

**Bruz, campus de Ker Lann
16 janvier 2013**

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



**Mini-cours :
Énergie et électricité**

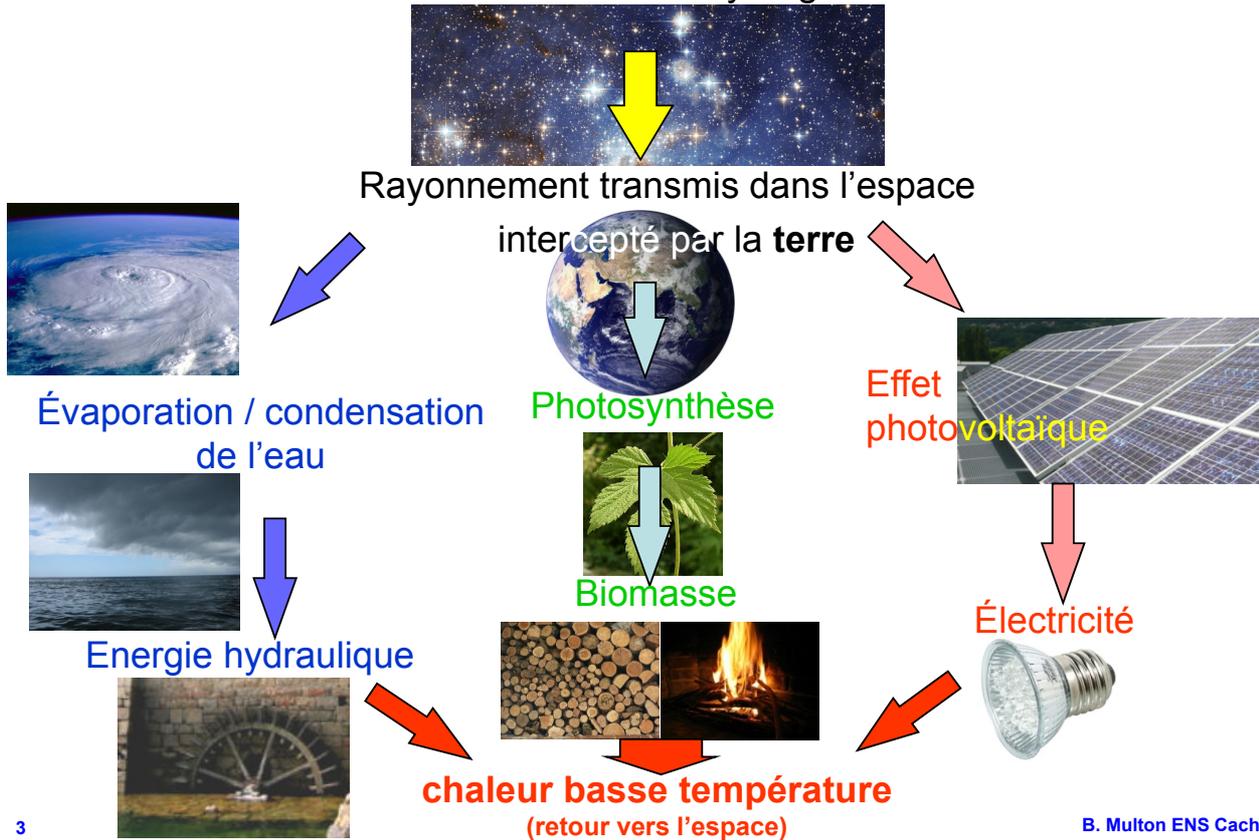


**L'énergie,
un concept physique unifié
pour décrire les transformations
du monde**

**L'énergie nourrit la « matière vivante »
et constitue la base du métabolisme
des sociétés humaines**

« Cycles de vie » de l'énergie : exemples

Réactions nucléaires de fusion d'hydrogène dans les étoiles



Principales manifestations de l'énergie

Travail mécanique



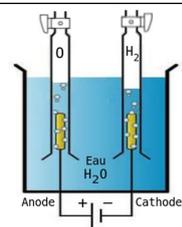
Chaleur



Rayonnements électromagnétiques



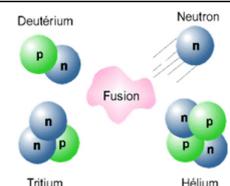
Réaction chimiques (à l'échelle des liaisons moléculaires)



Électricité



Désintégration de noyaux atomiques fission, fusion...



L'énergie est caractérisée par :
 ses possibilités de transformation plus ou moins bien réversibles,
 les équivalences entre ses différentes formes

Unités physiques de l'énergie et équivalences

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

Autres unités :

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

1 kWh = 3,6 MJ
1 TWh = 1 milliard kWh
1 tep \cong 11 600 kWh
1 Mtep \cong 11,6 TWh

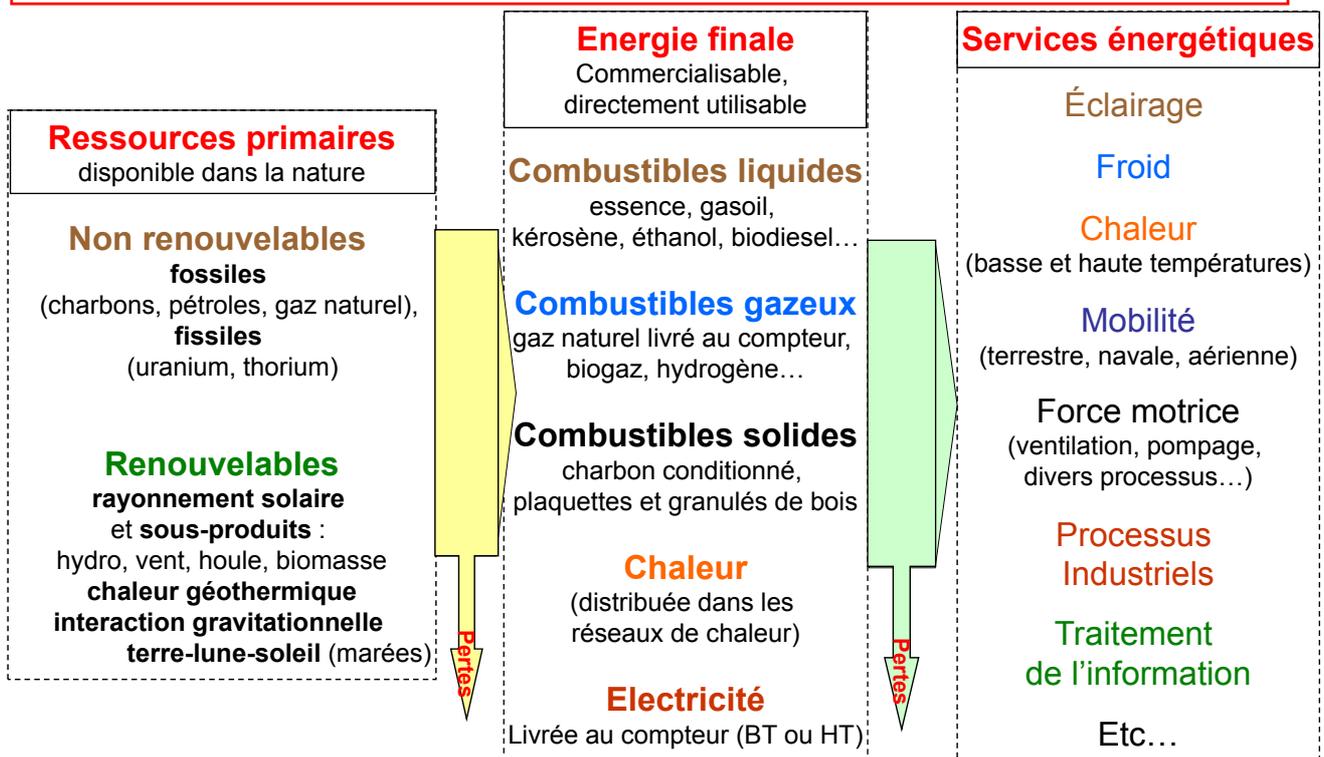
Quelques ordres de grandeur de transformation

- 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 classique : 1 tep ou 12 000 kWh
- production annuelle d'électricité d'une éolienne terrestre : 4 millions de kWh
- consommation mondiale de ressources énergétiques : 12 Gtep (milliards de tep)

5

B. Multon ENS Cachan

Des ressources primaires aux services énergétiques



Un bilan global très médiocre pour cause de faible efficacité, plus de la moitié des ressources primaires non renouvelables sont gaspillées.

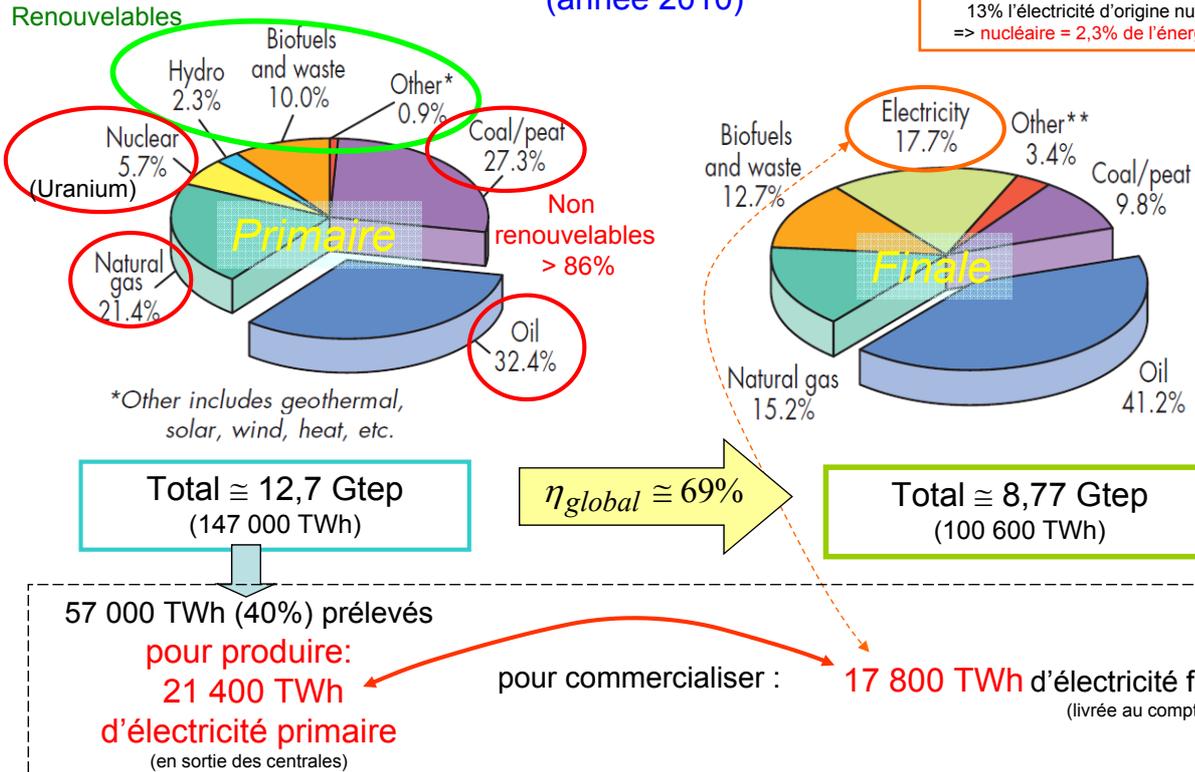
6

B. Multon ENS Cachan

Bilan énergétique mondial : décryptage et place de l'électricité

(année 2010)

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



Source des données AIE (Key World Energy Stat. 2012)

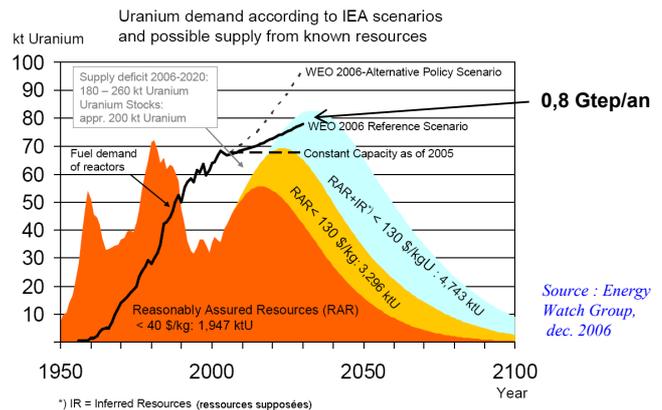
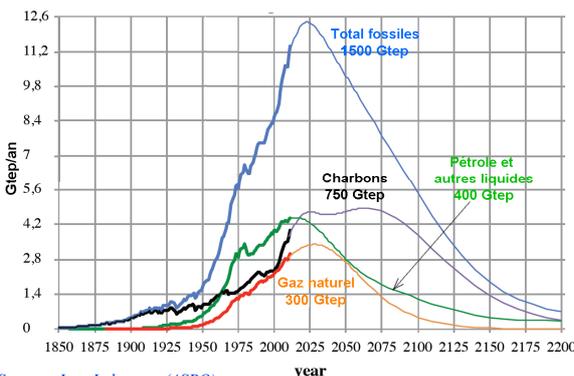
B. Multon ENS Cachan

Ressources et réserves 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 < 60 Gtep)

Si les réserves ont pu croître dans le passé, les ressources sont limitées...
et les coûts d'extraction vont en croissant



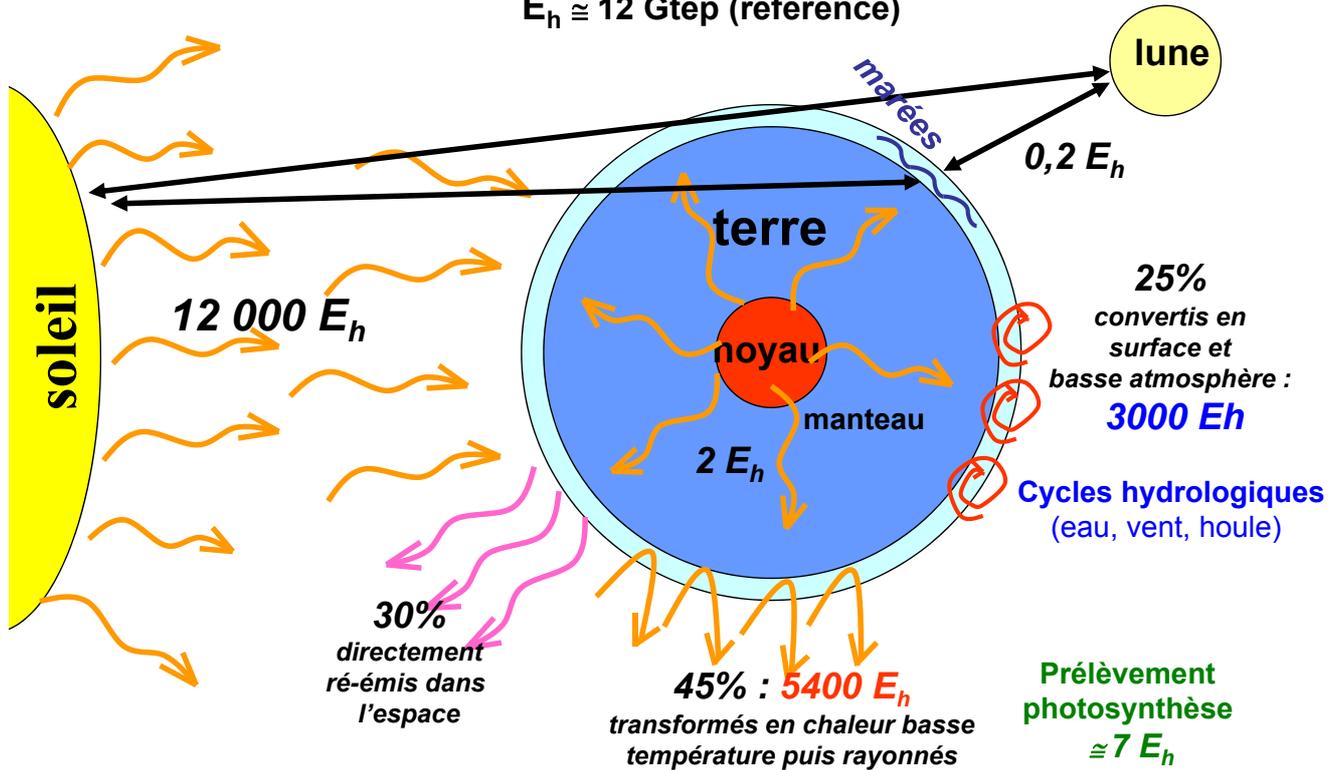
Rayonnement solaire au sol : 100 000 Gtep... par an !

B. Multon ENS Cachan

Ressources renouvelables (chiffres annuels)

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

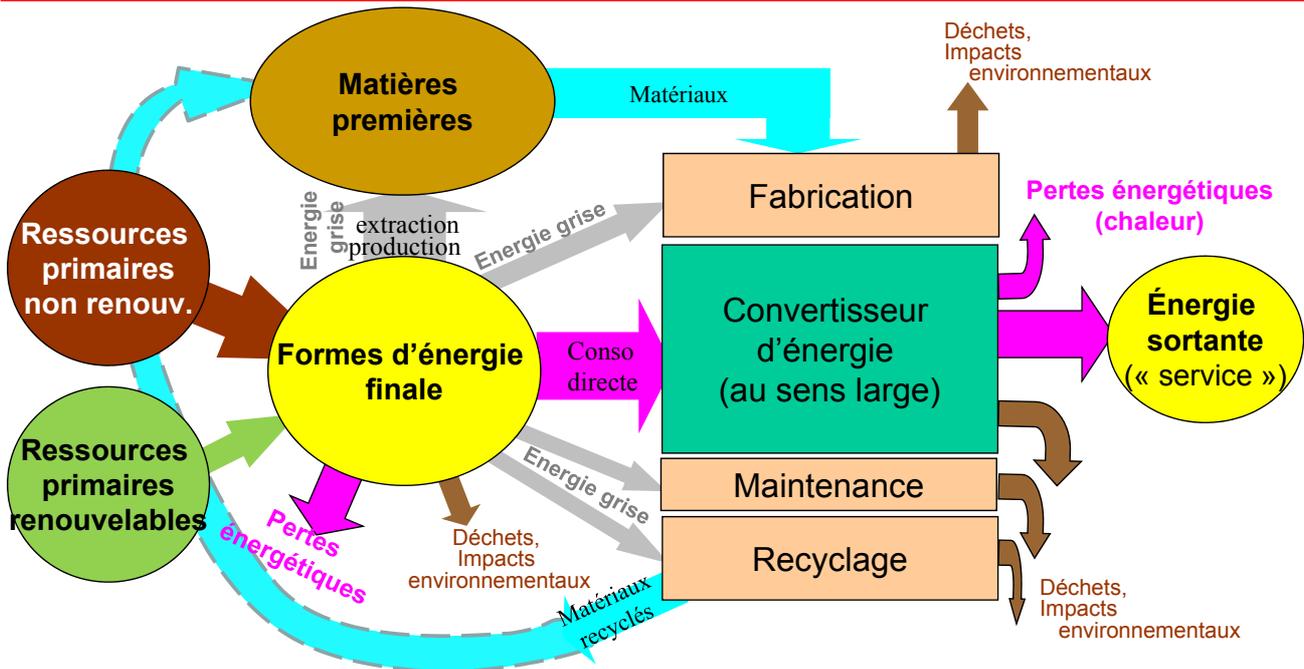
$E_h \cong 12 \text{ Gtep}$ (référence)



9

B. Multon ENS Cachan

Dépense énergétique sur cycle de vie pour rendre un service : prise en compte du rendement de conversion et de l'énergie grise



En termes de DD, la grandeur la plus importante est la quantité totale d'énergie primaire non renouvelable consommée et les déchets associés sur la vie du convertisseur pour réaliser le service attendu

10

B. Multon ENS Cachan

L'électricité

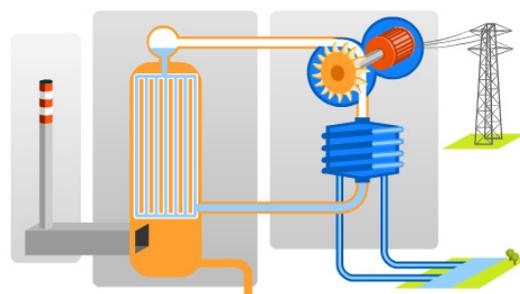


Comment produit-on de l'électricité ?

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

80% de l'électricité mondiale actuelle

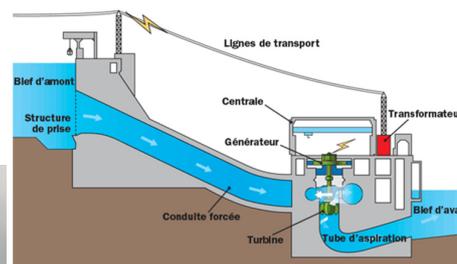
- turbines à vapeur (chaudière + turbine)
(charbon, gaz, pétrole : combustions
uranium : fission)
- turbines et moteurs à combustion
(gaz, fuel)



Mais aussi **à partir de ressources renouvelables**

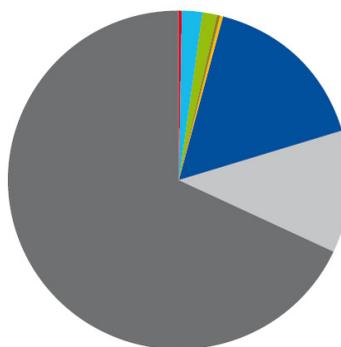
Près de 20% de l'électricité mondiale actuelle

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



Origine de la production mondiale d'électricité (2011)

22 000 TWh



■ Géothermie 0,3 %
■ Éolien 2,1 %
■ Biomasse 1,3 %
■ Solaire 0,3 %
■ Hydraulique 16,3 %
■ Déchets non renouvelables 0,2 %
■ Nucléaire 11,7 %
■ Fossile 67,9 %

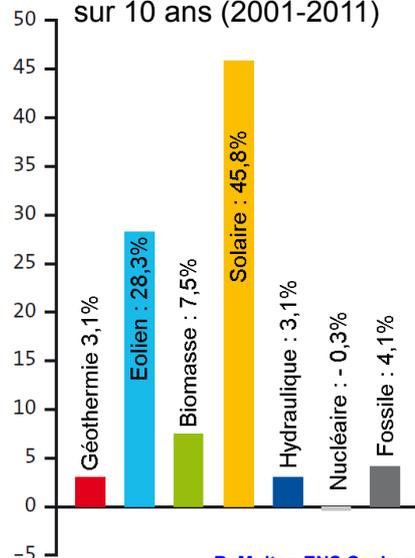
20,2 % d'origine renouvelable :
+ 4,5% par an sur 10 ans

Électricité d'origine non renouvelable :
+ 3,5% par an sur 10 ans

Source : La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde Observ'ER 2012

Charbon : > 40%
Gaz : > 22%
Pétrole ≃ 5%

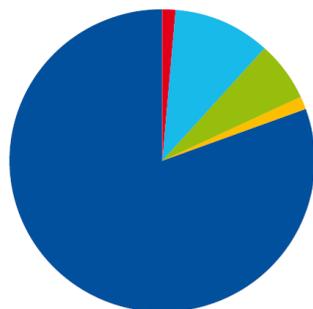
Evolution moyenne en % par an sur 10 ans (2001-2011)



En outre, la part de l'électricité (énergie finale) croit :
< 3% en 1940 - 17,7% en 2010 - 24% en 2040 ?

Origine de la production mondiale électrique issue de ressources renouvelables (2011)

Renouvelables 20,2% ≃ 4450 TWh



■ Géothermie 1,6 %
■ Éolien 10,3 %
■ Biomasse 6,2 %
■ Solaire 1,4 %
■ Hydraulique 80,5 %

Une extrapolation de la progression qui montre les effets de l'effort mondial :

Avec + 20% par an pendant 9 ans (+28% sur 2001/2011),
puis + 10% par an pendant 10 ans :
la production éolienne atteindrait : 6100 TWh en 2030

Avec + 30% par an pendant 9 ans (+46% sur 2001/2011),
puis + 20% par an pendant 10 ans :
la production solaire atteindrait 4070 TWh en 2030

En 2030 :
4000 TWh hydrauliques
+ 6100 TWh éoliens + 4000 TWh solaires
+ 400 TWh biomasse + 200 TWh géothermiques
TOTAL : 14 700 TWh soit 49%
sur un total de 30 000 TWh



En 2050 :
100% renouvelable tout à fait réalisable

Source : La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde Observ'ER 2012

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

Photovoltaïque en toiture

Pour une durée de vie de 20 à 30 ans



Technologie/ Rendement/ Energie grise	Nord Europe 900 heures _{EPP} par an	Sud Europe 1700 heures _{EPP} par an
Silicium cristallin / 14% / 5,8 kWh / Wp	4,6 ans	2,4 ans
Silicium couches minces 9% / 3,8 kWh / Wp	3 ans	1,6 ans

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

Grand éolien terrestre

Pour une durée de vie de 20 ans



Source image : Gamesa

Exemple : éolienne Gamesa G8X (2 MW – 80 m)

Énergie grise (tout compris sur 20 ans) : **1,6 GWh**

Sur site normalement venté : 2000 h_{EPP}/an => **0,4 année**
 site très bien venté : 2700 h_{EPP}/an => **0,33 année**

Source : E. Martinez et al., "Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine", Elsevier Ren. Energy 2009

B. Multon ENS Cachan

15

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

Solaire photovoltaïque



Méthaniseur + cogénérateurs



Houlogénérateurs

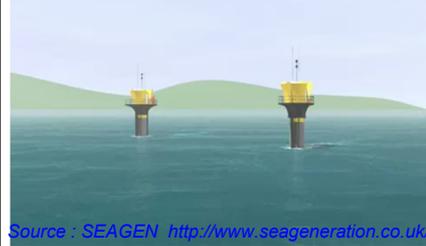


Source : <http://www.pelamiswave.com/>

Solaire thermodynamique à concentration



Hydroliennes



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

Et bien d'autres pour la stocker...

16

B. Multon ENS Cachan



Pollutions associées aux transformations énergétiques

17

B. Multon ENS Cachan

Emissions polluantes : indicateurs agrégés

- **Globales** (affectent l'ensemble de la planète) :
 - gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O ...) comptées en **équivalent CO_2**
 - destruction de la couche d'ozone (CFC) en **équiv. CFC-11**
 - émissions radio-actives (essais militaires, extraction minière, rejets industriels, déchets, accidents...) **en Bq**
- **Locales** (affectent la santé humaine, les écosystèmes...) :
 - émissions de gaz toxiques (NO_x , soufre...)
 - eutrophisation de l'eau (nitrates) en **équiv. ions $\text{PO}_3\text{-/4}$**
 - cancérogènes (particules fines, COV et polluants chimiques, radioactifs...)
 - ...

Attention aux raisonnements trop simplistes, notamment mono-critères, qui conduisent à promouvoir de fausses bonnes solutions...

Emissions de CO₂ associées à la combustion de combustibles fossiles

Les combustibles fossiles contribuent à près de 60%
des émissions anthropiques de gaz à effet de serre.

Combustible	Emission de CO ₂ relative à la valeur énergétique chaleur, en gCO₂/kWh
Charbon (anthracite)	350
Fuel domestique	280
Gaz naturel	200

Mais attention, ces valeurs correspondent à **la seule phase de combustion...**
Il faut également considérer les **autres émissions** :

- à l'extraction (fuites de méthane etc...)
- associées à l'énergie grise (extraction, conversions...)

**Les émissions sur cycle de vie associées sont souvent bien plus élevées.
Le bilan est particulièrement mauvais avec les gaz de schistes...**

Rejets issus de l'exploitation des ressources renouvelables

Rejets surtout associés à l'utilisation de ressources non renouvelables
pour la fabrication (**énergie grise**) des convertisseurs d'énergie

Même fabriqué en Chine (forte proportion de charbon),
un **système photovoltaïque** émettra, sur sa vie,
moins de gaz à effet de serre ou de radiations ionisantes
que toute autre solution conventionnelle électrique.

Cas des **grands barrages hydrauliques** :
inonder de vastes superficies végétalisées peut conduire
à des émissions de GES élevées (cas des forêts tropicales)

Biomasse solide et liquide (« biofuels ») :
le carbone s'inscrit dans des cycles naturels,
ce sont les apports externes et les usages des sols
qui conduisent éventuellement à un excès d'émissions de GES

La **combustion de la biomasse** peut émettre d'autres polluants similaires à
ceux associés aux combustibles fossiles : NO_x, COV, particules fines...

Emissions de CO₂ associées à la production d'électricité

Obtenir **1 kWh de chaleur** à partir de **gaz naturel** rejette environ :
(juste à la combustion) **200 g CO₂**

Produire **1 kWh d'électricité** avec un rendement de 60% (le plus élevé)
il faut 1,7 kWh de chaleur → rejets de **340 g CO₂**

Avec le **charbon**, on peut dépasser : **1 kg CO₂/kWh**

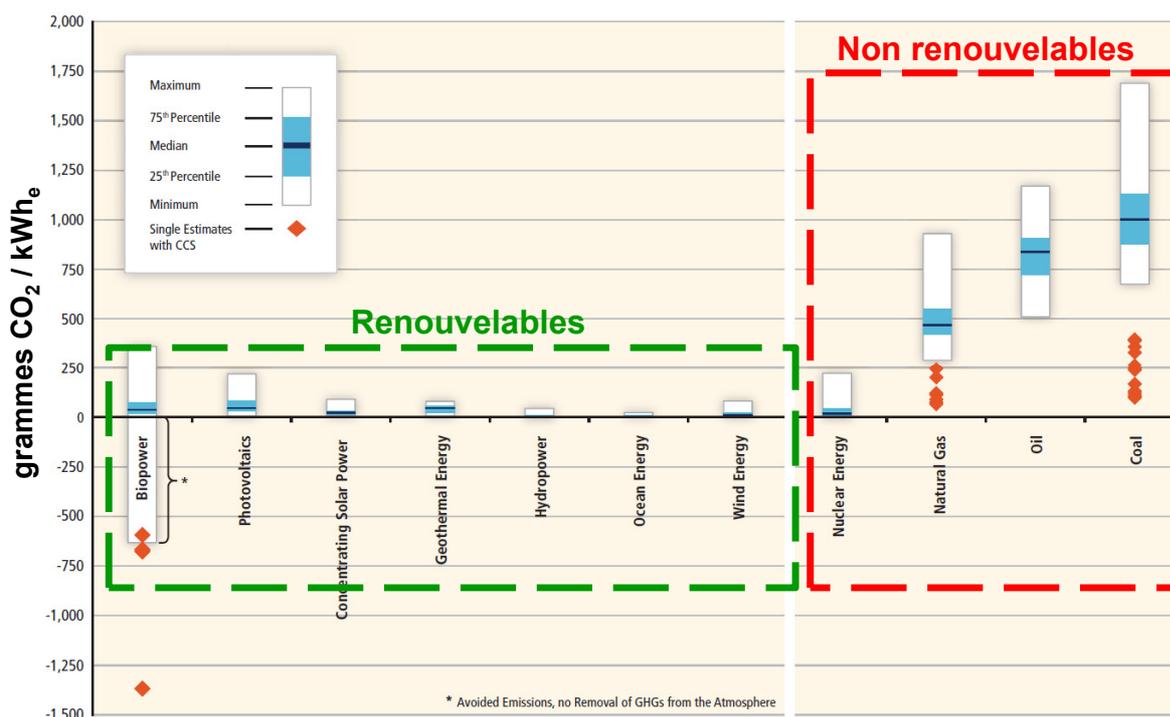
En France, 1 kWh **nucléaire** rejette 6 g CO₂
(pour une moyenne mondiale nucléaire de 60 g)

Et la **moyenne française** des émissions est d'environ **90 g CO₂ par kWh**
Mais les émissions associées **aux pointes de consommation**
(chauffage électrique notamment) sont très élevées

21

B. Multon ENS Cachan

Bilan des émissions de GES sur cycle de vie dues à la production d'électricité



Source : IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2011
Ch. 9 : Renewable Energy in the Context of Sustainable Development

22

B. Multon ENS Cachan



L'essentiel des activités énergétiques ne sont pas soutenables et pèsent très lourd en termes environnementaux

Contrairement aux fossiles et aux fissiles, **les renouvelables ne s'épuisent pas**.
Leurs usages ont la possibilité de s'inscrire dans les cycles naturels,
ils évitent de conduire à des dégradations irréversibles et
leurs **impacts environnementaux**, à de rares exceptions près,
sont **bien moindres**.

Plus élevée sera la part des renouvelables dans le mix énergétique,
plus faibles seront les impacts globaux.

Les principes physiques et les technologies de conversion existent
et sont maîtrisés, **c'est la voie du moindre risque pour le futur**.

L'optimum en termes d'économie globale consiste à :

- prélever, à terme, la totalité de nos besoins énergétiques sur les ressources primaires renouvelables
- minimiser nos consommations finales.

Tout cela semble envisageable à un horizon relativement court : 2050



Merci de votre attention ! Questions ?

Source : Apollo 11, Nasa

B. Multon ENS Cachan

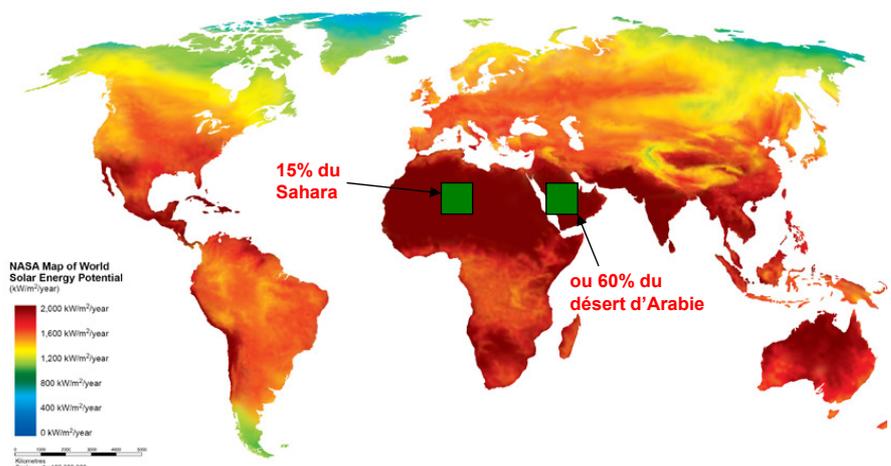
Potentiel des **Ressources Renouvelables** « interceptables » :
plus de 8000 fois la consommation humaine !

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

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

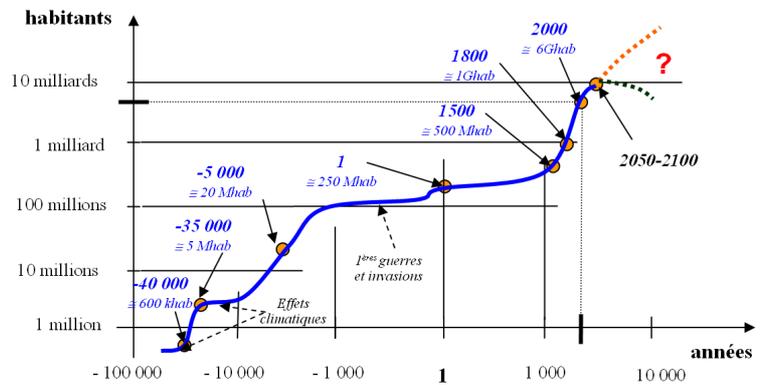
300 000 TWh/an
(3 fois plus qu'aujourd'hui)
⇒ **1,4 millions km²**
(1200 km x 1200 km)

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

Evolution la population humaine sur la terre:



Consommation énergétique des activités humaines :

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

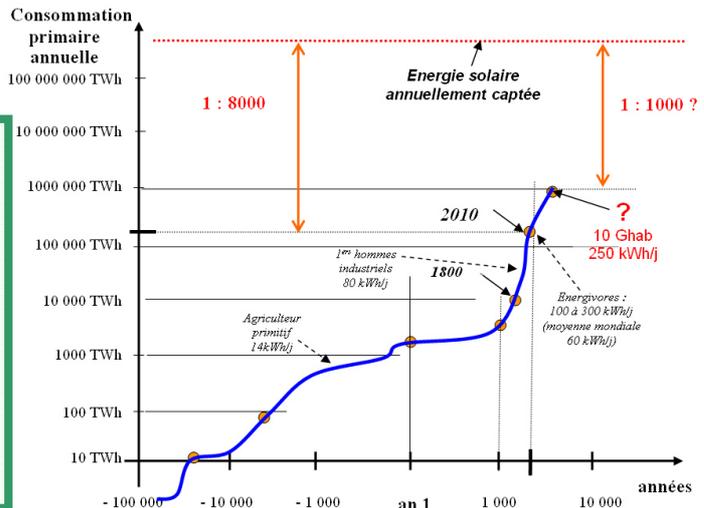
Autres activités énergétiques :
(énergie commerciale, hors biens importés)

Moyenne monde : 60 kWh/j

Africain : 14 kWh/j

Américain US : 270 kWh/j

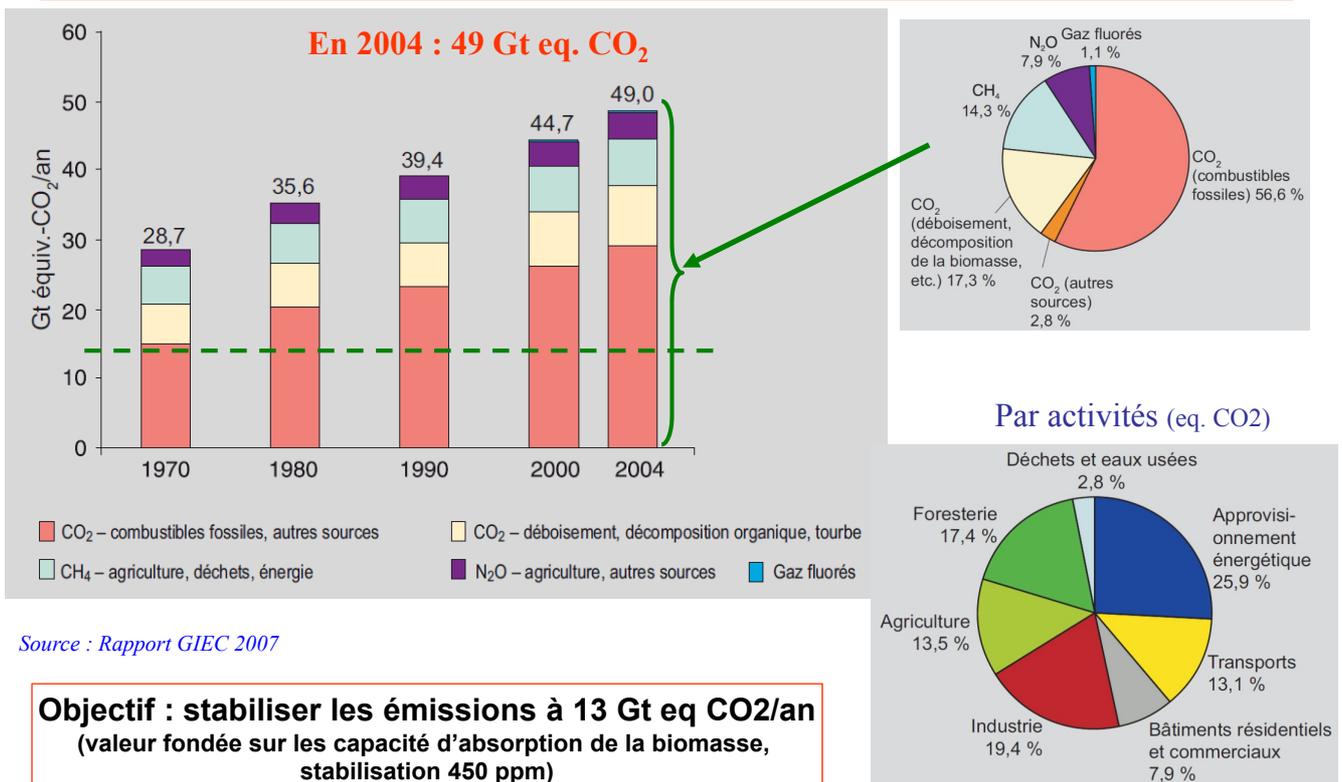
Français : 140 kWh/j



B. Multon ENS Cachan

27

Emissions mondiales de gaz à effet de serre d'origine anthropique

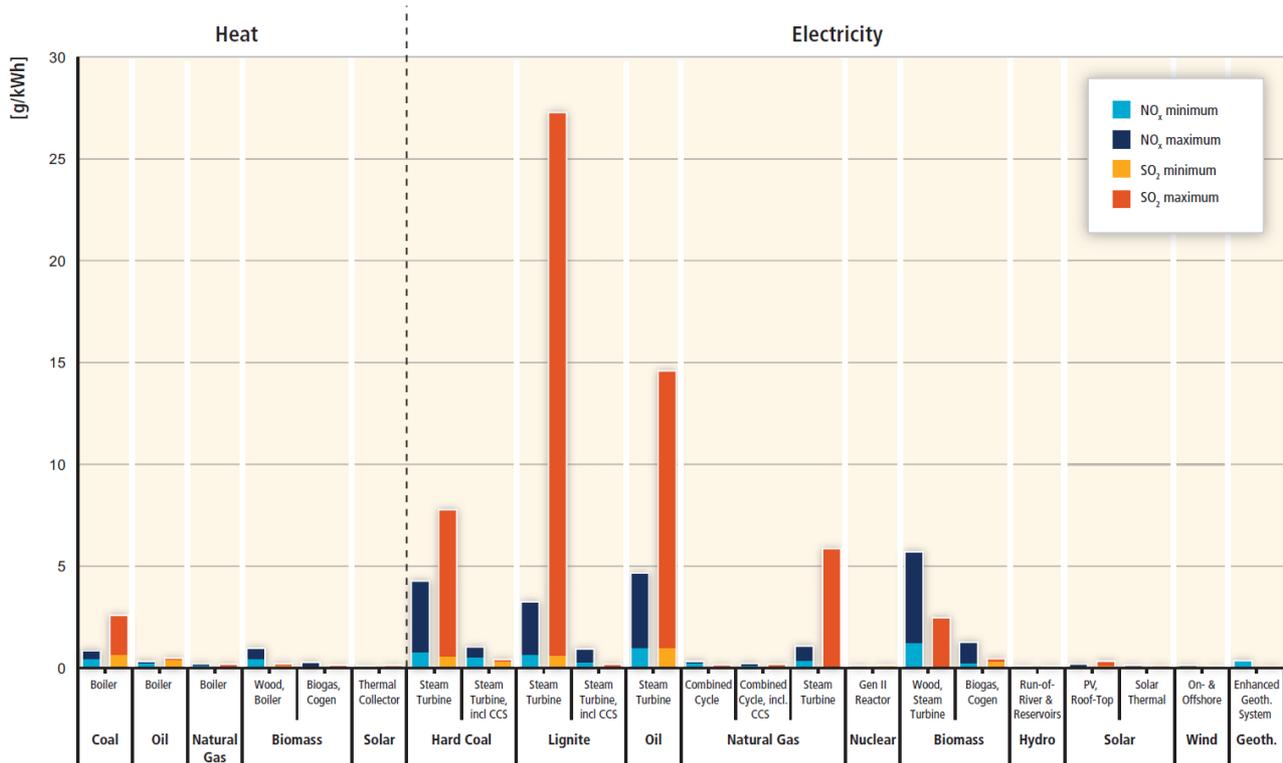


Source : Rapport GIEC 2007

B. Multon ENS Cachan

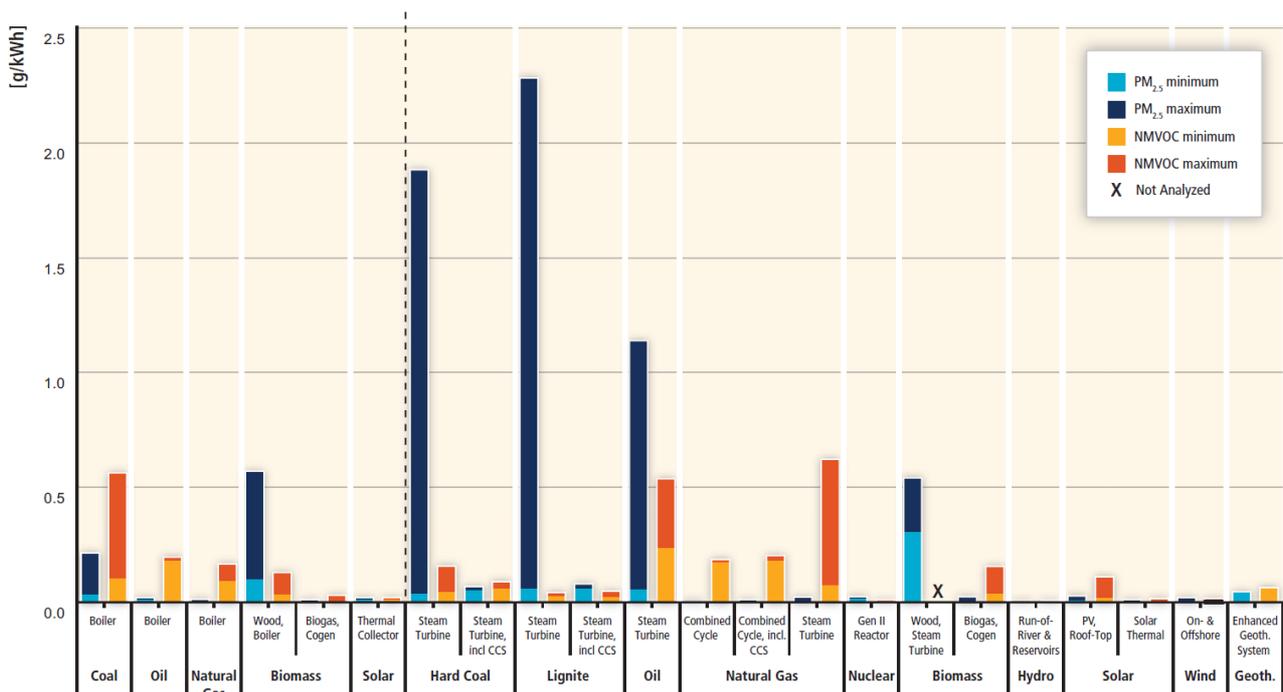
28

Bilan des émissions de NO_x et SO_2 en g/kWh sur cycle de vie pour la production de **chaleur** et d'**électricité**



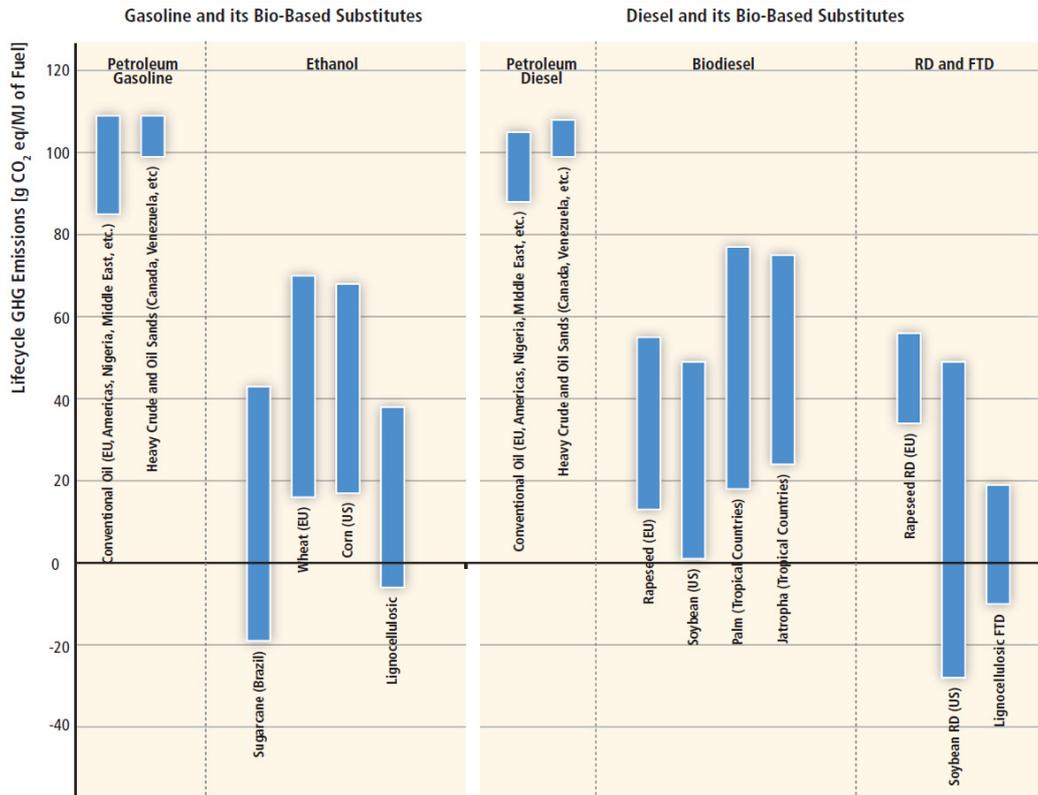
Source : IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2011
Ch. 9 : Renewable Energy in the Context of Sustainable Development

Bilan des émissions de particules fines et de COV en g/kWh sur cycle de vie pour la production de **chaleur** et d'**électricité**



Source : IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2011
Ch. 9 : Renewable Energy in the Context of Sustainable Development

Bilan des émissions de GES sur cycle de vie en gCO₂/MJ pour la production de carburants

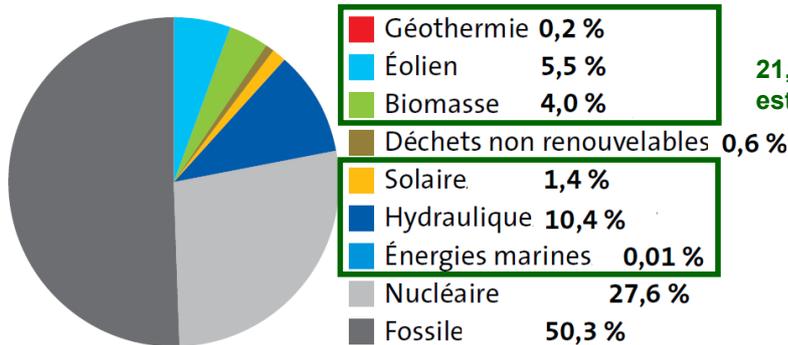


Source : IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2011
Ch. 9 : Renewable Energy in the Context of Sustainable Development



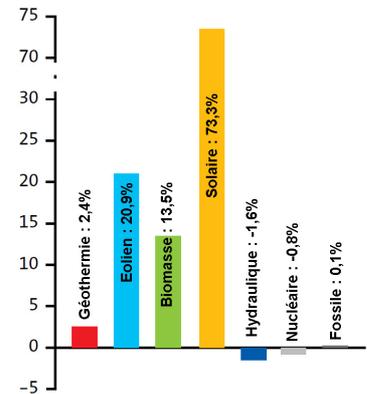
Production électrique Union Européenne en 2011

Production totale : **3 277 TWh**



(-2% / 2010
+0,5%/an moyenne 10 ans)
21,5 de l'électricité européenne est d'origine renouvelable (20,9 % en 2010)

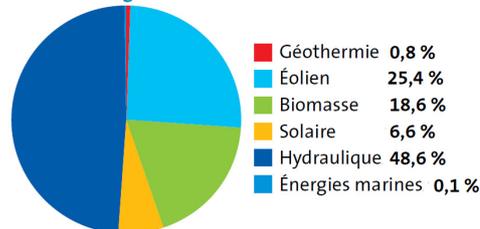
Taux de croissance annuel moyen 2001-2011



Renouvelable **705 TWh**

(+0,6 / 2010
+ 4,6%/an moyenne 10 ans)

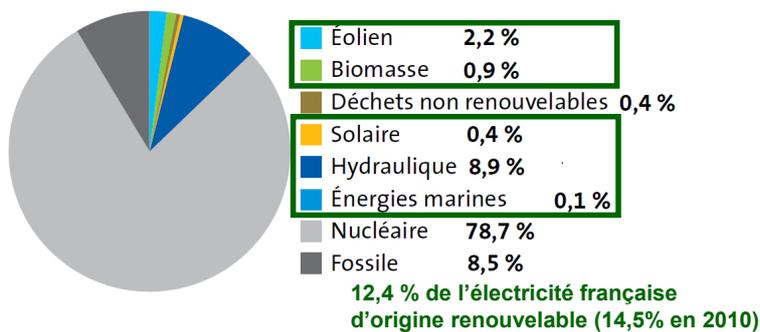
Structure de la production électrique d'origine renouvelable – 2011



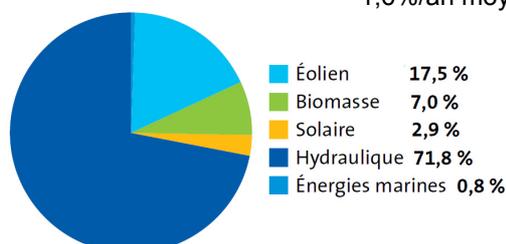
Source :
La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde
Observ'ER 2012

Production électrique France en 2011

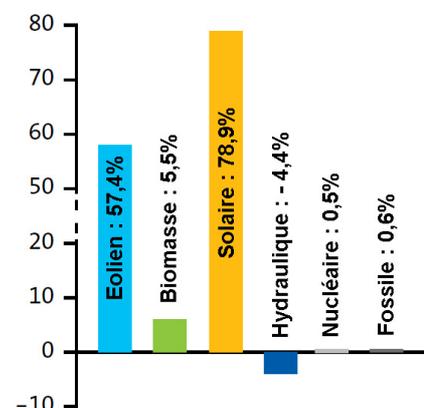
Production totale : **562 TWh** (- 1,2 % / 2010
+ 0,2%/an moyenne 10 ans)



Renouvelable : **69,8TWh** (-15,5% / 2010
-1,6%/an moyenne 10 ans)



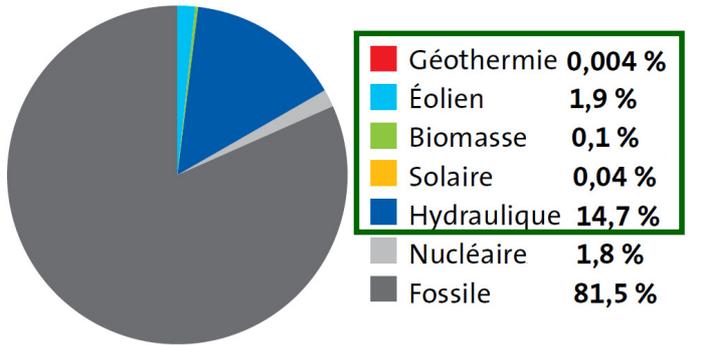
Taux de croissance annuel moyen 2001-2011



Source :
La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde
Observ'ER 2012

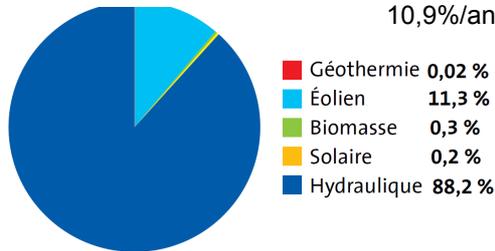
Production électrique Chine en 2011

Production totale : **4709 TWh** (+ 12,3 % / 2010
+ 12,3%/an moyenne 10 ans)

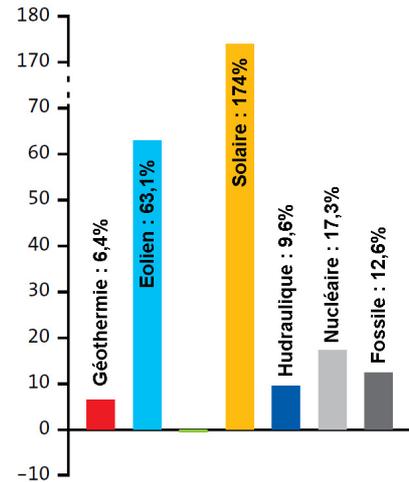


16,7 % de l'électricité chinoise d'origine renouvelable

Renouvelable : **69,8 TWh** (0,9% / 2010
10,9%/an moyenne 10 ans)



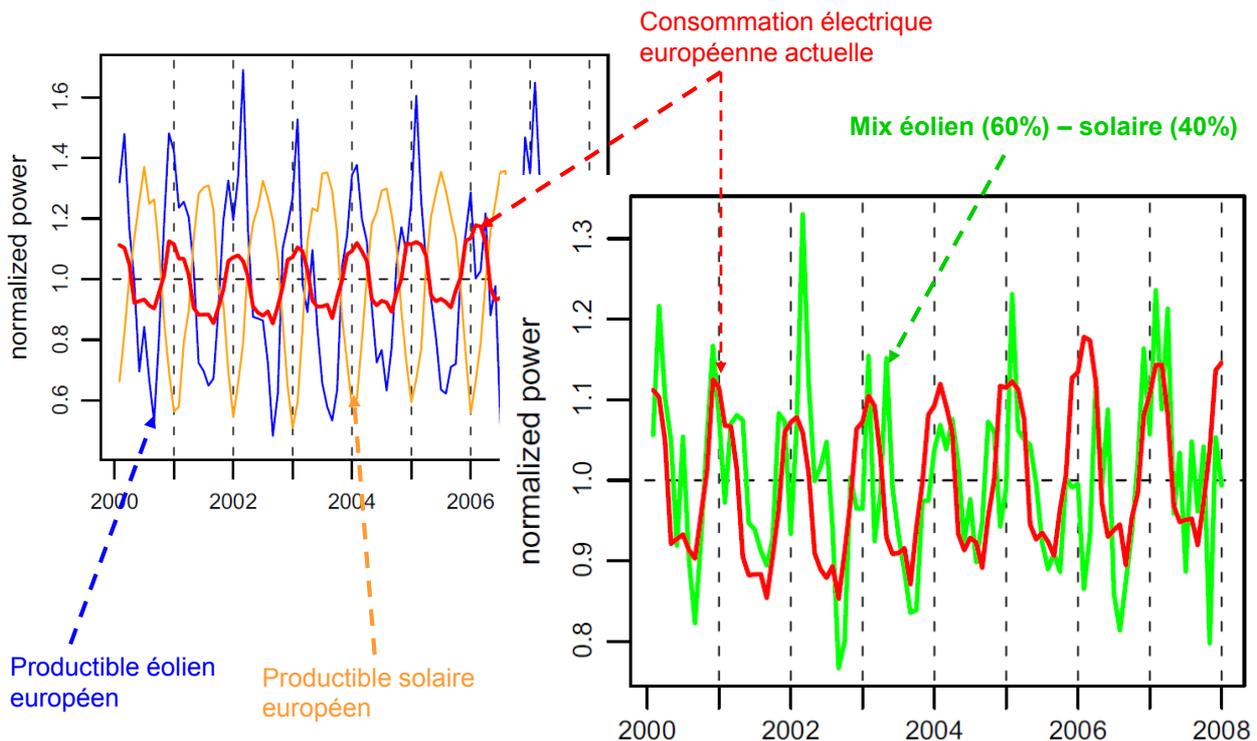
Taux de croissance annuel moyen 2001-2011



Source :
La production d'électricité
d'origine renouvelable dans le monde
Observ'ER 2012

B. Multon ENS Cachan

Complémentarité solaire éolienne à l'échelle de l'Europe

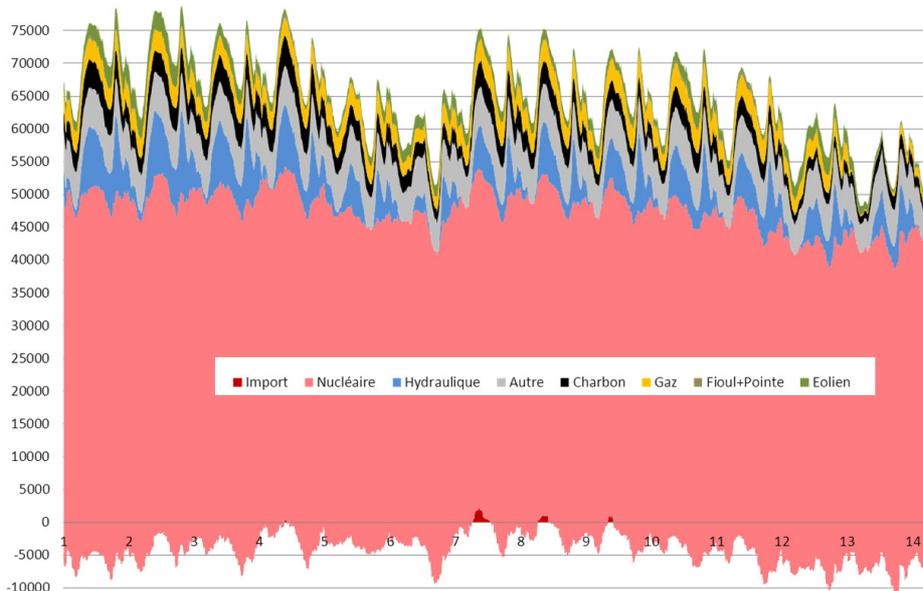


Source : D. HEIDE et al. « Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future, highly renewable Europe », Renew. Energy, Elsevier 2010.

B. Multon ENS Cachan

Réalité des émissions de CO₂ 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 gCO₂/kWh et c'est bien plus aujourd'hui (en 2007, rapport ADEME (non diffusé) : 500 à 600 g)

Rejets de CO₂ d'un véhicule électrique

dépendent fondamentalement du mix énergétique de production électrique

1 kWh électrique en France : 90 g/kWh_e
 en Europe : 400 g/kWh_e **en moyenne...**
 au monde : 720 g/kWh_e

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 kgCO₂/kWh_e) : 200 gCO₂/km



Renault Kangoo bebop ZE



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

Principales équivalences : nécessaires pour comprendre les diverses sources

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

Énergie et service énergétique : quelques exemples

Énergie calorifique : échauffer un litre d'eau de 40°C :

$$E = 1 \text{ L} \times 1 \text{ kg/L} \times 4180 \text{ J/}^\circ\text{C/kg} \times 40^\circ\text{C} \\ = 167,2 \text{ kJ} = 46,4 \text{ Wh}$$



Énergie mécanique : déplacer un objet

avec un effort de 1000 N sur une distance de 10 km :

$$E = F \times d = 1000 \times 10\,000 = 10 \text{ MJ} = 2,78 \text{ kWh}$$



Énergie lumineuse :

éclairer une surface de 10 m² pendant 4 h

avec une intensité de 200 lux (200 lumens/m²),

et une source de lumière de rendement 50 lumens/watt :

$$E = 200 \text{ lumens/m}^2 \times 10 \text{ m}^2 \times 4 \text{ h} / (50 \text{ lm/W}) = 0,8 \text{ Wh} = 2,88 \text{ kJ}$$



Énergie et puissance : quelle différence ?

La puissance caractérise la capacité du convertisseur à effectuer rapidement les transformations d'énergie

$$\text{Puissance} = \text{débit d'énergie} : P = \frac{E}{t}$$

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

ou encore :

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

Exemple :

un chauffe-eau de 4 kW permet de transformer en chaleur deux fois plus vite qu'un appareil de 2 kW :

de l'électricité (effet Joule),
du gaz (combustion)
du rayonnement solaire

41

B. Multon ENS Cachan

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

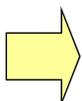
Exemple 2 (« production ») : transformation rayonnement solaire -> chaleur

Energie : pour obtenir 10 kWh de chaleur

avec un rayonnement solaire de 1 kW/m²

Puissance : il faut : 10 h avec un capteur solaire de 1 m² (1 kW)

2 h ----- 5 m² (5 kW)



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

42

B. Multon ENS Cachan

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



43

B. Multon ENS Cachan

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_{pci} => 4,7 c€/ kWh_{pci}),

Avec un rendement de 30%, il faut 3,3 kWh_{pci} pour obtenir 1 kWh_e

Ainsi, pour obtenir 1 kWh_e 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_e donc 0,8 c€/ kWh_e
prix total = 14,8 c€/ kWh_e

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_e 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_e (en 20 ans), le prix de revient est : 3 c€/ kWh_e

de 3000 heures, --- 60 000 kWh_e --- : 2 c€/ kWh_e

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

44

B. Multon ENS Cachan

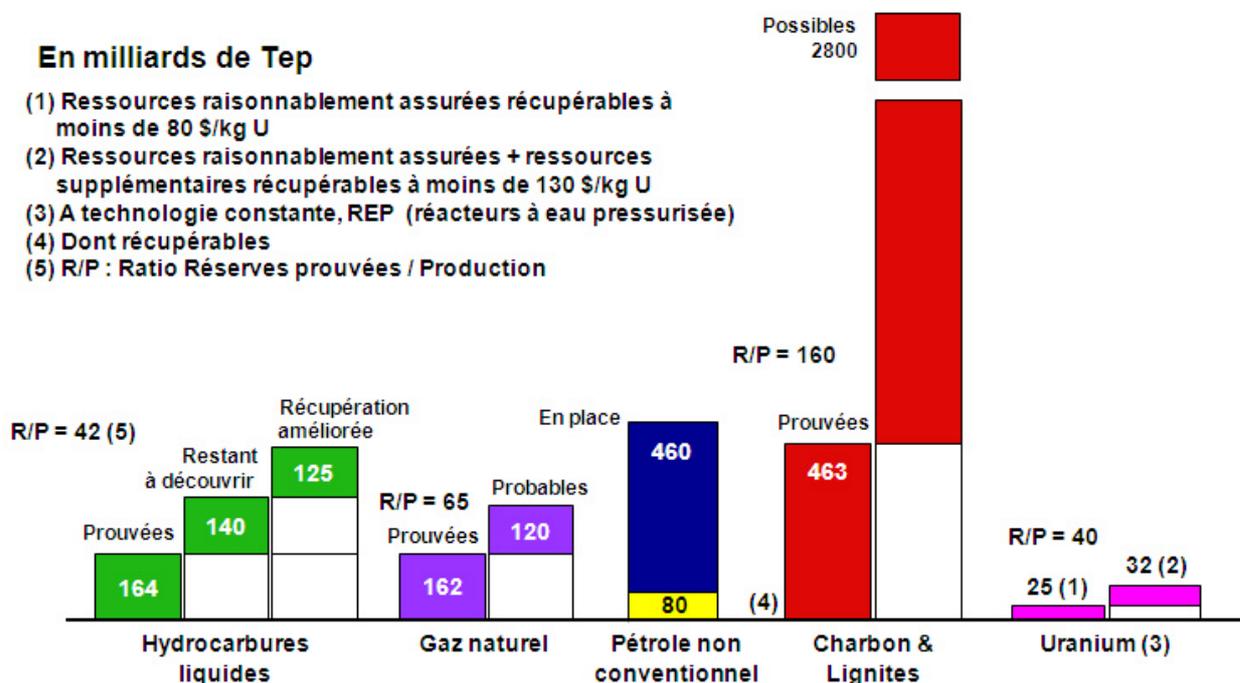
Ressources, aspects environnementaux



B. Multon ENS Cachan

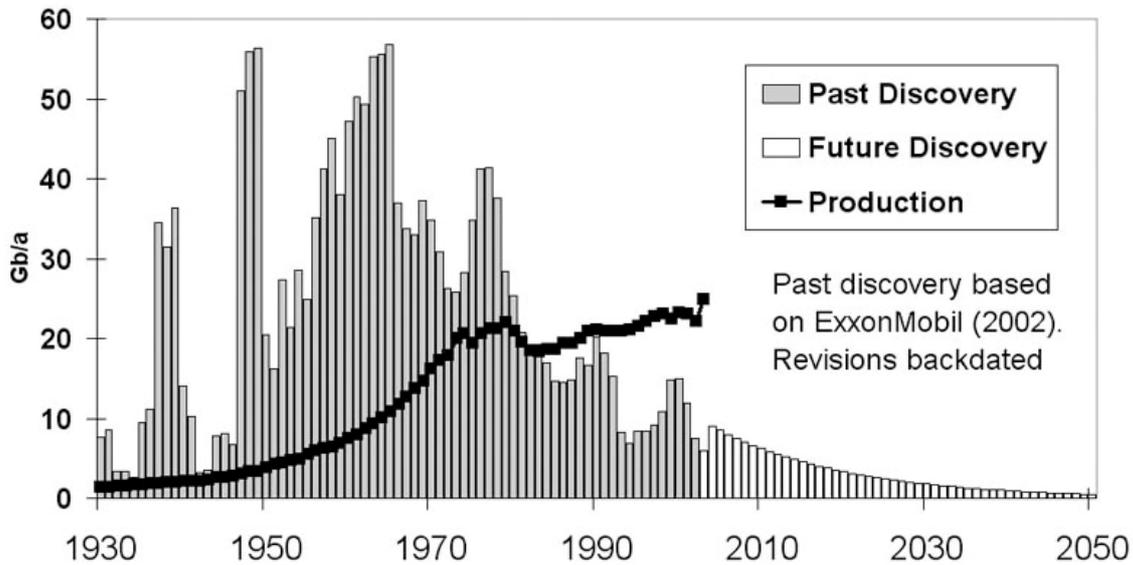
Réserves en matières premières énergétiques non renouvelables :

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



Source : BP Statistical Review, CEA, IFRIDE

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.)
Acier	230 G	160 G	73 G	40	1,8 G	
Alu	13 à 18 G	8 G	5,7 G	170	34 M	7,6 M (2004)
Cu	3 à 3,7 G	940 M	470 M	31	15 M	
Pb	1,5 G	140 M	67 M	16	4 M	4 M
Li (Metal)	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

Cuivre Primaire :	27 kWh/kg
Magnésium :	54 kWh/kg
Plomb :	5 kWh/kg

Aluminium

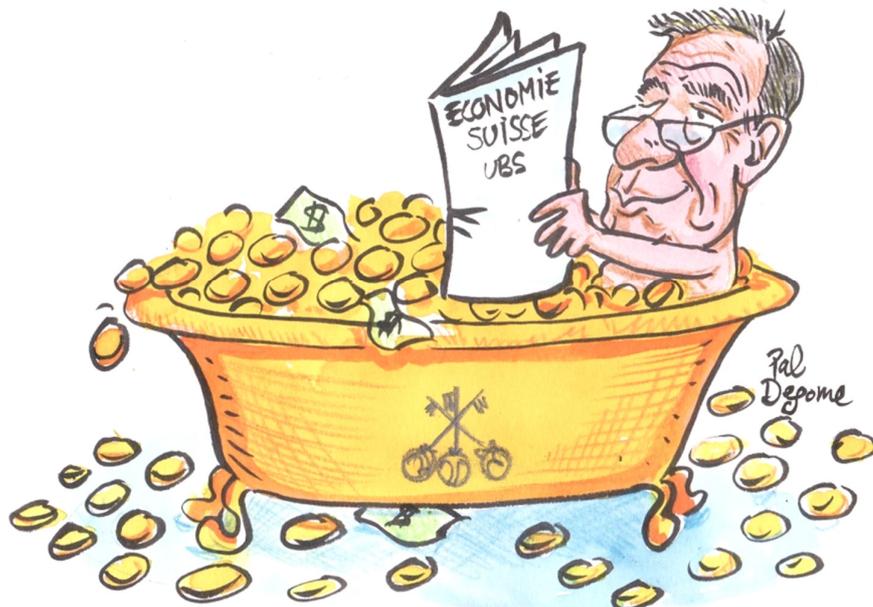
Primaire (0% recyclé) :	44,7 kWh/kg
Secondaire (100% recyclé) :	5 kWh/kg
Européen : 30% recyclé :	33 kWh/kg
Profilé alu Europe :	34 à 37 kWh/kg

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

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

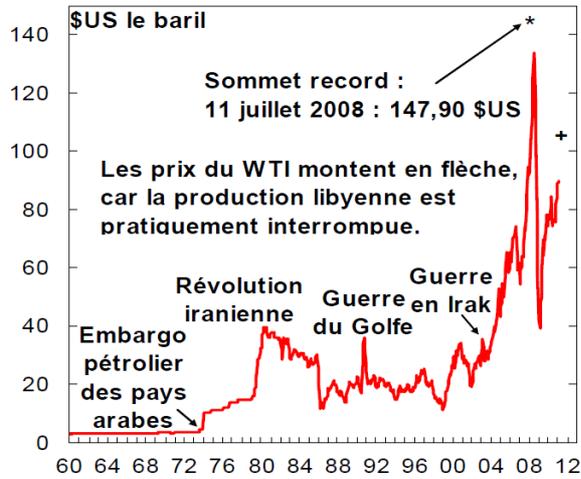
Ces valeurs peuvent varier significativement selon les sources...

Aspects économiques



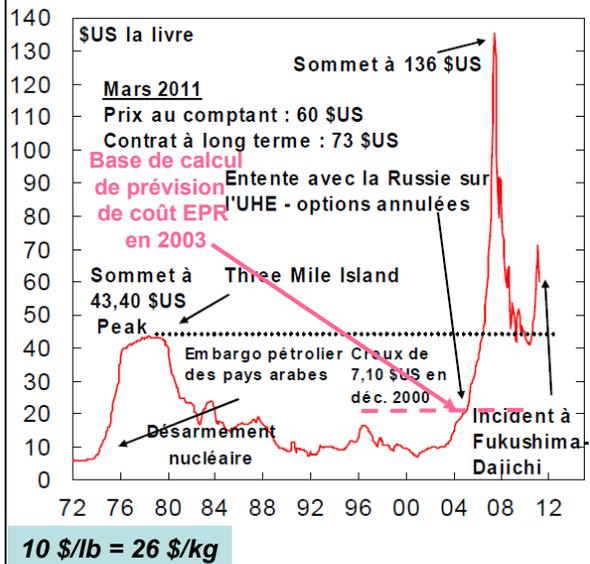
Les cours des matières premières énergétiques fluctuent et affectent économie et stabilité politique...

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

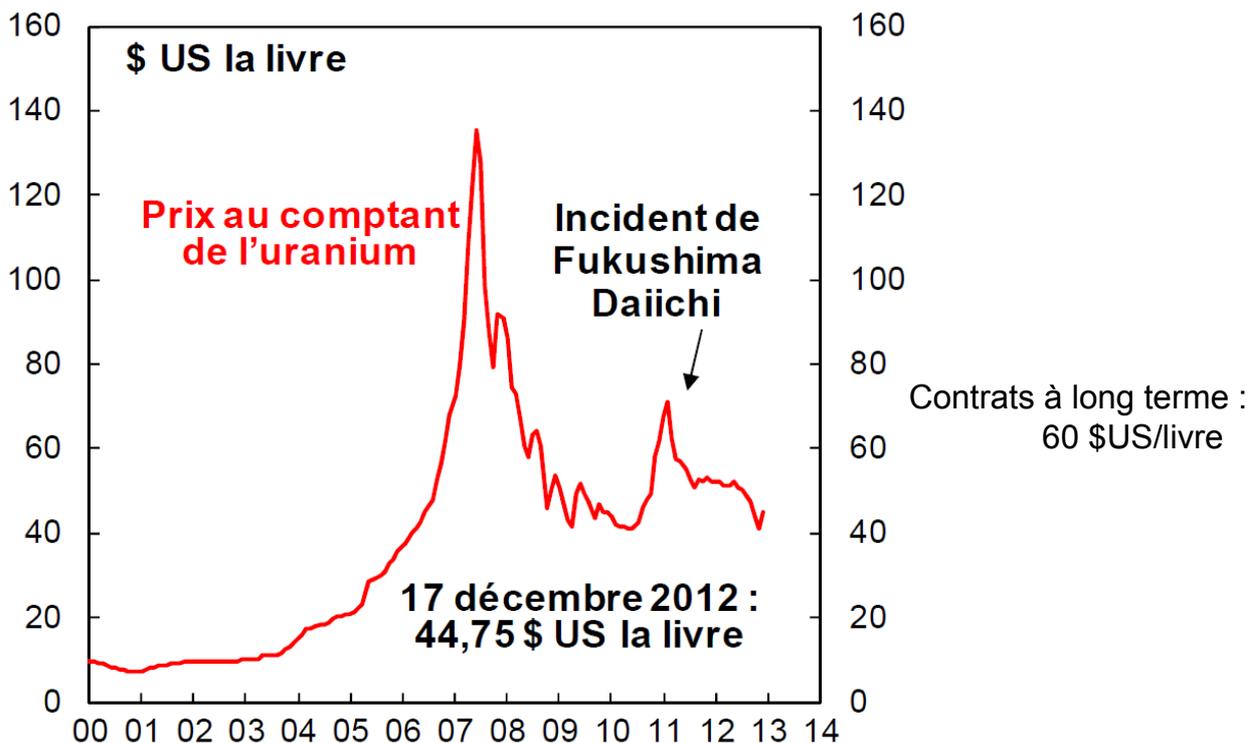


source : banque Scotia

51

B. Multon ENS Cachan

Cours de l'uranium : zoom actuel

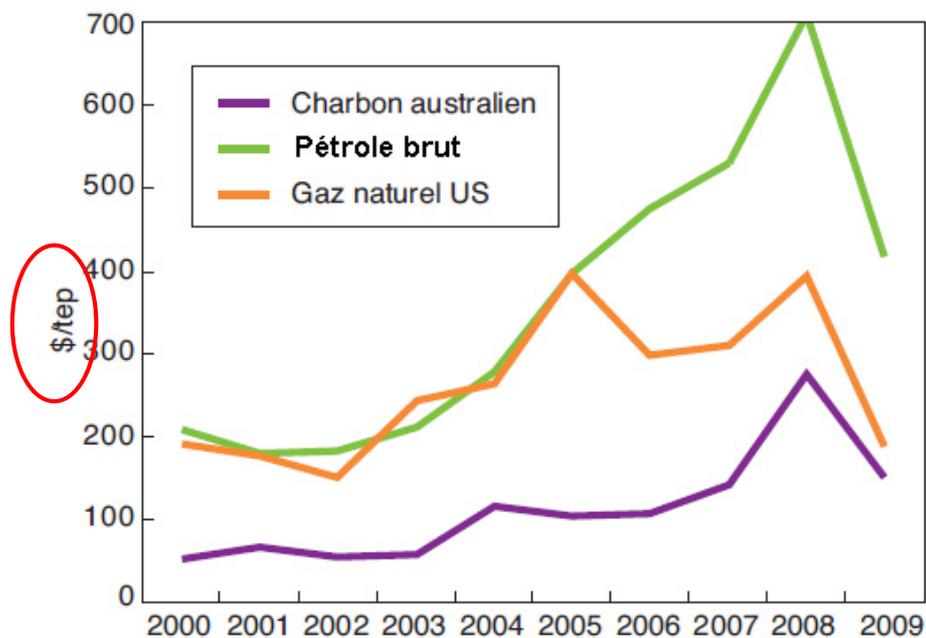


source : banque Scotia, décembre 2012

52

B. Multon ENS Cachan

Prix charbon, gaz et pétrole en \$/tep

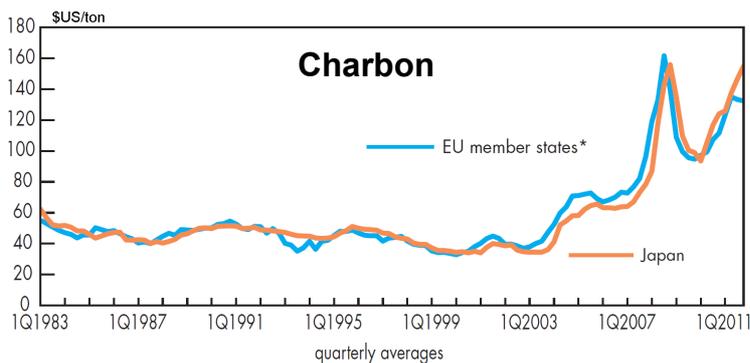


Source : IFP, base Platt's

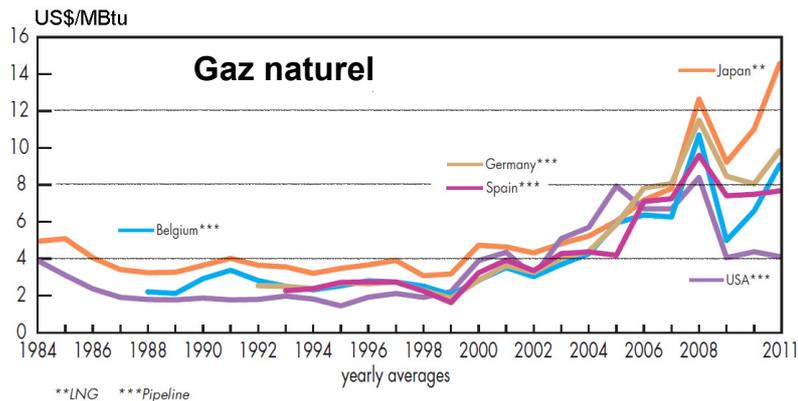
source : IFP

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

Prix des combustibles fossiles

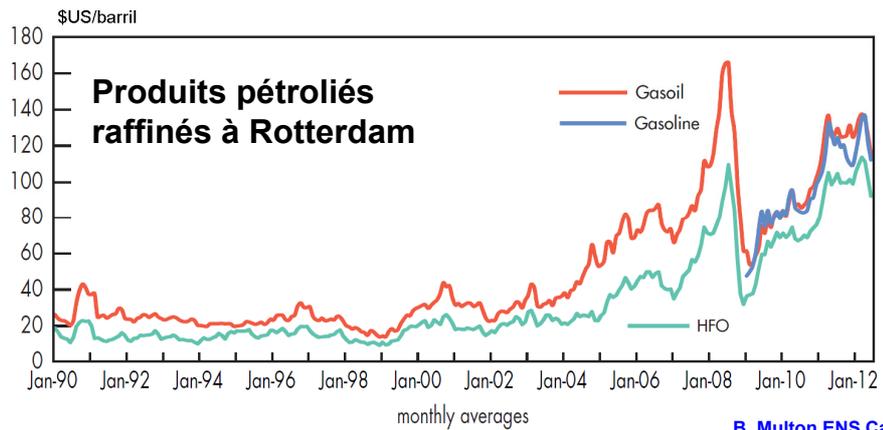
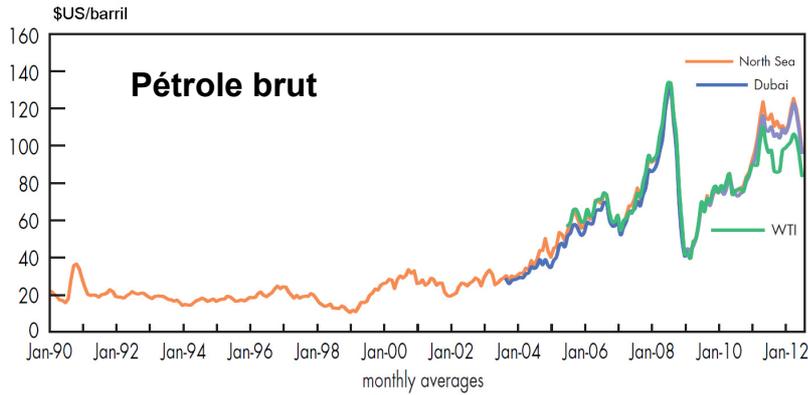


*The weighted average for EU member states is based only on imports for which prices are available and may include different components in different time periods.



LNG *Pipeline

Prix des combustibles fossiles



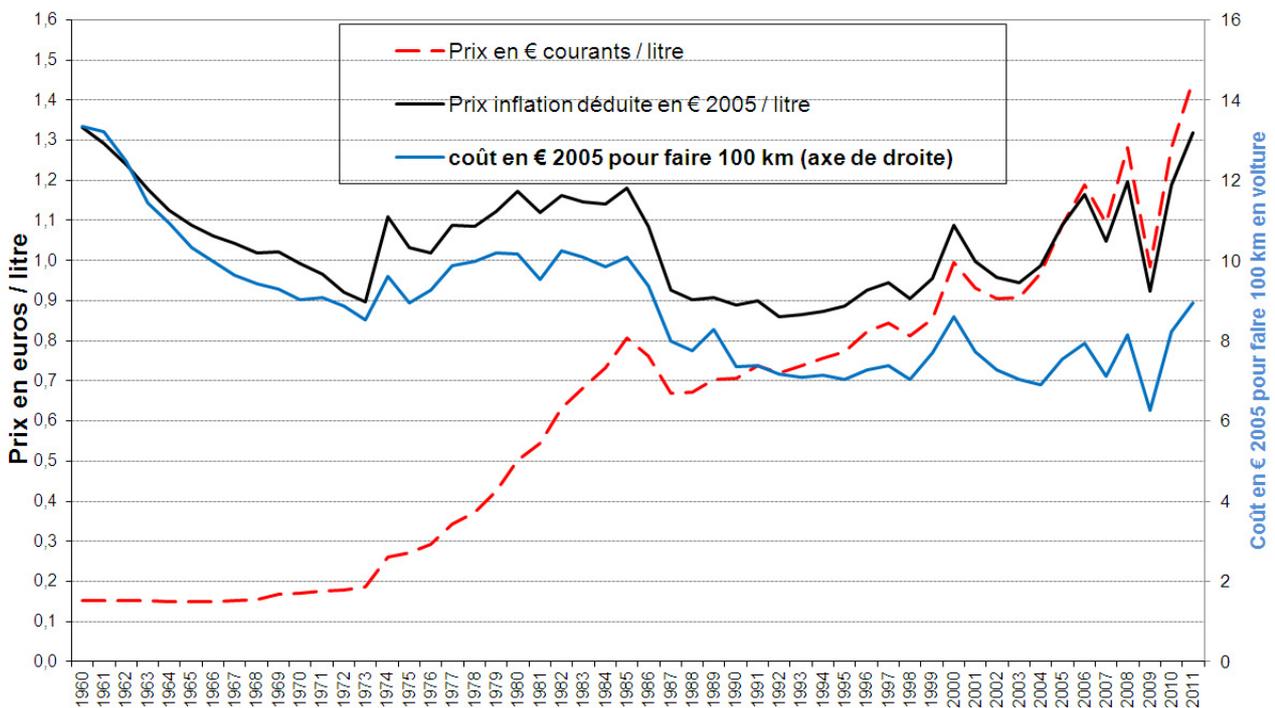
source : IAE Key Stat 2012

55

B. Multon ENS Cachan

Évolution des prix des carburants automobiles à la pompe en France

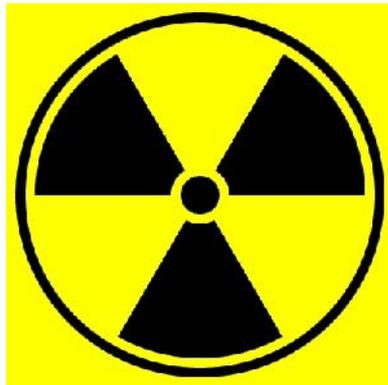
Prix TTC des carburants et coût aux 100 km entre 1960 et 2011



source : CIRED Nadaud et Quirion 2012

56

L'électronucléaire :

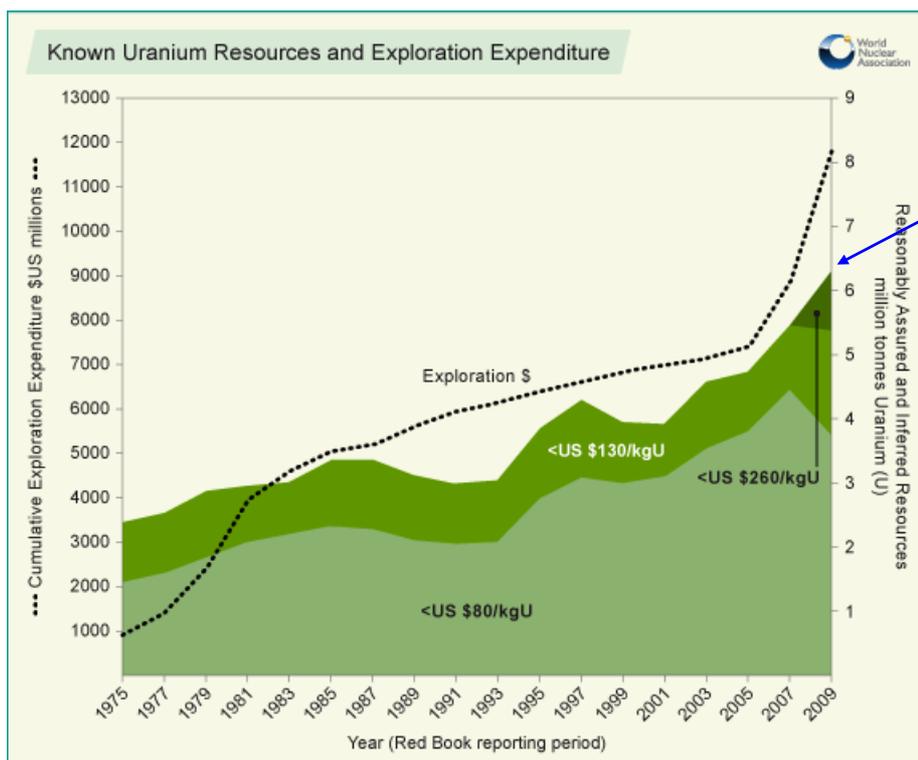


énergie durable,
viable, économique??

57

B. Multon ENS Cachan

Production et réserves d'uranium



6 M tonnes
à < 260 \$/kg

un doublement du prix
a permis d'augmenter
de 15% les réserves...

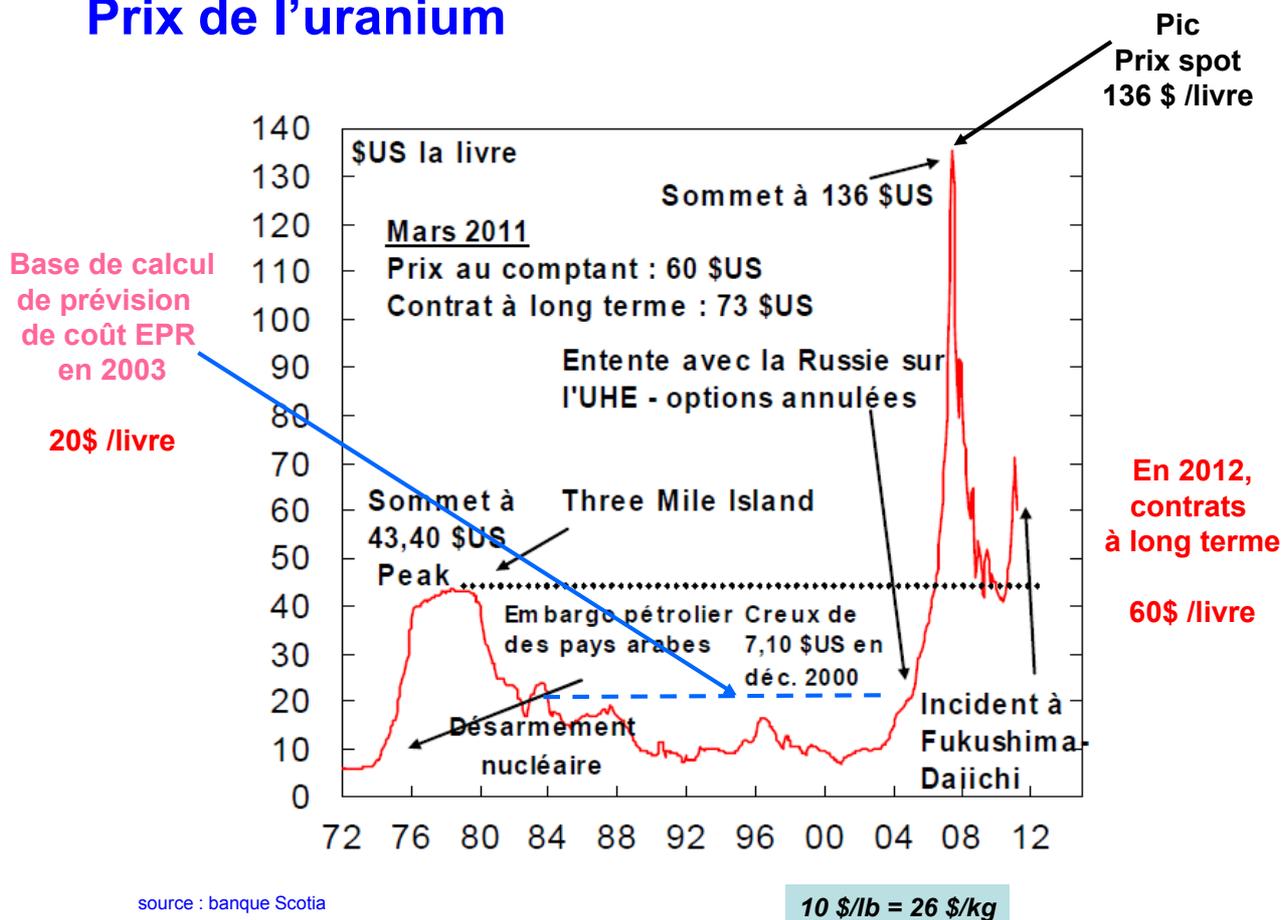
Ressources :
6 M tonnes équivalent à
environ 60 Gtep primaires
soit 20 Gtep finales

11 ans de production
électrique mondiale totale

58

B. Multon ENS Cachan

Prix de l'uranium



59

B. Multon ENS Cachan

Dérapiage des coûts d'investissement de l'EPR

Réacteur d'Olkiluoto (Finlande) : prix initial 3 G€
 démarrage en juillet **2005**, mise en service prévue en 2009
 repoussée successivement à fin 2010, puis 2014...
 Avec un surcoût de 3.6 milliards d'euros : **6,6 G€**

Réacteur de Flamanville 2007 : coût estimé à 3,4 G€
 lors du démarrage de la construction de Flamanville

Décembre 2008 : ré-évaluation EDF à **4 G€**

Juillet 2010 : **5 G€**

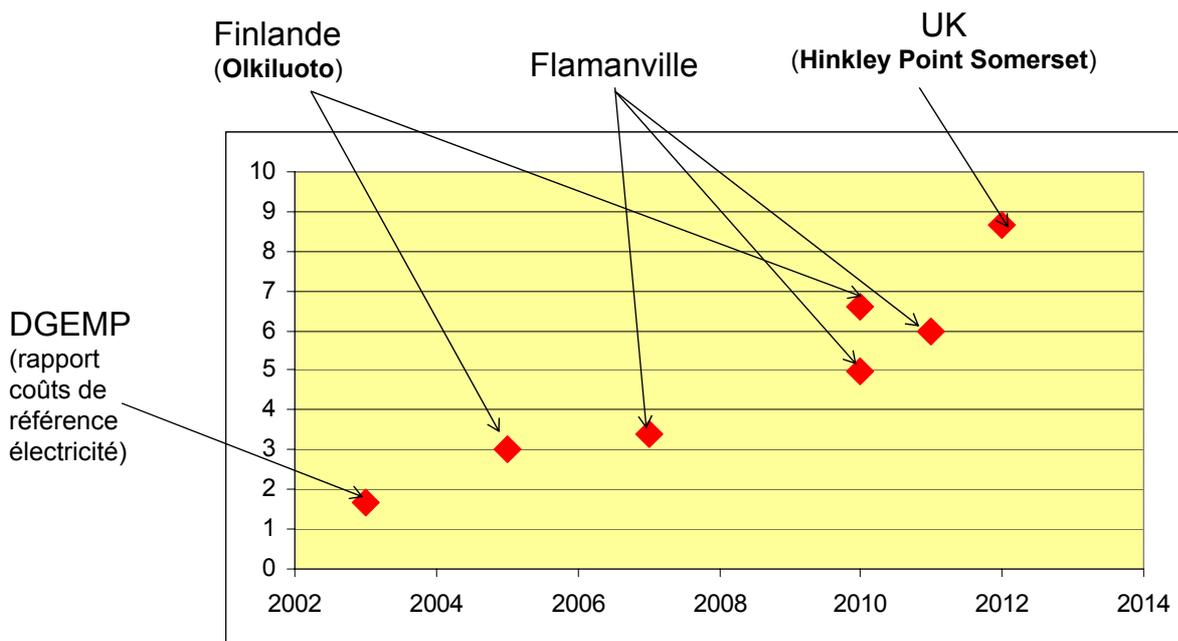
Juillet 2011 : **6 G€**

UK, projet 2 réacteurs Hinkley Point Somerset (EDF)
 Mai 2012 (Times, 7may 2012) : £ 7 milliards => **8,66 G€** pour 1,6 GW

60

B. Multon ENS Cachan

Dérapiage des coûts d'investissement de l'EPR



Estimation du coût de production de l'EPR

(sur la base du rapport DGEMP déc. 2003)

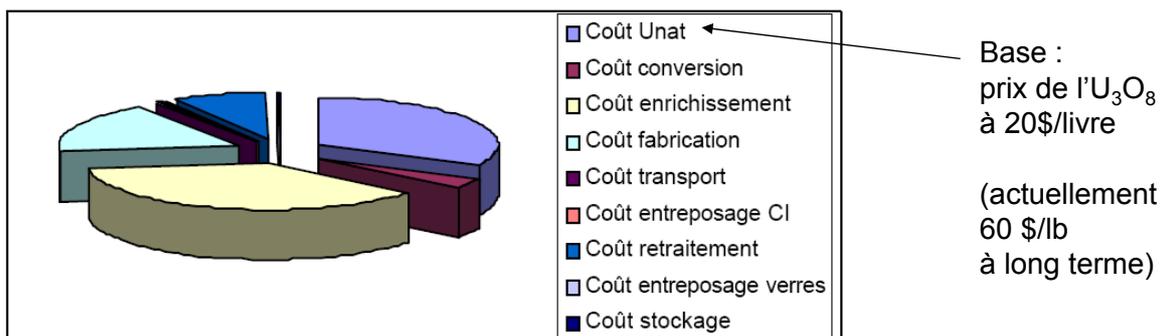


Figure 34 – Décomposition du coût du combustible nucléaire (actualisation 8%) 4,4 Euro/MWh

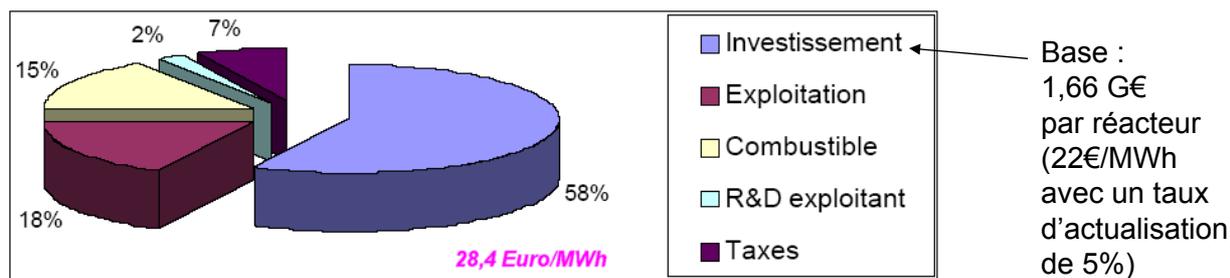


Figure 35 – Décomposition du coût de production du nucléaire en base (actualisation 8%)

A 8,66 G€ par réacteur, cela donne **120 €/MWh** (12 c€/kWh) pour la seule part de l'investissement

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^{ème} 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=C6GHAtY8MM>
- 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/>