

La nature de l'énergie ?

*L'énergie de la nature n'est pas
une chose...*

Jacques Treiner

*Université Pierre et Marie Curie
et Sciences-Po Paris*

Association « Sauvons le climat »

Avertissement

Ce qui suit est moins un exposé sur l'énergie que sur les questions qu'on peut (qu'il faut ?) se poser lorsqu'on enseigne la notion

Quelques expressions piège

Nous avons besoin d'énergie

Nous allons manquer d'énergie

Il faut produire de l'énergie

Le bien-être des sociétés s'est toujours accompagné d'une consommation croissante d'énergie

Les aliments ont un contenu en énergie qui se lit sur la boîte

La relativité nous apprend que la matière peut se changer en énergie

Comment peut-on manquer d'énergie si elle se conserve ?

Toutes ces expressions traitent l'énergie comme d'une chose

Feynman : une anecdote à propos de l'enseignement de l'énergie

Un livre de 6^e propose, comme entrée sur l'énergie, le questionnement suivant :



*Qu'est-ce qui fait
marcher le chien ?*

*Qu'est-ce qui fait
marcher le chien ?*



*Qu'est-ce qui fait
marcher la moto ?*



*S'agit-il d'un introduction à la physique,
à la biologie, à la chimie ?*

Réponse du livre du maître :

C'est l'énergie qui fait bouger le chien mécanique, le chien vivant, la moto etc.

Mais, dit Feynman, cette réponse n'apprend rien : car si un élève dit non, c'est Dieu ou la force de l'esprit ou une force motrice qui fait bouger le chien, comment entamer la discussion avec lui ?

Pour savoir ce qui fait bouger le chien mécanique, il faut l'ouvrir, et constater qu'un ressort, précédemment remonté, entraîne en se détendant des roues dentées.



Avec les mots de Feynman

- « Adoptons maintenant un point de vue différent et disons, à l'inverse, que c'est là simplement la définition de l'énergie. Quelque chose qui bouge a –par définition– une certaine énergie ; **mais ce n'est pas l'énergie qui la fait bouger.** La nuance est assez subtile. »
- « Quand on pose à un enfant la question de savoir ce qui fait bouger un chien mécanique, il faut avoir présent à l'esprit ce que serait la réponse normale. A savoir ici que **le ressort a été bandé lorsqu'on l'a remonté, et qu'il se détend en entraînant les roues dentées du mécanisme.** »
- « En somme, la question posée par le manuel est bonne. C'est la réponse qui est mal venue, car ce n'est qu'une définition de l'énergie qui ne nous apprend rien. Imaginez quelqu'un élève dise : « Moi, je ne crois pas que ce soit l'énergie qui fait bouger le chien ». Il est impossible de discuter avec lui ! »
- « A la longue, j'ai fini par trouver un truc qui permet de savoir si ce qu'on a enseigné c'est **une définition ou un concept.** Il suffit de dire aux élèves : « Sans utiliser le mot nouveau que vous venez d'apprendre, redites la même chose avec votre vocabulaire habituel. » Par exemple : « **Dites-moi ce que vous savez du mouvement du chien, sans utiliser le mot « énergie » !** » Impossible. Donc vous n'avez rien appris d'autre qu'une définition, pas de la science. » »

Toujours revenir aux transformations

*Nous ne vivons pas d'énergie, nous vivons **de transformer la matière** autour de nous, quels que soient les usages : résidentiel/tertiaire, industrie/agriculture, transport, électricité.*

*L'énergie n'est pas une chose, c'est **l'unité de compte des transformations de la matière.***

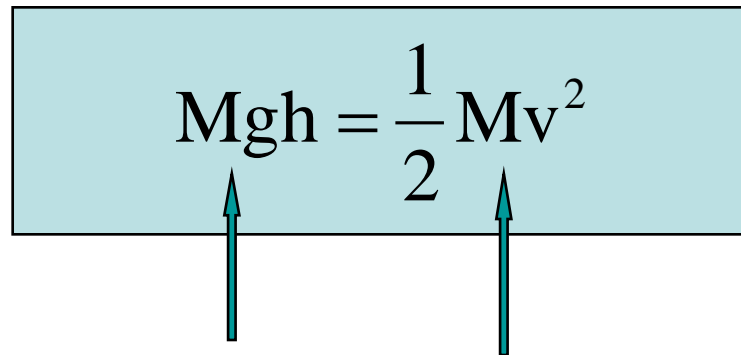
Transformations de la matière \longleftrightarrow Interactions fondamentales

L'énergie, unité de compte des transformations de la matière.

Premier exemple : la chute libre

Un corps tombe : il perd de l'altitude, il gagne de la vitesse

*Question : y a-t-il un rapport entre cette **perte** et ce **gain** ?*

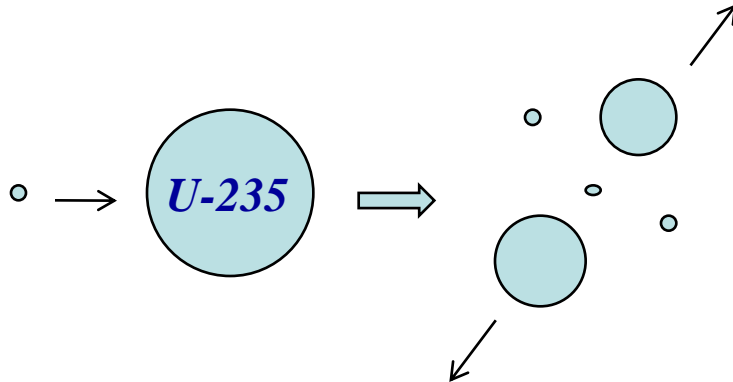

$$Mgh = \frac{1}{2} Mv^2$$

Énergie associée à la position relative de l'objet et de la Terre : énergie potentielle

Énergie associée au mouvement : énergie cinétique

Deuxième exemple : la fission

Que signifie : la fission dégage de la chaleur ?



Le neutron incident est absorbé, le noyau U-236 formé fissionne en deux fragments qui se repoussent violemment, et en moyenne environ 2,5 neutrons sont libérés dans le processus

Question : si la masse se conserve, d'où vient l'énergie cinétique des fragments ?

C'est la question que se sont posés Lise Meitner et Otto Frisch en décembre 1939, après que Meitner ait reçu la nouvelle de Berlin que l'uranium-235 se fragmentait, et que l'un des fragments, selon Otto Hahn, était du baryum.

Fission, quantification

Défaut de masse : La masse d'un noyau est plus petite que la somme des masses des constituants, d'une quantité appelée énergie de liaison

***$B(Z,N)$** : c'est l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour le dissocier complètement en constituants au repos, à l'infini (état de référence pour l'énergie)*

$$M(Z,N)c^2 = Zm_p^2 + Nm_n^2 - B(Z,N)$$

$$E(Z,N) + B(Z,N) = 0$$

Or :



L'utilisation de la formule de masse de Bethe-Weizsäcker montre alors que l'énergie cinétique disponible est de l'ordre d'environ 200 MeV (pour être plus précis il faut tenir compte du fait que les noyaux formés ne sont pas dans leur état fondamental, et qu'ils émettent β , γ et ν).

Fission, fin : pourquoi est-ce l 'U-235 qui fissionne avec des neutrons lents ?

Défaut de masse : La masse d'un noyau est plus petite que la somme des masses des constituants

L'uranium-236 formé possède une énergie d'excitation égale à la différence $B(92,144) - B(92,143) = 6,85 \text{ MeV}$

Dans le cas d'une capture par U-238, l'énergie d'excitation de l'U-239 formé est $B(92,147) - B(92,146) = 4,91 \text{ MeV}$

*L'énergie d'excitation de U-236, noyau pair-pair, est suffisante pour franchir la **barrière de fission**. Ce n'est pas le cas pour l'U-239. noyau pair-impair.*

***Précision** : un noyau pair-pair bénéficie d'un surcroît d'énergie de liaison, car les orbitales m et $-m$ sont occupées, assurant un recouvrement optimal et donc une meilleure attraction (effet d'appariement, également à l'origine de la superfluidité nucléaire)*

Moralité

Ces deux exemples illustrent ce que l'on gagne à pouvoir quantifier les transformations : on progresse dans l'explication des phénomènes.

Expliquer : élaborer une représentation abstraite du monde réel, régit par des lois qui s'expriment mathématiquement, et qui se comporte – pour certains aspects au moins – comme le monde « réel ».

« Expliquer » n'est pas seulement « décrire » : les lois de Kepler « décrivent » le mouvement des planètes. La mécanique de Newton les « expliquent ».

En général, une explication a une portée plus large que le contexte dans lequel elle a été formulée. Exemple : les lois de Newton « contiennent » le chaos déterministe, mais Newton ne le savait pas...

Transformations et interactions fondamentales

gravitation

électromagnétisme

interaction forte

interaction faible

Concentration de l'énergie

Chimie : 1 kWh correspond à la transformation de 1 kg de matière

Nucléaire : mg (1 kWh nécessite 10 mg d'U naturel contenant 0,7 % d'U-235)

Gravitation, systèmes mécaniques : énergie très diluée

Ex. : *Une centrale donnant 1 GWe consomme*

50 kg de tritium par an (si on y parvient !)

27 tonnes d'U par an

170 tonnes de fuel, 260 tonnes de charbon à l'heure

1200 tonnes d'eau par sec tombant de 100 m de hauteur

5000 éoliennes de 1 MW

30 km² de panneaux solaires

Changement de registre : pourquoi ne pouvons-nous plus aborder l'énergie comme « avant » ?

Le couplage énergie-climat

L'épuisement des ressources fossiles

Il ne s'agit donc pas seulement de construire le concept d'énergie, et la loi de conservation, mais aussi d'aborder l'énergie comme facteur de développement des sociétés, donc les applications des sciences.

Or les applications ne relèvent pas du seul domaine de la science. Les applications changent les rapports des hommes entre eux, et leurs rapports avec la nature : on est dans l'ordre sociétal.

Deux exemples : - les renouvelables (des panneaux sur le toit et une éolienne au fond du jardin pour résoudre la question de l'énergie)

- le nucléaire, toujours associé à la bombe

- puissance de l'imaginaire de l'énergie

Difficultés de la tâche

Manier un nombre considérable de données de toutes sortes

Scénarios *demande énergétique*
potentialités des différentes sources
conditions de mises en œuvre économique
acceptation (ou pas) par les populations

Evaluer la demande énergétique

population et type de population, développement
économique, usages etc.

Potentialités :

aspects intrinsèques, aspects économiques, aspects
sociétaux

En rouge : les domaines où, en tant que scientifiques, nous pouvons intervenir

De nouveaux outils : Hans Rösling et ses statistiques dynamiques

Hans Rösling a développé de merveilleux outils pour visualiser les grandes tendances d'évolution des sociétés humaines. On peut regarder une vidéo illustrative sur le site :

<http://onecoolsitebloggingtips.com/2010/12/29/hans-roslings-wonderful-world-of-statistics>

*On peut aussi télécharger un logiciel et des données sur le site :
<http://www.gapminder.com>, et visualiser les couples de données suivantes :*

Espérance de vie – revenu moyen par personne

Espérance de vie – nombre d'enfant par femme

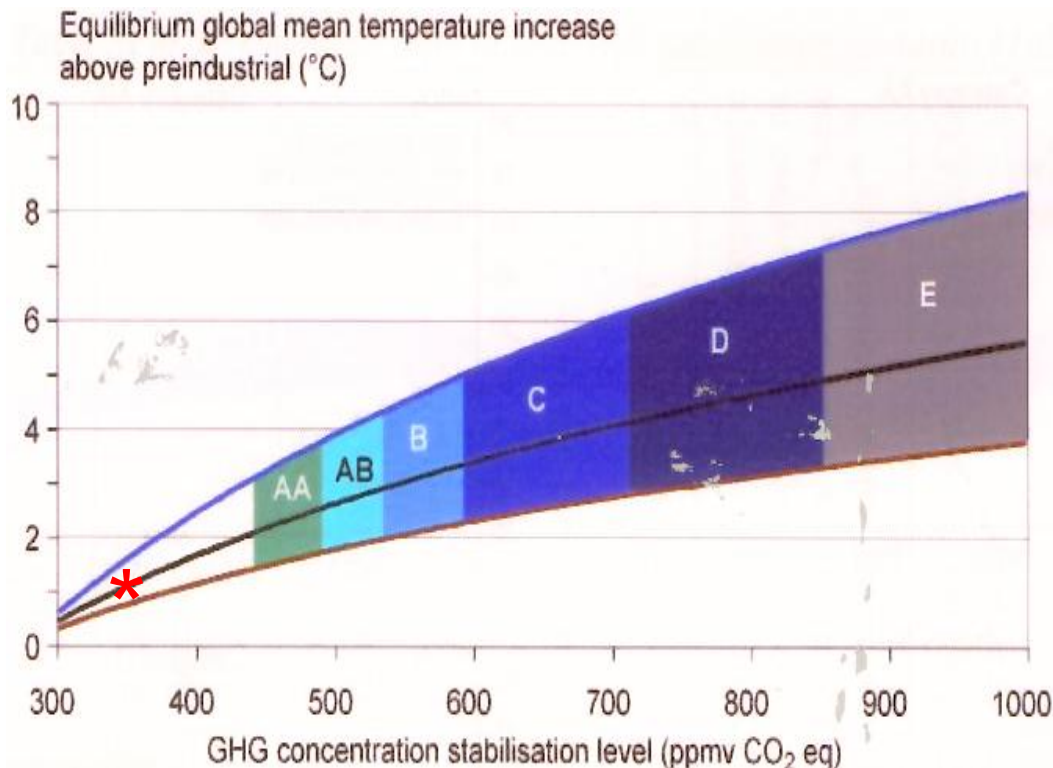
Espérance de vie – consommation énergétique

Revenu moyen – consommation énergétique

Emissions de CO2 par personne – consommation énergétique

<..\..\..\..\All Users\Bureau\Gapminder Desktop.Ink>

La contrainte climatique



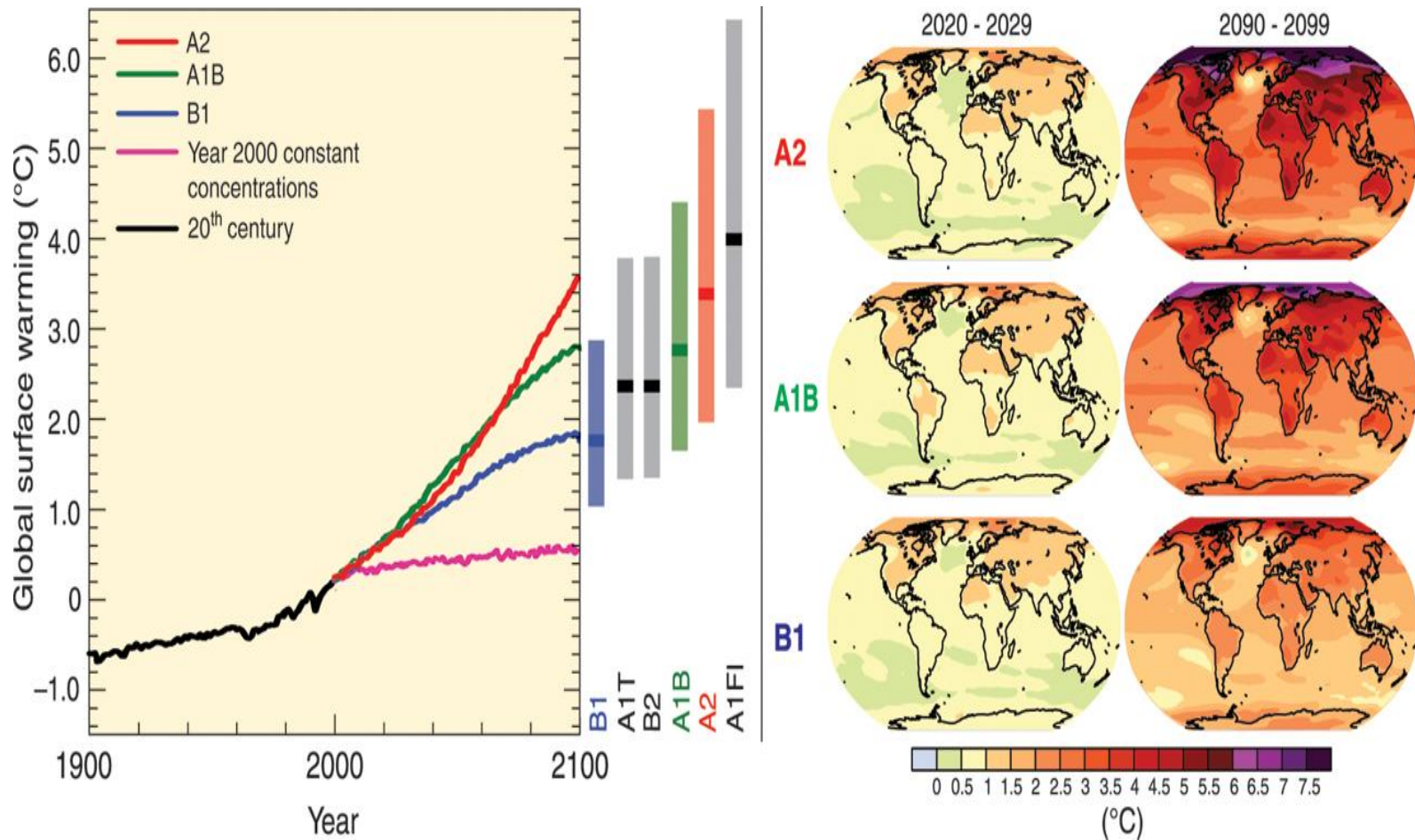
*Un consensus international :
limiter le réchauffement
à 2°C (4 à 500 ppm CO₂ éq.)*

*Conséquences en termes de rejets
Monde: diviser par 2
Pays industriels: diviser par 4 à 8*

*Engagements français
Diviser par 4 d'ici 2050 (loi 2005)
Réduire de 20 à 30 % d'ici 2020
(Grenelle)*

Source – rapport GIEC III mai 2007

Variation de la température de surface de la Terre



Le climat de 2030 est déjà joué. Tenir compte de la contrainte climatique, c'est envisager l'horizon de la fin du siècle !

Consommation énergétique mondiale

(1 tep = 42 GJ)

Comparaison 2008/1973 (source AIE 2010)

total 12 Gtep / 6 Gtep

population 7 Ghab / 4 Ghab

pétrole 33% / 46%

nucléaire 6% / 1%

charbon 27% / 24%

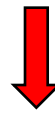
hydro 2% / 2%

gaz 21% / 16%

biomasse 10% / 11%

soit 81% / 86%

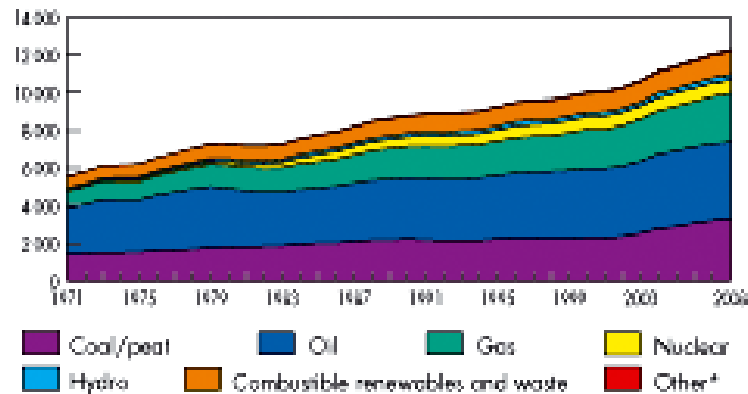
sol+éol+ géo 0,7% / 0,1%



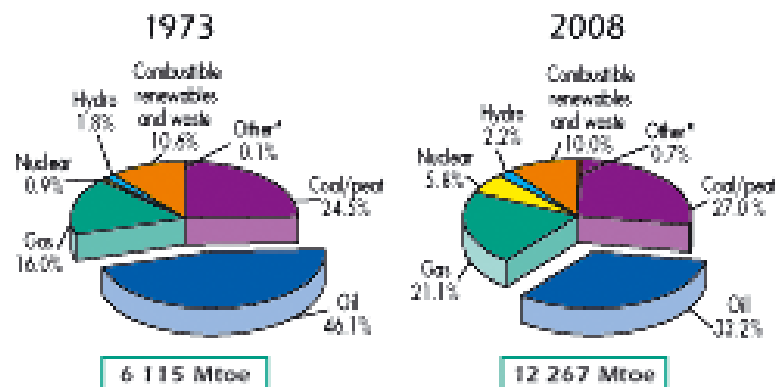
TOTAL PRIMARY ENERGY SUPPLY

World

Evolution from 1971 to 2008 of world total primary energy supply by fuel (Mtoe)



1973 and 2008 fuel shares of TPES



*Other includes geothermal, solar, wind, heat, etc.

Énergie primaire
Énergie finale

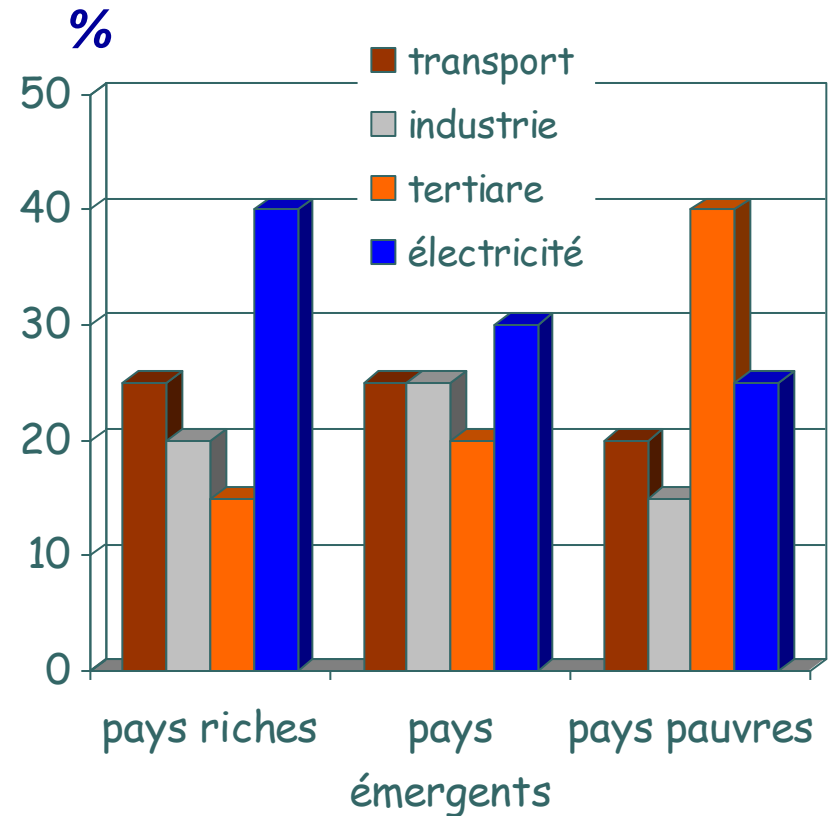
Usages

Chauffage : 35 %

Industrie et agriculture : 30 %

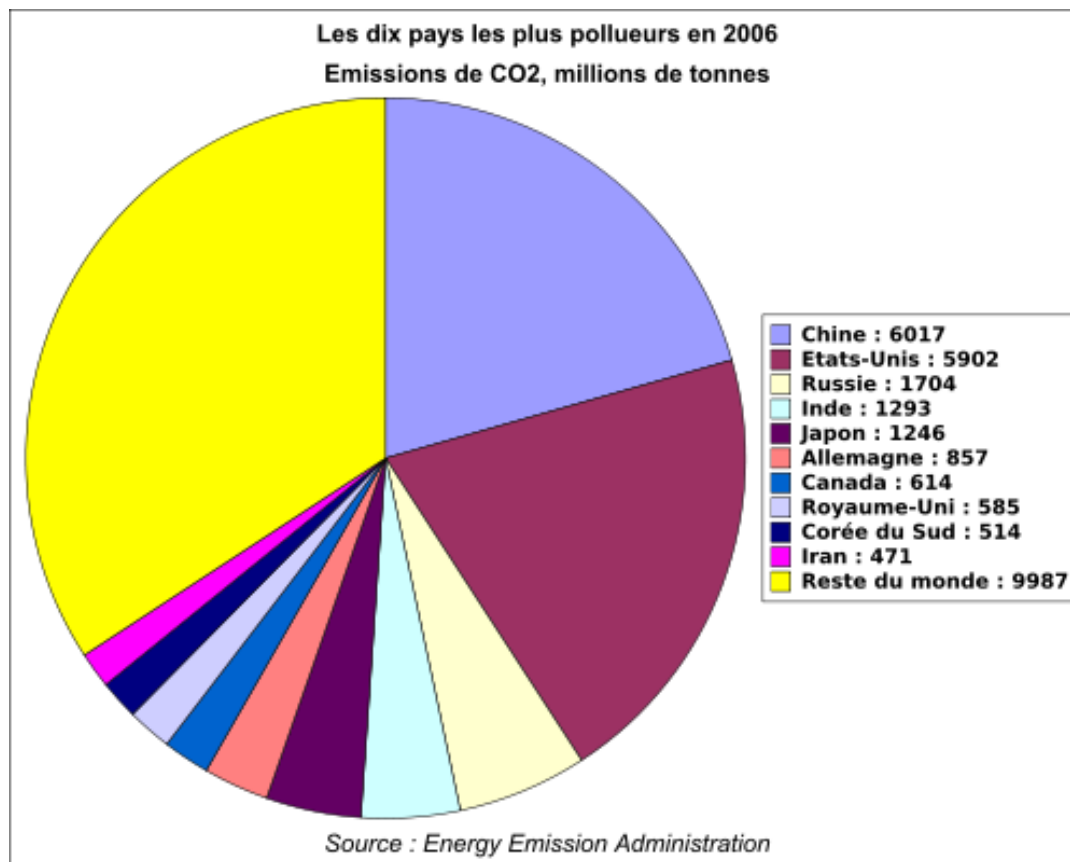
Transports : 25 %

Tertiaire : 10 %

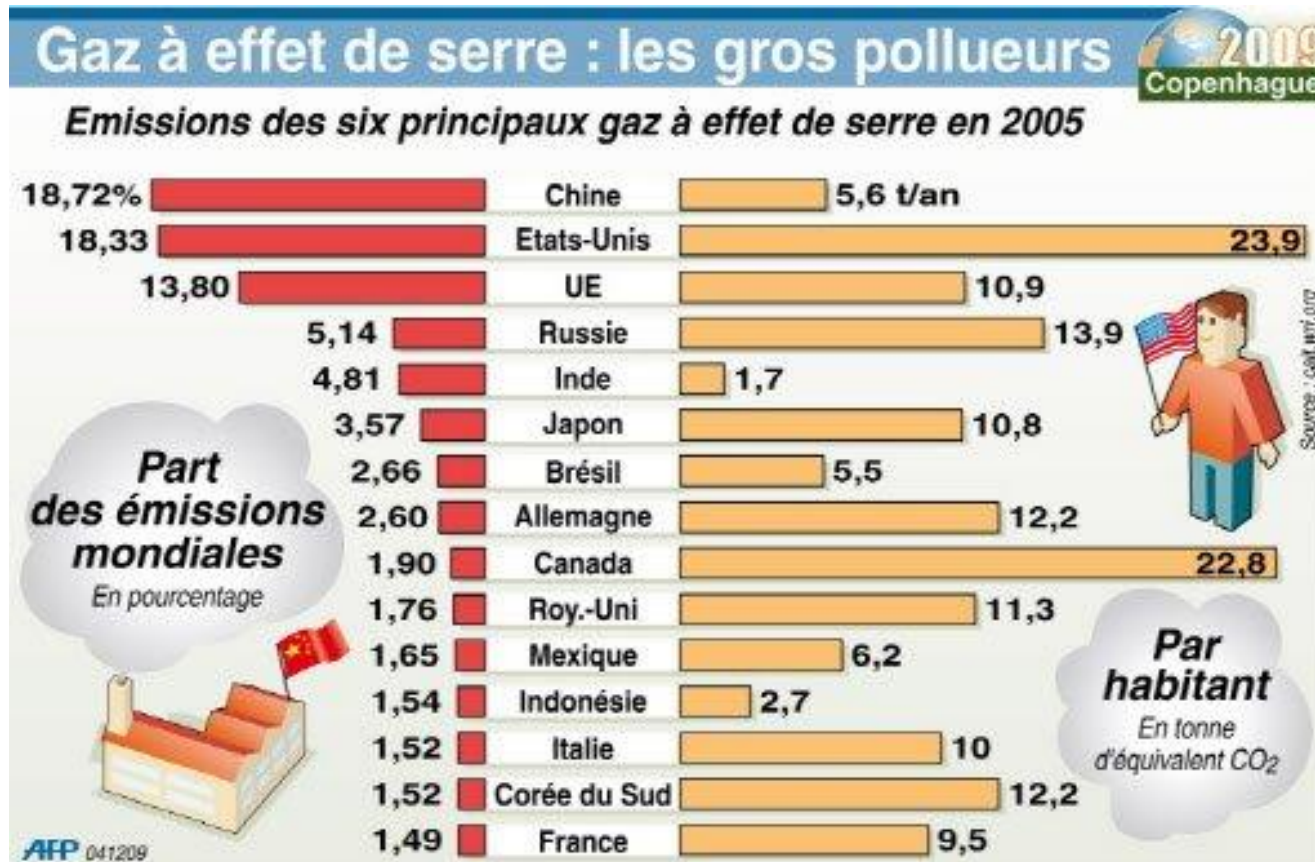


Dans ce graphique, l'électricité est traitée à part (elle est multi-usage)

Répartition par pays des émissions de gaz à effet de serre en 2000.



Emissions de gaz à effet de serre en CO₂-éq.

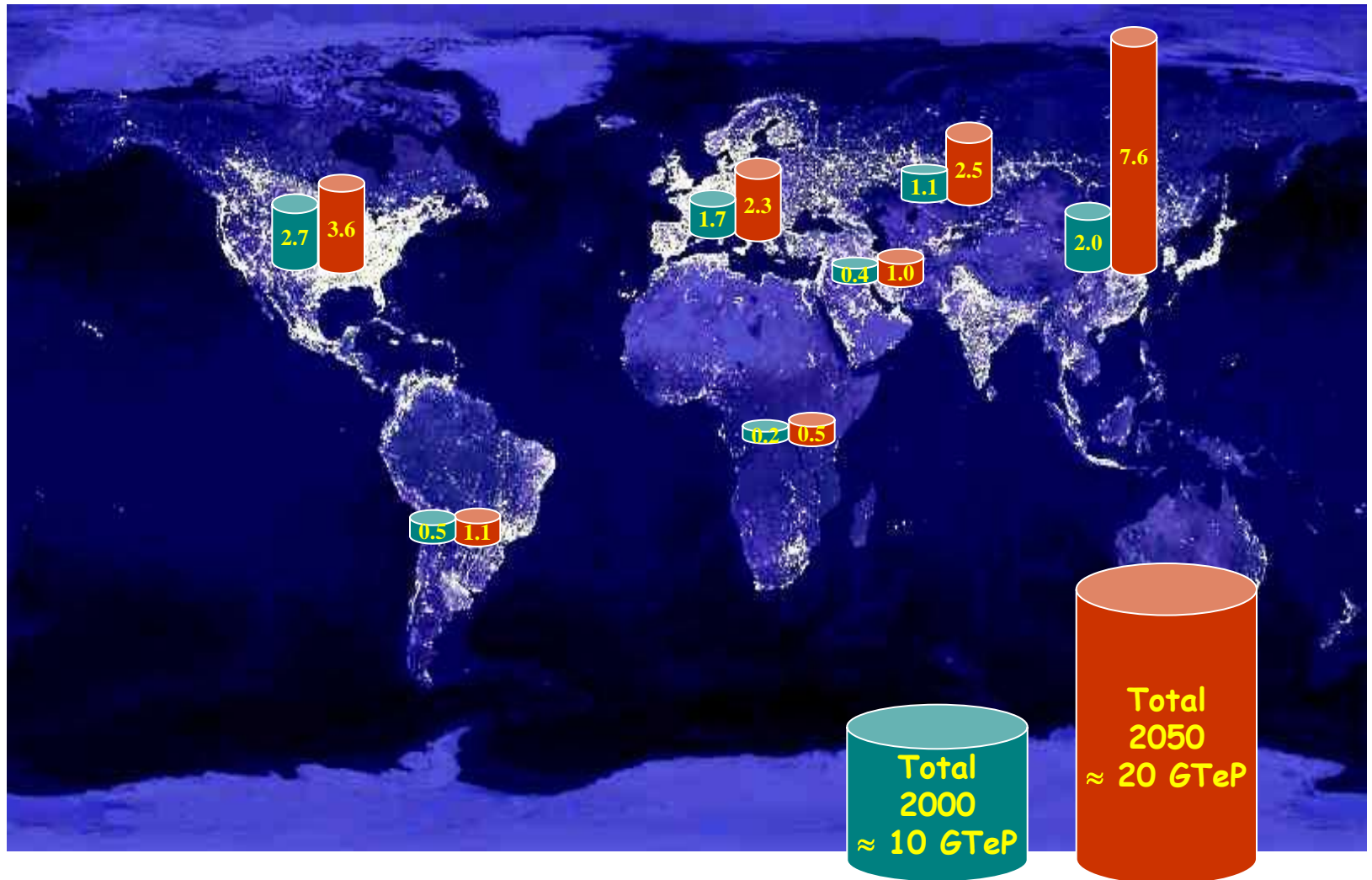


La situation a évolué depuis 2005 : par ex., la Chine est passée devant la France...

Emissions de GES et équité

Pays	CO2 t/hab	GES t/hab	facteur de réduction pour que chaque pays émette 2,25 t/hab	
Suède	6	7	3,1	
France	7	9	4	
Allemagne	11	12	5,3	
Danemark	11	13	5,7	
UK	9	11	4,8	<i>Est-ce envisageable ?</i>
USA	20	23	10,2	
Chine	5	?	2,2	
Inde	1	?	0,4	
Brésil	2	?	0,8	
Mexique	4	5	2,2	
Qatar	56	?	24,8	
<i>Monde</i>		4,5	2	
<i>Division par 2</i>		2,25		

Contexte énergétique mondial



Les énergies fossiles

Gaz naturel

Réserves supérieures à celles du pétrole, mais pic attendu bien avant la fin du siècle

Charbon

Réserves importantes > 100 ans de production au taux actuel

Fuels non conventionnels

Schistes bitumineux, hydrate, ...

Réserves sans doute très importantes (plusieurs centaines d'années)

Extraction / utilisation incertaine (coût, impact, etc...)

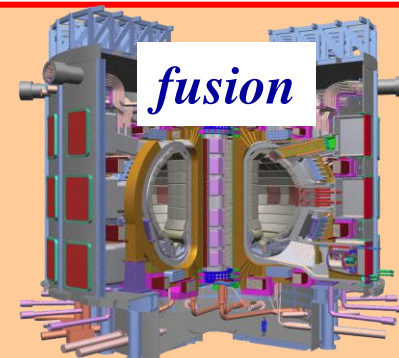
*L'enjeu climatique consiste à éviter d'avoir recours au charbon
et aux fuels lourds après la fin du pétrole et du gaz*

Les autres sources d'énergie

L'énergie nucléaire



fission



fusion

Inépuisable



solaire



hydro.



éolien



géothermie

Renouvelable (que l'on peut renouveler, mais ce n'est pas obligé...)

biomasse

bois



colza



Que peuvent apporter les sciences dans le débat public sur l'énergie ?

*Dans l'évaluation des possibilités de remplacement des ressources fossiles,
bien distinguer :*

- les pistes de recherche : il faut tout explorer !*
- ce qui est utilisable à un moment donné pour faire fonctionner la société,
compte tenu du développement de la technologie et des coûts de mise en
œuvre : tout n'est pas possible hic et nunc !*

*L'examen exhaustif des potentialités des différentes sources sera fait dans
l'exposé de Sandra Bouneau*

*Un exemple concret de l'apport des sciences :
le cas de l'éolien*

Les divers aspects de la question

L'état des lieux de la filière

Les caractéristiques physiques

L'intermittence

Le potentiel de substitution

Les coûts

PUISSANCE : JUSQU'OU IRONT-ELLES ?

PAR CHARLOTTE RIGAUD

En vingt-cinq ans, la puissance des éoliennes a été multipliée par 100, le diamètre du rotor par 8. Aujourd'hui, la course continue avec l'offshore en ligne de mire. Chercheurs et industriels planchent désormais sur des machines de 10 MW et au-delà.



Monde: évolution de la puissance éolienne cumulée 1993/2008 (MW)

121 GW →

+ 28,7%

+ 26% par an depuis 5 ans

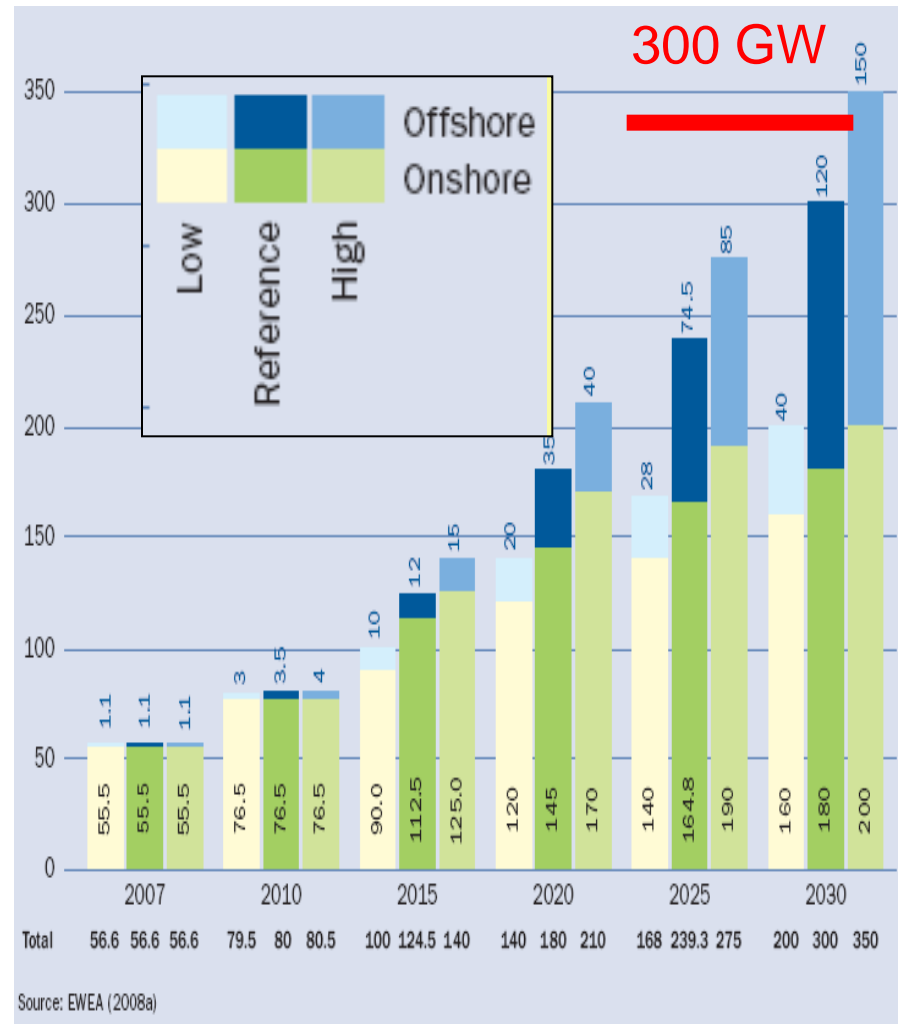


Scénarios d'évolution de l'éolien en Europe

2007-2030 (European wind energy association 2008)

- **Puissance installée :**
 - 300 GW (x 4,6 / 2008)
- **Production:**
 - 935 TWh (x 7,6 / 2008)
 - (effet offshore?)
- **Besoins d'électricité :**
 - entre 3400 et 4400 TWh
 - (x 1,33 / 2008)
- **Part de l'éolien :**
 - entre 21,2% et 28%

GW



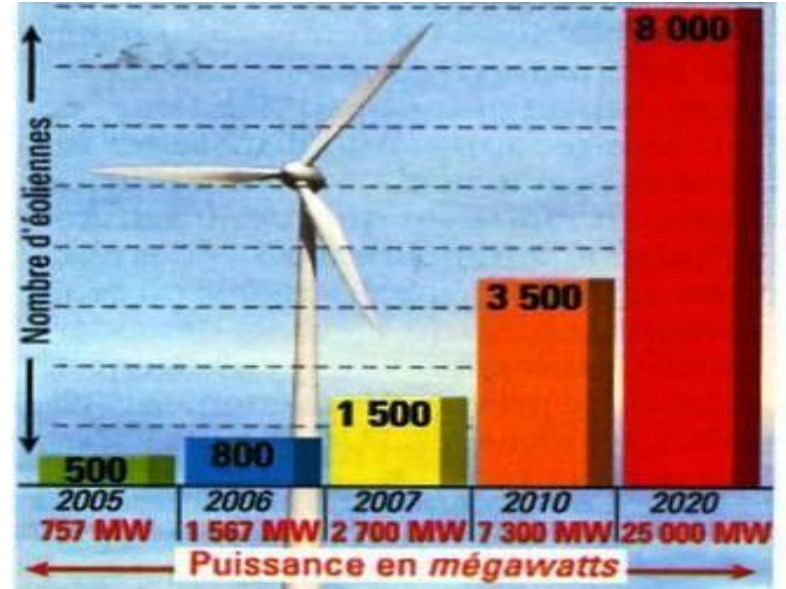
Le Plan Borloo (nov. 2008)

- *Situation actuelle (fin 2010):*

- 5,3 GW
- Production environ 10 TWh

- *Objectifs 2020*

- + 6.500 éolienne de 3 à 5 MW
- Surface des parcs 2500 km²
- Puissance totale: 25 GW
- Coût d'investissement:
 - ~ 1,5 M€/ MW on shore et ~ 3 M€/MWh off shore
 - soit environ 46 milliards € d'investissements
- Production d'énergie: environ 54 TWh
- Part dans la production française en 2020:
 - 54 TWh / 600 TWh = 9 % ou 4,5 centrales nucléaires/60
- Economie de CO² : 16 millions de tonnes selon l'ADEME ???

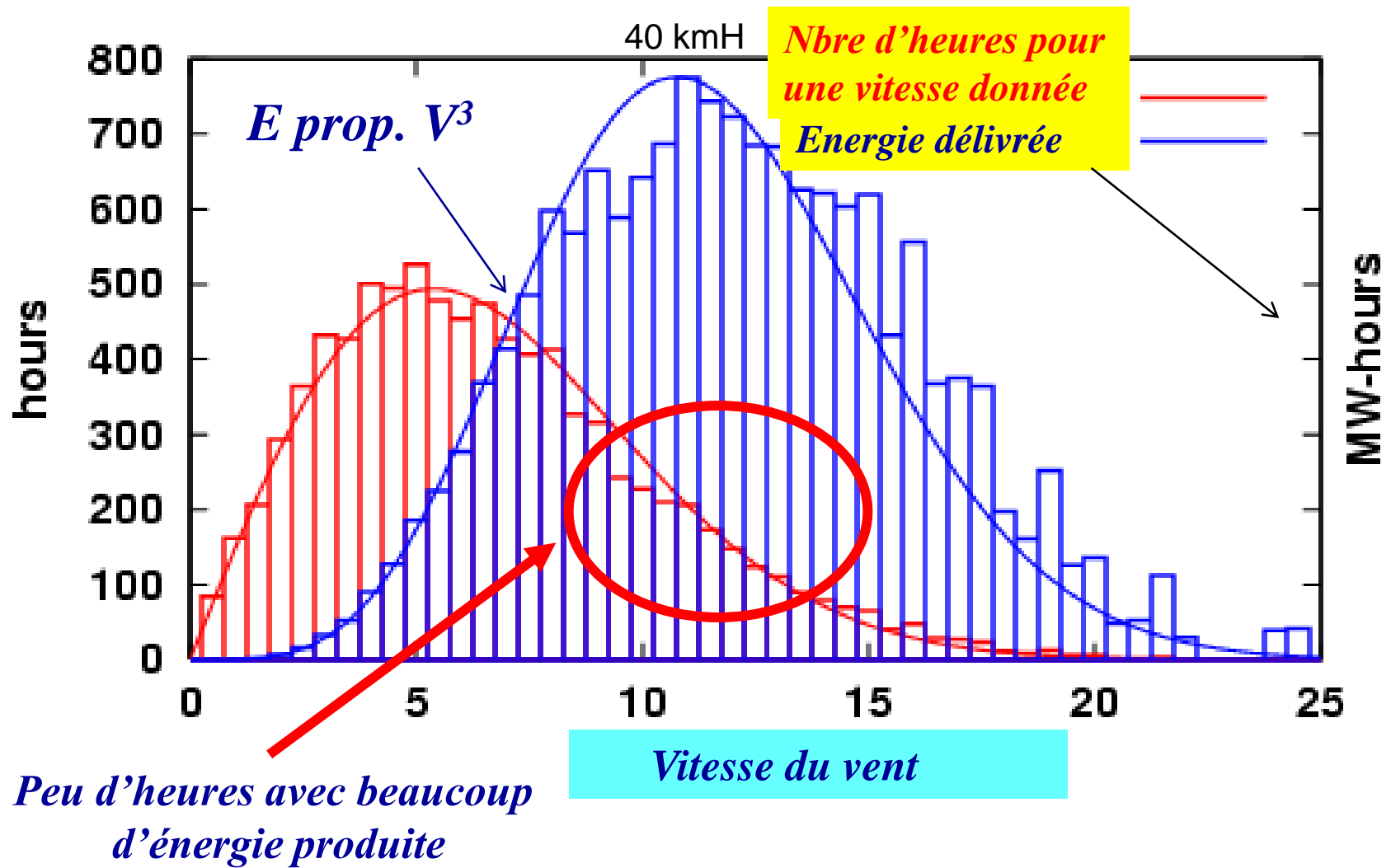


Puissance maximale récupérable

- *Densité d'énergie du vent : $\frac{1}{2} \rho V^2$ (ρ masse volumique de l'air)*
- *Vitesse du vent en amont de l'éolienne V_1 , en aval V_2*
- *Surface couverte par les pales de l'éolienne S*
- *Puissance moyenne récupérable : $P = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2)$, avec V : vitesse moyenne du vent au niveau de l'éolienne.*
- *En prenant $V = \frac{1}{2} (V_1 + V_2)$, on a $P = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)$, ou encore $P = \frac{1}{4} \rho S V^3 (1+x)(1-x^2)$, avec $x = V_2/V_1$*
- *P est maximum pour $x = -1$ et $x = 1/3$. La valeur $x = -1$ n'est pas physique. Pour $x = 1/3$, on trouve $P = \frac{8}{27} \rho S V^3$*
- *Comme la puissance disponible est $P_0 = \frac{1}{2} \rho S V^3$, on trouve que la puissance maximale récupérable est :*

$$*P = \frac{16}{27} P_0 \text{ (c'est la loi de Betz)}*$$

Corrélation vitesse du vent - puissance et énergie



Europe :

Carte des

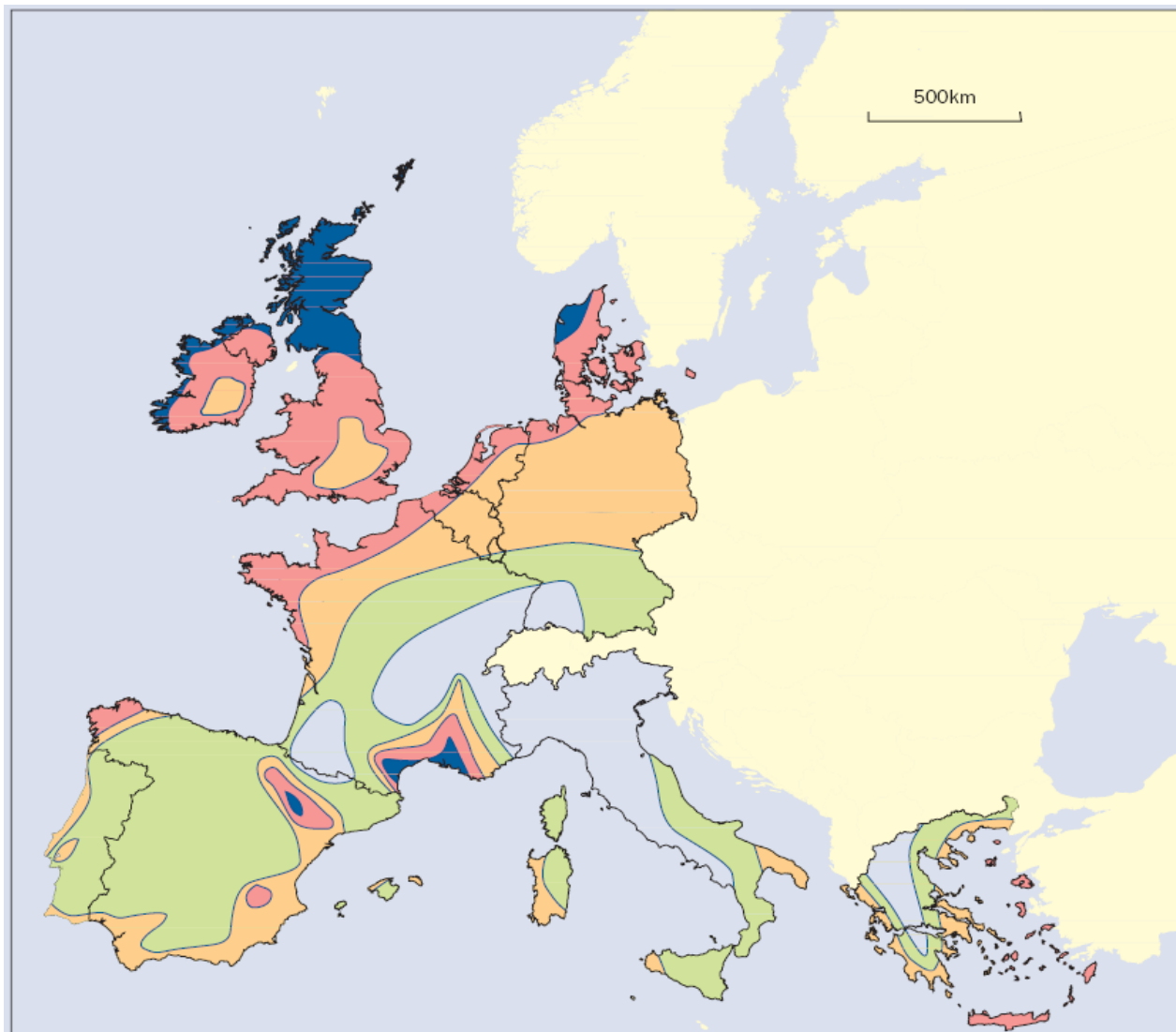
vents






on shore :

choisir les

lieux

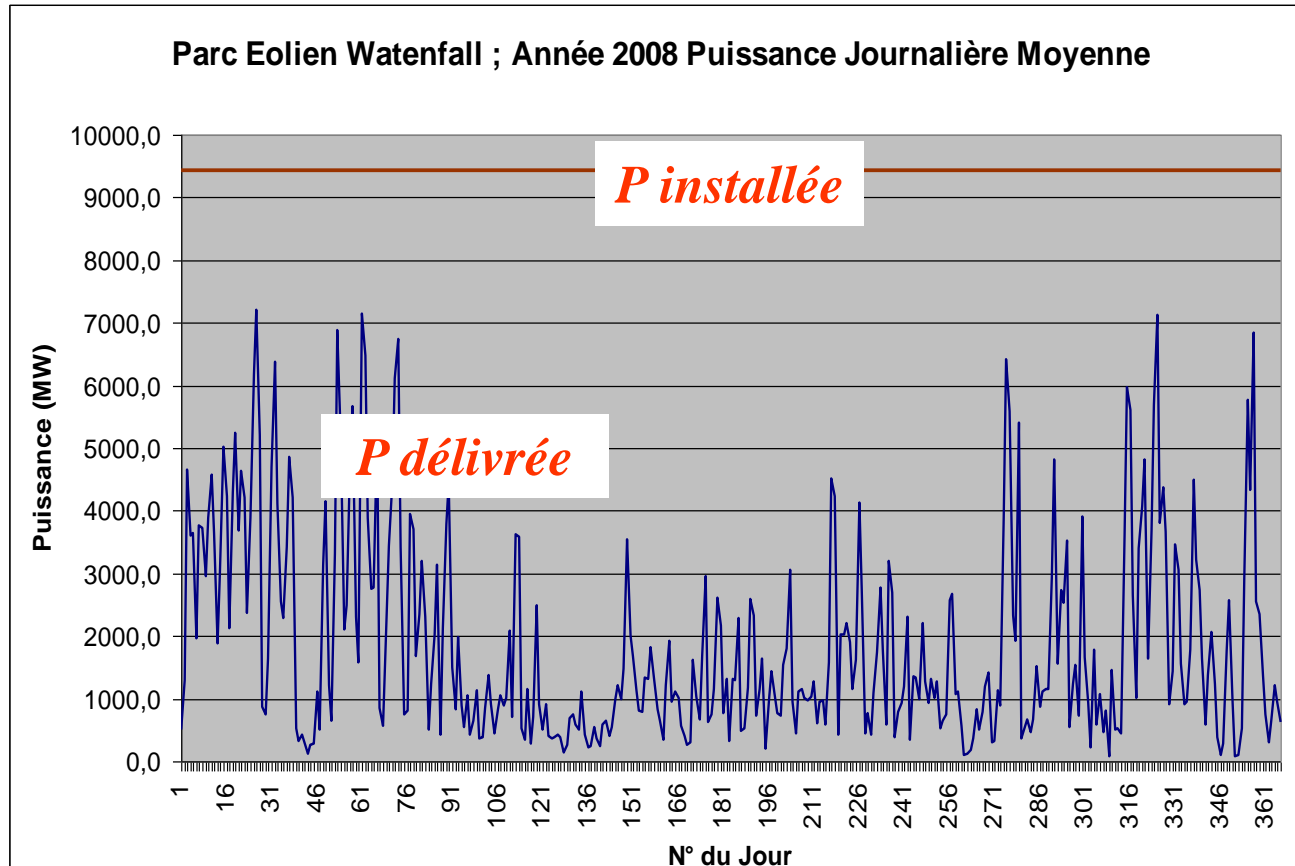
d'implantation



Wind resources at 50 metres above ground level for five different topographic conditions										
	Sheltered terrain		Open terrain		At a sea coast		Open sea		Hills and ridges	
	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²
	>6.0	>250	>7.5	>500	>8.5	>700	>9.0	>800	>11.5	>1800
	5.0–6.0	150–250	6.5–7.5	300–500	7.0–8.5	400–700	8.0–9.0	600–800	10.0–11.5	1200–1800
	4.5–5.0	100–150	5.5–6.5	200–300	6.0–7.0	250–400	7.0–8.0	400–600	8.5–10.0	700–1200
	3.5–4.5	50–100	4.5–5.5	100–200	5.0–6.0	150–250	5.5–7.0	200–400	7.0–8.5	400–700
	<3.5	<50	<4.5	<100	<5.0	<150	<5.5	<200	<7.0	<400

Intermittence : exemple du parc Vatenfall

Contribution sur un an d'un parc éolien de 9,4 GW



9,4 GW

La « puissance installée » est une valeur donnée par la théorie physique des éoliennes. Elle correspond au maximum que peut donner une installation. La puissance délivrée est toujours inférieure, ici, elle est mesurée jour par jour au cours d'une année

Facteur de charge et capacité de substitution

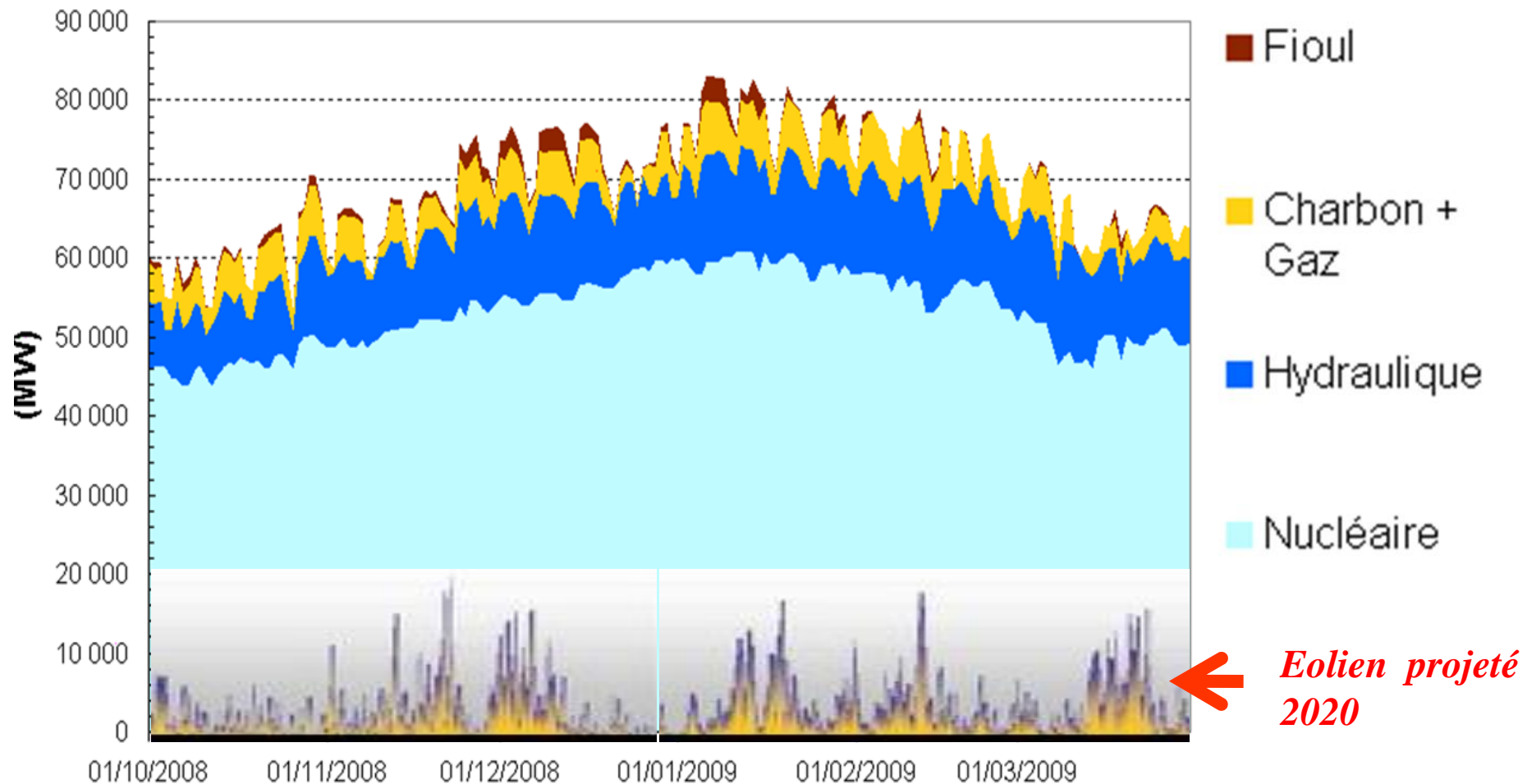
Facteur de charge : rapport de la puissance effective délivrée à la puissance installée

<i>Danemark</i>	<i>France</i>	<i>Allemagne</i>	<i>Italie</i>	<i>Pologne</i>	<i>Espagne</i>	<i>Royaume-Uni</i>
<i>23%</i>	<i>22%</i>	<i>17%</i>	<i>16%</i>	<i>25%</i>	<i>23%</i>	<i>28%</i>

Le facteur de charge off-shore est plutôt de l'ordre de 30 à 35%

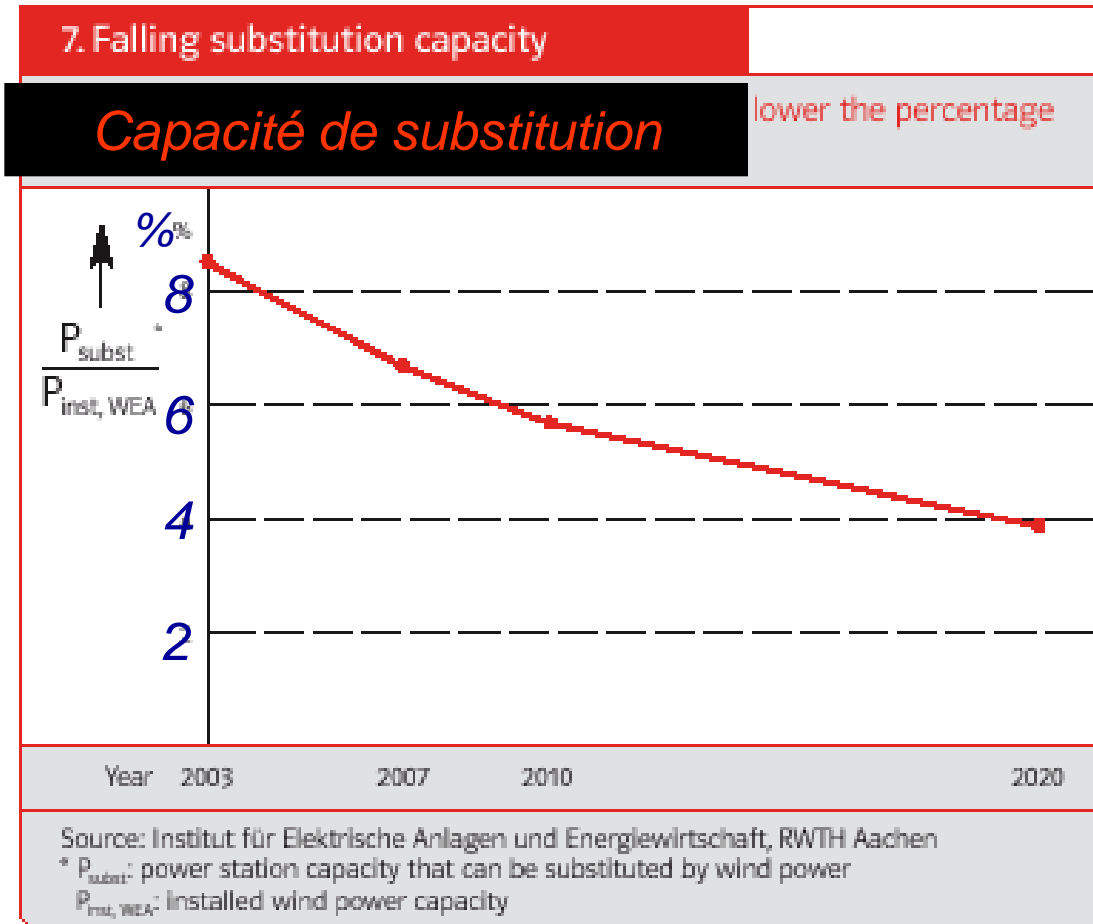
*Capacité de substitution : en cas de chute du vent, la puissance délivrée chute également. Le gestionnaire de réseau doit savoir quelle puissance est garantie à, par exemple, 95 %, de façon à prévoir de la **puissance en réserve**, rapidement mobilisable (centrales à gaz ou hydrauliques). La capacité de substitution est donnée par le rapport de la puissance garantie à la puissance installée. Elle n'est que de **quelques pourcents**.*

Production réalisée (France hiver 2008-2009)



Capacité de substitution selon E-ON

Si pas de vent, pas de courant, d'où nécessité de maintenir des centrales conventionnelles. Les fermes éoliennes ne peuvent remplacer que peu de puissance conventionnelle. »



E.ON : « En 2020, avec une prévision de puissance éolienne supérieure à 48 GW (source DENA grid study), seuls 2 GW de puissance traditionnelle peuvent être remplacés par des fermes éoliennes (p9)

Le développement de l'éolien s'accompagne d'un développement important de centrales à gaz

Sources intermittentes en France : ne pas se tromper sur les chiffres

En France, le Grenelle prévoit la mise en service de 25 GW d'éolien (19 on + 6 off) et 5,4 GW de PV.

Ca semble faire 30 GW...

Mais en fait, ça ne fait qu'environ 7 GW effectifs, soit 4,5 EPR

Coût d'installation : $1,5 \times 19 + 3 \times 6 + 3,5 \times 5,4 = 65,4$ G€ fonctionnant pendant 20 ans, soit 196 G€ sur 60 ans, comparé à 20 G€ pour 4 EPR...

Surcoûts :

Tarif d'achat : 60 Md€ pour le PV et 50 Md€ d'éolien sur 20 ans,

A rajouter : puissance conventionnelle à avoir en réserve, coût d'extension des réseaux etc.

Question : 100 Md€ permettent d'isoler 2 millions de logements (à 50000 euros par logement). N'est-ce pas un chantier plus intéressant ?

La biomasse et transports, ordre de grandeur



C'est toujours du solaire

Rendement < 1% - source très diluée

La biomasse « stocke » l'énergie solaire sous forme de combustible via la photosynthèse

Bois de chauffage : déjà 10% de la consommation mondiale d'énergie

Application aux transports grâce aux agrocarburants, mais...

France : 20% des transports (10Mtep) = 25% de la France en champs de colza

Monde : 25% de la puissance pour les transports, soit 500 W/hab en moyenne

Métabolisme humain : 130 W, couvert par l'agriculture.

Plusieurs fois la totalité des terres agricoles pour assurer la totalité des transports. Agrocarburants de seconde génération ? Bilan CO2 total ?

Conclusions provisoires

L'énergie dans l'enseignement : partir des transformations, analyser sans utiliser le concept d'énergie, et l'introduire en fin d'analyse

L'énergie dans la société : quelle place pour la connaissance dans le débat public ?

*Les lois de la physique ne se votent pas au Parlement
Celles relatives à la technologie, si (en partie) !*

Scénario et mix énergétique : ne faut-il pas envisager l'énergie comme un **bien commun**, comme l'eau ou le climat, et l'extraire, en partie tout au moins, de la logique du marché, pour réfléchir au mix énergétique de **façon globale** ?