

Exposé des motifs

Le discours public sur l'environnement est très peu scientifique ; du sentiment et des adjectifs plus que de la science et des chiffres.

Votre formation vous permet d'être mieux informés et plus objectifs que les soi-disant experts, avec un minimum d'effort : c'est le but de l'atelier.

Les obstacles :

Avant tout les puissance de dix (qui rebutent le public) et les unités (multiplicité).

L'environnement partage cette difficulté avec la physique moderne, la biologie, l'économie nationale etc. Il ne s'agit plus du passage du microscopique au macroscopique mais le facteur 10^{10} est présent entre l'individu et la population mondiale, comme entre l'atome et un mètre, ou entre le nombre de cellules et le corps humain (à des facteurs dix près).

Solution : choisir l'échelle humaine. Exemple l'énergie consommée par un occidental est de l'ordre de 100 kWh/jour.

Attention aussi aux comparaisons et aux références inappropriées : la consommation d'énergie domestique (ou même de celle dépensée pour l'éclairage) n'est qu'une fraction (de l'ordre de 20%) de la consommation par individu (qui comprend en plus les transports, les équipements publics, les biens de consommation ou d'équipements individuels).

L'approche logique, étant données les incertitudes et les différences d'ordre de grandeur, est donc celle des échelles plus que celle des calculs exacts. (incertitudes : ne pas confondre les incertitudes déjà nombreuses sur par ex. le climat futur ou les choix politico-économiques du futur proche (scénarios) avec la méconnaissance de ce qui est déjà établi, typiquement ce qui va être exposé dans l'atelier comme les rendements limites).

Plan

Les nécessités de la spécialisation disciplinaire nous obligent à organiser le cours suivant les sources d'énergies (ou de consommation). Les conférenciers (sauf Diana) auront des discours de spécialistes, Claude en tant que géographe aura un point de vue plus transdisciplinaire.

Dans la mesure où mon but est de vous montrer que vous êtes en mesure de comprendre l'essentiel à partir des notions scientifiques que vous pos-

sédez déjà, j'aurai moi aussi une approche de spécialiste de type hypothético-déductive : je partirai donc de notions élémentaires de la physique, comme les lois de Newton ou la thermodynamique de base, pour en déduire les performances et les limites des différentes ressources naturelles.

Mais ce cours est destiné à tous ceux qui le suivent :

- N'hésitez pas à poser des questions si vous ne comprenez pas !!
- Ma bible est le livre de MacKay "Sustainable energy without the hot air" disponible sur le Web : <http://www.withouthotair.com/>. A consulter sans crainte de l'épuiser si vous manquez une séance, ou si vous arrivez en retard ou partez en avance. Il nous servira aussi de source pour les exposés. Les références à ce texte sont notées sewtha p. numéro de la page.
- Mon leitmotiv : La physique impose des limites aux ressources renouvelables. Ces limites sont mal perçues, comme l'étaient les limites à la croissance avant les années 70. Le livre de MacKay est un peu l'équivalent de Limits to Growth de Meadows et al.

Je reprends la perspective de McKay : Est-il possible, (et comment faire), d'équilibrer un bilan production/demande à partir des énergies renouvelables : Comment produire les 60M x la centaine de kWh/j consommée par les Français (avec en plus un facteur de près de deux correspondant aux importations et aux voyages aériens).

Première partie

I L'hydro-électricité

Une petite précaution : Sauf exception (chauffage solaire par exemple), l'énergie est distribuée sous forme d'électricité. C'est la source secondaire de distribution de l'énergie. Mais les sources primaires sont très variables (cf. premier cours de Claude). Nous allons faire un panorama de ces différentes sources et de leurs limites dans les cours qui vont suivre, en commençant par l'hydro-électricité.

1 Les barrages terrestres

(sewtha p.55)

En montagne, comme en plaine, le barrage peut apparaître comme une ressource très séduisante : il s'agit effectivement d'une ressource renouvelable.

Rendement d'une centrale hydro-électrique. Une retenue, un lac artificiel, collecte l'eau d'un bassin versant qui fait fonctionner des turbines génératrices en contrebas. L'énergie disponible maximum évaluée sur un an est donc :

$$E_p = Mgh_c = \rho gh_c Ah_p$$

M est la masse d'eau dans la retenue (par an), et h_c la hauteur de la chute jusqu'aux turbines ; en détaillant M, ρ est la masse volumique de l'eau, A l'aire du bassin versant et h_p la hauteur annuelle de la pluie sur le bassin.

Application numérique (sewtha p.56)

Le Loch Sloy. $A = 83 \text{ km}^2$, $h_p = 3 \text{ m}$, $h_c = 200 \text{ m}$.

résultat à comparer avec une énergie réelle de 142 GWh/an.

En densité d'énergie, la superficie du lac est de $1,5 \text{ km}^2$. Par conséquent le rendement en puissance par m^2 est de 11 W/m^2 (équivalent à une cellule photo-voltaïque)

(Serre-Ponçon, $A = 3\,600 \text{ km}^2$, $h_p = 1 \text{ m}$?, $h_c = 123 \text{ m}$. Production 700 GWh/an. Superficie du lac 28 km^2)

Avantages : la source primaire étant une énergie potentielle elle est modulable dans le temps suivant la demande (dans une certaine limite). L'eau peut même être pompée vers le lac lorsque qu'un surplus d'énergie est disponible par ailleurs, pour servir dans les périodes de forte demande. (mais pertes).

Inconvénient : surfaces inondées ; ressources agricoles et voies de communications perdues.

2 Marées

(sewtha p. 81)

Même principes physiques, mais là on n'est pas maître du débit, contraint par la marée.

Dans un bassin la densité d'énergie par m^2 est :

$$dW = \int \rho gh \cdot dh$$

$$W = \rho gh^2 / 2$$

où h est la dénivellation entre le bassin et la marée à l'étale. W est donc de 20 kJ pour une dénivellation de deux mètres, environ 6Wh récupérables en 6 heures (une demi marée). En faisant fonctionner les turbines dans les deux sens la puissance moyenne est de 1 W/m^2 .

Heureusement les marées sont plus hautes dans l'Atlantique et dans la Manche.

Pour la Rance (sewtha p. 87), la marée a une amplitude de 13,5 m et le bassin fait 22 km². La puissance moyenne est de 60 MW, correspondant à une densité de 2,7 W/m².

Il existe d'autres sites qu'on pourrait envisager d'équiper : la baie du Mont St Michel, le Morbihan, l'estuaire de la Severn (sewtha p. 85 2GW!) etc. Plus des turbines dans le Pas de Calais ...

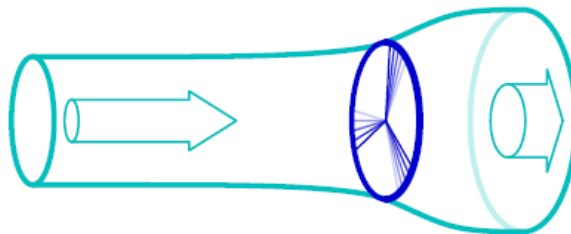
3 Les vagues

Le mouvement vertical des vagues correspond à des puissances importantes récupérables par des serpents de mer !

Il s'agit de cylindres métalliques remplis de liquide en mouvement sous l'effet des différences de hauteur entre le sommet et la crête de la vague : l'énergie cinétique du liquide intérieur est recueillie par une turbine. Des chiffres de 300 kW par serpent de 700 tonnes sont avancés. La puissance théorique des vagues de l'Atlantique est de 40 kW/m.

Deuxième partie

Eoliennes



L'énergie cinétique incidente par unité de temps (la puissance) est le flux de l'énergie contenue dans le tube de section 1 m^2 et de longueur v , la vitesse.

$$P = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho vv^2 = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (1)$$

Où $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$ est la masse volumique de l'air.

$$P = 140 \text{ W/m}^2 \quad (2)$$

Pour $v = 6m/s$; un vent de force 4, classique en Bretagne. La vitesse intervient à la puissance 3, d'où l'importance du choix des sites et de la hauteur de l'éolienne.

Mais 50% de cette énergie au moins doit être restituée (l'éolienne n'arrête pas le vent).

Ce sont les facteurs de formes qui contrôlent ce chiffre : l'éolienne est optimisée pour un vent donné. Le rendement tombe pour des vents différents.

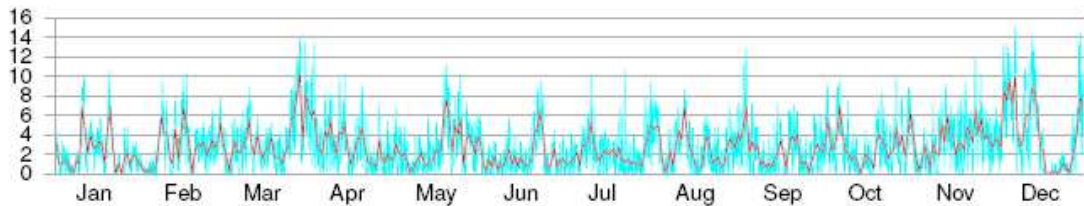
Une éolienne de 25 m de diamètre peut donc générer 34 kW avec des vents de $v = 6m/s$.

"Standard windmill properties (sewtha p.267)

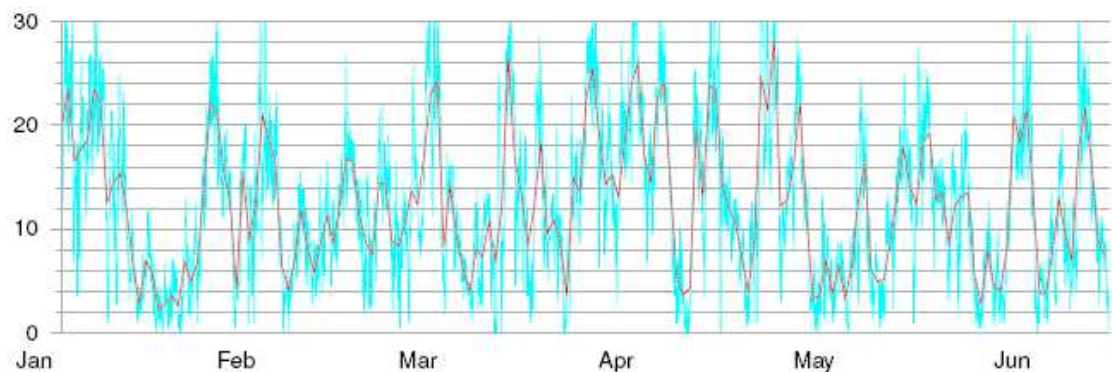
The typical windmill of today has a rotor diameter of around 54 metres centred at a height of 80 metres; such a machine has a "capacity" of 1MW. The "capacity" or "peak power" is the maximum power the windmill can generate in optimal conditions. Usually, wind turbines are designed to start running at wind speeds somewhere around 3 to 5m/s and to stop if the wind speed reaches gale speeds of 25m/s. The actual average power delivered is the "capacity" multiplied by a factor that describes the fraction of the time that wind conditions are near optimal. This factor is sometimes called the "load factor" a typical load factor for a good site in the UK is 30%; in Germany, it is 19%."

Dans une ferme éolienne, les éoliennes sont typiquement écartées de 5 fois leur diamètre pour éviter les interférences. Les deux facteurs combinés, rendement de 50% et espacement des éoliennes 3%, réduisent le rendement à $2.2W/m^2$.

Le plus gros problème des éoliennes est le caractère intermittent de la puissance engendrée, lié à l'intermittence du vent.



Vitesse du vent à Cambridge (UK)



Vitesse du vent à Cairgorm (Ecosse)

Sur une année, le rendement moyen d'un parc éolien est donc bien plus faible que la puissance installée, typiquement d'un facteur 1/4 en France. Il y a un problème de temps et de lieu :

- Il y a dans l'année et dans la journée (plutôt la nuit) des périodes où la puissance générée est très faible (elle varie suivant le cube de la vitesse. Ces périodes n'ont pas de raison de coïncider avec les chutes de la demande! Cas défavorable : l'anticyclone hivernal dans l'est de l'Europe.
- Les zones de grand vent sont les cols et la facade maritime. Ce ne sont pas les toujours les lieux où la demande est la plus forte. Le cas allemand : générateurs au nord alors qu'une bonne partie de la demande est au sud : pertes dans les lignes électriques.

L'éolien offshore est évidemment très attractif en terme de terrain occupé et de vent. Mais il ne peut pas être installé partout : eaux peu profondes, moins de 25 m. Et problèmes de distribution électrique et de maintenance de circuits électriques dans l'environnement marin (18 mois entre interventions).

4 Une digression : transports terrestres

Si on se place maintenant du côté de la consommation, la même équation de l'aérodynamique joue un rôle fondamental : une voiture (un camion, un train, ...) dissipe en particulier une énergie liée à la friction de l'air (sewtha p.254)

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3)$$

Où A est la section "efficace" de la voiture, produit de la section géométrique par le coefficient de drag (de l'ordre de 0.3). D'autres termes vont intervenir,

frottements solides, freinage dans le cas de la voiture (circulation urbaine), mais ce terme suffit à donner un ordre de grandeur. Le raisonnement s'applique aussi aux transports aériens (sewtha p.269).

5 Conclusions

Nous avons calculé des puissances limites à partir des phénomènes physiques (vents, marées, hydrographie).

Les puissances récupérables sont souvent des fonctions puissance, de la vitesse du vent ou de la hauteur d'eau par exemple, d'où l'importance des intermittences et du choix des sites.

On peut déjà comparer les puissances fournies par ces équipements à la demande nationale et à la superficie occupée sur le terrain.

La demande annuelle nationale en France est de l'ordre de 170 Mtep équivalents à 6 TWh par jour et donc à 250 GW de puissance instantanée. Les barrages terrestres en fournissent près de 10 % mais on estime que tout le territoire est équipé. Les 60 MW de la Rance font pâle figure. Même en imaginant des équipements correspondant à vingt fois la Rance, en barrant les autres estuaires, le Mont St Michel et le Morbihan, on obtient une estimation de l'ordre du GW.

Pour générer 1 GW crête il faudrait 1000 éoliennes de diamètre 54m qui occuperaient 500 km², soit 1/1000 ième du territoire. (Il ne s'agit que d'ordres de grandeurs!).