



Vers une production d'électricité 100% renouvelable

20 mai 2011

Bernard MULTON
ENS de Cachan
SATIE - CNRS
Site de Bretagne

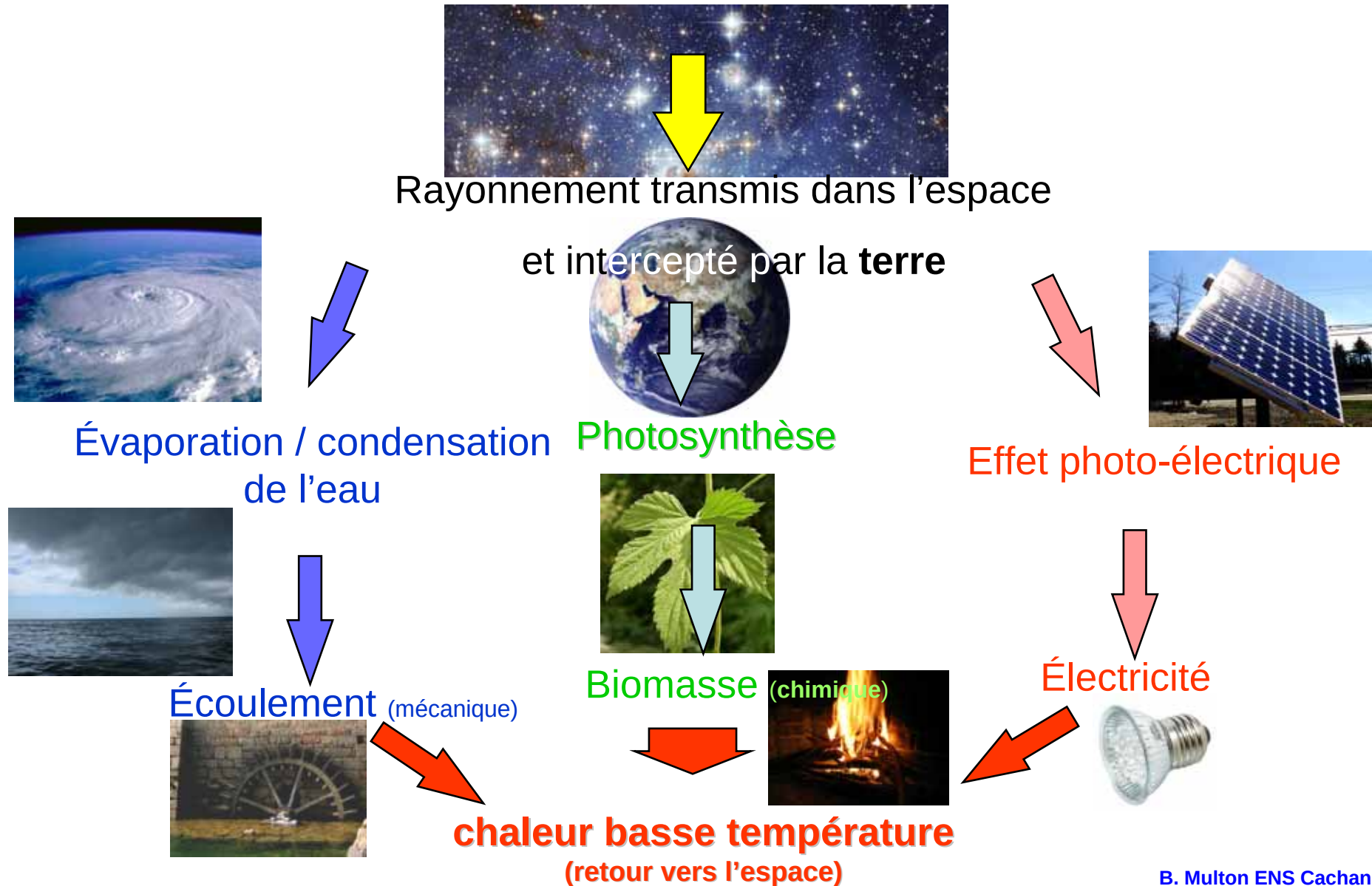


L'énergie,
un concept physique unifié,
pour décrire les transformations...

indispensable à la vie
et aux activités humaines

« Cycles de vie » de l'énergie : exemples

Réactions nucléaires de fusion d'hydrogène dans les étoiles



Unités physiques de l'énergie et équivalences

L'unité du Système International : **le joule (J)**

Pour des raisons pratiques, nous utiliserons :

- **le térawattheure : TWh**
- **la tonne équivalent pétrole : tep** (Mtep, Gtep)

$$1 \text{ TWh} = 1 \text{ milliard kWh}$$

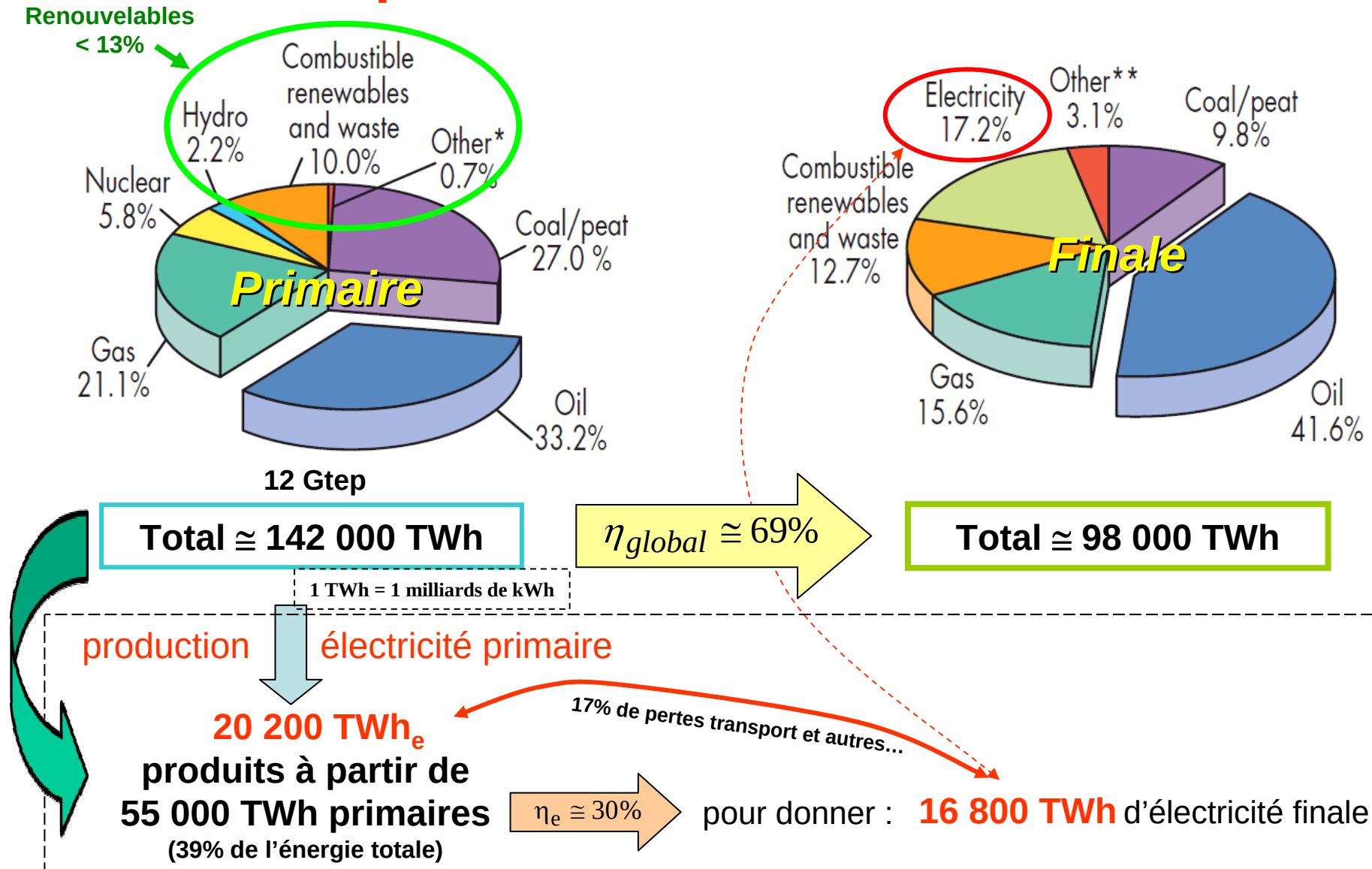
$$(1 \text{ TWh} = 10^{12} \text{ Wh} = 10^9 \text{ kWh})$$

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ tep} \simeq 11\,600 \text{ kWh} - 1 \text{ Mtep} \simeq 11,6 \text{ TWh}$$

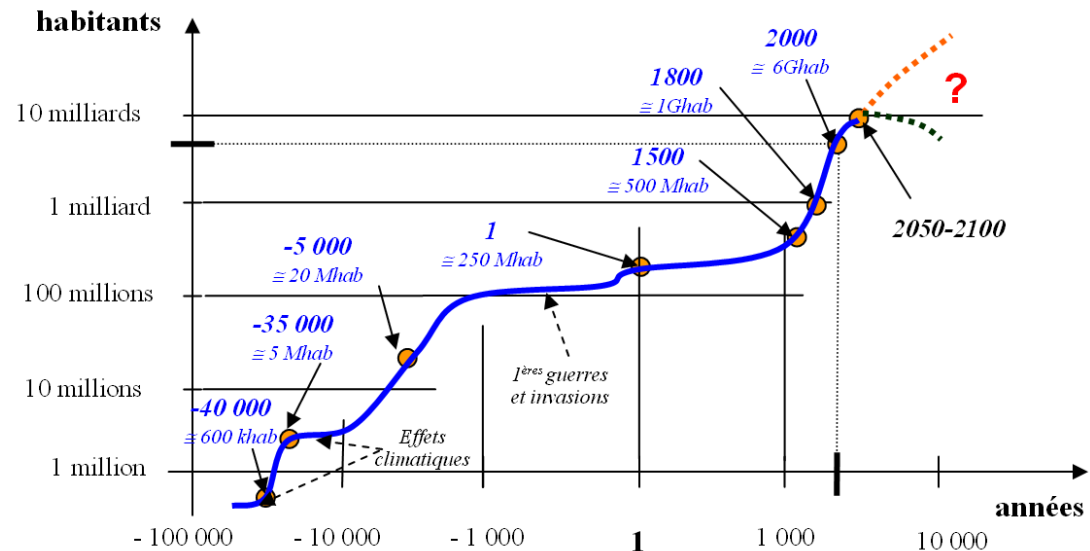
De l'énergie «primaire» à l'énergie «finale»

place de l'électricité 2008



Développement de l'humanité et ressources énergétiques

Evolution la population humaine sur la terre:



Consommation énergétique des activités humaines :

Besoins métaboliques (nourriture) :
2,5 kWh/jour/personne

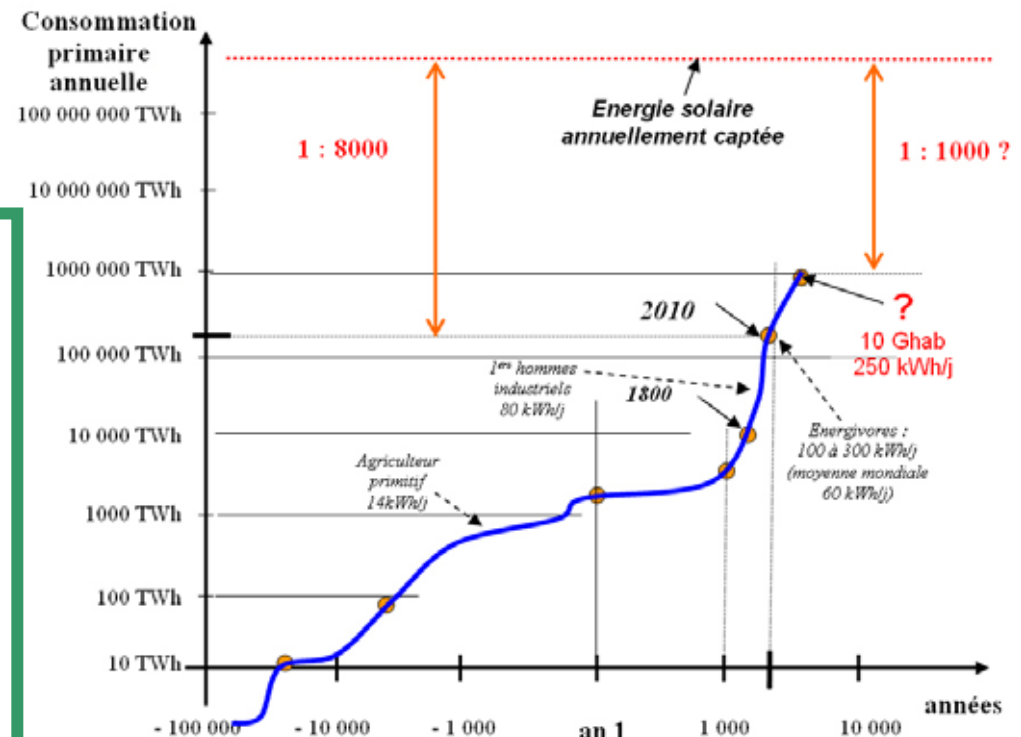
Autres activités énergétiques :
(énergie commerciale, hors biens importés)

Moyenne monde : 60 kWh/j

Africain : 14 kWh/j

US américain : 270 kWh/j

Français : 140 kWh/j



Ressources « épuisables » (non renouvelables)

COMBUSTIBLES FOSSILES (charbon, pétrole, gaz naturel) :

entre 2000 et 5000 Gtep

(400 à 600 pétrole – 250 gaz – 3500 charbon)

URANIUM FISSIONNABLE : environ 150 Gtep (avec réacteurs actuels)

Pétrole, gaz, charbon, uranium... épuisés avant 2100 ?

Durant le 20^{ème} siècle,

prise de conscience planétaire :

- ressources limitées, notamment celles en énergie
- sévères perturbations environnementales

RAYONNEMENT SOLAIRE AU SOL :

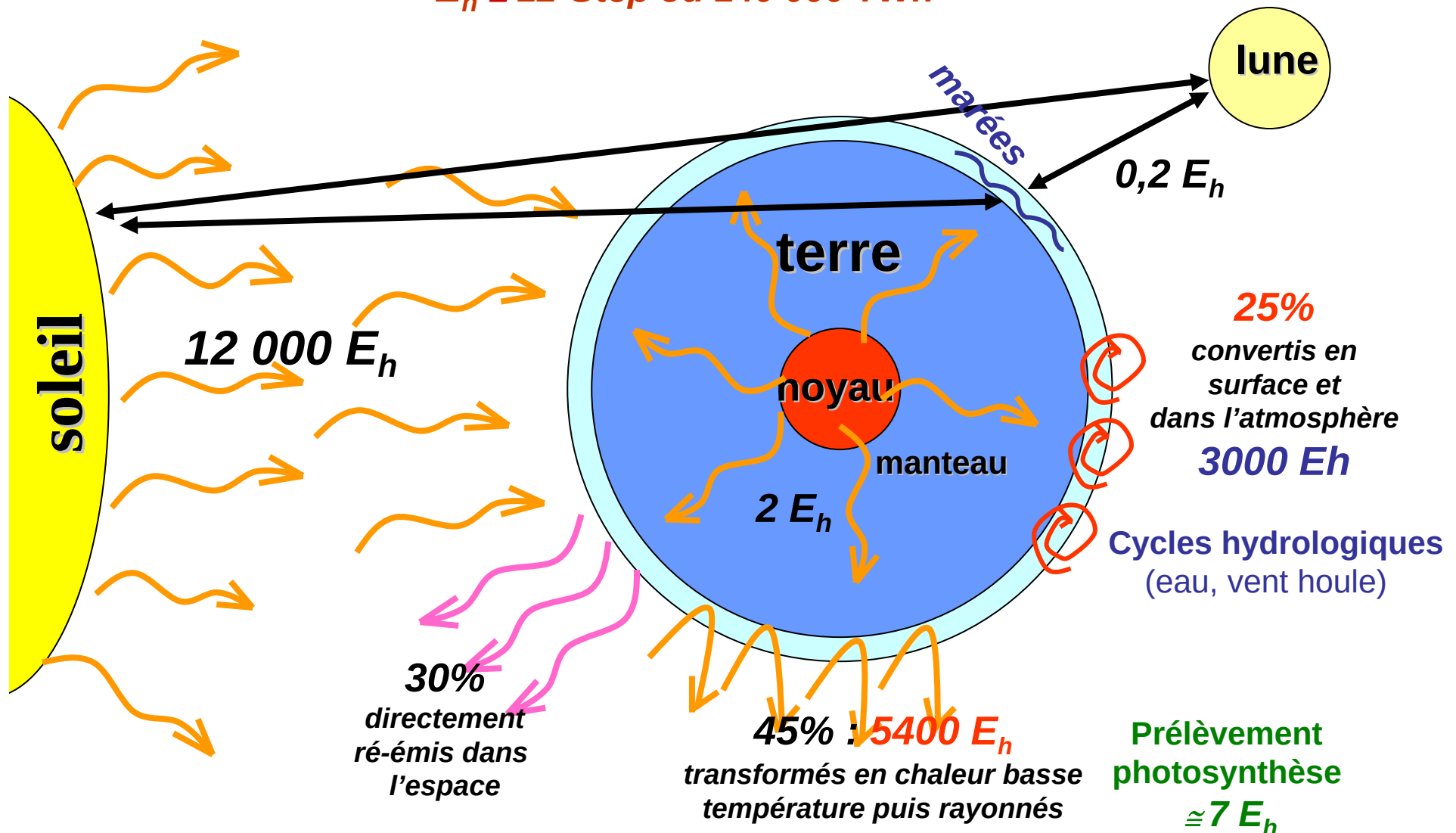
100 000 Gtep... par an !



Ressources renouvelables *(chiffres annuels)*

Valeurs ramenées à la consommation annuelle d'énergie primaire de l'humanité

$$E_h \cong 12 \text{ Gtep ou } 140\,000 \text{ TWh}$$



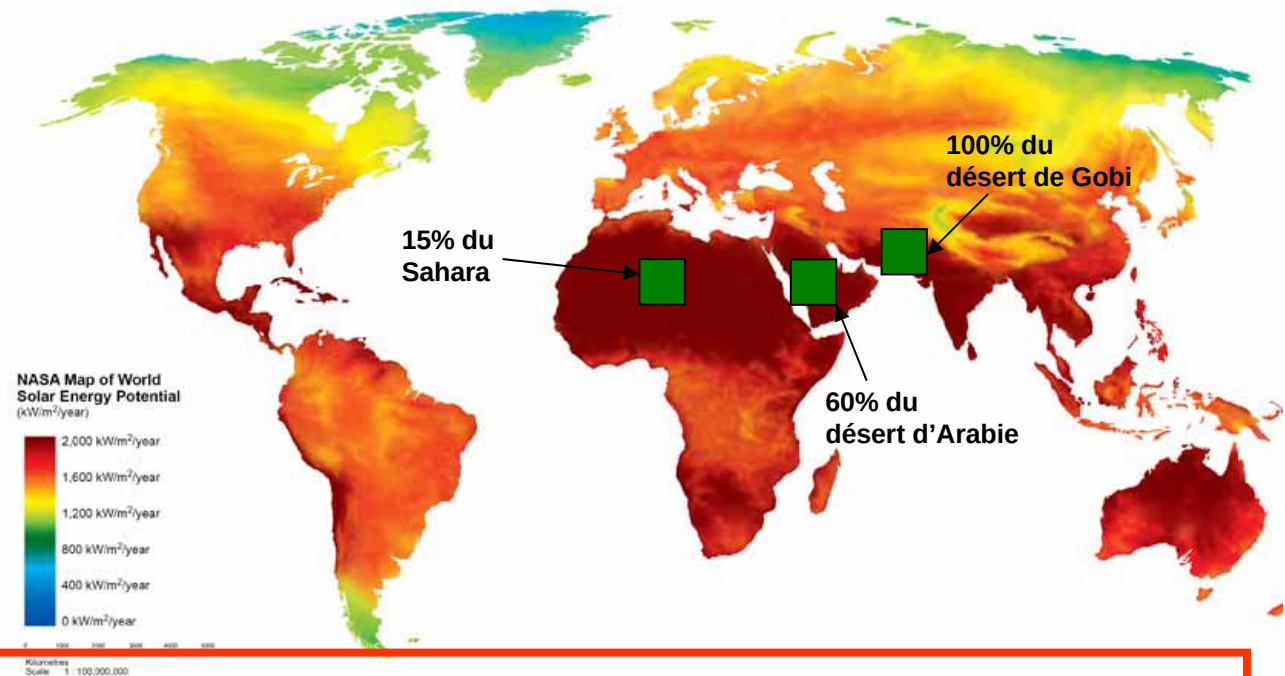
Le potentiel global **Ressources Renouvelables** « interceptables »
à la surface du globe représente
plus de 8000 fois la consommation humaine !

Avec un rendement global (arbitraire) de 10% de transformation de l'énergie solaire en carburant, électricité..., une fraction de la superficie d'un des grand déserts permettrait de **satisfaire les besoins énergétiques futurs de toute l'humanité** (10 milliards d'habitants avec la consommation moyenne d'un citoyen français)

$$2200 \text{ kW/m}^2 \times 10\% = 220 \text{ kWh/m}^2$$

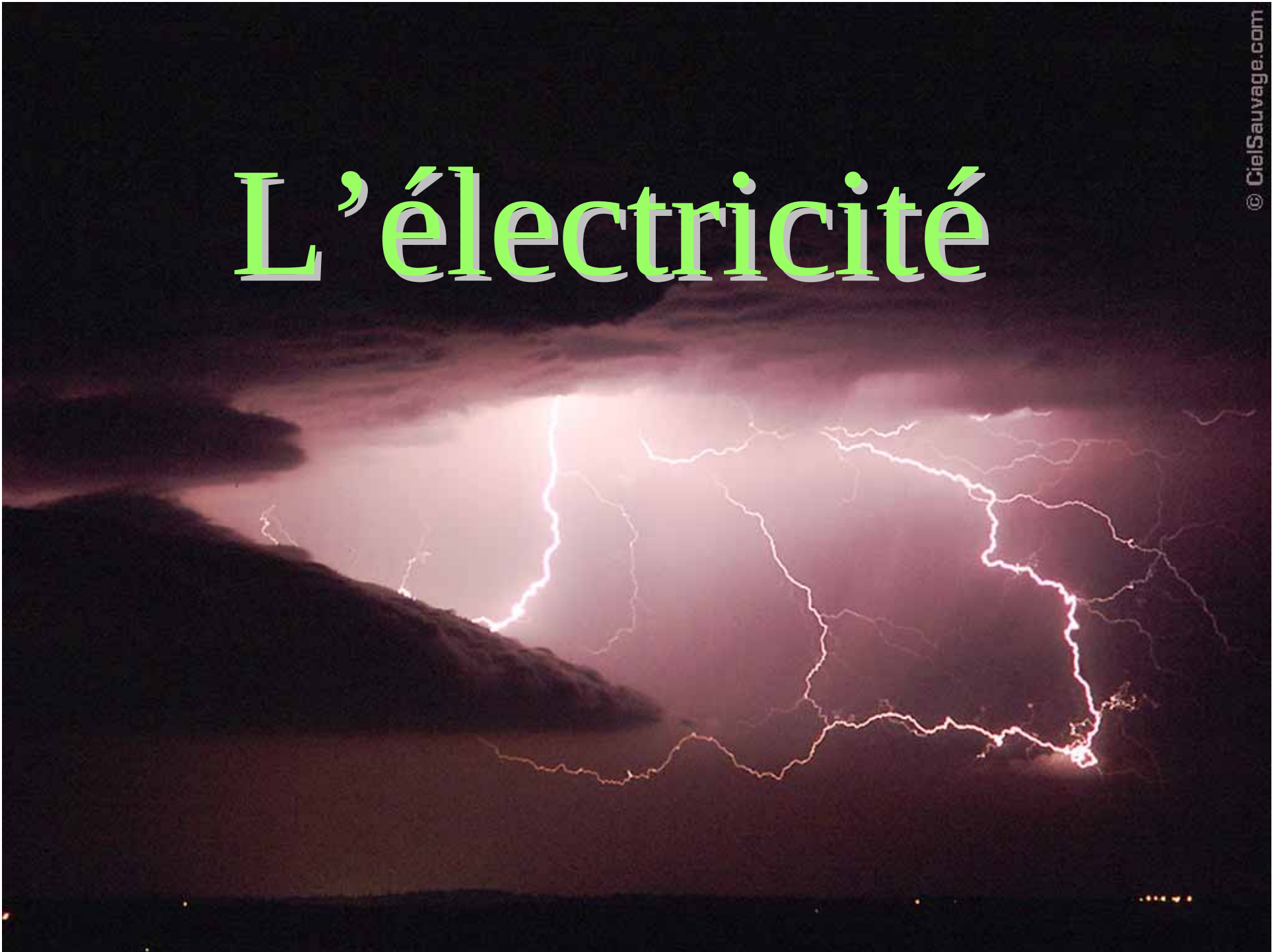
300 000 TWh/an
(3 fois plus qu'aujourd'hui)
➡ **1,4 millions km²**
(1200 km x 1200 km)

Remarque : il serait absurde
des points de vue géopolitique
et environnementaux
de tout concentrer en un seul lieu...



**Des ressources immenses, inépuisables à notre échelle de temps,
mais peu concentrées et souvent intermittentes**

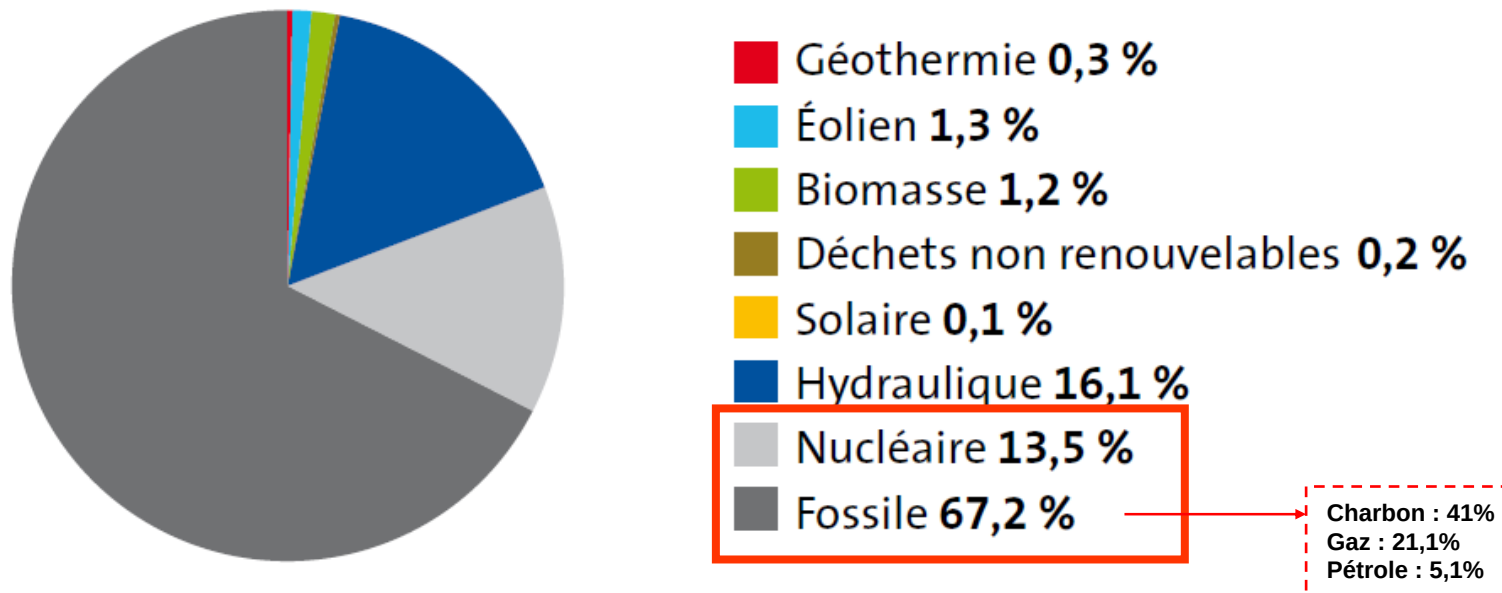
L'électricité



Production mondiale d'électricité par source (2009)

Entre 1973 et 2008 : doublement de la part
de l'électricité dans le bouquet final mondial

Environ 20 000 TWh



Source :
La production d'électricité
d'origine renouvelable dans le monde
Observ'ER 2010

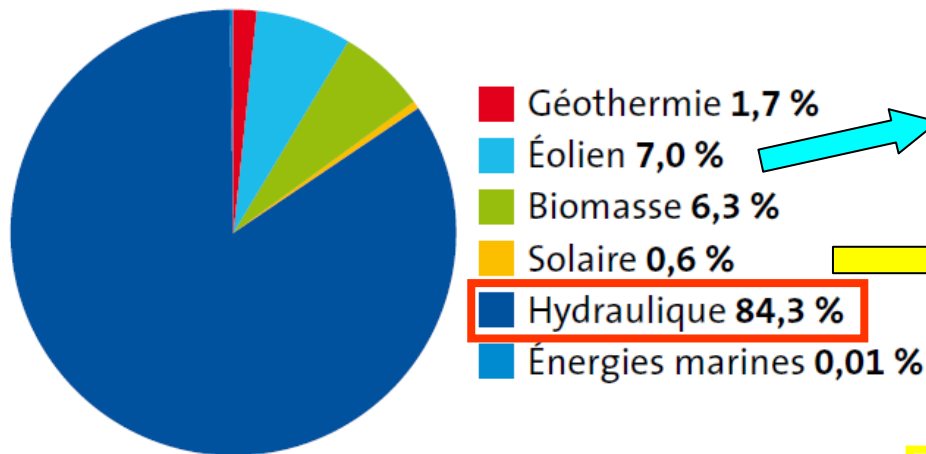
**81 % de l'électricité mondiale
est d'origine non renouvelable**

Production mondiale d'électricité à partir de ressources renouvelables (2009)

Poursuivre l'effort actuel sur les investissements en moyens de conversion des ressources renouvelables est utile...

Moyenne des taux de croissance 1999-2009 : éolien 29%/an
solaire 36%/an

3 810 TWh
(19% de la production mondiale)



Taux de croissance hypothétiques et sans doute sous-estimés

Avec + 20%/an pendant 10 ans,
puis + 10%/an pendant 10 ans :
la production éolienne atteindrait 4300 TWh en 2030

Avec + 30%/an pendant 10 ans,
puis + 20%/an pendant 10 ans :
la production solaire atteindrait 1800 TWh en 2030



En 2030 : production mondiale
d'électricité renouvelable **> 10 000 TWh**

En 2050 : électricité **100% renouvelable** techniquement possible

Source :
La production d'électricité
d'origine renouvelable dans le monde
Observ'ER 2010



Produire
une électricité
d'origine renouvelable,
Comment faire ?

Production éolienne

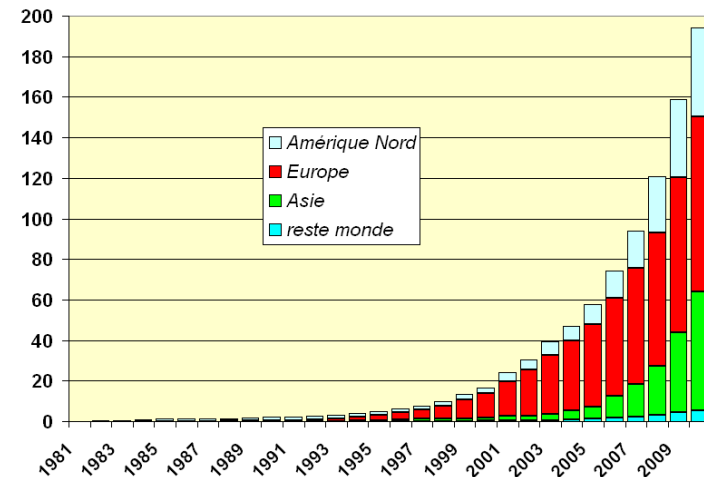
Près de 200 GW installés fin 2010
(dont 3,2 GW en offshore)

En France en 2010 : presque 2% de la production

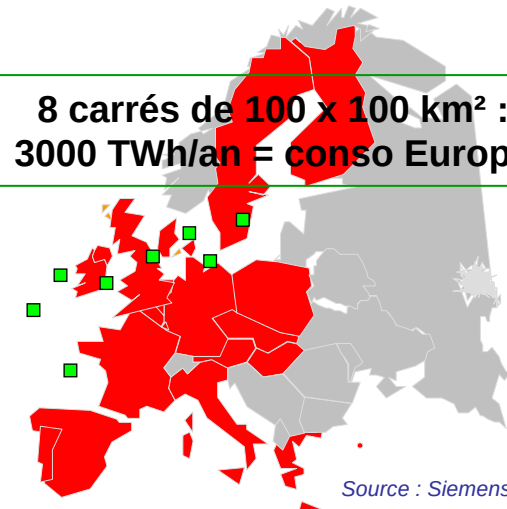
Relation entre Puissance et Energie :

1 W terrestre produit annuellement environ 2 kWh (2000 h)
1 W offshore 3 à 4 kWh (3 à 4000 h)
=> 200 GW produisent en un an plus de 500 TWh
(200 GW nucléaires produiraient environ 1400 TWh)

Très fort potentiel encore peu exploité en offshore,
le Danemark précurseur :



8 carrés de 100 x 100 km² :
3000 TWh/an = conso Europe



Génération thermodynamique solaire à concentration

Exemple de technologie mature : les centrales à tour

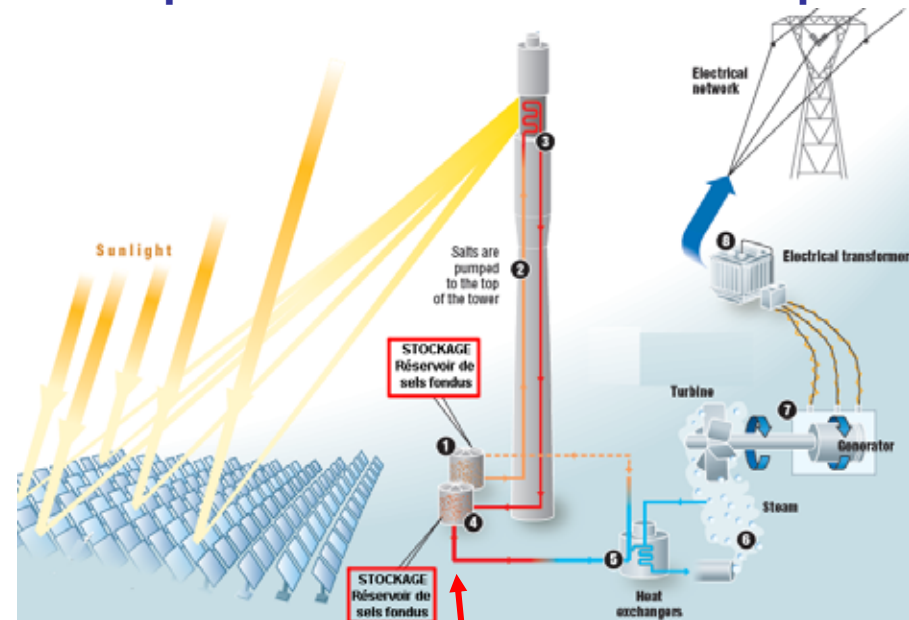
Espagne Gemasolar : 17 MW_e - 110 GWh/an
(Fuentes de Andalucía) sur une superficie de 185 ha



Source : Torresol Energy



champ d'héliostats + turbine à vapeur



Source : Torresol Energy

Possibilité d'un **stockage de chaleur**
en amont de la production électrique

Ici : capacité de 285 MWh_e (15 heures sans soleil)
Pour une productivité annuelle de
6500 heures par an (facteur de charge de 75%)

Production d'électricité 100% renouvelable ?

Un potentiel très largement suffisant d'énergie primaire est accessible et convertible en électricité avec de moindres perturbations environnementales

À tel point que l'électricité pourrait satisfaire de nouveaux usages
par exemple, transports électriques :



Déjà suffisamment de technologies de conversion existantes, avec
des écobilans largement positifs,
et à des niveaux de maturité et de coût acceptables
(éolien, photovoltaïque, solaire thermodynamique...)

Un problème important subsiste :
la variabilité de la production associée aux ressources
les plus largement disponibles (solaire et vent).

Alors, comment résoudre le problème de l'intermittence ?

En accroissant les capacités de **stockage** d'électricité

En généralisant le **pilotage des charges** « non prioritaires »,
notamment grâce à des **tarifications** beaucoup plus fines

En exploitant pleinement les **prévisions météorologiques**

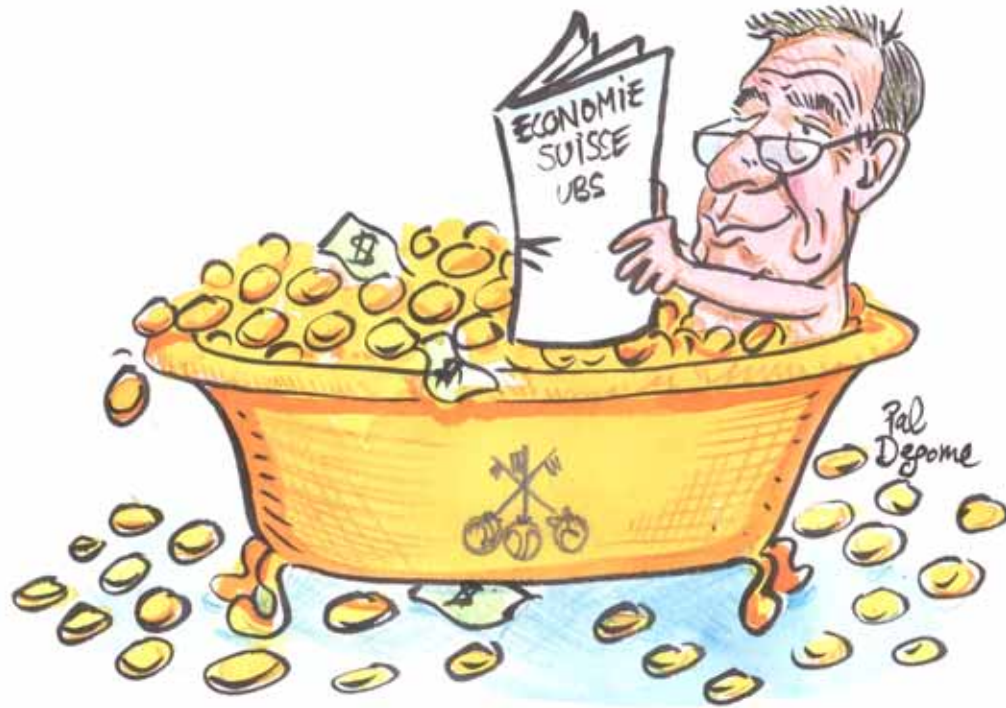
En utilisant des **combustibles renouvelables**
pour disposer de capacités de production « en stock »

En améliorant la **complémentarité** des ressources...

C'est le réseau (plus ?) intelligent (smart grid)

Il pourrait être également moins vulnérable grâce à la
possibilité d'îloter des micro-réseaux capables d'autonomie

À quels coûts ?



Et avec quelles matières premières ?

Monde : investissements économiques et en matières premières, quelques chiffres

Eolien et matières premières

260 tonnes d'acier (et 850 m³ de béton) par éolienne de 2 MW

Pour atteindre 10 000 TWh en 40 ans : 5000 GW éoliens et 2,5 M éoliennes de 2 MW

=> **650 M tonnes d'acier** (puis renouvellement sur 20 ans : 30 Mtonnes/an)

Production mondiale d'acier en 2006 : 1,8 Gtonnes (650 Mt sur 40 ans : 16 Mtonnes/an < 1 %)

Réserves mondiales : 73 Gtonnes => 5000 GW éoliens ⇔ 0,9%

Investissements éoliens

10 000 TWh : 5000 GW à 1 €/W => **5000 G€**
sur 40 ans (2050)

PIB mondial annuel : environ 60 000 G\$
sur 40 ans : **0,2% du PIB par an**

Investissements solaires

3000 TWh : 2000 TW à 3 €/W => **6000 G€**
sur 40 ans : **0,22% du PIB par an**

Dépenses actuelles

Militaires :

> 1500 G\$/an (**2,4% PIB**)

Pétrole :

Avec 4 Gtep (27 Gbarils)
à 100 \$/baril
2700 G\$/an

France

Exemple de scénario simplifié

450 TWh (puissance crête actuelle 95 GW) 100% renouvelables en 2050

Déjà 70 à 80 TWh hydrauliques (23,5 GW)

Restent 380 TWh :

- 70% éolienne 266 TWh (120 GW x 1,5 €/W = 180 G€)
- 20 % solaire 76 TWh (76 GW x 4 €/W = 300 G€)
- 10% biogaz et biomasse 38 TWh (6 GW x 1,5 €/W = 9 G€)
- stockage : 10 TWh – 50 GW ? (80 G€ ??)

Total : 570 G€
(en 40 ans : 0,8% PIB)

Hors taux d'intérêts et frais de maintenance (faibles) :

sur la base d'une durée de vie de 20 ans : 6,3 c€/kWh

+ modification des usages + économies d'énergie :
coût global pour la collectivité plus faible
(sur les produits neufs : très facile d'amortir... mais plus cher à la rénovation)

+ emplois locaux (installation, maintenance... fabrication ??)

Conclusion...



Journées « Energie et développement durable » Ker Lann mars 2007



**Finalelement, on ne manque ni d'énergie, ni de solutions,
mais il faut rapidement nous libérer de nos addictions
aux ressources faciles et polluantes**

Pour éviter ça :



ou ça :



L'équation du développement durable :

**sobriété + renouvelable + recyclage
= civilisation durable**

***« Les énergies renouvelables sont inépuisables.
Elles ne détruisent pas l'environnement.***



***Elles sont disponibles partout.
Leur utilisation facilite la solidarité avec les générations futures.
Elles assurent l'avenir de l'humanité.»***

Hermann SCHEER, le 9 décembre 1999
(1944 - 2010)