


**Bruz, campus de Ker Lann  
11 et 12 janvier 2012**

**Bernard MULTON  
ENS de Cachan  
SATIE - CNRS  
Site de Bretagne**



# Énergie

## Notions de base et décodage

# Plan

Qu'est-ce que l'énergie ?

Puissance, énergie et rendement

Energies primaire et finale : décodage des bilans

Ressources épuisables et renouvelables

Electricité : production, rendements, coûts...

Conversion des ressources renouvelables en électricité

Emissions de gaz à effet de serre associées à l'énergie

Compléments :

Équivalences, réserves en matières premières, énergie grise...

Analyses sur cycle de vie : transports, systèmes communicants, réfrigérateur

Développement humain et électricité renouvelable



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

indispensable à la vie  
et aux activités humaines

# Différentes formes de l'énergie

Travail mécanique

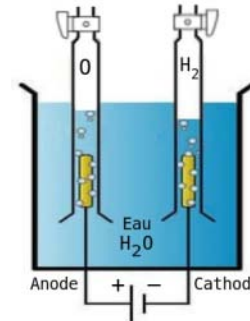


Rayonnement électromagnétique



Chimique (liaisons moléculaires)

Chaleur :

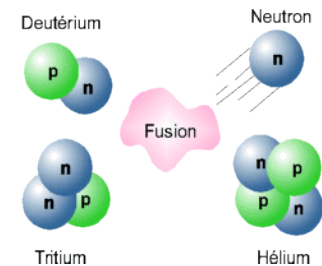


Electricité :



Matière

l'énergie ultime :  $E = m.c^2$



# « Cycles de vie » de l'énergie : exemples

Réactions nucléaires de fusion d'hydrogène dans les étoiles



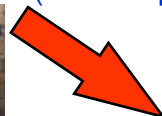
Rayonnement transmis dans l'espace  
et intercepté par la terre



Évaporation / condensation  
de l'eau

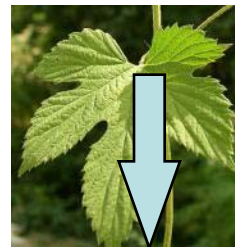


Écoulement (mécanique)



**chaleur basse température**  
(retour vers l'espace)

Photosynthèse



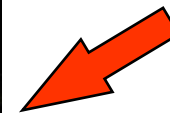
Biomasse (chimique)



Effet photo-électrique



Électricité



# Unités physiques de l'énergie et équivalences

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

Mais il y a d'autres unités, nous utiliserons ici :

- **le kilowattheure : kWh** et **le térawattheure : TWh**
- **la tonne équivalent pétrole : tep** (*Mtep* mégatep, *Gtep* gigatep)

## Quelques ordres de grandeur

- 1 coup de marteau : quelques 10 joules
- 1 tasse de café : quelques 10 kilojoules
- eau chaude d'une douche : 1 kWh
- fabriquer un smartphone (en partant de l'extraction des matières premières) : 300 kWh
- parcourir 20 000 km en voiture (6 litres/100 km) : 1 tep ou 12 000 kWh
- consommation française d'électricité : 450 TWh
- consommation mondiale de ressources énergétiques : 12 Gtep (milliards de tep)

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

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

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

# Qu'est ce que la puissance ?

La **puissance**,  
c'est le débit du convertisseur d'énergie :  $P = \frac{E}{t}$

**P** en watts (W) et **E** en joules (J)    **t** en secondes (s)

ou encore :

**P** en kilowatts (kW) et **E** en kilowattheures (kWh)    **t** en heures (h)

Dans les moteurs à combustion,

on utilise encore une autre unité de puissance le cheval : **1 cv = 736 W**

Exemple :

un moteur de 100 cv (73 kW) peut brûler le carburant

deux fois plus vite qu'un moteur de 50 cv

et donc transformer plus vite l'énergie du carburant en énergie mécanique

# Puissance (W) et énergie (kWh)

$$P = \frac{E}{t}$$

Exemple 1 (« consommation ») : transformation électricité -> chaleur

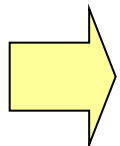
**Energie** : pour échauffer **200 litres** (ou 200 kg) d'eau de **40°C**, il faut **9,3 kWh**  
(4,18 J par °C et par gramme, ce qui donne 33,4 millions de joules ou encore 9,3 kWh)

**Puissance** : pour faire cette conversion  
en **3 heures**, il faut un « réchauffeur » de **3,1 kW**  
en **1 heure** ----- **9,3 kW**

Exemple 2 (« production ») : transformation rayonnement solaire -> chaleur

**Energie** : pour obtenir 10 kWh de chaleur  
avec un rayonnement solaire de 1 kW/m<sup>2</sup>

**Puissance** : il faut : **10 h** avec un capteur solaire de **1 m<sup>2</sup> (1 kW)**  
**2 h** ----- **5 m<sup>2</sup> (5 kW)**



Pour effectuer une transformation énergétique **plus vite**,  
il faut un **convertisseur plus puissant**...  
plus cher, nécessitant plus de matières premières...



# Notions de rendement énergétique

En réalité, l'énergie ne se produit pas, ni ne se consomme...

**elle se transforme ou se convertit d'une forme en une autre**

Exemples : **forme entrante** → **forme sortante**

*carburant* → *chaleur (combustion)*

*carburant* → *mécanique (moteur à combustion)*

*rayonnement solaire* → *électricité (photovoltaïque)*

*électricité* → *mécanique (moteur électrique)*

...

**Lors d'une transformation ou conversion,**

**toute l'énergie entrante n'est pas transformée en énergie souhaitée,  
il y a des pertes et le rendement est inférieur à 100% :**

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Énergie sortante}}{\text{Énergie entrante}} < 100\%$$

Généralement, les pertes se manifestent sous forme de chaleur

qu'il faut évacuer dans l'environnement :

$$\text{Pertes énergétiques} = \text{Énergie entrante} - \text{Énergie sortante}$$

# Définitions énergétiques

Ressources d'**énergie primaire** : disponible dans la nature

- **non renouvelables** (à nos échelles de temps)  
fossiles (charbons, pétroles, gaz naturel),  
fissiles (uranium, thorium)
- **renouvelables** (à nos échelles de temps)  
rayonnement solaire et sous-produits  
chaleur issue du noyau terrestre  
interaction gravitationnelle terre-lune-soleil

**Énergie finale** (« consommée ») : utilisable pour nos activités

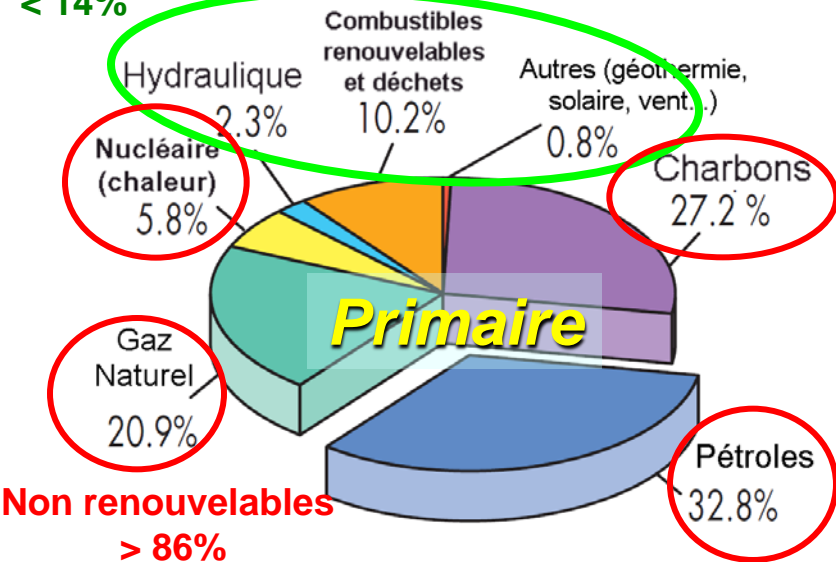
- carburants liquides (essence, gasoil, kérosène, éthanol...)
- carburants gazeux  
(gaz naturel livré au compteur, biogaz, hydrogène...)
- chaleur (réseaux de chaleur)
- électricité

# Bilan énergétique mondial : décryptage et place de l'électricité

(données 2009)

13,4% de l'électricité est d'origine nucléaire  
=> nucléaire = 2,3% de l'énergie finale

Renouvelables  
< 14%



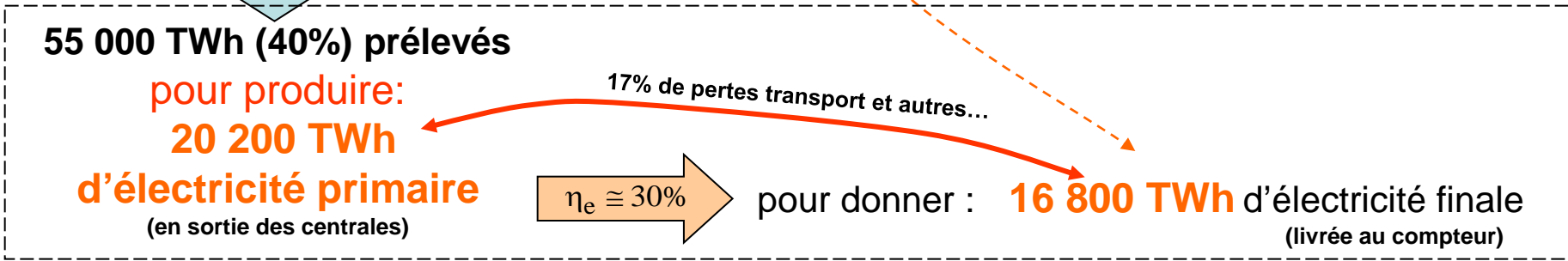
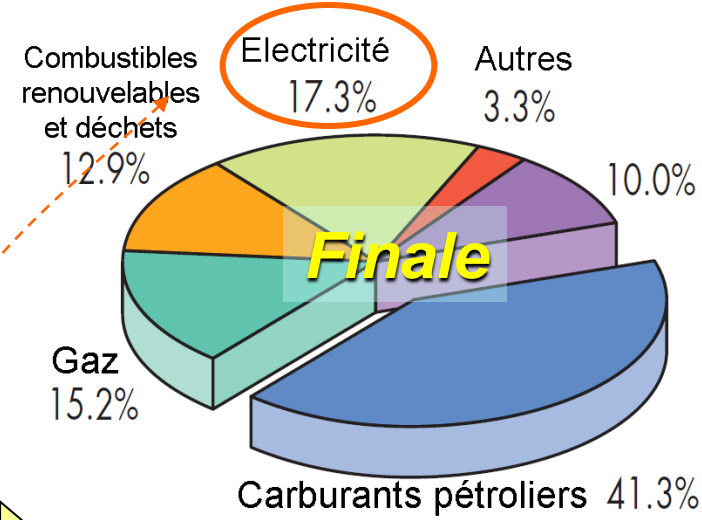
Non renouvelables  
> 86%

Total  $\approx$  141 000 TWh

1 TWh = 1 milliards de kWh

$\eta_{global} \approx 69\%$

Total  $\approx$  97 000 TWh

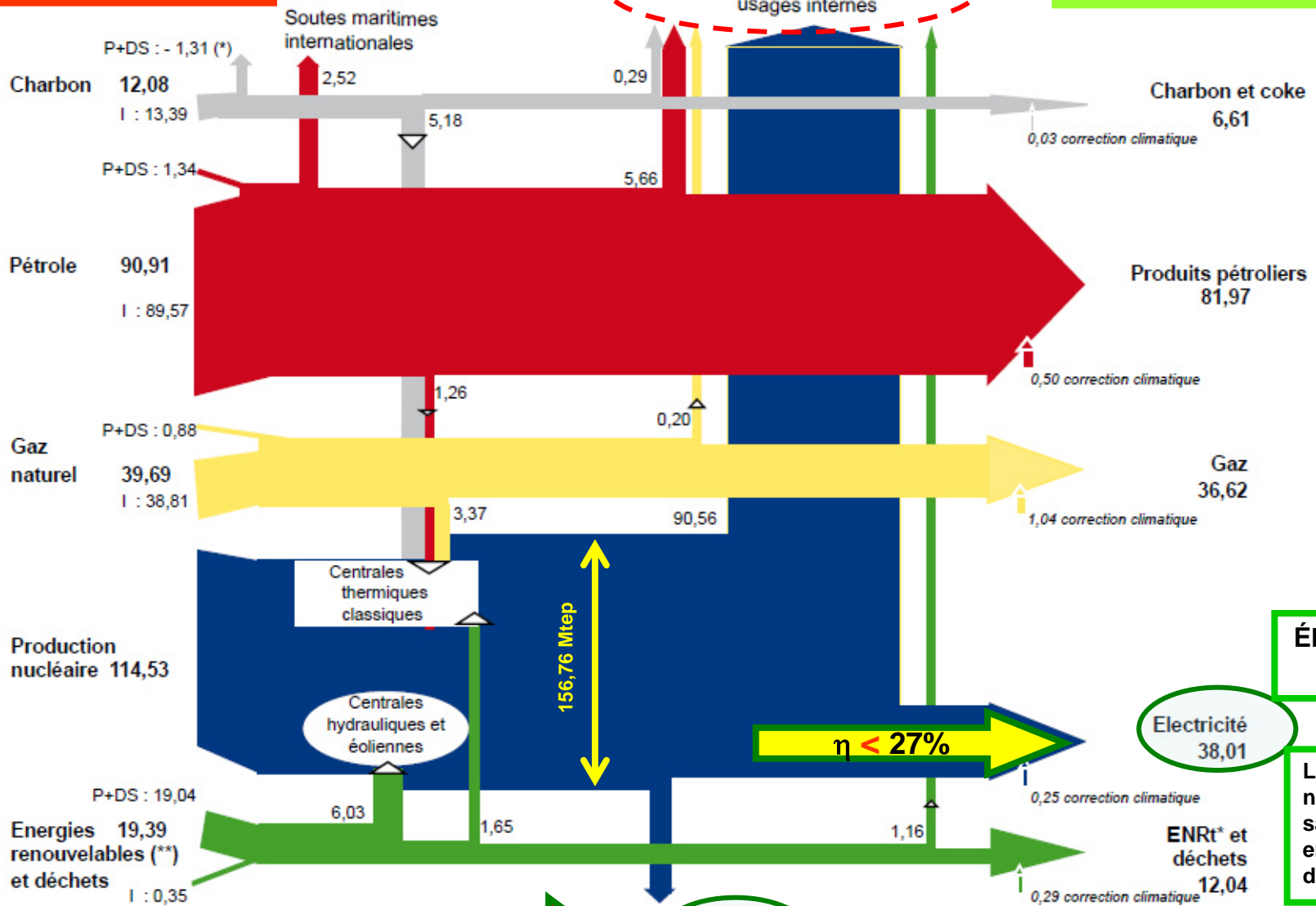


Source des données AIE (Key World Energy Stat. 2011)

# Bilan énergétique de la France (2009)

**Ressources primaires**  
(non corrigées du climat)

**Consommation finale**  
(corrigée du climat)



Total : 276,60 Mtep

$\eta_{global} \approx 63\%$

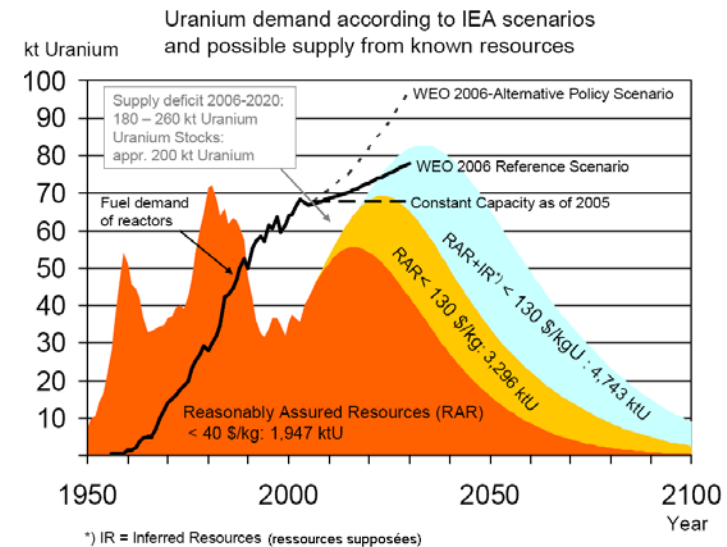
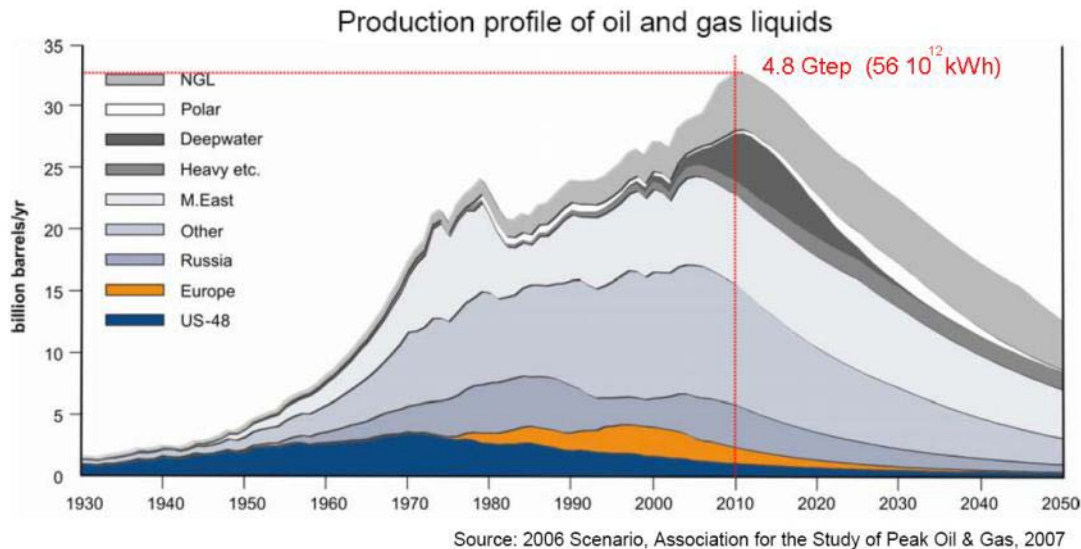
Total : 175,25 Mtep

# Ressources non renouvelables

**Combustibles fossiles** (charbon, pétrole, gaz naturel) :  
**entre 2000 et 5000 Gtep** (400 à 600 pétrole – 250 gaz – 3500 charbon)  
**(Réserves prouvées < 900 Gtep)**

**Uranium fissile** : **environ 150 Gtep** (avec réacteurs actuels)  
**(Réserves estimées < 50 Gtep)**

« **Pic de Hubbert** » : en combustibles fossiles liquides et en uranium

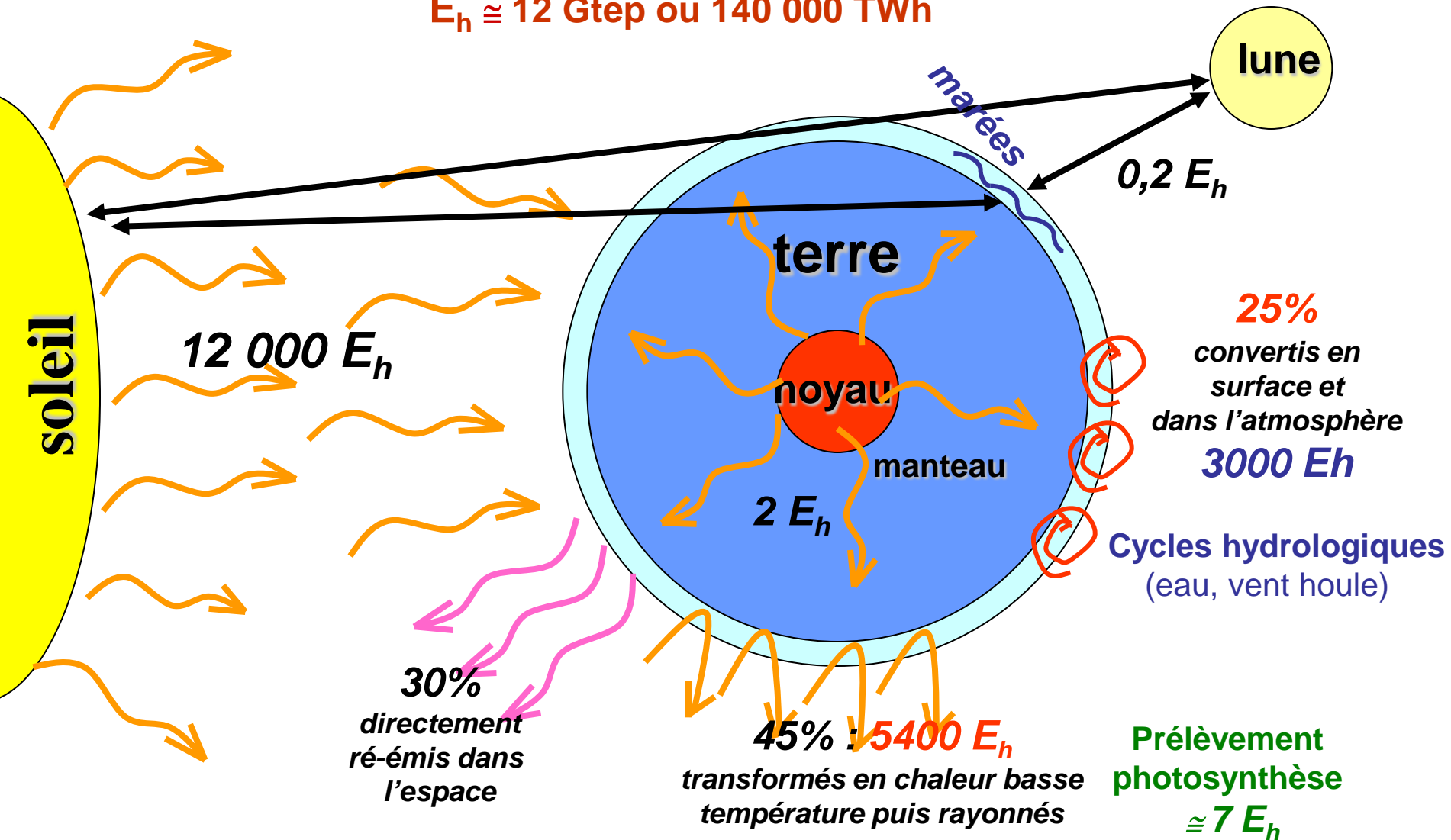


**Rayonnement solaire au sol : 100 000 Gtep... par an !**

# Ressources renouvelables (chiffres annuels)

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

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



# L'électricité



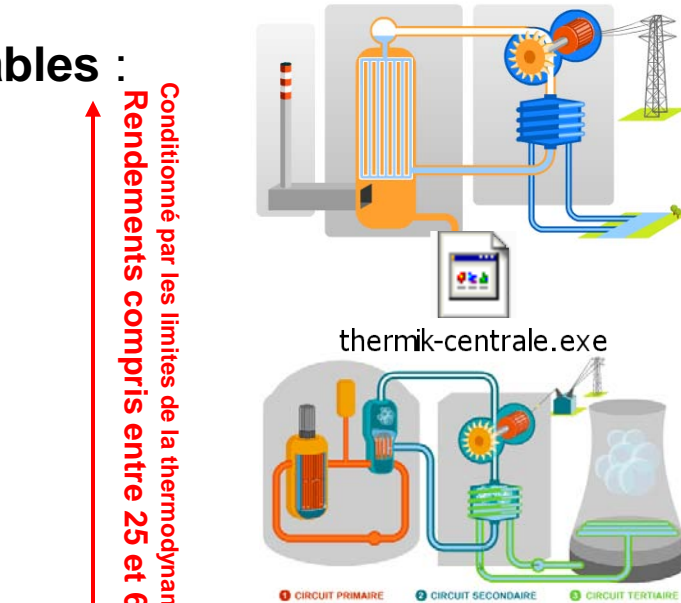
# Comment produit-on de l'électricité ?

Surtout en « brûlant » des **combustibles non renouvelables** :

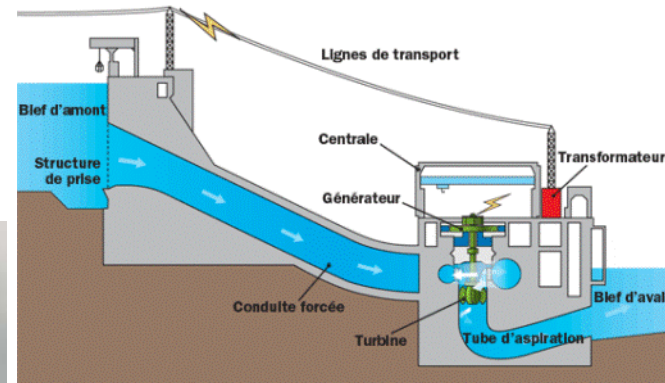
- turbines à vapeur  
(charbon, gaz, uranium, pétrole)
- turbines et moteurs à combustion  
(gaz, fuel)

Mais aussi **à partir de ressources renouvelables**

- turbines à vapeur ou à combustion  
(solaire thermodynamique, biomasse, géothermie)
- turbines à eau (hydraulique)  
à vent (éolienne)
- générateurs photovoltaïques
- autres...



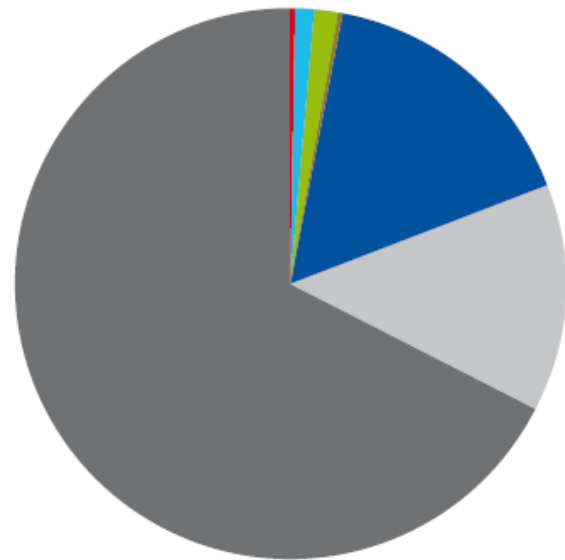
Conditionné par les limites de la thermodynamique  
Rendements compris entre 25 et 60%





# Origine de la production mondiale d'électricité (2009)

**20 000 TWh**



■ Géothermie 0,3 %  
■ Éolien 1,3 %  
■ Biomasse 1,2 %  
■ Déchets non renouvelables 0,2 %  
■ Solaire 0,1 %  
■ Hydraulique 16,1 %

Moins de 20 %  
est d'origine  
renouvelable

■ Nucléaire 13,5 %  
■ Fossile 67,2 %

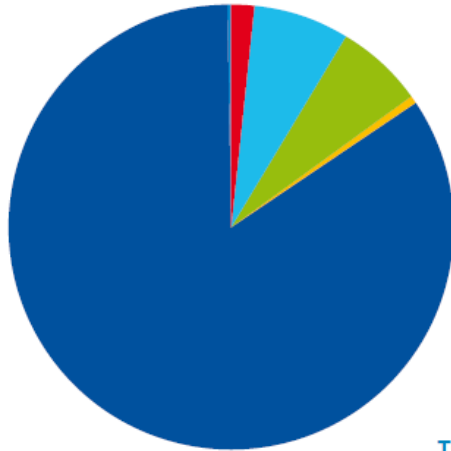
Charbon : 41%  
Gaz : 21,2%  
Pétrole : 5%

Plus de 80 % de l'électricité mondiale  
est d'origine non renouvelable

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

# Origine de la production électrique issue de ressources renouvelables (2009)

**19% renouvelables : 3 800 TWh**

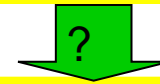


- Géothermie 1,7 %
- Éolien 7,0 %
- Biomasse 6,3 %
- Solaire 0,6 %
- Hydraulique 84,3 %
- Énergies marines 0,01 %

Extrapolation de la progression :

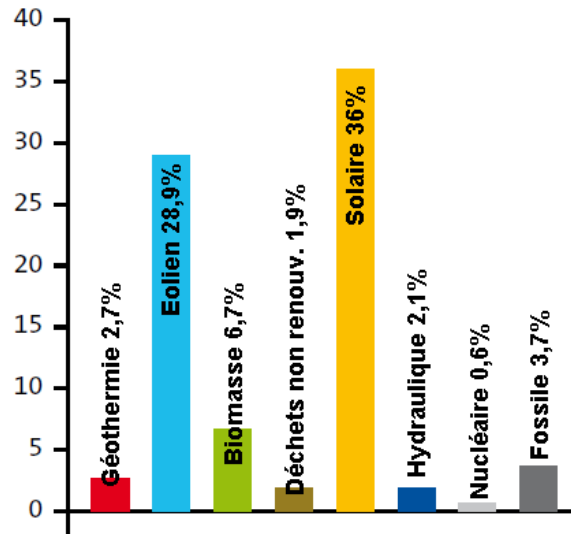
Avec + 20%/an pendant 10 ans (+29% 1999/2009),  
puis + 12%/an pendant 11 ans :  
*la production éolienne atteindrait 5700 TWh en 2030*

Avec + 30%/an pendant 10 ans (+36% 1999/2009),  
puis + 20%/an pendant 11 ans :  
*la production solaire atteindrait 1800 TWh en 2030*



**En 2030 :**  
**4000 TWh hydrauliques**  
**5700 TWh éoliens, 1800 TWh solaires**  
**400 TWh biomasse, 200 TWh géothermiques**  
**TOTAL : 12 100 TWh soit 40%**  
**sur un total de 30 000 TWh**

Taux de croissance annuel moyen 1999-2009



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

# Importance du rendement en « production » d'électricité

**Exemple 1** : à partir d'un combustible (procédé thermodynamique)

Rendement : entre 30% (nucléaire) et 60% (cycles combinés : combustion + vapeur)

Pour « produire » 1 kWh électrique ( $kWh_e$ ) avec un rendement de 30%,  
on « consomme » 3,3 kWh ( $kWh_{pci}$ ) de combustible

Si l'énergie entrante est non renouvelable,  
un mauvais rendement est le signe d'un grave  
gâchi de ressources

(dégradation irréversible de matière premières énergétiques polluantes)



**Exemple 2** : à partir d'une ressource renouvelable

Cas d'un générateur photovoltaïque : rendement entre 8% et 30%

Si l'énergie entrante est renouvelable, un mauvais rendement a  
des conséquences totalement différentes :

- plus d'espace occupé
- convertisseur plus gros...

Compte tenu de l'énergie grise, il existe d'ailleurs  
un optimum de rendement sur le plan environnemental



# Coûts de production d'électricité, calculs simplifiés

(hors intérêts d'emprunt et frais de maintenance)

## Exemple 1 : à partir d'un combustible (centrale thermique, turbine à combustion)

Investissement : 500 €/kW

Durée de vie : 20 ans

Combustible pétrole : 80 €/baril (1 baril = 1700 kWh<sub>pci</sub> => 4,7 c€/kWh<sub>pci</sub>),

Avec un rendement de 30%, il faut 3,3 kWh<sub>pci</sub> pour obtenir 1 kWh<sub>e</sub>

Ainsi, pour obtenir 1 kWh<sub>e</sub> il faut dépenser **14 c€ de combustible** (non renouvelable)

Si l'usine fonctionne pendant 20 ans durant 3000 heures par an,

la part de l'investissement dans le coût de revient vaut :

500 € pour 1 kW qui produit : 1 kW x 3000 h x 20 = 60 000 kWh<sub>e</sub> donc **0,8 c€/kWh<sub>e</sub>**

**prix total = 14,8 c€/kWh<sub>e</sub>**

**Avec les combustibles fossiles, la part du combustible est dominante**

## Exemple 2 : à partir d'une éolienne

Investissement : 1200 €/kW

Durée de vie : 20 ans

Le vent est gratuit : 0 €/kWh<sub>e</sub> dû à l'énergie primaire

Si l'éolienne est implantée sur un site dont la productivité annuelle est :

de 2000 heures, 1 kW produit 40 000 kWh<sub>e</sub> (en 20 ans), le prix de revient est : **3 c€/kWh<sub>e</sub>**

de 3000 heures, ---- 60 000 kWh<sub>e</sub> ---- : **2 c€/kWh<sub>e</sub>**

**Avec les ressources renouvelables gratuites, la part de l'investissement et les performances du site sont dominantes**

# Pour minimiser les impacts environnementaux : nécessité d'un éco-dimensionnement des systèmes de conversion

**=> minimisation de la consommation d'énergie primaire non renouvelable sur tout le cycle de vie**

Important car améliorer le rendement d'un convertisseur d'énergie se traduit généralement par un accroissement de la quantité de matériaux ou des process de fabrication plus énergivores

- Production des matières premières non énergétiques (fer, cuivre, silicium, lithium...)
- Fabrication des objets étudiés
- Transports entre les lieux de production, d'usage...

Energie grise

**+ prise en compte éventuelle du vieillissement, des remplacements et réparations**

**- Consommation d'énergie primaire non renouvelable sur la durée d'usage**

**- Valorisation éventuelle (conso négative)**

# Pour les convertisseurs de ressources renouvelables : quel temps de retour sur investissement énergétique ?

## Photovoltaïque en toiture

Pour une durée de vie de 30 ans



Technologie/ Energie grise	Nord Europe (900 heures par an)	Sud Europe (1700 heures par an)
Silicium cristallin (14%) / 5,8 kWh / Wp	<b>4,6 ans</b>	2,4 ans
Silicium couches minces (9%) / 3,8 kWh / Wp	3 ans	1,6 ans
CdTe (11%) / 2,1 kWh / Wp	1,7 ans	<b>0,9 ans</b>

Source : Energy Research Centre of the Netherlands, Workshop Photovoltaik-Modultechnik, Nov. 2009.

## Eolien (terrestre, grandes machines)

Pour une durée de vie de 20 ans



Exemple Vestas V90-3 MW : 7800 MWh (tout compris)

Source : B. Nalukowe et al., "Life Cycle Assessment of a Wind Turbine", may 2006

Site normalement venté : 2000 h/an => 6000 MWh/an => 1,3 ans  
 Site terrestre bien venté : 2700 h/an => 8100 MWh/an => 0,96 an

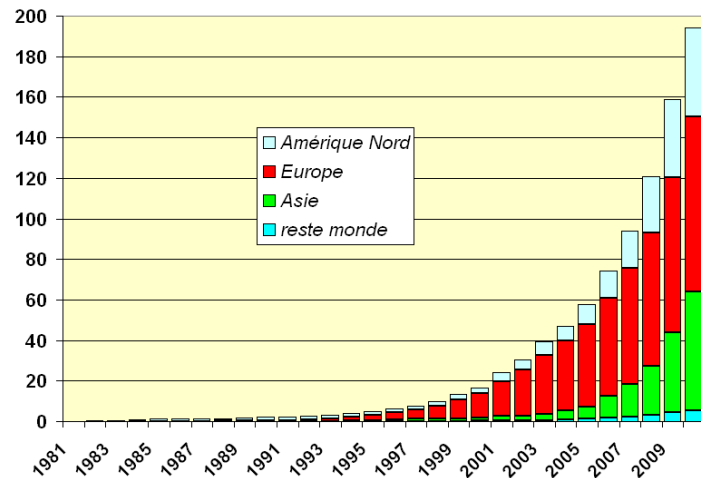
# Production éolienne

Dans le monde :

près de 200 GW installés fin 2010

(dont 3,2 GW en offshore)

(sur environ 4000 GW de capacités totales de production)



## Relation entre **puissance** installée et **énergie** produite:

1 W terrestre produit annuellement environ 2 kWh (1 W x 2000 h)

1 W offshore ..... 3 à 4 kWh (1 W x 3 à 4000 h)

=> 200 GW produisent en un an plus de 500 TWh (2500 h)

200 GW nucléaires produiraient environ 1400 TWh (7000 h)

Très fort potentiel encore peu exploité en offshore,

le Danemark précurseur, le Royaume Uni nouveau leader :

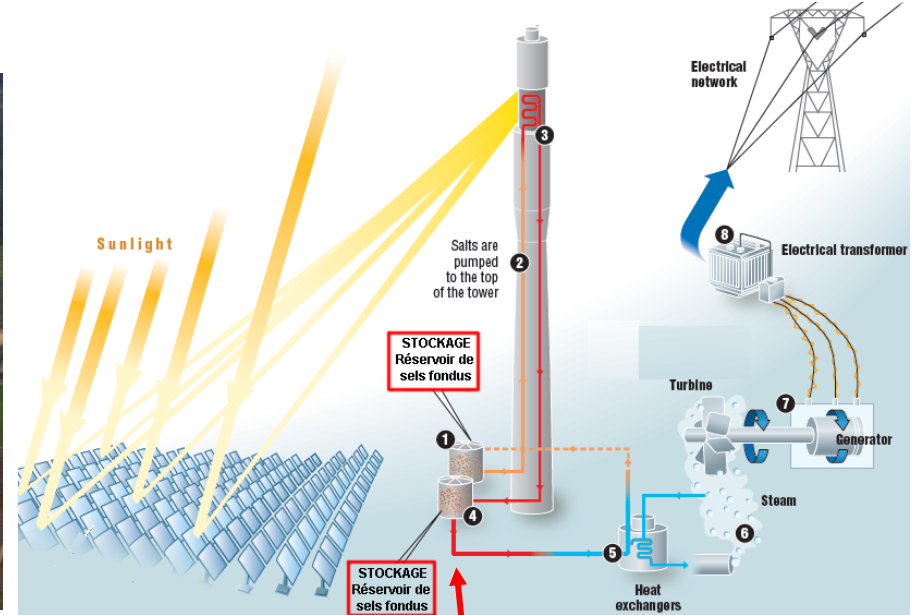


# Génération thermodynamique solaire à concentration

## Exemple de technologie mature : les centrales à tour

Espagne Gemasolar : 17 MW<sub>e</sub> - 110 GWh/an  
(Fuentes de Andalucía) sur une superficie de 185 ha

## champ d'héliostats + turbine à vapeur



Source : Torresol Energy



Source : Torresol Energy

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

Deux réservoirs pour 15 heures de production sans soleil.

=> productivité annuelle de **6500 heures par an**



# Beaucoup de solutions pour produire de l'électricité à partir des renouvelables

Solaire photovoltaïque



Méthaniseur + cogénérateurs



Houlogénérateurs



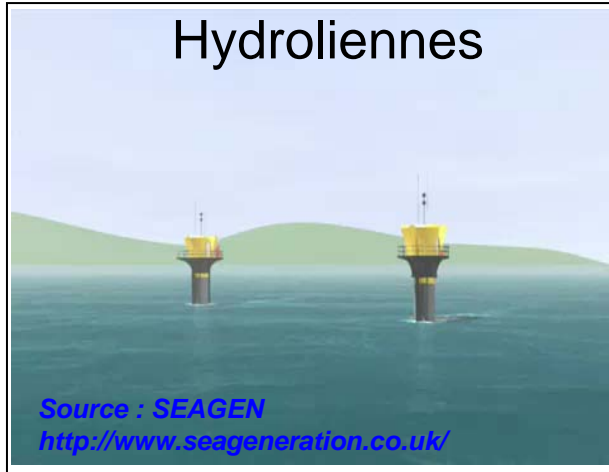
Source :  
<http://www.pelamiswave.com/>

Solaire thermodynamique (autres...)



Source : Kramer Jonction

Hydroliennes



Source : SEAGEN  
<http://www.seageneration.co.uk/>

**Et bien d'autres pour la stocker...**

# Emissions de CO<sub>2</sub> associées à la conversion de combustibles carbonés

La combustion de 1 kg de carbone dégage 3,6 kg de CO<sub>2</sub>

Combustible (valeurs particulières)	Pouvoir calorifique en kWh/kg ou kWh/m <sup>3</sup>	Emission de CO <sub>2</sub> par rapport au pouvoir calorifique en kgCO <sub>2</sub> /kWh
Charbon (anthracite)	8,1	0,35
Fuel domestique	11,6	0,28
Gaz naturel	10,4	0,2
Propane	12,9	0,24

## Combustible des moteurs à combustion interne

Essence : 2,37 kg CO<sub>2</sub>/litre

Diesel : 2,64 kg CO<sub>2</sub>/litre

Pour parcourir 1 km en automobile :  
100 à plus de 200 g CO<sub>2</sub>/km  
(Prius : <100 g CO<sub>2</sub>/km)

# Emissions de CO<sub>2</sub> associées à la production d'énergie finale

Pour obtenir 1 kWh de chaleur, il faut brûler environ 90 dm<sup>3</sup> de gaz naturel,  
ce qui rejette 200 g CO<sub>2</sub>

Pour produire 1 kWh d'électricité avec les  
meilleures centrales thermiques au gaz (rendement 60%),  
il faut 1,7 kWh de chaleur → rejet de 330 g CO<sub>2</sub>

Avec le charbon, on peut dépasser : 1 kg CO<sub>2</sub>/kWh

En France, 1 kWh nucléaire rejette 6 g CO<sub>2</sub> (moyenne mondiale : 60 g)

Et la moyenne française des émissions est d'environ 90 g CO<sub>2</sub> par kWh électrique

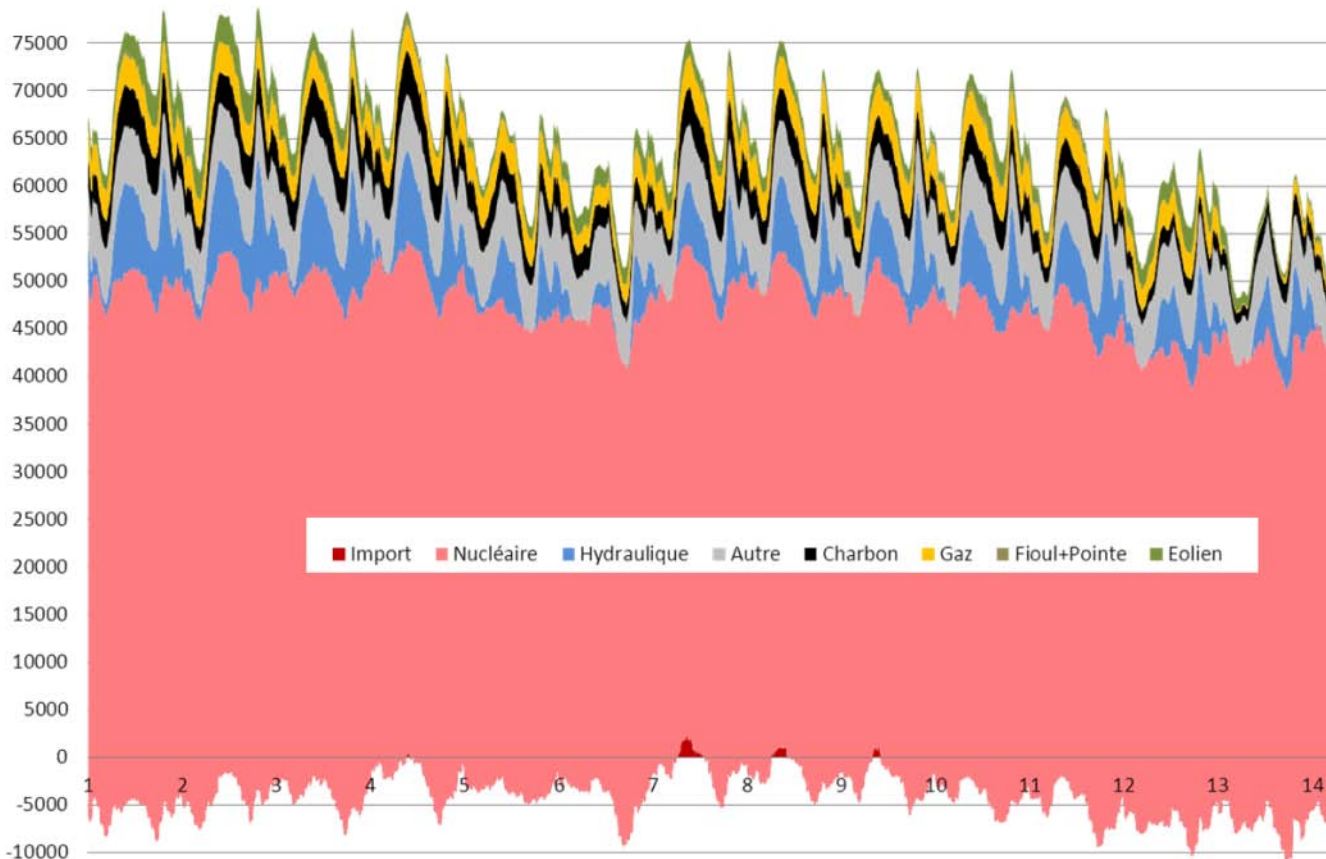
Dans le cas de l'électricité éolienne et photovoltaïque ou de toute autre source  
qui n'émet pas de gaz à effet de serre lors de la phase de conversion :  
les émissions sont liées aux phases de fabrication et de recyclage,  
donc à la quantité et au type d'énergie consommée.

C'est toujours bien plus faible que ce qui est produit avec les combustibles fossiles.

# Réalité des émissions de CO<sub>2</sub> de l'électricité

L'électricité est produite

à partir d'un mix énergétique qui varie en fonction du temps



La part du chauffage électrique continue à croître :

consommation due au froid :

En 1980-81 :  
**+ 400 MW/°C**

Hiver 2010-11 :  
**+ 2 300 MW/°C**

En janvier 2005, la France a admis que le chauffage électrique rejetait 180 gCO<sub>2</sub>/kWh et c'est bien plus aujourd'hui (en 2007, rapport ADEME (non diffusé) : 500 à 600 g)

# Rejets de CO<sub>2</sub> d'un véhicule électrique

dépendent fondamentalement du mix énergétique de production électrique

1 kWh électrique en France : 90 g/kWh<sub>e</sub>  
en Europe : 400 g/kWh<sub>e</sub> **en moyenne...**  
au monde : 720 g/kWh<sub>e</sub>

Un (petit) véhicule électrique consomme environ **0,2 kWh/km** (avec auxiliaires)

$$N \text{ gCO}_2/\text{km} = X \text{ gCO}_2/\text{kWh}_e \times Y \text{ kWh}_e/\text{km} \Rightarrow 18 \rightarrow 80 \rightarrow 140 \text{ gCO}_2/\text{km}$$

Rejets production d'électricité      consommation électrique du véhicule

Avec de l'électricité au charbon (1 kgCO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub>) : 200 gCO<sub>2</sub>/km

Valeurs à ré-évaluer compte tenu du supplément d'investissement énergétique (ACV) de la batterie : **environ + 20 gCO<sub>2</sub>/km**

(batterie lithium 2000 cycles à 80% DOD,

EG = 500 kWh par kWh de capacité )



Renault Kangoo bebop ZE



Nécessité d'une électricité « propre »  
sinon intérêt plus faible



FIN

Compléments...

# Bibliographie

## Livres

Hermann SCHEER, « L'autonomie énergétique : Une nouvelle politique pour les énergies renouvelables », Actes Sud (2007).

Jean-Christian LHOMME, « Les énergies renouvelables », Delachaux & Niestlé 2<sup>ème</sup> édition, 2004.

Estelle IACONA et al. « Les enjeux de l'énergie. De la géopolitique au citoyen », Dunod, juin 2009.

Olivier JOLLIET et al., « Analyse du cycle de vie - Comprendre et réaliser un écobilan », 2e édition, Ed. PPUR, oct. 2010

## Articles accessibles via internet

Bernard MULTON et al., « Consommation d'énergie, ressources énergétiques et place de l'électricité », Techniques de l'Ingénieur, Traités de Génie Electrique, D3900v2, 2011.

Bernard MULTON et al., « Systèmes de conversion des ressources énergétiques marines », Chapitre 7 du tome 1 du livre « Les Nouvelles Technologies de l'Energie », Hermès Publishing, 2006, 45p.

Bernard MULTON, « Vers une production d'électricité 100% renouvelable », Bulletin de l'Association des anciens élèves et des élèves de l'ENS de Cachan, déc. 2011, pp.5-8. Diaporama audio : [http://www.youtube.com/watch?v=jtHF\\_57Sz1Y](http://www.youtube.com/watch?v=jtHF_57Sz1Y)

Bernard MULTON et al., « Energie et développement durable », Bulletin de l'association des anciens élèves de l'ENS de Cachan, n°228, fev. 06, 11p.

## Organismes d'information sur les questions énergétiques et électriques

Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC) : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/>

Agence Internationale de l'Énergie (International Energy Agency) : <http://www.iea.org>

Conseil Mondial de l'Énergie (World Energy Council) : <http://www.worldenergy.org/wec-geis/>

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) : <http://www.ademe.fr>

Electricité de France (EDF) : <http://www.edf.fr/>

Energy Information Administration (Département de l'Énergie du gouvernement US) : <http://www.eia.doe.gov/>

Réseau de Transport d'électricité (RTE) : <http://www.rte-France.com>

Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) : <http://www.cea.fr/>

Comité de liaison Energies Renouvelables (CLER) : <http://www.cler.org>

Observateur des Energies Renouvelables (Observ'ER), revues Systèmes Solaires et Renewable Energy Journal : <http://energies-renouvelables.org>

Institut Français du Pétrole (IFP) : <http://www.ifp.fr>

Institut de l'Énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF) : <http://www.iepf.org/>



# Compléments généralités



# Principales équivalences

1 Wh = 3600 J (1 kWh = 3,6 MJ)

1 tep  $\cong$  11 600 kWh (1 Gtep  $\cong$  11 600 TWh)

1 tep  $\cong$  41 700 GJ (1 Gtep  $\cong$  41,7 EJ)

1 baril (159 l ou 136 kg)  $\cong$  1600 kWh

1 BTU (British Thermal Unit)  $\cong$  252 cal  $\cong$  1050 J

1 quad BTU :  $10^{15}$  BTU  $\cong$  290 T kWh  $\cong$  25 Mtep

1 BTU = énergie pour accroître de 1°F une livre (pound, 453 grammes) d'eau

## Valeurs énergétiques PCI/PCS de quelques combustibles

Uranium natur. (fission)	120 000 kWh/kg
Hydrogène	34/39 kWh/kg
Fuel	11,6/12,4 kWh/kg
Essence	12,4/13,4 kWh/kg
GPL : Propane	12,8/13,8 kWh/kg
Butane	12,7/13,7

Gaz Naturel	13,8/15,3 kWh/kg
Charbon	7 à 9 / 9 à 10 kWh/kg
Bois	2 à 4 kWh/kg
Bagasse	2,2 kWh/kg
Ordures ménagères	0,3 à 0,5 kWh/kg

Selon les gisements :

Gaz naturel : 37 à 42 MJ/m<sup>3</sup>

Pétrole brut : 1 à 1,07 tep/tonne

Charbon : 0,44 à 0,64 tep/tonne

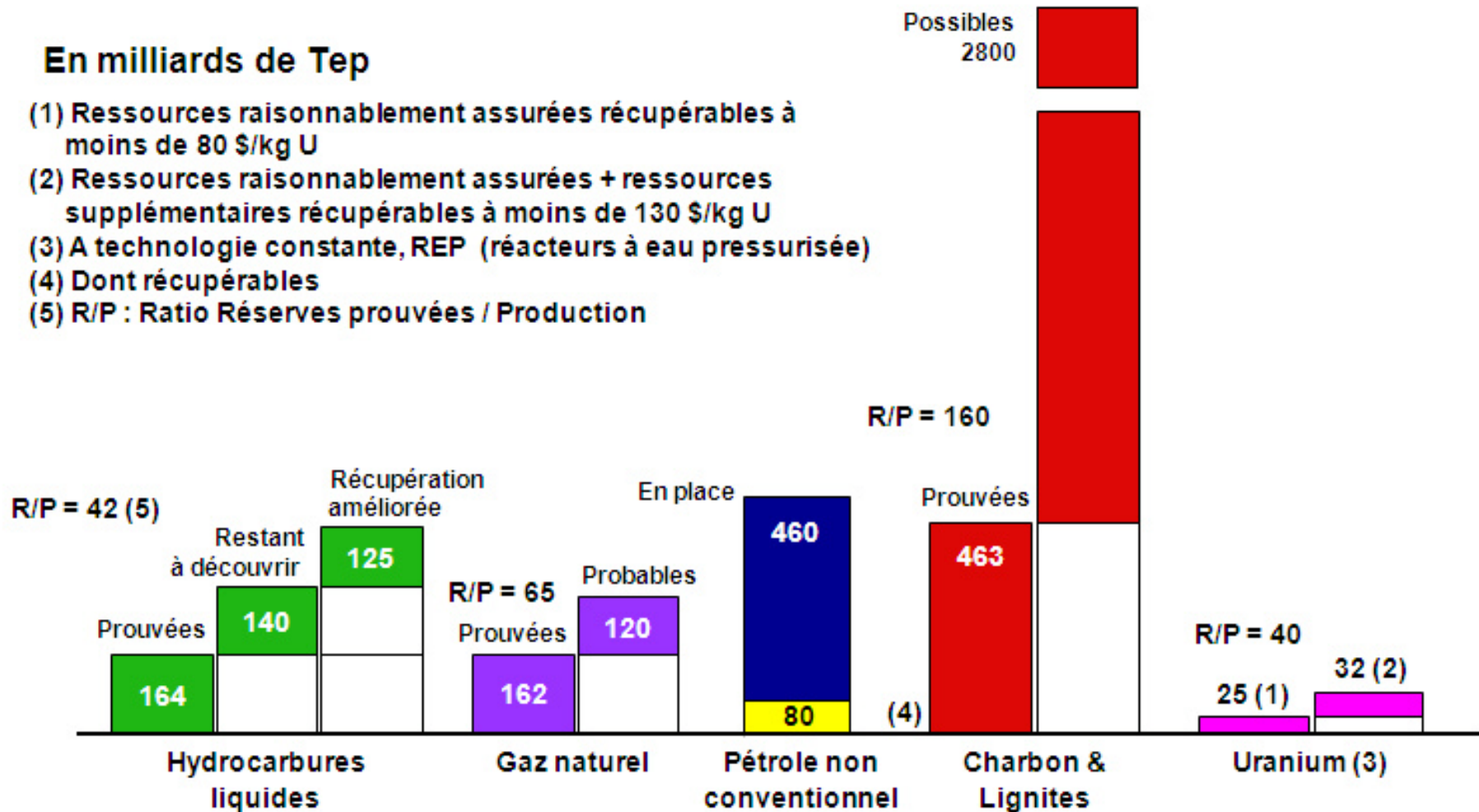
*PCI = pouvoir calorifique inférieur (lower heating value: LHV)*  
*PCS = pouvoir calorifique supérieur (higher heating value : HHV)*

# Réserves en matières premières énergétiques non renouvelables :

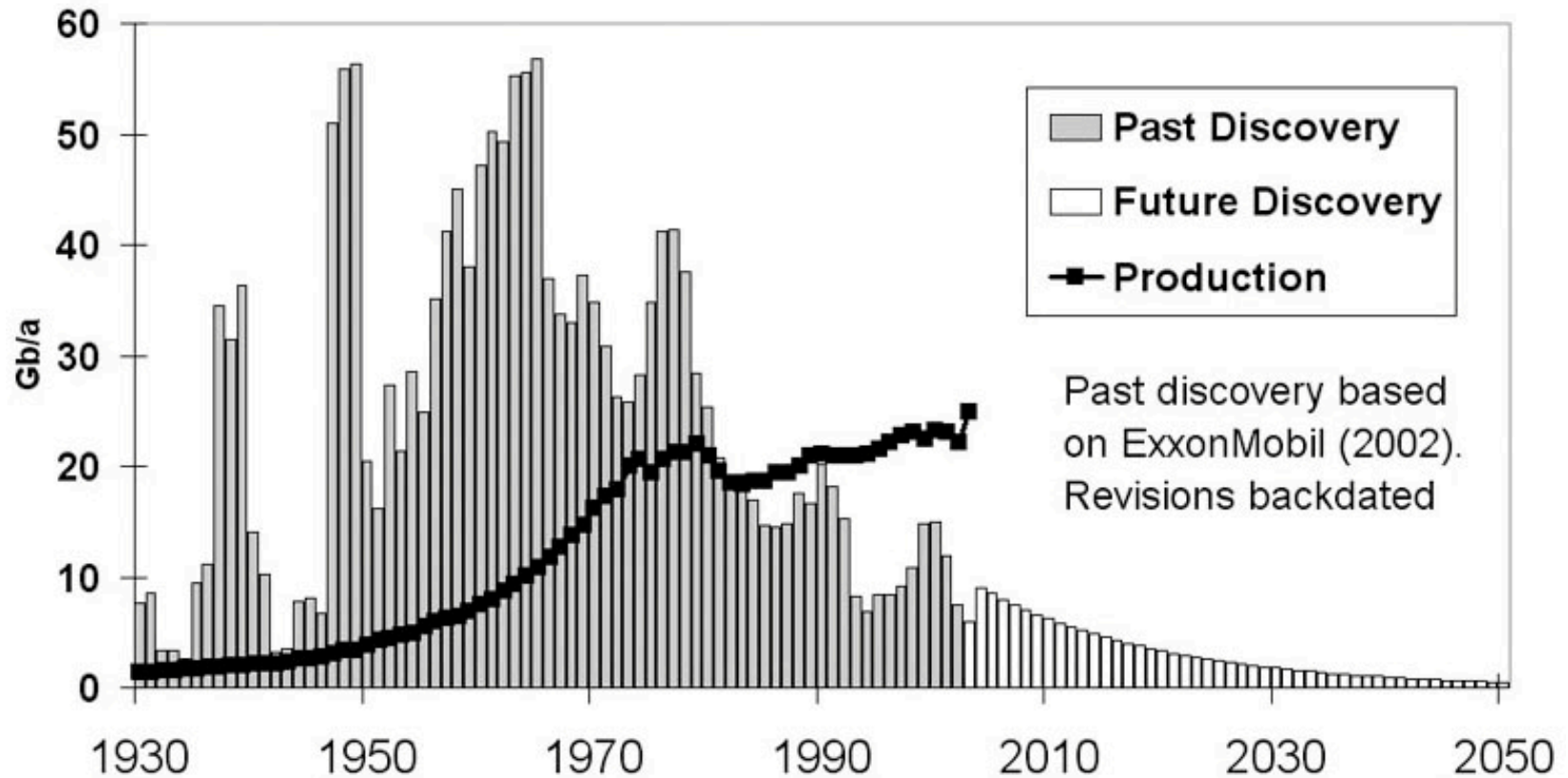
en Gtep (primaires) et rapport R/P (réserves sur production annuelle)

En milliards de Tep

- (1) Ressources raisonnablement assurées récupérables à moins de 80 \$/kg U
- (2) Ressources raisonnablement assurées + ressources supplémentaires récupérables à moins de 130 \$/kg U
- (3) A technologie constante, REP (réacteurs à eau pressurisée)
- (4) Dont récupérables
- (5) R/P : Ratio Réserves prouvées / Production



# Au sujet des « éternels » 40 ans de réserves de pétrole



Source : Exxon Mobil 2002

Citation de Jean LAHERRERE (septembre 2006) :  
**Depuis 1980 on découvre beaucoup moins de pétrole que l'on n'en produit (actuellement 3 fois moins)**

# Matières premières : différence entre réserves et ressources

## Ressources :

- **identifiées** ou démontrées (en lieu, teneur, qualité et quantité)  
liées aux connaissances géologiques et à la prospection par échantillonnage ;
- **présumées** définies par extrapolation des connaissances sur les ressources identifiées.

**Réserves de base** : réserves techniquement récupérables sur la base des ressources connues

**Réserves** : relatives aux critères économiques et physico-chimiques (voire écologiques ??)  
d'exploitation, tiennent compte des pertes à l'extraction

## Réserves < Ressources

Exemples ressources/réserves/production annuelle  
matières premières non énergétiques :

	Ressources présumées	Réserves Base	Réserves	Rapport Réserves/ Production (années)	Production Mondiale (≅ 2006)	
					primaire	Secondaire (recycl.)
<b>Acier</b>	230 G	160 G	73 G	40	1,8 G	
<b>Alu</b>	13 à 18 G	8 G	5,7 G	170	34 M	7,6 M (2004)
<b>Cu</b>	3 à 3,7 G	940 M	470 M	31	15 M	
<b>Pb</b>	1,5 G	140 M	67 M	16	4 M	4 M
<b>Li (Metal)</b>	14 M	11 M	4,1 M	215	18,8 k	

données USGS

en tonnes

(USGS = US Geological Survey)

# Exemples de valeurs d'énergie grise (embodied energy)

## Acier

Primaire (pas recyclé) :	8,3 kWh/kg
Acier secondaire (100% recyclé) :	4,1 kWh/kg
Acier européen 47% recyclé :	6,4 kWh/kg
Acier inoxydable (13% chrome) Europe :	9,7 kWh/kg

<b>Cuivre</b> Primaire :	27 kWh/kg
<b>Magnésium</b> :	54 kWh/kg
<b>Plomb</b> :	5 kWh/kg

## Aluminium

Primaire (0% recyclé) :	44,7 kWh/kg
Secondaire (100% recyclé) :	5 kWh/kg
Européen : 30% recyclé :	33 kWh/kg
Profilé alu Europe :	34 à 37 kWh/kg

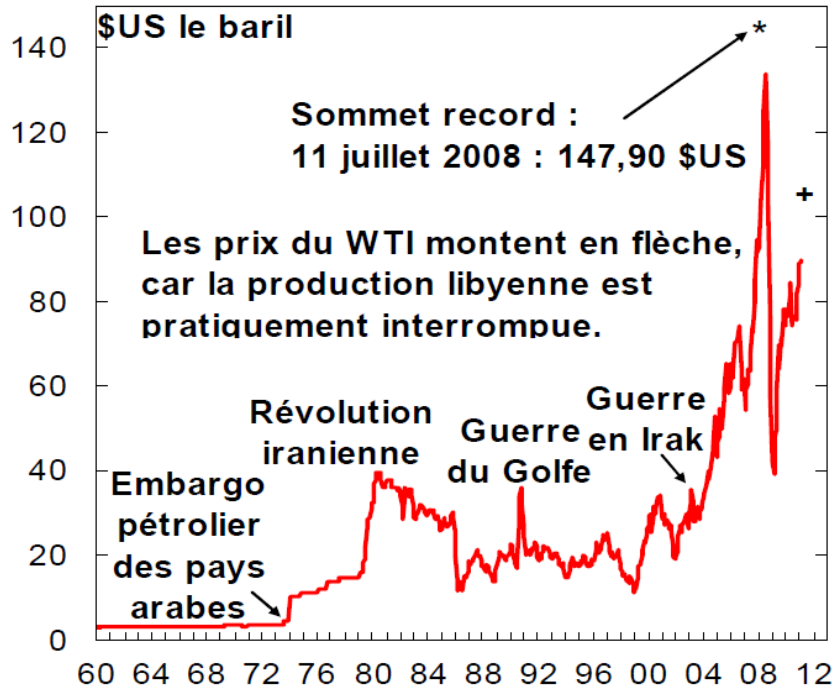
<b>Thermoplastiques</b> :	7,8 (polypropylène) à 25 kWh/kg (PMMA Poly méthacrylate de méthyle)
<b>Thermodurcissables</b> (résines) :	17 (mélamine) à 27 kWh/kg (phénoplaste époxy)

<b>Verre</b> :	3 (alimentaire ou recyclé 99%) à 3,9 kWh/kg (verre alimentaire blanc)
<b>Bois massif</b> :	1,2 kWh/kg
<b>Panneaux agglomérés</b> :	5 kWh/kg
<b>Panneaux de particules</b> :	2,2 kWh/kg

Ces valeurs peuvent varier significativement selon les sources...

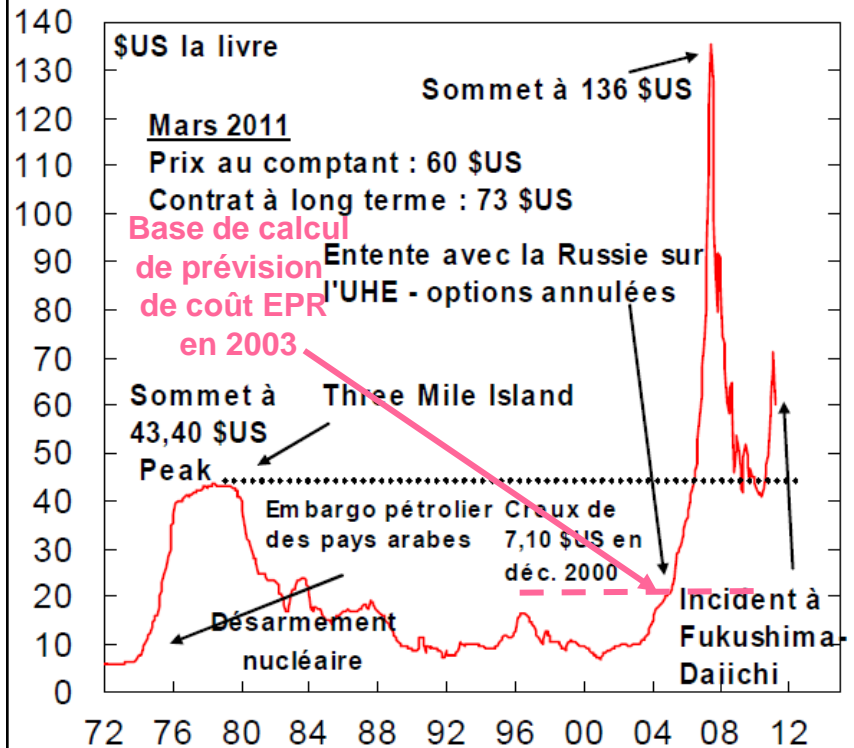
# Les cours des matières premières énergétiques fluctuent et affectent économie et stabilité politique...

## Le baril de pétrole brut : la référence



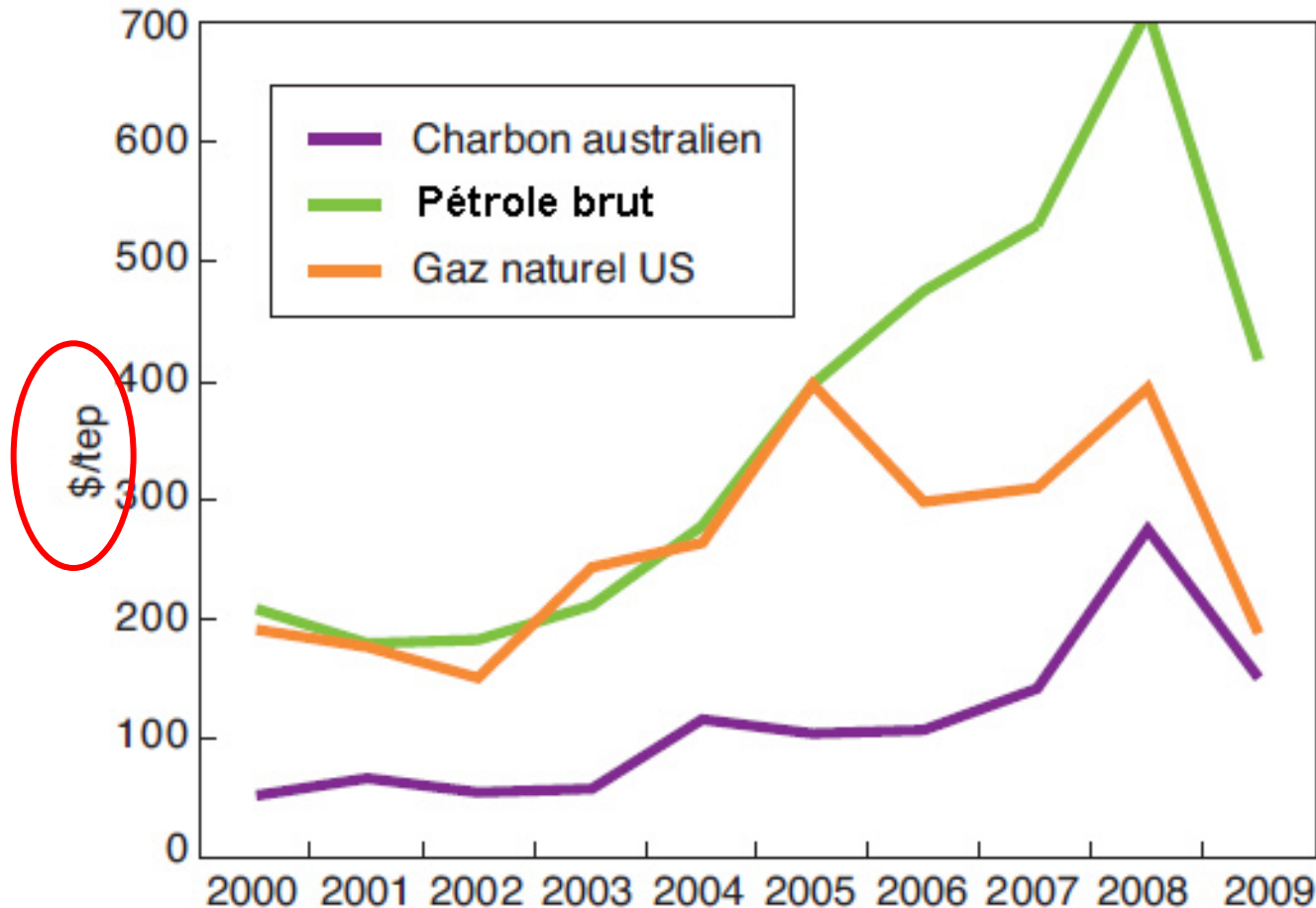
Et (en Europe), le prix du gaz naturel fluctue comme celui du pétrole...

## Le cours de l'uranium : également instable



10 \$/lb = 26 \$/kg

# Prix charbon, gaz et pétrole en \$/tep



Source : IFP, base Platt's

source : IFP

Un pétrole à 100 \$/baril conduit à 680 \$/tep  
(1 tep équivalent à 6,8 barils)



**Compléments  
pour analyse sur  
cycle de vie**



# Transports : le raisonnement « du puits à la roue »

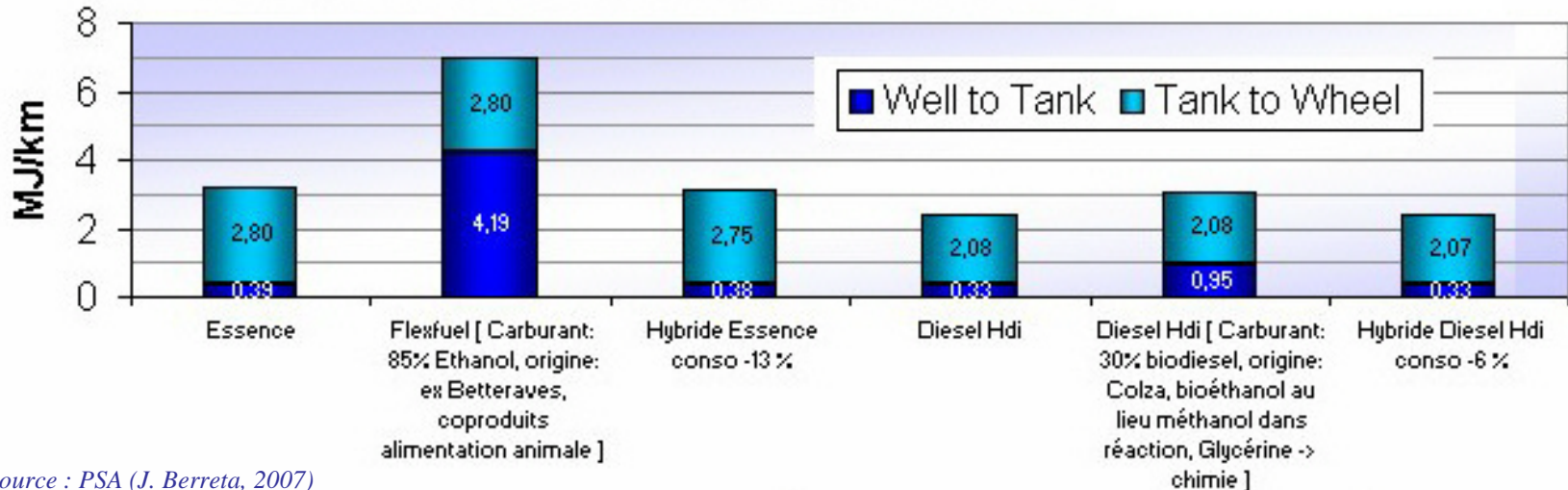
(well to wheel)

(en énergie globale consommée, en rejet de GES...)

Source primaire « Puits » (Well) → Energie embarquée primaire Réservoir (Tank) → Energie utile « À la roue » (Wheel)

Un exemple de présentation parmi d'autres :

Energie totale consommée pour parcourir 1km

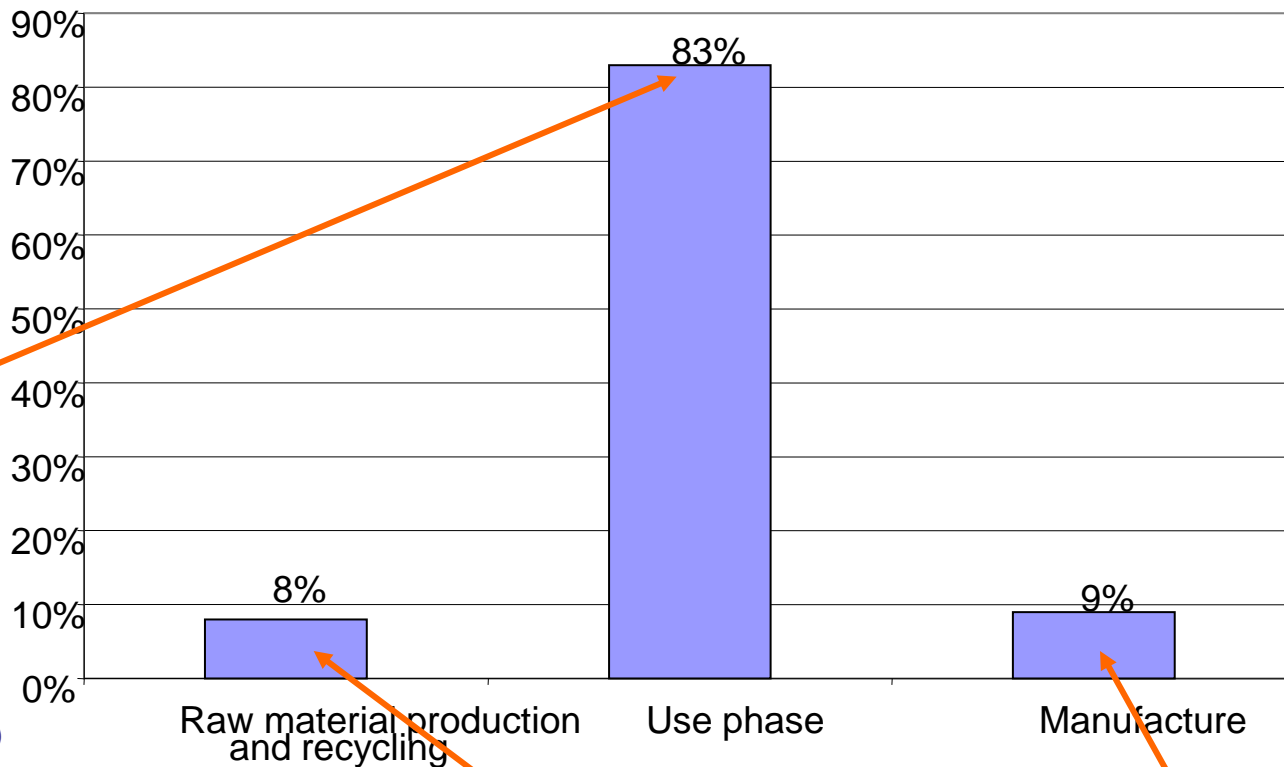


Source : PSA (J. Berreta, 2007)

Mais il manque encore les coûts énergétiques des investissements et du recyclage (« énergie grise ») pour minimiser la consommation d'énergie primaire sur l'ensemble du cycle de vie

# Un progrès : le raisonnement sur tout le cycle de vie

Énergie consommée pendant la vie d'une 406 HDI :



Vie de référence :  
150 000 km – 10 ans

5,6 L / 100 km

84 MWh<sub>PCI</sub>

Source : J. Beretta (PSA) 2007 (JEEA)

Dans cet exemple, la production de matière première et le recyclage ainsi que la fabrication coûtent respectivement 9,1 et 8,1 MWh<sub>PCI</sub> soit, pour ce véhicule de 1350 kg, environ **12 kWh<sub>PCI</sub>/kg**

**La part de l'énergie grise du véhicule doit être considérée.**

**La réduction de la consommation peut s'accompagner  
d'un accroissement de l'énergie grise (hybridation, aluminium...)**

# Conséquence de la « dématérialisation » via les systèmes informatiques et communicants ??

Extraits de : « The Energy and Emergy of the Internet »,  
Barath Raghavan and Justin Ma , Hotnets '11, November 14–15, 2011, Cambridge, MA, USA

## Energie grise et durée de vie

Category	Count	Weight		Per-unit energy	Total energy		Replacement timespan
		Min	Max		Min	Max	
Desktops	$750 \times 10^6$	0.5	0.95	7.5 GJ	$2,800 \times 10^6$ GJ	$5,300 \times 10^6$ GJ	4 years
Laptops	$750 \times 10^6$	0.75	1.0	4.5 GJ	$2,500 \times 10^6$ GJ	$3,400 \times 10^6$ GJ	3 years
Cloud	$50 \times 10^6$	0.8	1.0	5 GJ	$200 \times 10^6$ GJ	$250 \times 10^6$ GJ	3 years
Smartphones	$1,000 \times 10^6$	0.25	0.9	1 GJ	$250 \times 10^6$ GJ	$900 \times 10^6$ GJ	2 years
Servers	$100 \times 10^6$	0.5	0.95	5 GJ	$250 \times 10^6$ GJ	$480 \times 10^6$ GJ	3 years
Routers	$1 \times 10^6$	0.9	1.0	50 GJ	$45 \times 10^6$ GJ	$50 \times 10^6$ GJ	3 years
Wi-Fi/LAN	$100 \times 10^6$	0.75	1.0	1 GJ	$75 \times 10^6$ GJ	$100 \times 10^6$ GJ	3 years
Cell Towers	$5 \times 10^6$	0.1	0.5	100 GJ	$50 \times 10^6$ GJ	$250 \times 10^6$ GJ	10 years
Telecom Switches	$0.075 \times 10^6$	0	0.25	1000 GJ	0 GJ	$19 \times 10^6$ GJ	10 years
Fiber Optics	$1,500 \times 10^6$ km	0.5	0.9	10 GJ	$7,500 \times 10^6$ GJ	$13,500 \times 10^6$ GJ	10 years
Copper	$3,500 \times 10^6$ km	0.1	0.5	10 GJ	$3,500 \times 10^6$ GJ	$17,500 \times 10^6$ GJ	30 years

**Table 1: Census estimate of Internet devices and infrastructure, embodied energy (emergy), and replacement timespan.**

Exemple : 750 millions de PC de bureau représentent une énergie grise comprise entre 2800 et 5300  $10^6$  GJ

Soit en TWh ( $10^6$  GJ = 0,278 TWh) : entre 777 et 1470 TWh

Soit sur 4 ans avec 8760h/an, une **puissance moyenne** égale EG/(35040 heures) : 22,3 et 42,3 GW (voir page suivante)

Extraits de : « **The Energy and Emergy of the Internet** »,  
Barath Raghavan and Justin Ma , Hotnets '11, November 14–15, 2011, Cambridge, MA, USA

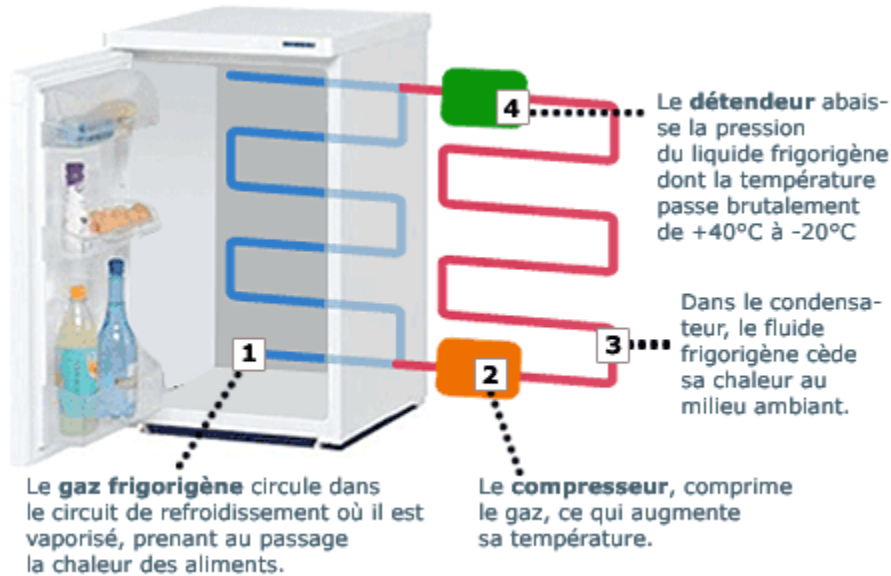
**Energie grise + énergie consommée sur durée d'usage => puissance moyenne**

Category	Wall-socket power	Wall-socket duty cycle	Total power (min)		Total power (max)	
			Wall-socket	Embodied	Wall-socket	Embodied
Desktops	150 W	0.5	28.1 GW	22.3 GW	53.4 GW	42.3 GW
Laptops	40 W	0.5	11.3 GW	26.7 GW	15.0 GW	35.6 GW
Cloud	450 W	1.0	18.0 GW	2.1 GW	22.5 GW	2.6 GW
Smartphones	1 W	0.5	0.13 GW	4.0 GW	0.45 GW	14.3 GW
Servers	375 W	1.0	18.8 GW	2.6 GW	35.6 GW	5.0 GW
Routers	5 kW	1.0	4.5 GW	0.48 GW	5.0 GW	0.53 GW
Wi-Fi/LAN	20 W	1.0	1.5 GW	0.80 GW	2.0 GW	1.1 GW
Cell Towers	3 kW	1.0	1.5 GW	0.16 GW	7.5 GW	0.80 GW
Telecom Switches	75 kW	1.0	0 GW	0 GW	1.4 GW	0.06 GW
Fiber Optics	0 W	0	0 GW	23.8 GW	0 GW	42.8 GW
Copper	0 W	0	0 GW	3.7 GW	0 GW	18.5 GW
<b>Total for Internet</b>			84 GW	87 GW	143 GW	164 GW
			<b>170 GW</b>		<b>307 GW</b>	

**Table 2: Wall-socket power and embodied power estimates for Internet devices and infrastructure. Embodied power is embodied energy divided by timespan (from Table 1). The total of wall-socket and embodied power for the Internet is given in the last row (with min and max bounds). Values are rounded.**

Exemple : 750 millions de PC de bureau consomment  $150 \text{ W} \times 0,5$  (moitié du temps) = 56 GW  
Mais attention, il s'agit de l'énergie électrique. Compte tenu du rednement de la production d'électricité, c'est environ 3 fois plus d'énergie primaire qui est consommée !

# Le réfrigérateur



Source : © L'Internaute Magazine

L'énergie grise dépend fortement de la taille du réfrigérateur, exemple :

Réfrigérateur	Durée de vie prévue : 18 ans	
Total	90.0 Kg	1658.47 KWh
Acier	58.5 Kg	710.13 KWh
Plastique	24.3 Kg	675.00 KWh
Cuivre	2.7 Kg	73.19 KWh
Aluminium	3.6 Kg	184.93 KWh
Peinture	900 g	12.97 KWh
Transport	13.904 Km	86.90 KWh
Élimination		2.25 KWh

[http://labo-energetic.eu/fr/a\\_telecharger/rapports\\_activites\\_partenaires\\_4\\_e.htm](http://labo-energetic.eu/fr/a_telecharger/rapports_activites_partenaires_4_e.htm)

Sa consommation d'énergie en usage dépend de sa taille,  
des usages (ouvertures, température des aliments à refroidir, entretien....),  
de la température ambiante,  
et des performances techniques (efficacité du groupe de froid, niveau d'isolation...).

En considérant tout le cycle de vie, il existe un optimum pour remplacer un réfrigérateur  
(et d'une façon générale, tout produit consommant de l'énergie)

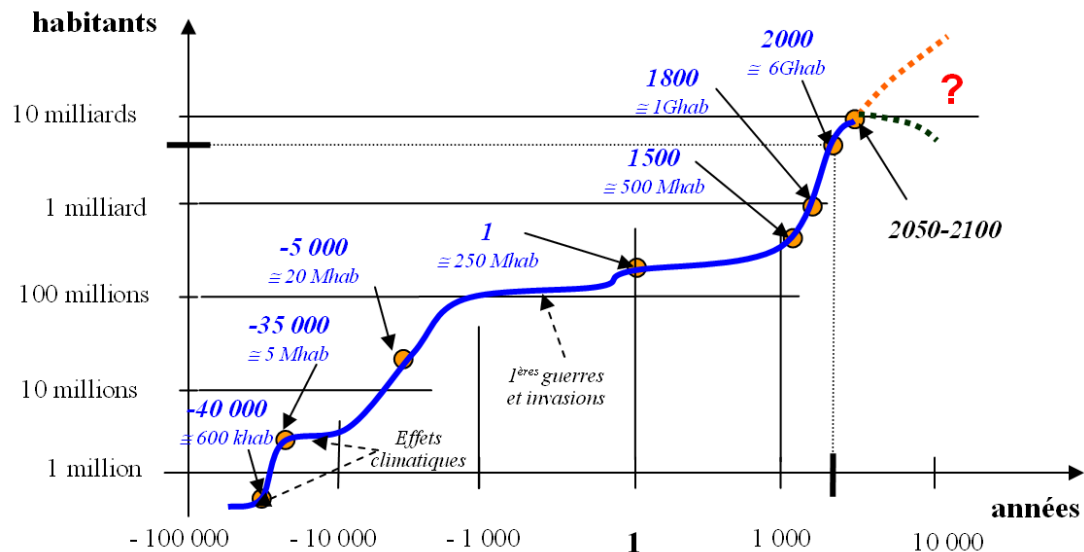
Voir :

[Optimal household refrigerator replacement policy for life cycle energy, greenhouse gas emissions, and cost](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421505001126)  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421505001126>



**Compléments  
développement humanité  
et électricité renouvelable**

# Evolution la population humaine sur la terre:



# Consommation énergétique des activités humaines :

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

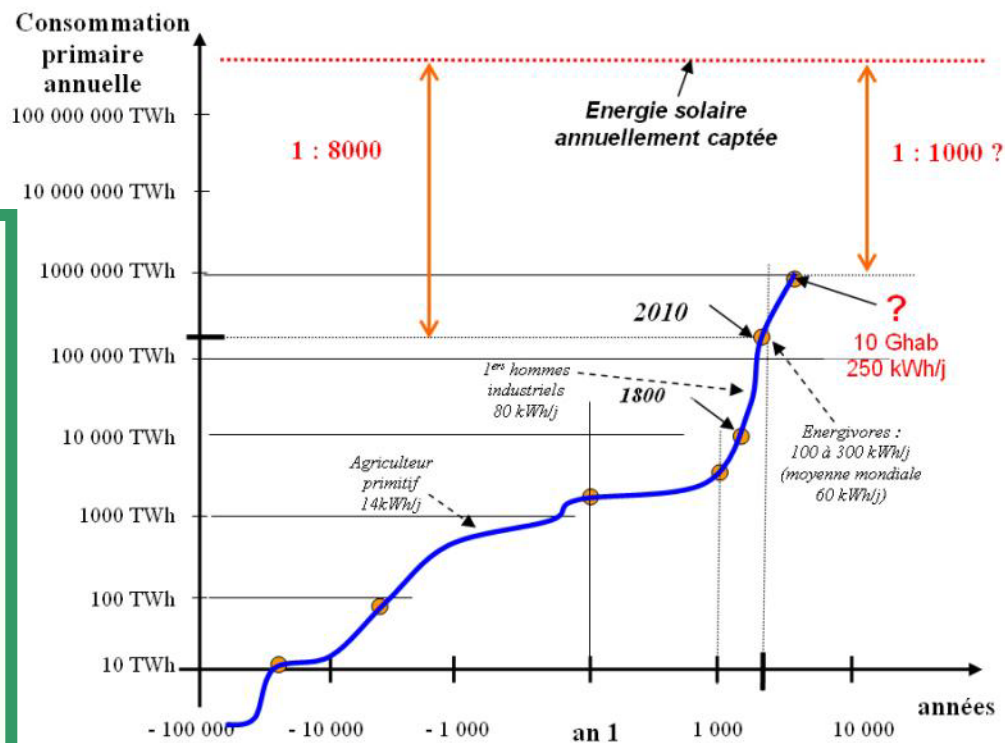
**Autres activités énergétiques :**  
(énergie commerciale, hors biens importés)

Moyenne monde : 60 kWh/j

Africain : 14 kWh/j

Américain US : 270 kWh/j

Français : 140 kWh/j



# Potentiel des **Ressources Renouvelables** « interceptables » : plus de 8000 fois la consommation humaine !

Avec un rendement global (arbitraire) de 10% de conversion 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)

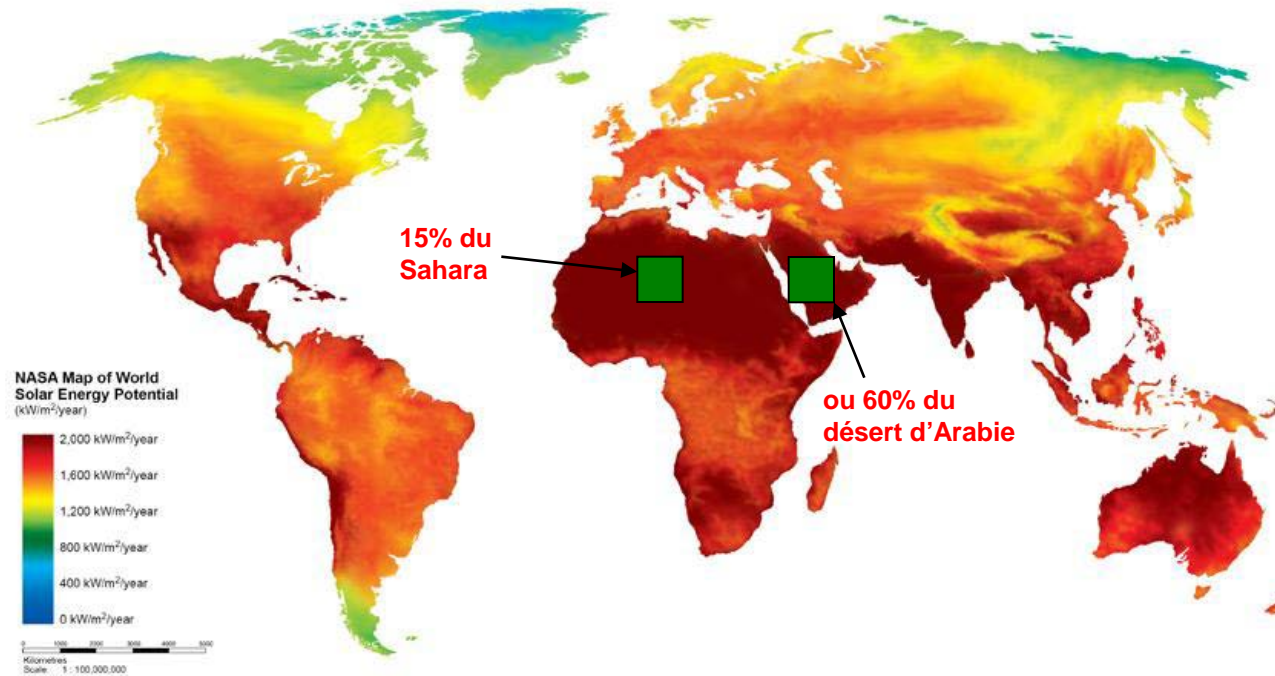
$$2200 \text{ kW/m}^2 \times 10\% = 220 \text{ kWh/m}^2$$

**300 000 TWh/an**

(3 fois plus qu'aujourd'hui)

→ **1,4 millions km<sup>2</sup>**  
(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**



# 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 :  
transports ??

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...)

L'idée fait son chemin : Allemagne pour 2050, en France (Négawatt)  
(mais aussi Europe + Afrique du Nord)

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

# Alors, comment résoudre ce problème ?

En mettant à profit au maximum l'hydroélectricité,  
en gérant au mieux les barrages.

En accroissant les capacités de **stockage** (réversible) 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 plus des barrages)

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

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

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

# Electricité : projections européennes pour 2020

Sur 3700 TWh électriques en 2020 : 31% renouvelables

(en 2010 : 632 sur 3400 TWh soit 18,6%)

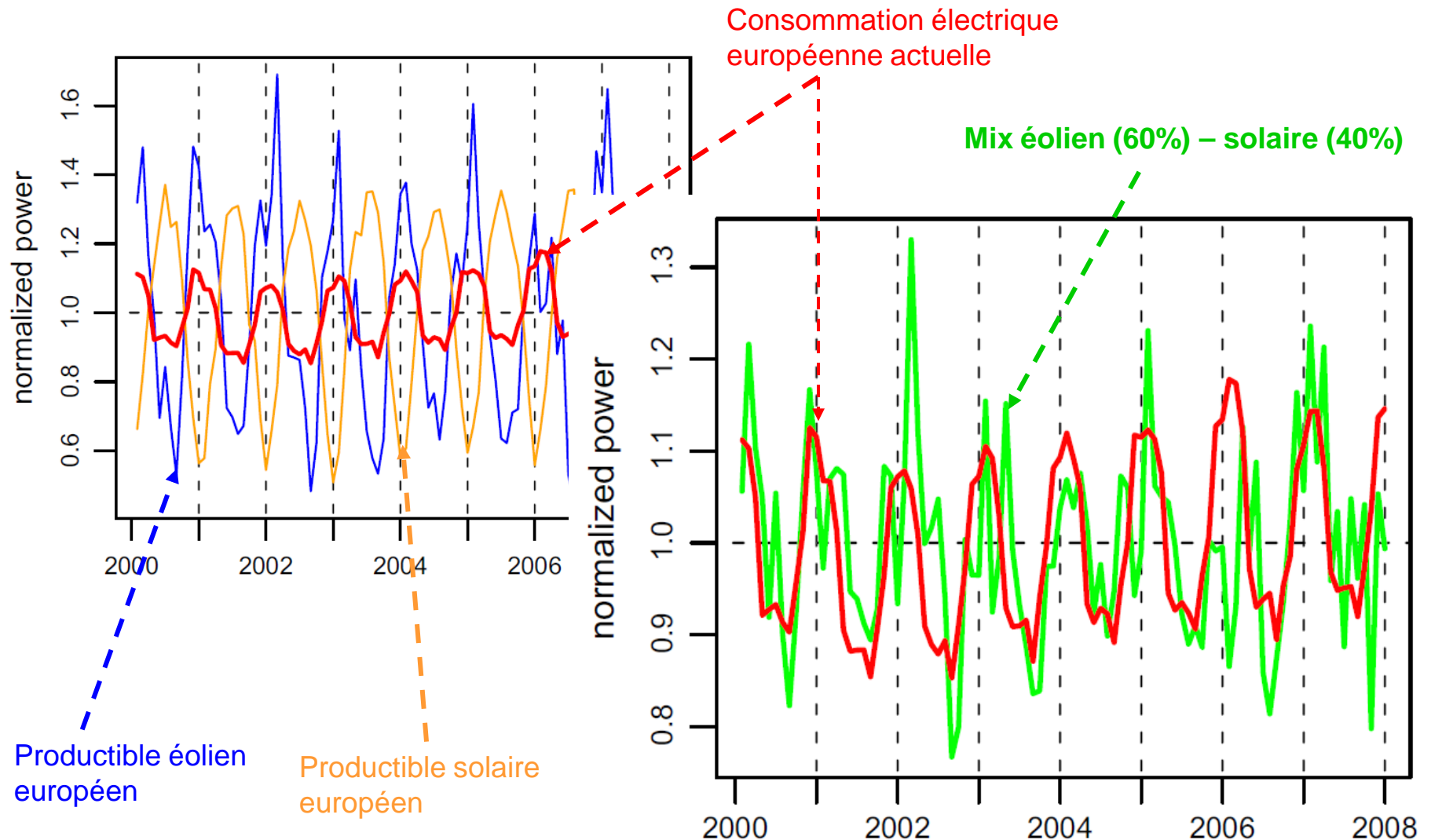
Renewables in the 23 Member States are projected to account for over 1150 TWh of electricity generation, with about 50% of it from variable sources (Table 2).

RES type	Generation 2010 (TWh)	Generation 2020 (TWh)	Share 2020 (%)
Hydro	342.1	364.7	32%
Wind	160.2	465.8	40%
Biomass	103.1	203	18%
Solar	21	102	9%
Other	6.5	16.4	1%
<b>TOTAL</b>	<b>632.9</b>	<b>1151.9</b>	<b>100%</b>

Table 2: Projected evolution of renewables electricity generation in GW, 2010-2020

Source : Energy Infrastructure - priorities for 2020 and beyond - A Blueprint for an integrated European energy network, Directorate General for Energy, European Union, report 2011.

# Complémentarité des ressources à l'échelle de l'Europe



Source : D. HEIDE et al. « Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future, highly renewable Europe », *Renew. Energy*, Elsevier 2010.

# France : électricité 100% renouvelable

## Exemple de chiffrage économique simplifié

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

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

Restent 380 TWh (les coûts spécifiques sont des évaluations tenant compte des tendances actuelles) :

- 50% éolien (on et offshore) 190 TWh (90 GW x 1,5 €/W = 135 G€)
- 40 % solaire (PV + CSP) 152 TWh (142 GW x 2 €/W = 284 G€)
- 10% biogaz et biomasse 38 TWh (6 GW x 1,5 €/W = 9 G€)
- stockage : 10 TWh ? – 50 GW ? (80 G€ ??)

**Total : 510 G€**  
(en 40 ans : 0,7% PIB)

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

sur la base d'une durée de vie de 20 ans : 5,6 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 ??)