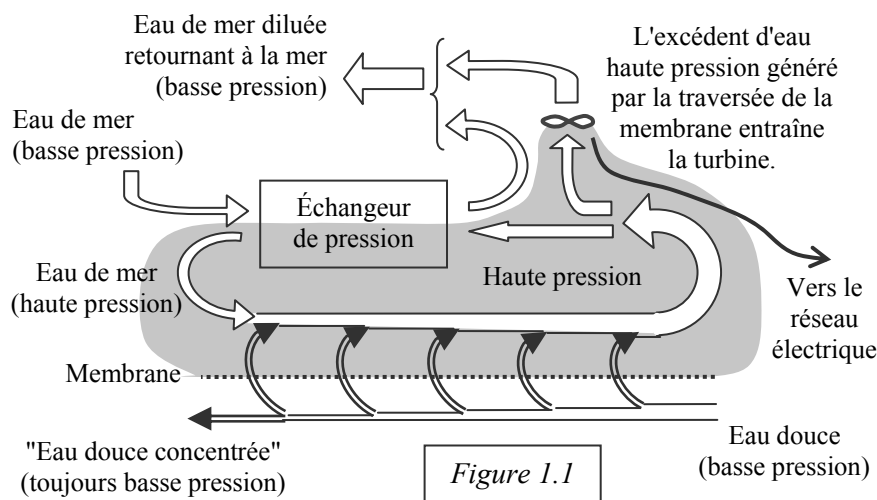
L'énergie hydraulique est la moins chère et la plus abondamment exploitée des énergies renouvelables, mais son potentiel de développement est limité car un grand nombre des sites favorables sont déjà équipés. De plus, ceux-ci présentent soit des hauteurs de chute élevées mais très en amont donc avec une fraction seulement du débit du fleuve, soit l'inverse, mais presque jamais les deux à la fois. C'est justement ce que cette technique peut apporter, et souvent à proximité des consommateurs (embouchures des différents fleuves d'Europe, du Saint-Laurent, du Gange, du Yang-tsé Kiang, du Rio de la Plata, du Mékong, du Mississippi, de la Snake River...).

Autre avantage par rapport à d'autres énergies renouvelables, le stockage de l'énergie se présente sous un jour très favorable, car de grandes quantités d'eau douce peuvent sans grandes difficultés être stockées dans des poches souples flottant dans l'eau de mer : contrairement au stockage de l'eau dans des barrages, il y a très peu de pression à contenir, puisqu'elle s'équilibre presque exactement entre l'eau de mer et l'eau douce.

Quelques nuances : tout d'abord, nous en avons fait la présentation la plus pédagogique et la plus spectaculaire, mais ce n'est sans doute pas sous cette forme que cette technique va se développer, car les projets de la société

Statkraft incluent un « échangeur de pression » qui permet de se passer du creusement d'un puits de 200 m de profondeur. Cependant, d'un point de vue énergétique, tous les autres paramètres sont strictement équivalents à ce qu'on vient de présenter, et en particulier tous les arguments en faveur de cette source d'énergie.

D'un point de vue économique, les quantités de membranes semi-perméables à mettre en œuvre seront naturellement colossales. C'est un élément défavorable si leur prix reste ce qu'il est actuellement, et l'énergie produite resterait alors une dizaine de fois trop chère pour être parfaitement compétitive. Cependant, un aussi vaste marché peut induire des économies d'échelle importantes, et il n'est pas nécessaire de mettre sur pied une industrie totalement nouvelle, car les principes de base (y compris les échangeurs de pression) sont les mêmes que dans l'industrie du dessalement par osmose inverse, actuellement en plein essor.



Autre nuance, le processus n'est pas l'exact symétrique du dessalement de l'eau de mer, car on n'a pas, côté eau douce, une eau 100 % pure. Donc, en ne laissant que les molécules d'eau rejoindre le côté mer, on va avoir une augmentation de la concentration de l'eau douce en divers minéraux, son efficacité énergétique va diminuer, il y aura un risque d'entartrage des membranes, donc il faudra remonter à la surface un certain pourcentage de cette eau (faible pour de l'eau de fonte de glaciers, mais fort pour l'eau de fleuves alimentés en grande partie par des sources et des nappes phréatiques). Avec le système des échangeurs de pression, cette « eau douce concentrée » rejoint directement la mer, n'ayant pas besoin d'être remontée de 200 m, mais non valorisable énergétiquement.