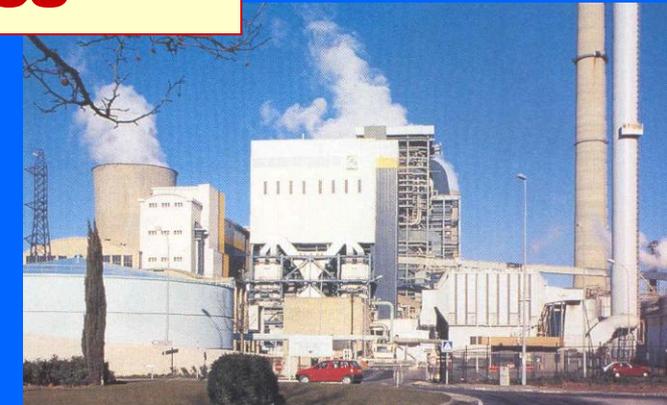


**ENERGIE,
PRODUCTION ELECTRIQUE
ET ENVIRONNEMENT**
1^{ère} partie : Généralités



Jacky Ruste

Ingénieur INSA « Génie Physique »
Dr Ing. Université Nancy 1
anciennement Ingénieur Senior EDF R&D



Nous vivons à une époque où les émotions et les sentiments comptent plus que la vérité, et où la science est largement ignorée.

James Lovelock

L'énergie est à la base de notre société

L'évolution de la société, du mode de vie, de l'accroissement du PIB depuis le milieu du XIX^{ème} siècle est due à l'apparition de sources d'énergie très efficaces, mille à dix mille fois plus efficace que l'énergie humaine et animale et pour un coût absolument dérisoire !

L'avenir de la société sera directement lié à l'énergie disponible et aux moyens de production du futur...

L'un des grands défis du XXI^{ème} siècle sera de faire face à la demande croissante d'énergie (et en particulier d'énergie électrique) en gérant les ressources énergétiques existantes ou nouvelles et en respectant l'environnement

Malheureusement l'énergie n'est plus uniquement une question purement économique et scientifique mais de plus en plus l'objet de décisions politiques liées souvent à positions doctrinaires étrangères à la réalité !

Actuellement, la situation du marché de l'électricité en France et en Europe est de plus en plus complexe... et aberrante

Deux facteurs importants perturbent le marché et conduisent à un risque majeur de crash électrique dans les années à venir :

1 – Le développement intensif des énergies renouvelables, éolien et solaire dont la production est incontrôlable et imprévisible et dont les variations brutales ont comme conséquences :

- des prix de l'électricité sur le marché très bas, voire négatifs rendant certain moyens de production performants comme le gaz non rentables(*)... Ce qui provoque aux moments de fortes demandes des prix excessifs (3000€/MWh) avec un risque de pénurie en hiver.**
- d'où la fermeture de milliers de MW de centrales au gaz récentes, propres et efficaces, mais qui ne fonctionnent plus assez longtemps pour être rentables...**

() Pour être rentable une centrale doit fonctionner au minimum 57% du temps... en moyenne on en est à 25%., voire 10%.. cela concerne 60% des centrales européennes soit 130 GW et plusieurs dizaines de GW en France... 50 GW ont été fermées en Europe... solution envisagée : les subventionner !*

2 – Ces fermetures sont favorisés paradoxalement par le développement du gaz de schiste aux USA qui fait baisser les prix du gaz (aux USA) et indirectement diminue le prix du charbon qui devient en Europe plus compétitif que le gaz...

Ce qui conduit l'Allemagne par exemple à développer ses centrales au charbon et au lignite (extrêmement polluantes) ainsi que l'extension de mines existantes et à l'ouverture de nouvelles...

**A plus long terme, en espérant un retour au bon sens
quelques questions essentielles :**

**Le charbon : en plein développement, malgré sa pollution considéré
comme l'énergie de l'avenir dans la plupart des pays...**

1 - *Quel est l'état des réserves en combustibles fossiles ?*

2 - *Comment rendre les centrales thermiques propres ?*

Les énergies renouvelables, *réalité ou fausse solution ?*

**L'avenir de l'énergie nucléaire, en plein développement dans le monde
quid de son avenir en France, en Europe ?
*et comment gérer les déchets ?***

***Et comme les décisions sur l'avenir de l'énergie et des futurs moyens de
production sont principalement liées à la théorie du « dérèglement climatique
lié aux activités humaines »...***

**Réalité du « réchauffement climatique » au XXI^{ème} siècle ?
*dérèglement climatique ? réchauffement ou refroidissement ?***

Introduction : la question énergétique

I - La production électrique dans le monde, en Europe et en France

Les ressources fossiles

II – Les Moyens de production

II-1 - Les énergies « renouvelables »

L'énergie hydraulique

Les énergies de la mer

L'énergie éolienne

L'énergie solaire

La biomasse

L'énergie géothermique

II-2 – Les énergies « épuisables »

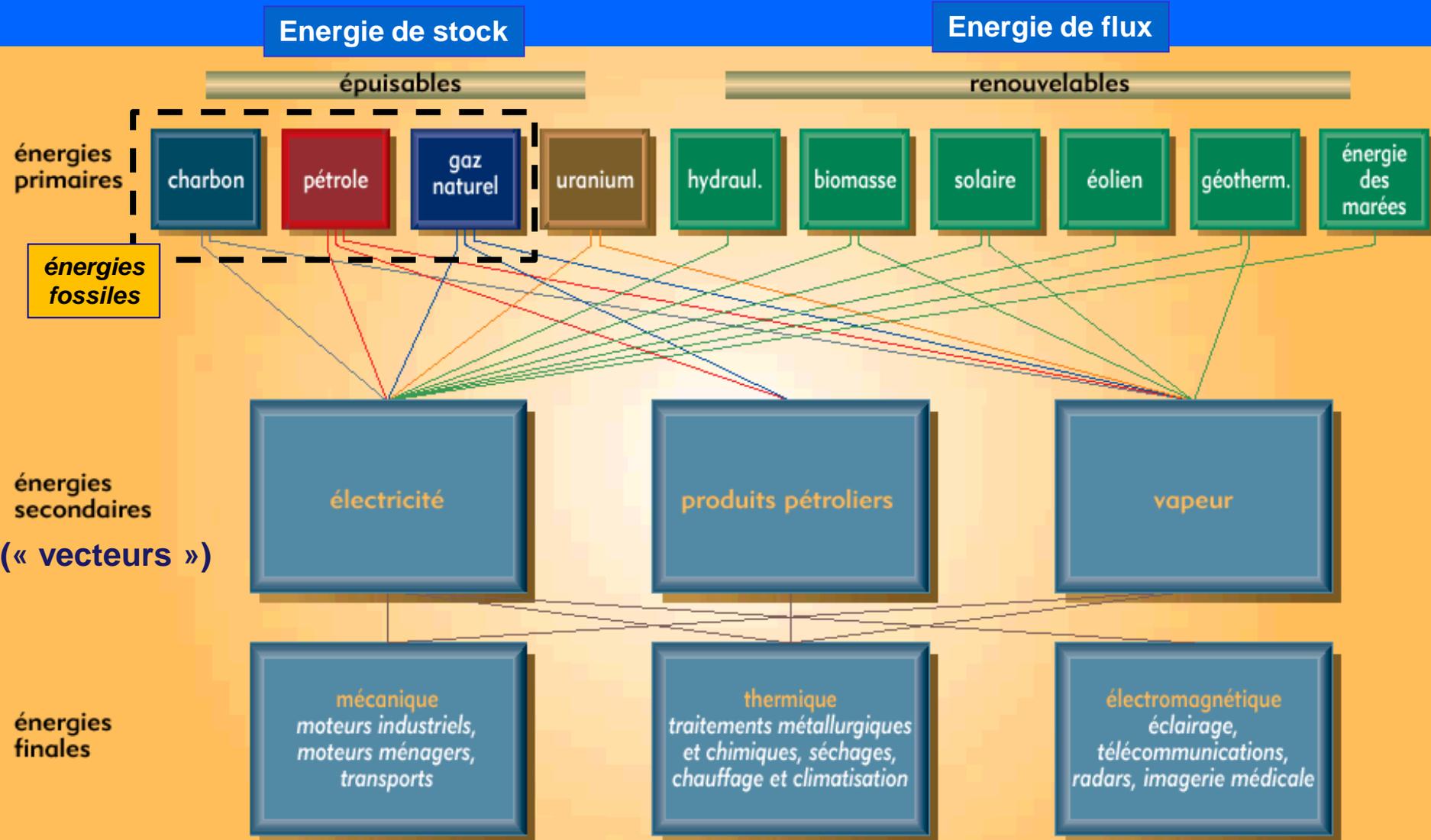
Les centrales thermiques à flamme

III – L'énergie nucléaire

- L'énergie nucléaire dans le monde
- Les réacteurs nucléaires de 3ème et 4ème génération
- La fusion thermonucléaire
- La solution « hydrogène »

INTRODUCTION

Classification des sources d'énergie



On ne « produit » pas d'énergie, on la transforme ! (principe fondamental de la conservation de l'énergie)

Les différentes formes d'énergie

Dans la vie courante, on rencontre et **on utilise l'énergie sous bien des formes** :

- **L'énergie mécanique** : celle des moteurs, des muscles
- **L'énergie calorifique** : celle de la chaleur, du chauffage, de la cuisson
- **L'énergie cinétique** : celle de la voiture, de la balle de tennis, du vent
- **L'énergie chimique** : celle de la nourriture, des carburants
- **L'énergie lumineuse** : celle qu'on reçoit du soleil, celle des lasers
- **L'énergie nucléaire** : celle des étoiles, des centrales nucléaires

Mais seules les énergies finales sont utilisables directement...

Pour transformer les énergies primaires en énergie utile il faut les convertir...

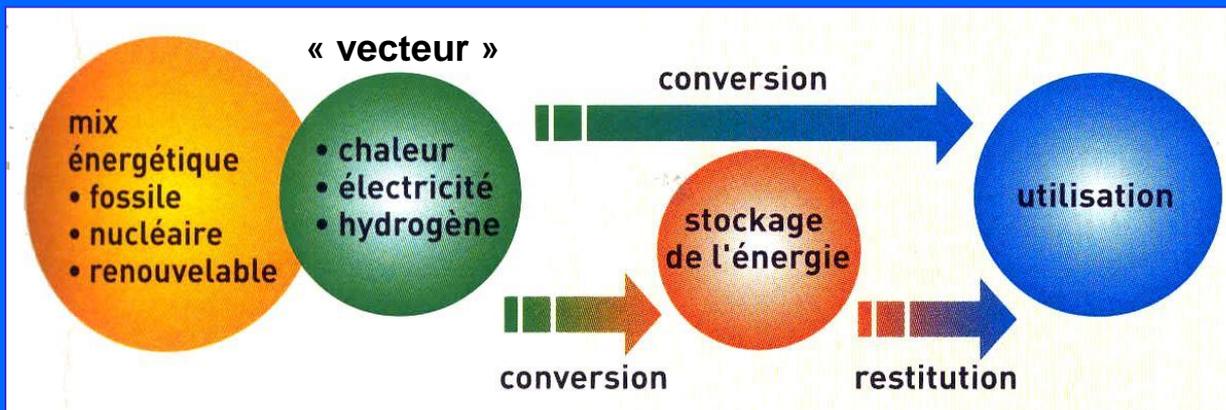
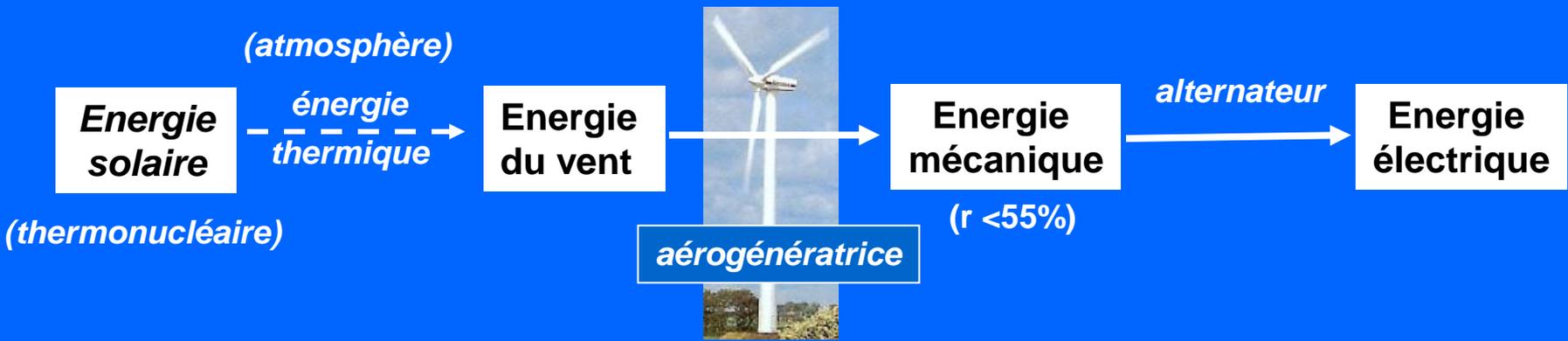


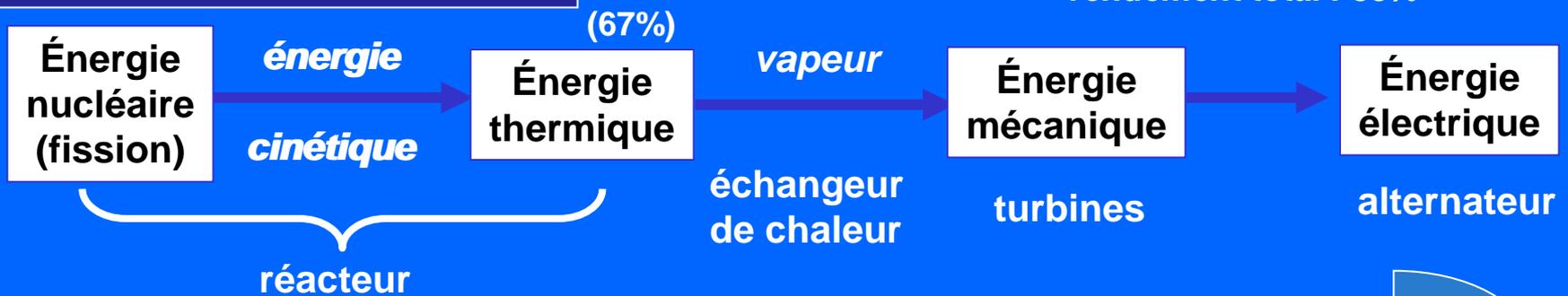
Schéma énergétique

Les conversions peuvent être complexes...

exemple de l'énergie éolienne



exemple de l'énergie nucléaire :



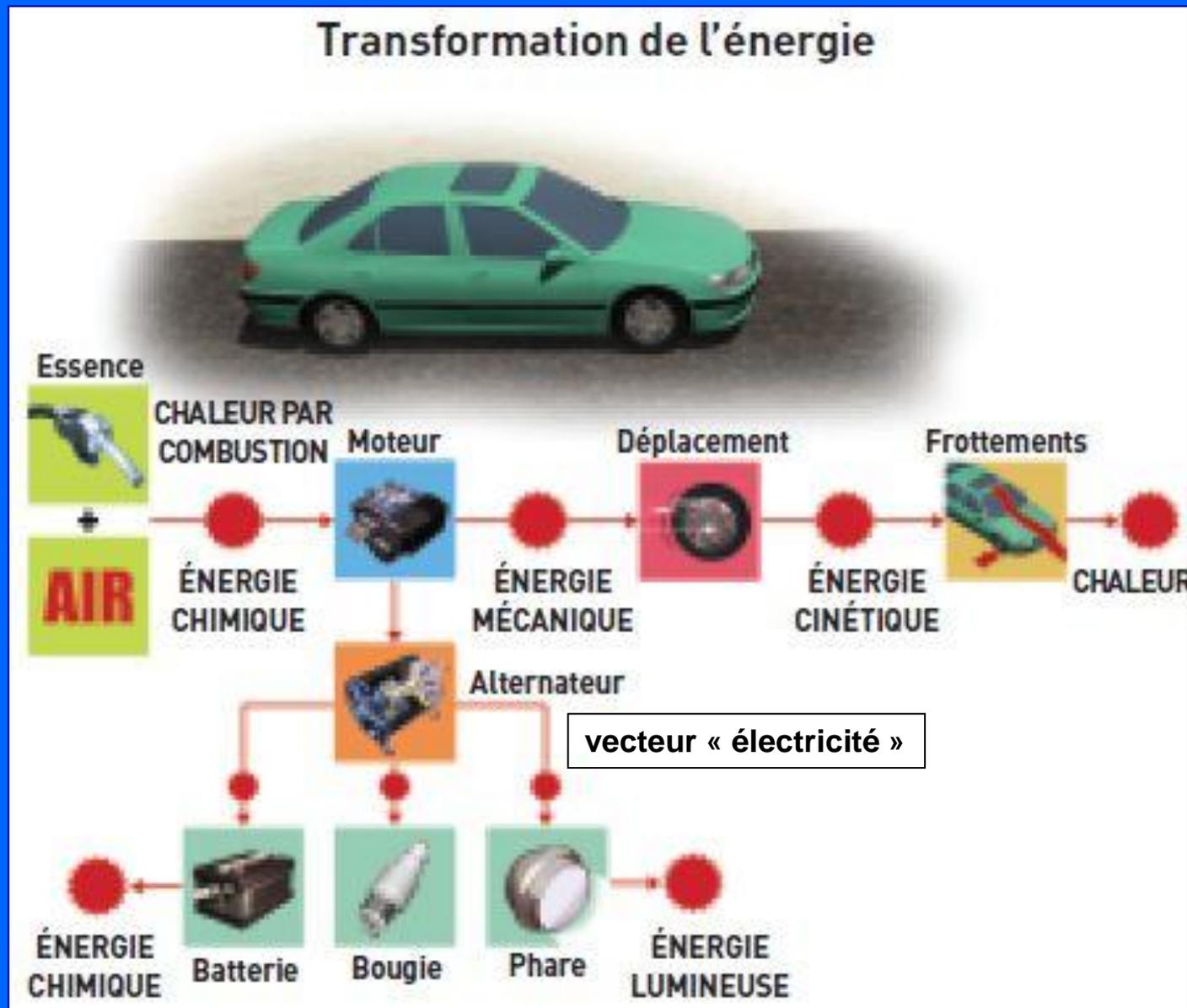
L'énergie électrique ne peut se stocker directement

- énergie gravitationnelle (barrage)
- énergie cinétique
- énergie chimique (pile, batterie)

Utilisation

- énergie mécanique
- énergie thermique
- énergie radiative

Un exemple de conversion d'énergie à partir du pétrole



Les unités énergétiques

L'unité légale est le joule (J)

Autres unités usuelles

	Joule	kWh	cal	eV	
Joule	1	$2,78 \cdot 10^{-7}$	0,239	$6,24 \cdot 10^{18}$	keV, MeV, GeV
kWh	$3,6 \cdot 10^6$	1	$8,63 \cdot 10^5$	$2,26 \cdot 10^{25}$	électricité
cal	4,18	$1,16 \cdot 10^{-6}$	1	$2,62 \cdot 10^{19}$	chaleur
eV	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$4,45 \cdot 10^{-26}$	$3,828 \cdot 10^{-20}$	1	physique nucléaire

MWh
GWh
TWh

Autres unités :
TEP : « tonne équivalente pétrole »
TMC (gaz) : 10^{12} m^3

1 tonne de pétrole = 42 GJ
1 tonne de charbon = 29,3 GJ
1 tonne de gaz naturel = 46 GJ
1000 kWh = 3,6 GJ
1 kg d'U = 360 GJ
(1 g TNT = 4000 J)

! Ne pas confondre « puissance » et « énergie »

W, kW, MW, GW

$$E = P \cdot t \begin{cases} E \text{ en J} \\ P \text{ en W} \\ t \text{ en sec} \end{cases}$$

1 kWh : énergie produite par 1kW pendant 1^h heure

Quelques chiffres...

L'unité de comparaison énergétique : la tep (tonne équivalente pétrole)

et ses multiples : Mtep (10^6 tep) Gtep (10^9 tep)

On trouve aussi pour caractériser la consommation le « mbj » :

le millions de barils par jour

(un baril = 159 litres, 1 mbj=159.000 m³)

1 mbj= 0,15 Mtep par jour = 52 Mtep par an

(la consommation française est de 2 mbj)

Pour le gaz naturel on utilise le TMC (terra m³) : 10^{12} m³

1 TMC= 1 Gtep (12.000 TWh)

1 tonne d'essence : 1,05 tep

1 tonne de fioul : 1 tep

1 tonne de charbon : 0,6 tep

1 tonne de bois : 0,3 tep

1 tep = $42 \cdot 10^9$ joules = 11,6 MWh

1 MWh = 0,086 tep (*)

() une nouvelle équivalence est apparue , faisant intervenir le rendement des centrales (33%) afin de pénaliser le chauffage électrique vis-à-vis du chauffage traditionnel :*

1 MWh= $0,086/0,33=0,26$ tep

En toute logique en France il faudrait prendre comme équivalence :

*1 MWh = $0,086*0,9+0,26*0,1=0,103$ tep*

- Energie cinétique d'une voiture de 1.000 kg à 100 km/h : 0,1 kWh
- Pour fondre 1 kg de glace : 0,1 kWh
- Pour porter 1kg d'eau à ébullition : 0,7 kWh
- Pour obtenir 1 kWh il faut faire chuter de 100m 3,67 tonnes d'eau...

le pétrole constitue une source *très condensée* d'énergie :

pour stocker l'équivalent de 1kg de pétrole (= 12 kWh)
il faut :

- *charger 300kg de batterie au Pb*
- *hisser 44 tonnes d'eau à 100m de hauteur*

L'énergie produite par la force humaine : quelques dixième de kWh
Pour grimper au sommet du Mont Blanc le corps humain
ne produit que 0,5 kWh (*effort considérable !*)

Pour remplacer l'essence en France (50 Mtep) :

- par du biocarburant : toute la surface cultivable ne suffirait pas
- par de l'hydrogène :
 - 160 GW pour produire cette hydrogène par électrolyse
soit 100 réacteurs nucléaires EPR
ou 300 000 éoliennes de 3 MW !
ou 27.000 km² de panneaux solaires (7.500 centrales « Toul »)

Autres comparaisons :

Énergie fournie par 1 kg de :

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

réaction chimique :
 $\Delta m/m \sim 10^{-10}$ à 10^{-11}

réactions nucléaires :
 $\Delta m/m \sim 10^{-4}$ à 10^{-5} (10^6 fois +)

chimique

Batterie au Pb :	0,15 kWh
Bois :	4 kWh
Charbon :	8 kWh
Pétrole (ou 1 m ³ de gaz) :	12 kWh
Hydrogène :	36 kWh



nucléaire

Uranium : 100 000 kWh (REP) ou 2 500 000 kWh (RNR)
Hydrogène (fusion thermonucléaire) : 180 millions de kWh

REP : réacteur nucléaire à eau sous pression

RNR : réacteur nucléaire à neutrons rapides



15g uranium REP = 1 tonne de pétrole
= 1,4 tonne de charbon
= 15 000 m² de panneaux solaires pendant 1 h
= 4500 tonnes d'eau sur 100m de chute

Panorama historique des différentes énergies

Force humaine : depuis l'origine... (quelques millions d'années)

Force animale : depuis plusieurs millénaires (cheval, bœuf, chameau...)

Force du vent : depuis l'antiquité (voile, moulin à vent, éolienne)

Combustible :

- bois : depuis 300 000 ans

- charbon : depuis le XVIII - XIX^{ème} siècle

- pétrole : découverte XIX^{ème} siècle, utilisation massive : milieu XX^{ème} siècle

- gaz de ville (CO+H₂) : XIX^{ème} siècle

- gaz naturel (CH₄) : milieu XX^{ème} siècle

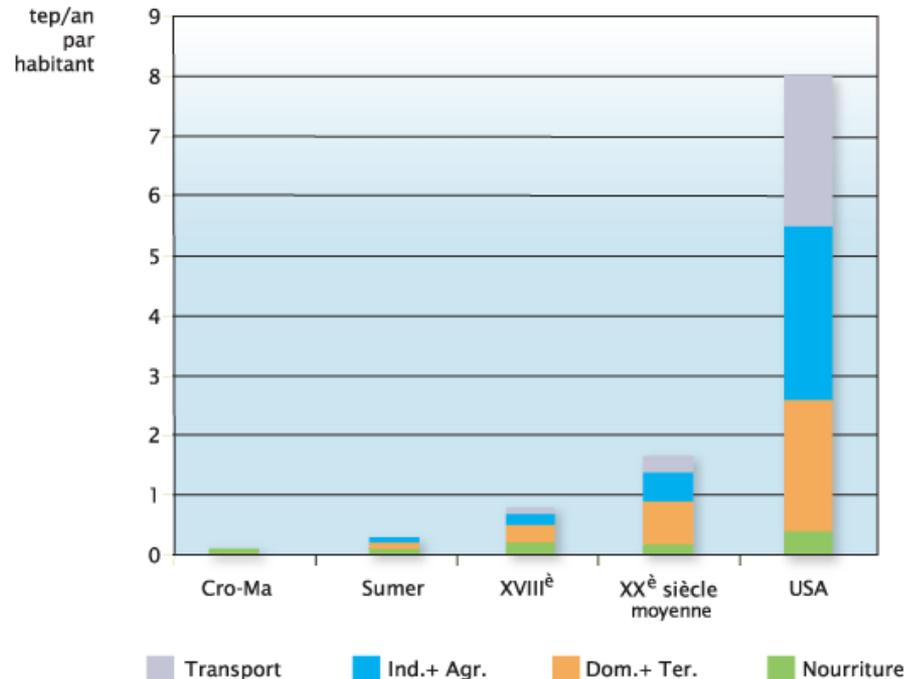
Énergie hydraulique : quelques millénaires

Énergie électrique : fin du XIX^{ème} siècle

Énergie nucléaire : milieu XX^{ème} siècle

Énergie solaire : milieu XX^{ème} siècle (*)

() mais les combustibles fossiles, la biomasse...
sont des sous produits de l'énergie solaire !*



Energie, production électrique et environnement

L'énergie est à la mode...

Les « experts » « fleurissent » dans les médias, on y raconte souvent n'importe quoi, exploitant l'ignorance de la population ! :

- « On » vend (très cher) des « certificats d'énergie verte » qui garantissent une fourniture exclusive d'électricité « verte » ! (comme si l'électricité était un fluide...)
- « On » prétend même que les cellules solaires peuvent fonctionner la nuit grâce à la Lune !

Et les opinions divergent très fortement !

En particulier vis-à-vis des énergies renouvelables très contestées ou adulées !

Déclarations faites lors du débat en Grande Bretagne en 2006 sur l'avenir énergétique :

« si nous devons réduire les gaz à effet de serre de 60 % [. . .] d'ici 2050, les énergies renouvelables sont la seule façon de le faire »

Michael Meacher, ancien ministre de l'environnement

« quelqu'un qui pense que les énergies renouvelables peuvent combler le fossé [énergétique] vit dans un monde totalement utopique et est, à mon avis, un ennemi du peuple. »

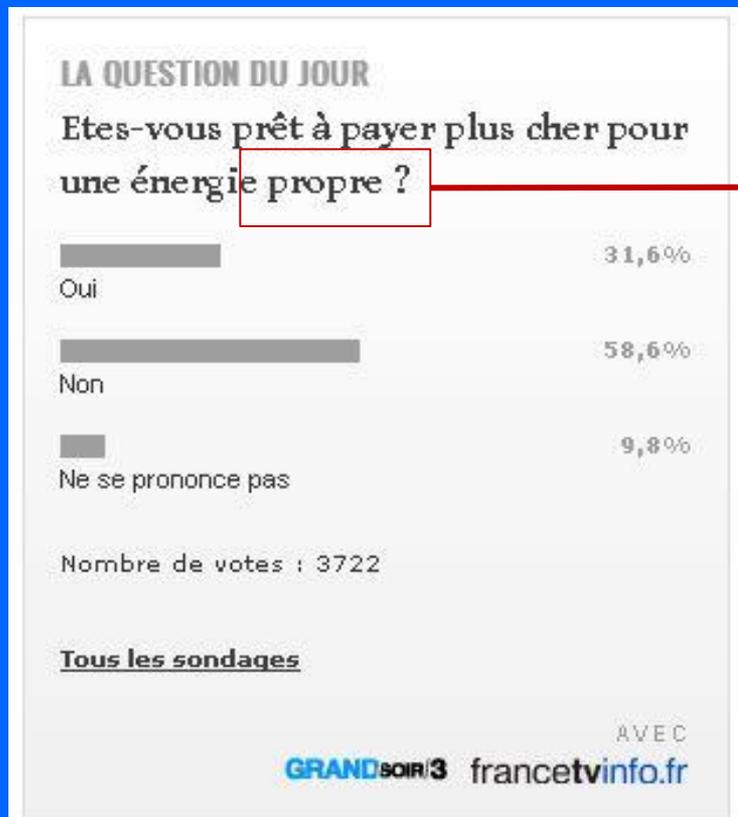
Sir Bernard Ingham, ancien haut fonctionnaire

« les éoliennes sont si peu fiables du fait de leur intermittence qu'elles sont le plus inefficace moyen de production d'électricité jamais imaginé. Il s'agit là de la plus grande escroquerie des temps modernes ».

John Hayes, ministre anglais de l'énergie

Dans le « grand public », quelques idées reçues sont bien implantées dans les esprits (et sont répétées à loisir par les médias) :

Ainsi lu sur internet :



il existe donc des énergies « propres » ?

mais aussi :

il y a des énergies « gratuites »

(généralement « propre » rime avec « gratuit »

sans oublier des solutions miracles qui vont tout résoudre !

Des solutions miracles ?

Le nucléaire dans les années 50, les biocarburants dans les années 90, maintenant les énergies renouvelables , plus tard l'hydrogène etc.

Exemple : on porte aux nues la voiture électrique (« zéro émission ») solution aux problèmes de pollution ...

mais qui se pose la question de l'origine de l'énergie électrique pour recharger les batteries ? du coût énergétique de ces batteries ?

En France : ~30g_{CO2}/km,

En Allemagne, en Chine... >150g_{CO2}/km (> voiture thermique !)()*

(sans compter la pollution liée aux batteries : Li, terres-rares...)

() norme 2015 : 130g_{CO2}/km*

L'hydrogène... vecteur énergétique très performant...

quand on saura le produire massivement et économiquement,

quand on saura le stocker, le transporter

quand on saura l'utiliser économiquement...

Ces questions seront certainement résolues un jour mais pour le moment...

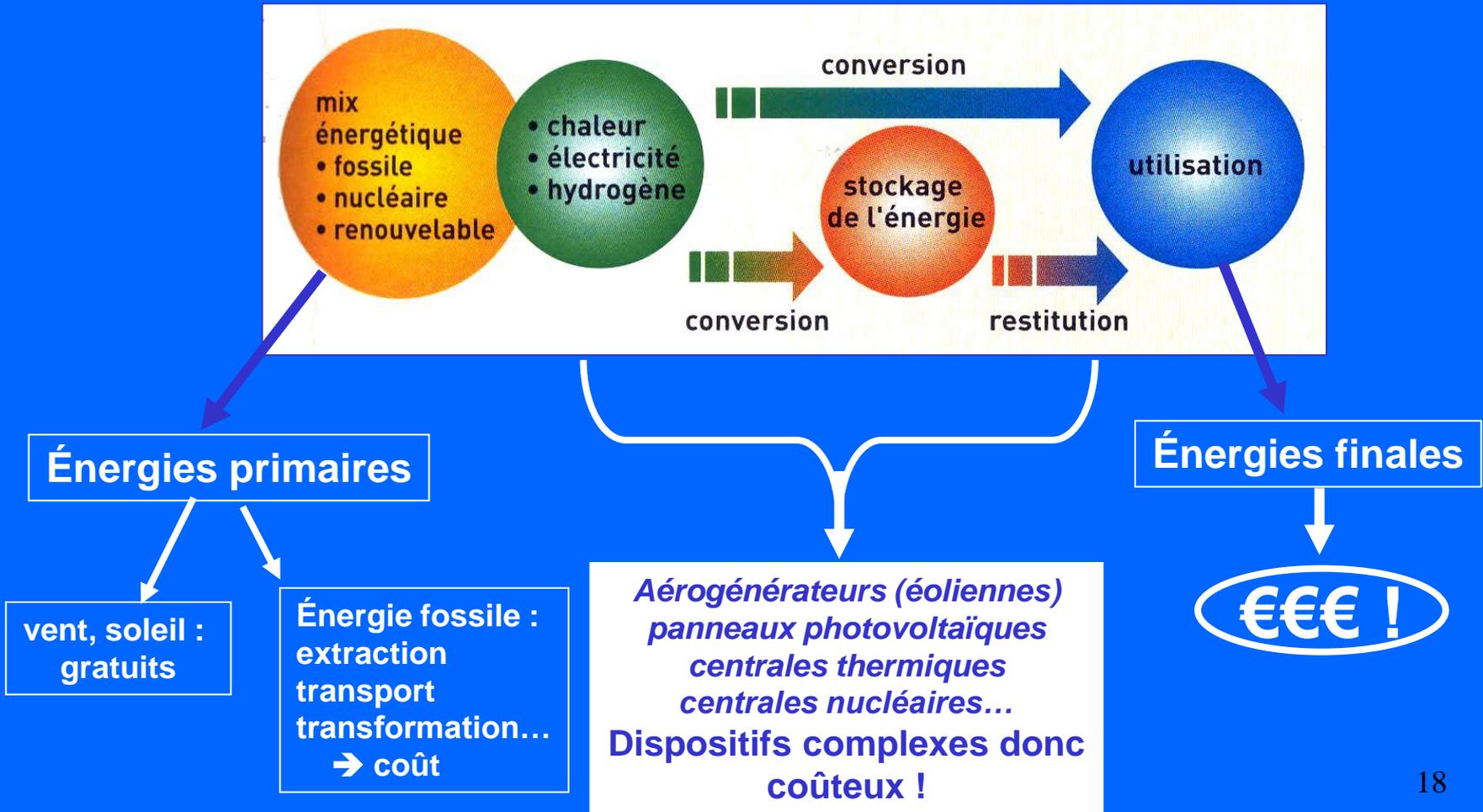
Qu'en est-il réellement de ces « idées reçues » ?

1 - il existe des énergies « gratuites »

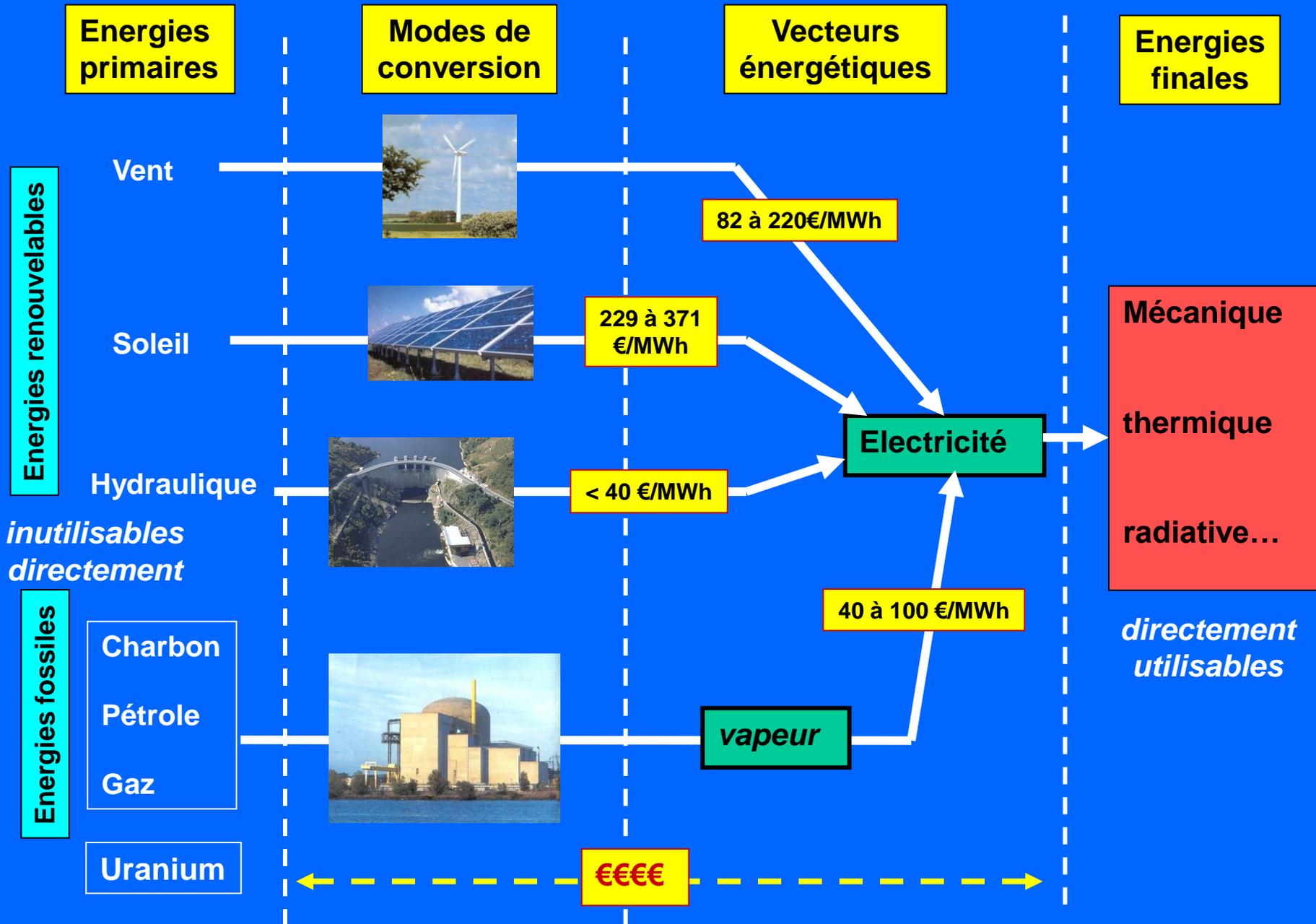
Faux !

Toutes les énergies primaires sont gratuites, mais pas les énergies finales !

Schéma énergétique

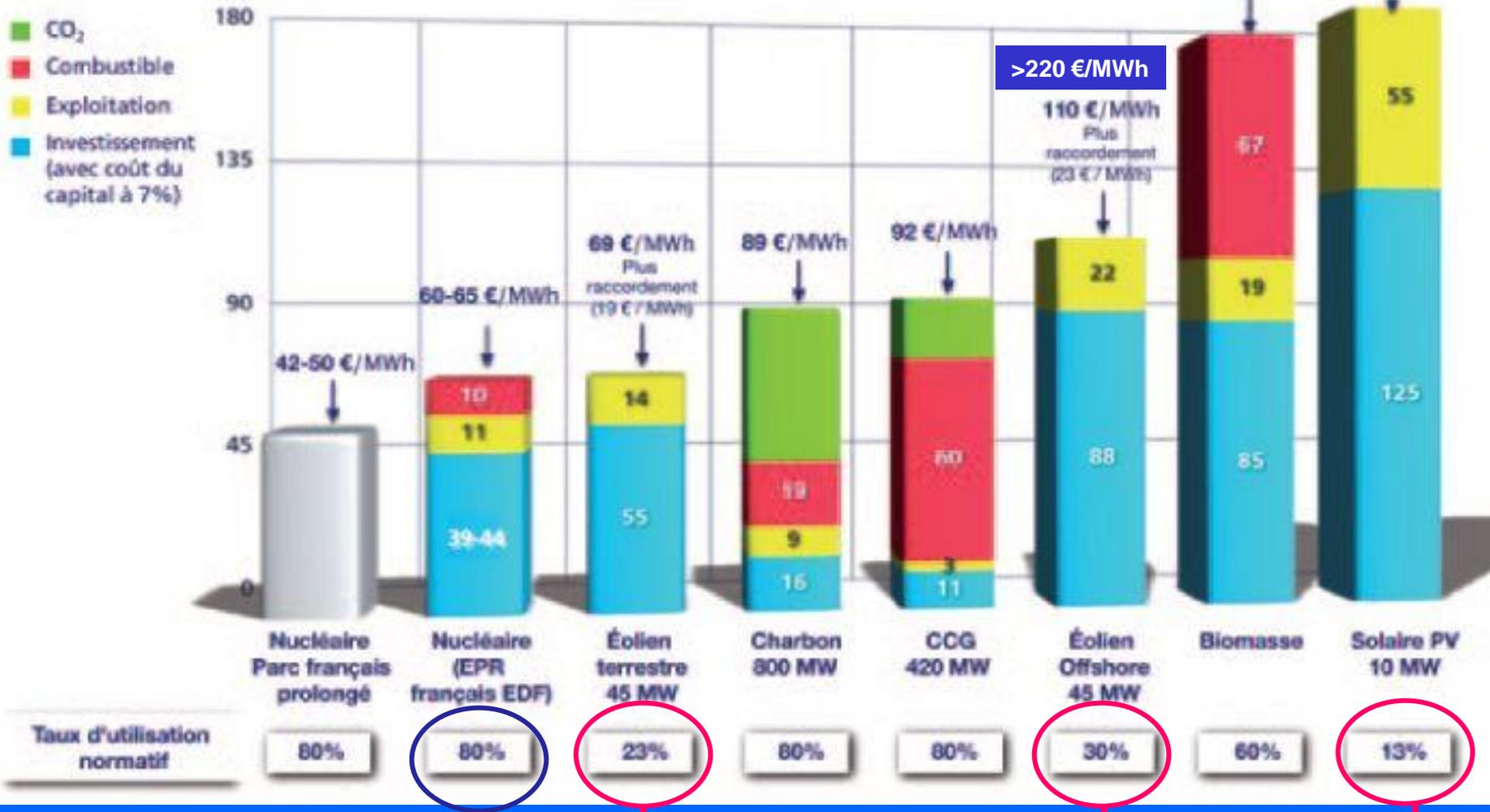


Le mythe des énergies gratuites



Coût des différentes filières

230 à 370 €/MWh



base : CO₂ : 50€/t
 U : 70\$/livre
 Gaz : 34€/MWh

pétrole : 150\$/baril
 charbon : 100 \$/t

non maîtrisable

2 - il existe des énergies « propres »

Faux !

Tous les modes de production sont polluants ou perturbent l'environnement...

Hydraulique, marémotrice :

- construction des barrages (béton... → CO₂)
- perturbe l'écologie fluviale ou maritime (→ CH₄)

Thermique classique « à flamme » :

- construction (béton, acier → CO₂)
- production (CO₂, SO₂, NO₂, cendres, poussières...)

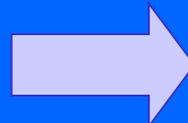
Solaire, éolienne :

- fabrication et construction (Si, béton, acier ... → CO₂)
- dégradation et recyclage des photopiles très polluants

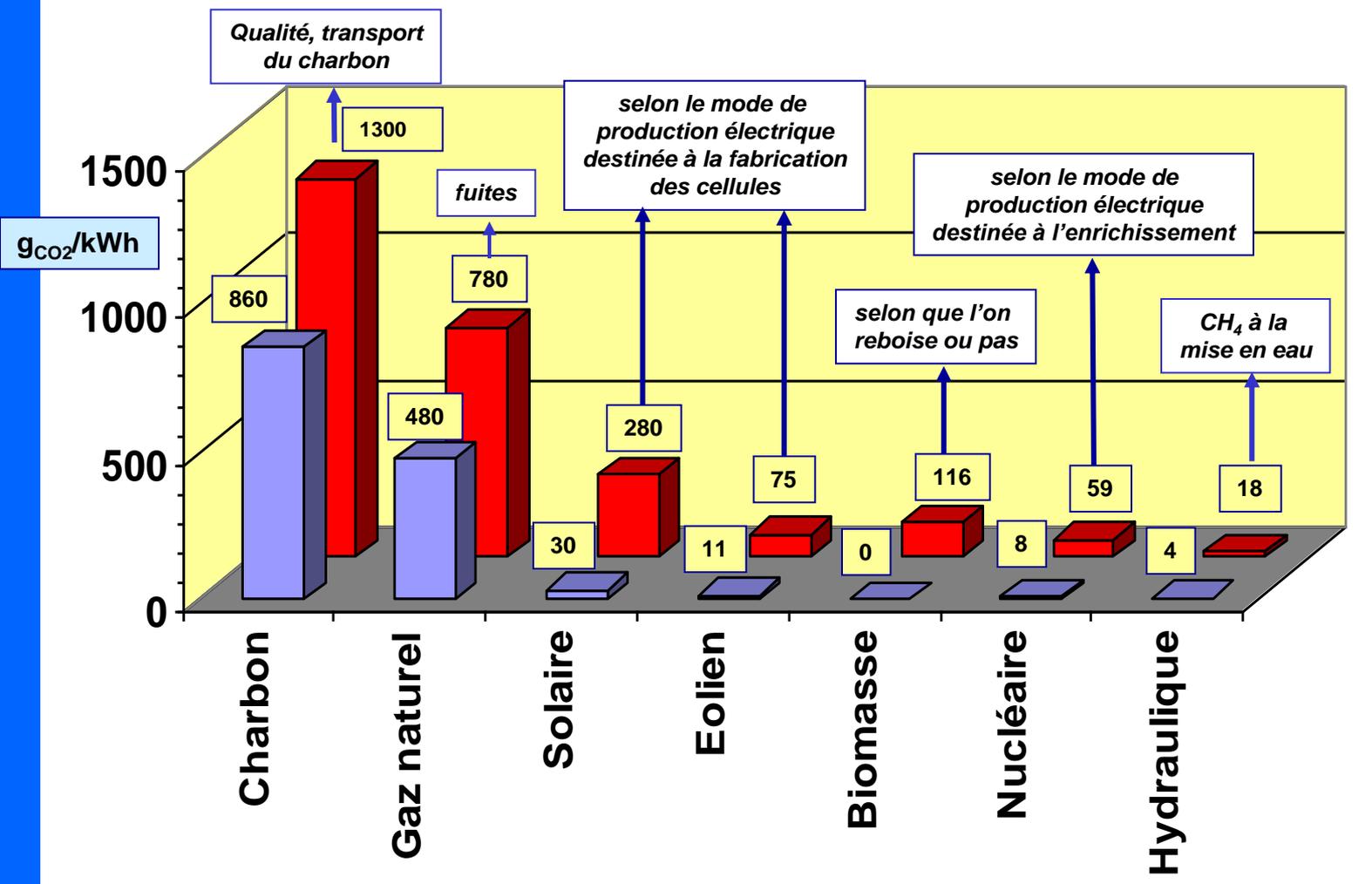
Nucléaire :

- construction, démantèlement (CO₂)
- production (déchets nucléaires)

coût de construction, de fonctionnement, de stockage, de recyclage ...



l'Eco-bilan



Estimation des émissions de CO₂ par kWh produit selon le mode de production (en tenant compte de l'éco-bilan et selon deux hypothèses, basse et haute)

Valeurs retenues par RTE et l'AIE :
(ne tiennent compte que de l'exploitation)

Charbon : 960 g/kWh
Fioul : 800 g/kWh
CCG (gaz) : 360 g/kWh

nucléaire : 0
hydraulique : 0
EnR : 0

En 2012 :

France :

Production électrique : 541 TWh

Soit un total de 29,5 Mt_{CO2}

(54 g_{CO2}/kWh ou 0,054 t_{CO2}/MWh)

- Nucléaire : 409,9 TWh (0)
- Hydraulique : 63,8 TWh (0)
- Charbon : 18,1 TWh (16,8 Mt_{CO2})
- Gaz : 23,2 TWh (6,5 Mt_{CO2})
- fioul : 6,6 TWh (8,3 Mt_{CO2})
- Enr : 18,9 TWh (0)

} 8,9%

Si au lieu d'utiliser le charbon ou le fioul, on utilisait le gaz on serait à 24 g_{CO2}/kWh (17 Mt_{CO2} au lieu de 30)

Allemagne :

Production électrique : 617,6 TWh

- Lignite : 159 TWh (1,05 t_{CO2}/MWh → 167 Mt_{CO2})
- Charbon : 118 TWh (0,93 t_{CO2}/MWh → 110 Mt_{CO2})
- Gaz : 23,2 TWh (0,39 t_{CO2}/MWh → 27,3 Mt_{CO2})
- fioul : 6,6 TWh (0,73 t_{CO2}/MWh → 6,6 Mt_{CO2})

→ 57,6%

Soit un total de 310,6 Mt_{CO2} (500 g_{CO2}/kWh ou 0,5 t_{CO2}/MWh)

France : fermeture des centrales au gaz au profit du charbon
Allemagne : remplacement du nucléaire par le lignite et le charbon

La biomasse : le mythe d'une énergie propre

Idée primaire : les émissions de CO₂ lors de la combustion sont compensées par l'absorption lors de la pousse des arbres...

⇒ Produire de l'électricité à partir de granulés de bois

Sans modification une centrale peut fonctionner avec 90% charbon – 10% granulés et avec adaptation 100% de granulés

**2012 : l'Europe a consommé 13 millions de tonnes de granulés
2020 : 25 à 30 millions de tonnes...**

du bois qu'il faut importer massivement...

du Canada et de l'Amérique du sud avec un coût croissant !

***La fabrication, le transport des granulés coûtent cher en énergie...
et en pollution ! (et en subvention...)***

200 kg_{CO2} pour produire 1 MWh (gaz de 400 à 600 kg)

**Selon une étude de Tim Searchinger de l'Université de Princeton :
Par rapport au charbon, la surproduction de CO₂ avec la biomasse :**

- au bout de 20 ans : +79%

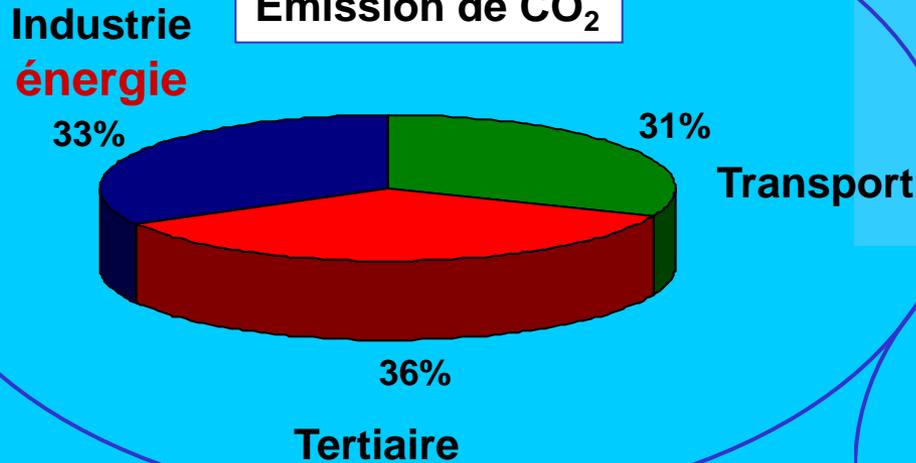
- au bout de 40 ans : +49%

- équilibre au bout de 100 ans... *quand les arbres ont suffisamment repoussé*

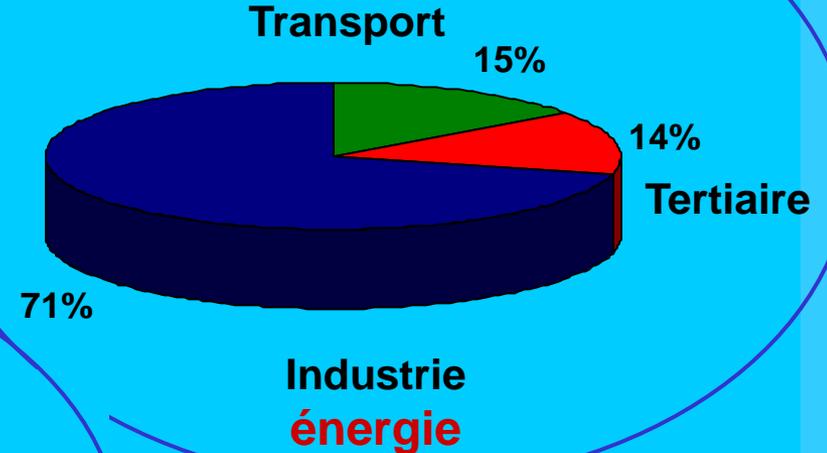
Origine des principales sources de pollution atmosphérique

*Il n'y a pas que le CO₂ !
d'autres émissions sont encore plus néfastes (SO₂, NO_x → « pluie acides »...)*

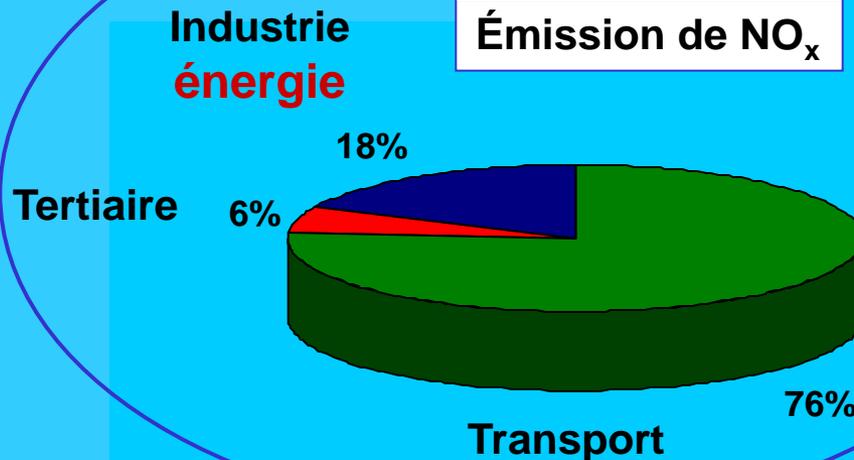
Émission de CO₂



Émission de SO₂

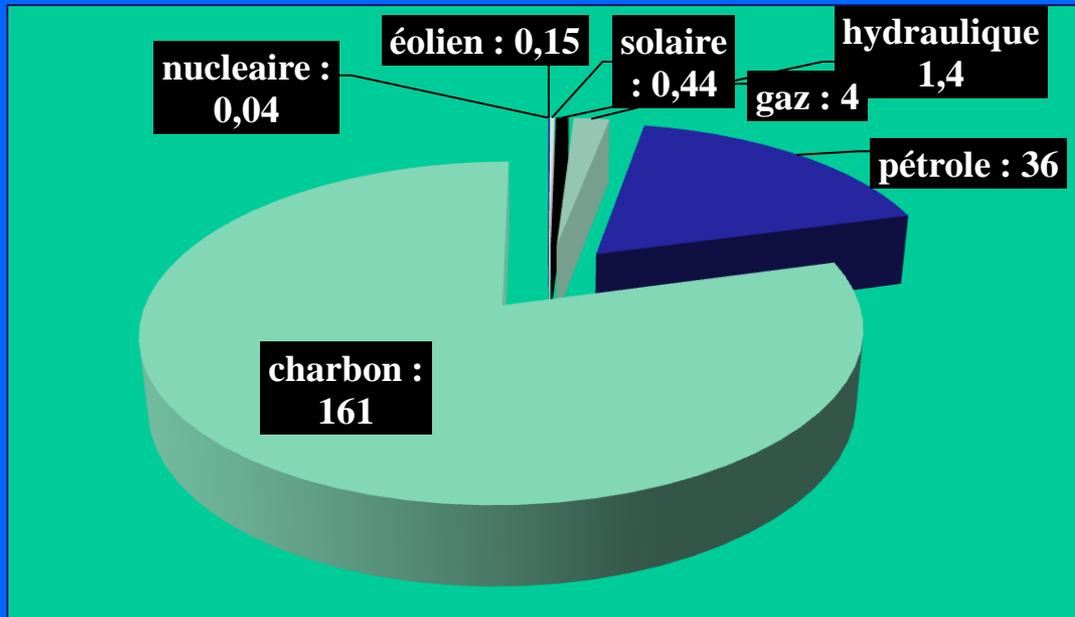


Émission de NO_x



Le danger lié aux modes de production électrique

Une étude du Wall Street Daily (nextbigfuture.com), a calculé le nombre de mort par TWh



Le pétrole apparaît 900 fois plus dangereux que le nucléaire, le charbon 4.000 fois plus ! (hors mineurs, le charbon causerait environ 15.000 morts par an dans le monde)

Autre étude menée par Pushker Kharedra et James Hansen (NASA), publié par « Environmental Science and technology » :
entre 1971 et 2009, le nucléaire aurait épargné la vie de 1,8 millions de personnes dans le monde...

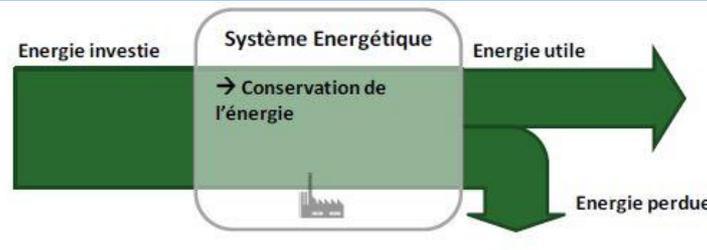
Entre 2010 et 2050, le maintien du nucléaire épargnerait entre :

- 4 à 7 millions de vie par rapport au charbon
- 400.000 à 700.000 par rapport au gaz...

Il aurait évité entre 1971 et 2009 l'émission de 64 milliards de tonnes de CO₂ et jusqu'en 2050, entre 80 et 240 milliards de tonnes de CO₂

Une notion ancienne, oubliée mais qui revient au 1^{er} plan : L'EXERGIE

$$\eta_{en} = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie investie}}$$



D'après le 1^{er} principe de la thermodynamique, l'énergie se conserve...

Le rendement énergétique est défini comme le rapport entre l'énergie investie et l'énergie utile...

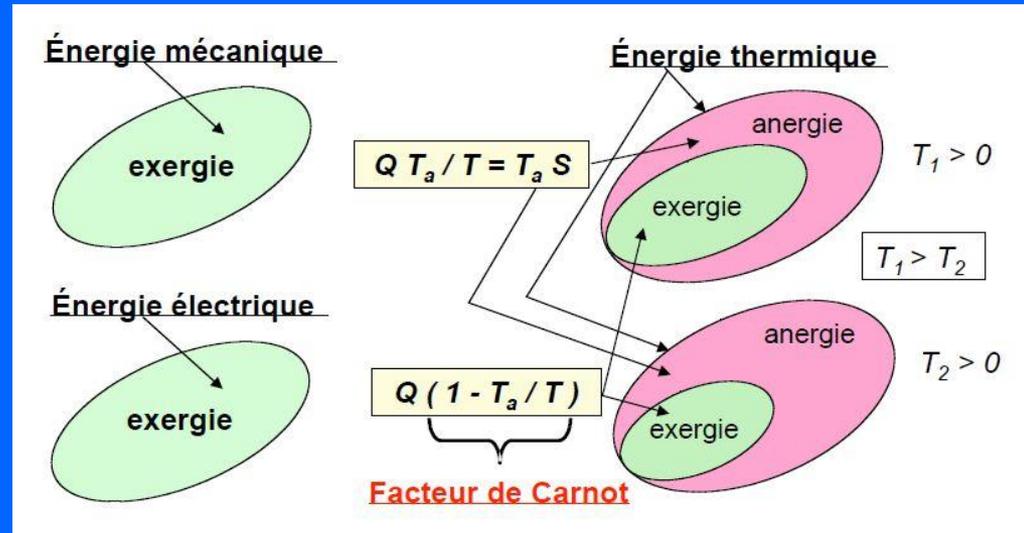
On définit l'exergie comme la part de l'énergie qui peut être transformée en énergie utile

énergie → « quantité »
exergie → « qualité »

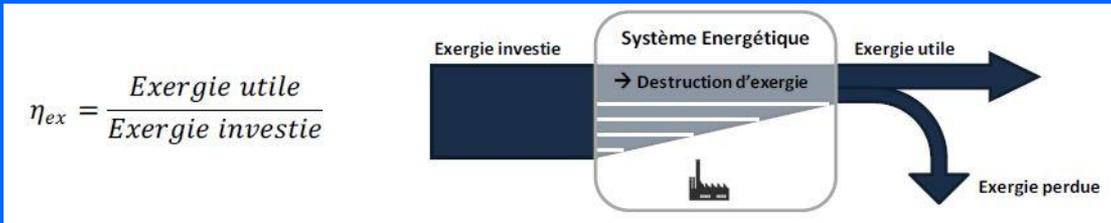
Il y a des « énergies nobles » où
exergie=énergie
énergies mécanique, électrique...

et des moins nobles... où
exergie < énergie
énergie thermique...

$$W = Q \left[1 - \frac{T_a}{T} \right]$$

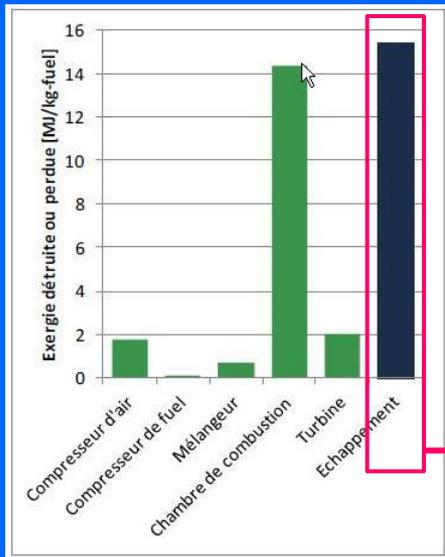


L'exergie correspond au second principe de la thermodynamique qui introduit la notion de dégradation de l'énergie (l'entropie)



La question n'est pas « économie d'énergie » mais « économie d'exergie »... c'est dire rechercher les causes des pertes d'exergie pour y remédier...

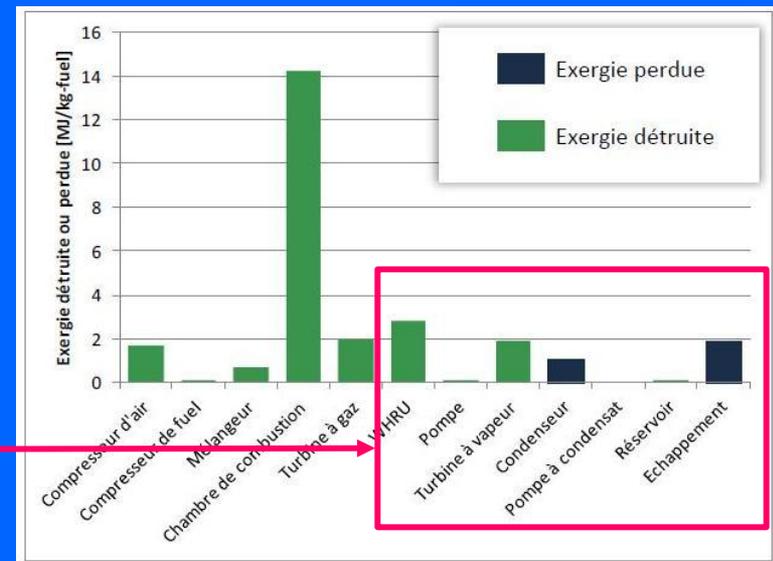
Le rendement « exergetique » peut être très différent du rendement « énergétique » et plus réaliste !



Cas de la turbine à gaz

de l'exergie est perdue par les gaz d'échappement

En intégrant la turbine dans un cycle combiné où les gaz d'échappement sont valorisés, on réduit la part perdue



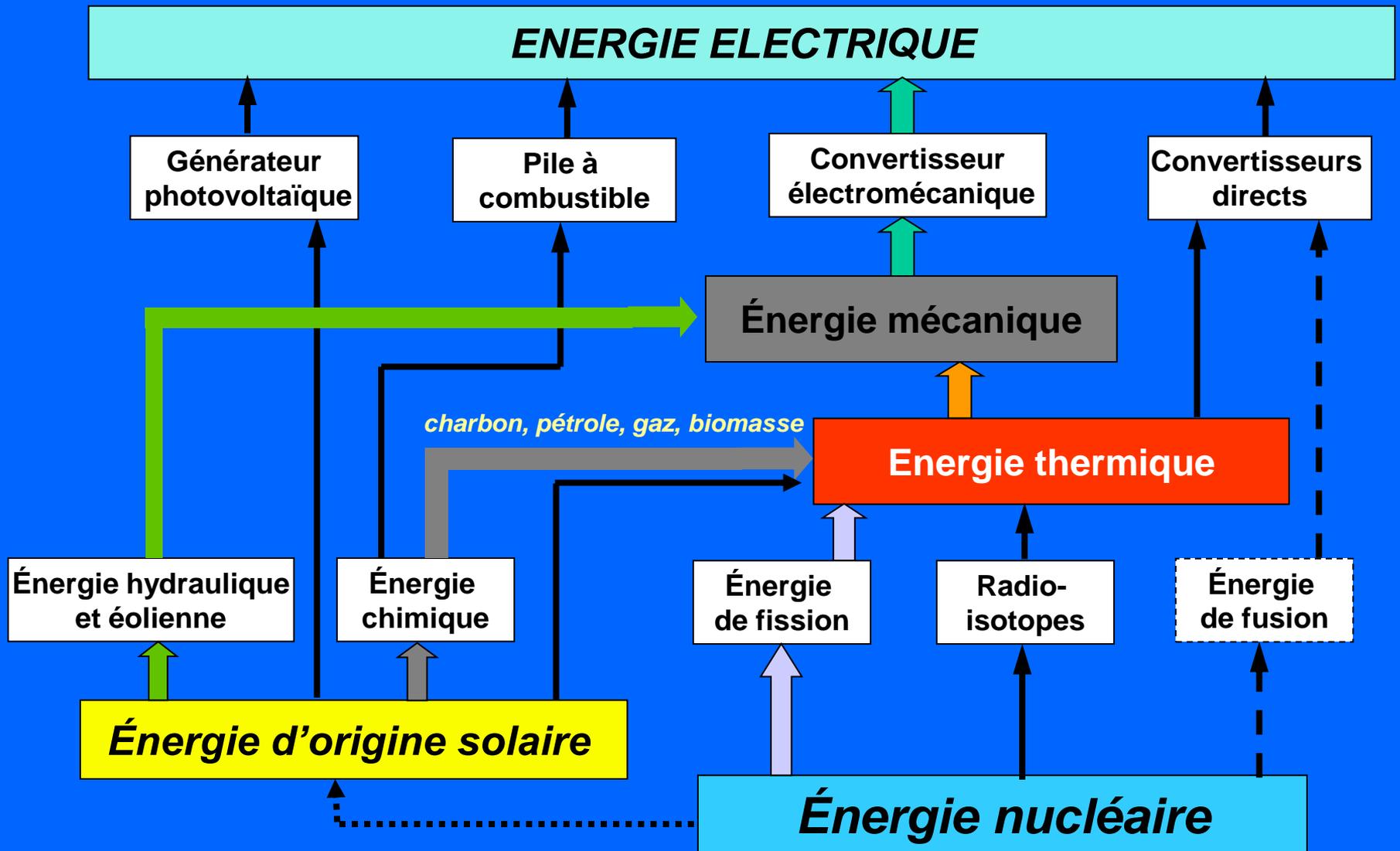
I – La production d'énergie électrique : *quelques généralités...*

1 – L'énergie électrique n'est pas une véritable énergie ,
c'est un vecteur énergétique

2 – Contrairement à une idée très répandue,
l'électricité n'est pas un fluide magique (des électrons ?)
qui circule dans les câbles...

On ne « produit » pas de l'électricité, on produit une « énergie »
sous la forme d'une différence de potentiel... que l'on cherche à
maintenir constante...

Filières de production d'énergie électrique



Petit rappel sur les unités employées en production électrique

1 - Puissance électrique :

kW, MW, GW 1 GW = 10^6 kW

M : méga (10^6)

G : giga (10^9)

T : téra (10^{12})

Pour une centrale thermique on distingue :

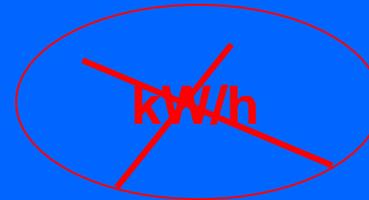
- la puissance thermique brute (MW_{th})
- la puissance électrique produite (MW_e)

qui tient compte du rendement (environ 30 à 35% pour une centrale thermique)

$$900 MW_e = 3000 MW_{th}$$

2 – Production énergétique

kWh, MWh, GWh et TWh



1 kWh = énergie produite par une puissance de 1 kW pendant 1 heure = 3 600 000 joules

1 MWh = 10^3 kWh

1 GWh = 10^6 kWh

1 TWh = 10^9 kWh

La production électrique annuelle en France est d'environ 500 TWh soit 500 milliards de kWh

! La puissance brute d'une installation peut être une donnée trompeuse

Il faut distinguer :

- la puissance « installée » (brute)

- EPR : 1600 MW_e
- éolienne : de 750 kW à 5 MW

- le coefficient de disponibilité (Kd) (ou « facteur de charge ») :

donne la fraction du temps où la centrale est apte à produire sa puissance maximale

centrale nucléaire : 80 à 90%
-*changement de combustible*
-*révision*
-*réparation*

éolienne terrestre⁽¹⁾ : → 15 à 25%

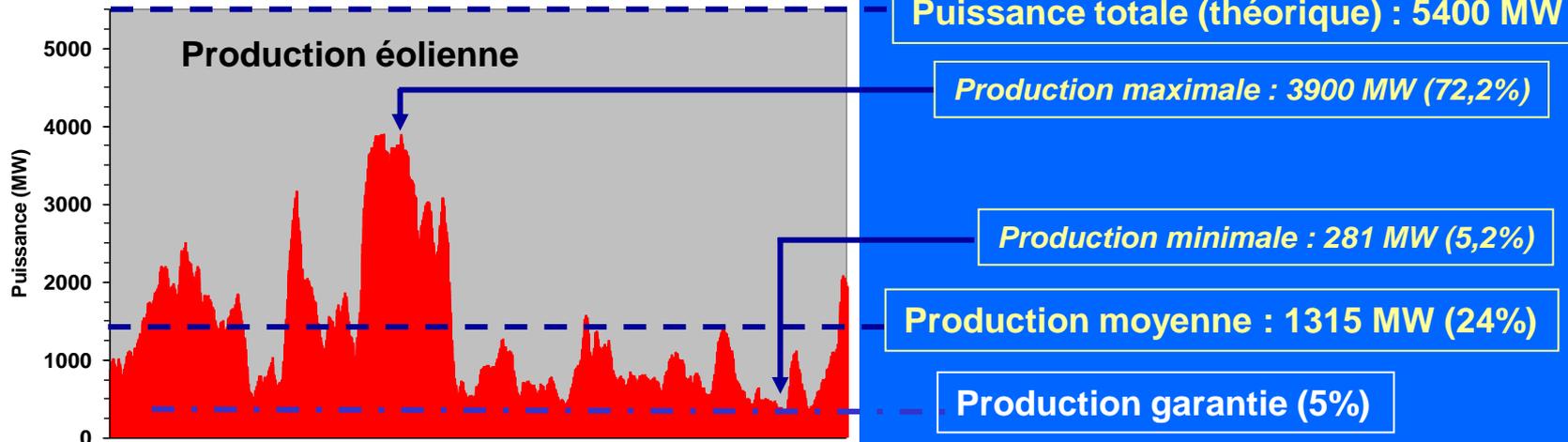
éolienne off-shore : → 25 à 35%

selon la force du vent

(1) Facteur de charge moyen en France en 2009 : 20%

Novembre 2010

Production éolienne



Attention aux « effets d'annonce » dans les médias :

Selon Ewea et Gwec (associations internationales de l'énergie éolienne), en 2009, le parc mondial, soit 37,5 GW, est équivalent à 23 EPR...

En réalité, compte tenu du facteur de charge moyen de 20%, la production théorique est de : 66,4 TWh/an soit l'équivalent de 6 EPR ! (11,2 TWh/an/EPR)

En fait, il apparaît que seulement 60% de l'énergie éolienne est utilisable réellement et donc on est plus proche de 4 EPR que de 23

- le coefficient de production (K_p) :

donne la fraction du temps où la centrale produit réellement (en fonction des besoins)

Moyenne pour la France (2007) :

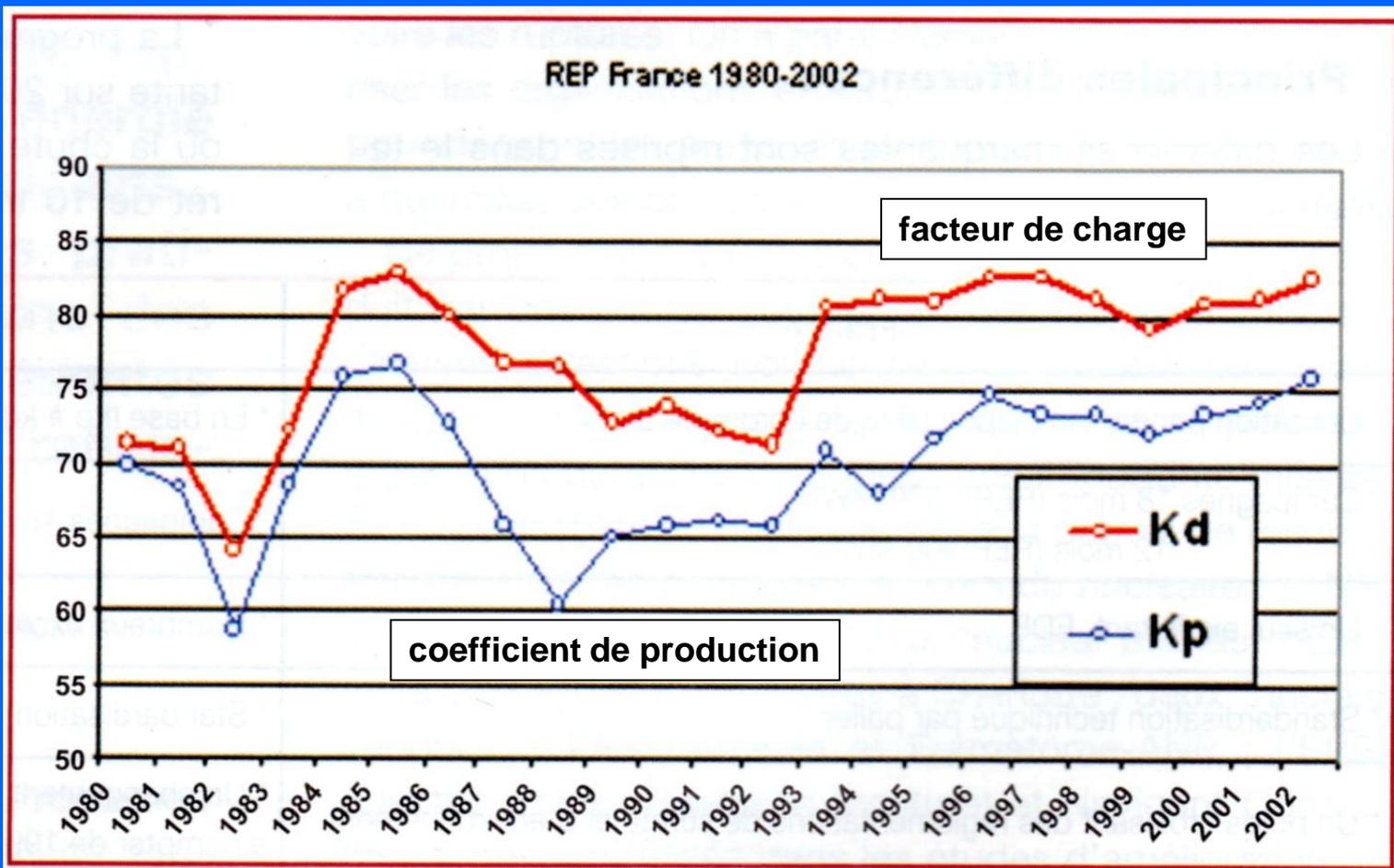
-parc nucléaire (production de base) : 80%

-parc thermique classique (semi-base et pointe) : de 5 à 60% (2007 : 32% en moyenne)

-centrales hydrauliques (semi-base et pointe) : 26%

↓
très variable selon les années

En théorie, pour l'éolien et le solaire, le facteur de production est égal au facteur de charge, mais il peut y avoir « délestage » en cas de surproduction... ou arrêt des éoliennes la nuit dans certaines régions pour des raisons de pollution sonore



**Exemple : variations des coefficients Kd et Kp
du parc nucléaire français entre 1980 et 2002**

Si un réacteur nucléaire ne peut pas être utilisé en « tout ou rien » comme une centrale thermique classique, on peut cependant ajuster sa production dans une certaine limite... (10 à 15% selon les besoins)

Sans compter les puissances « hypothétiques » !

Pour qualifier les cellules photovoltaïques,
on utilise la « puissance crête » (P_C)

La puissance crête correspond à la puissance maximale obtenue :

- pour une cellule connectée à une charge d'impédance optimale
- recevant un éclairement de 1000 W/m^2 (vers midi heure solaire et orientée au sud)
- à la température 25°C

Elle n'est quasiment jamais obtenue !

*En 2009, la puissance photovoltaïque était de 310 MWc, elle a produit 0,17 TWh
(0,03% de la production totale d'électricité)*

soit un facteur de charge de 6% (puissance réelle effective : 20 MW)

En 2012, 4 TWh (0,9%) pour 3510 MWc soit un facteur de 7,5% (260 MW réel)

Exemple : la ferme solaire de Toul Rosière (54)

Surface occupée : 367 ha

Puissance crête : 143 MW

Production annuelle : 188 GWh (0,188 TWh)

Facteur de charge : 15%

Coût d'investissement : 450 M€

Puissance réelle effective : 21,5 MW

soit : 21 M€/MW_{effectif}

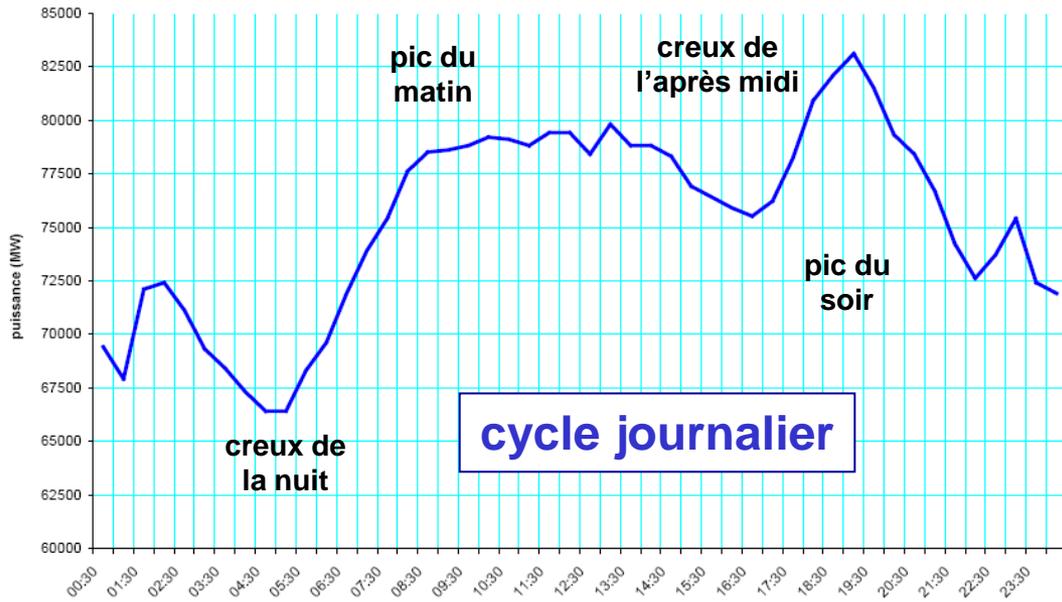
(EPR : 5 M€/MW)

Réseau de distribution électrique : quelques données techniques

Règles de base :

- 1 - L'énergie électrique ne peut être stockée... (ou très difficilement)
- 2 – La production doit être adaptée en permanence à la demande

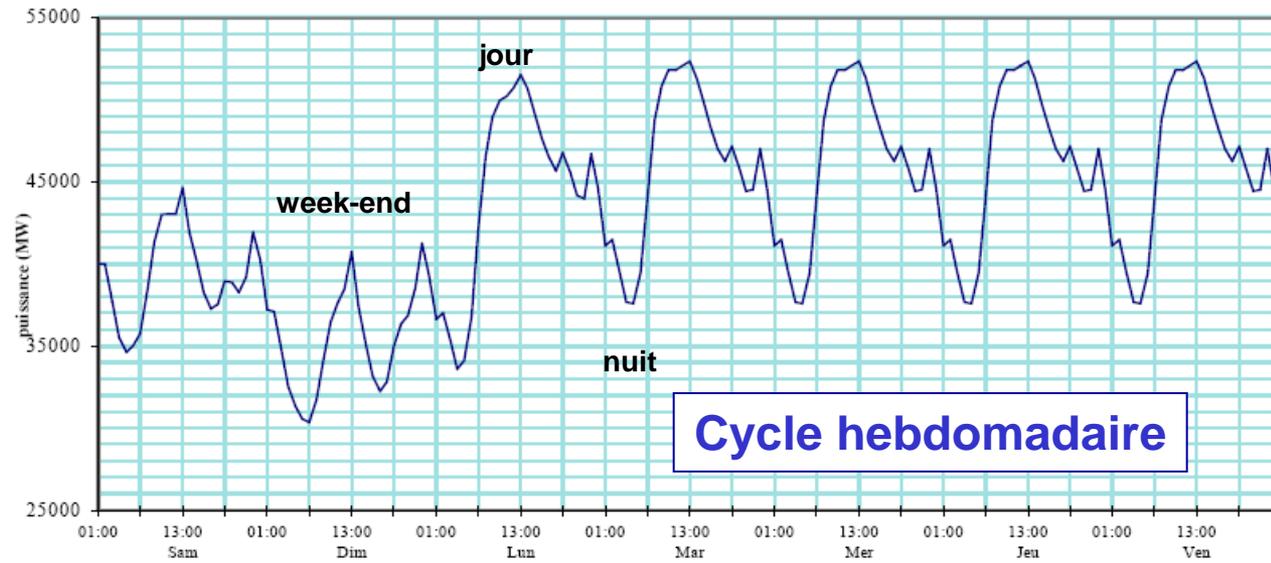
Consommation Journalière du Mercredi 08 janvier 2003

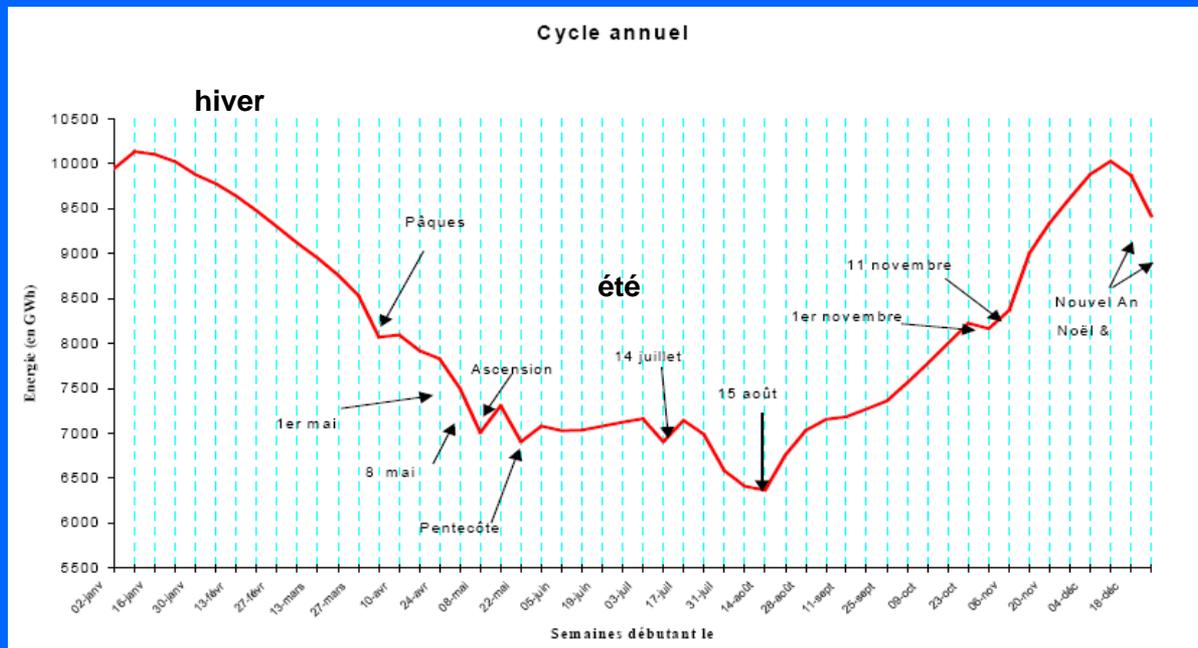


Les cycles de la consommation d'énergie électrique

Courbes moyennes de consommation

Exemple de cycles hebdomadaire et journalier en période d'été





**Cycle
annuel**

- La température :

hiver : 2100 MW / °C

été: 500 MW / °C

(climatisation)

(Une variation de $\pm 1^\circ\text{C} = \pm 2100 \text{ MW}$)

- La nébulosité (nuages)

classée de 0 à 8 (octa) 0 : ciel dégagé
8 : ciel couvert

650 MW / octa

- L'activité économique et familiale, l'heure légale, la tarification...

Il faut adapter en permanence la production d'énergie en fonction de la demande

Chaque jour RTE prévoit la consommation du lendemain :

Pour chacune des 7 régions, la journée est divisée en 48 périodes de 30mn pour lesquelles on prévoit la consommation. La production et la distribution sont adaptées en conséquence. Une mise à jour est faite le jour même à 14h30

Les 7 régions électriques



Des évènements exceptionnels peuvent perturber ces prévisions et il faut y faire face immédiatement sous peine d'effondrement du réseau !

Cela signifie la mise en route de moyens rapides de production (gaz, pétrole) ou de délester certains moyens à caractère trop aléatoire et imprévisible comme l'éolien ou le solaire.

Un nouveau logiciel, IPES, va être mis en place pour mieux gérer ces énergies peu maîtrisables !

Consommation d'électricité du :

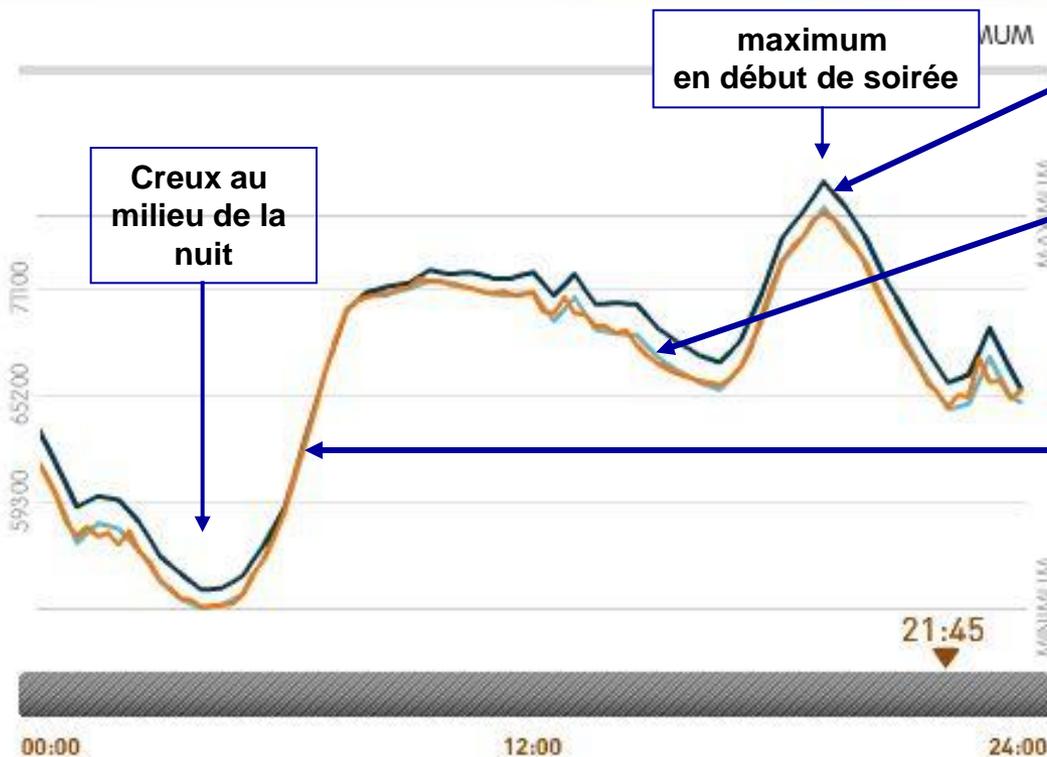
16 Novembre 2010



Comparer la consommation réelle avec :

PRÉVISION J

PRÉVISION J-1



Creux au milieu de la nuit

maximum en début de soirée

prévisions faites le 15 novembre

prévisions actualisées le jour même (14h30)

consommation réelle

65321 MW

CONSOMMATION

65250 MW

PRÉVISION J

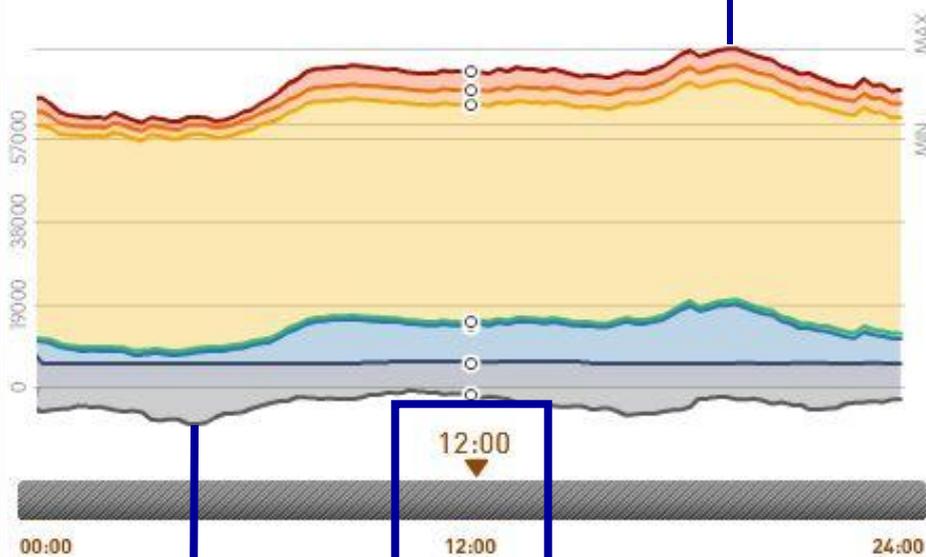
66750 MW

PRÉVISION J-1

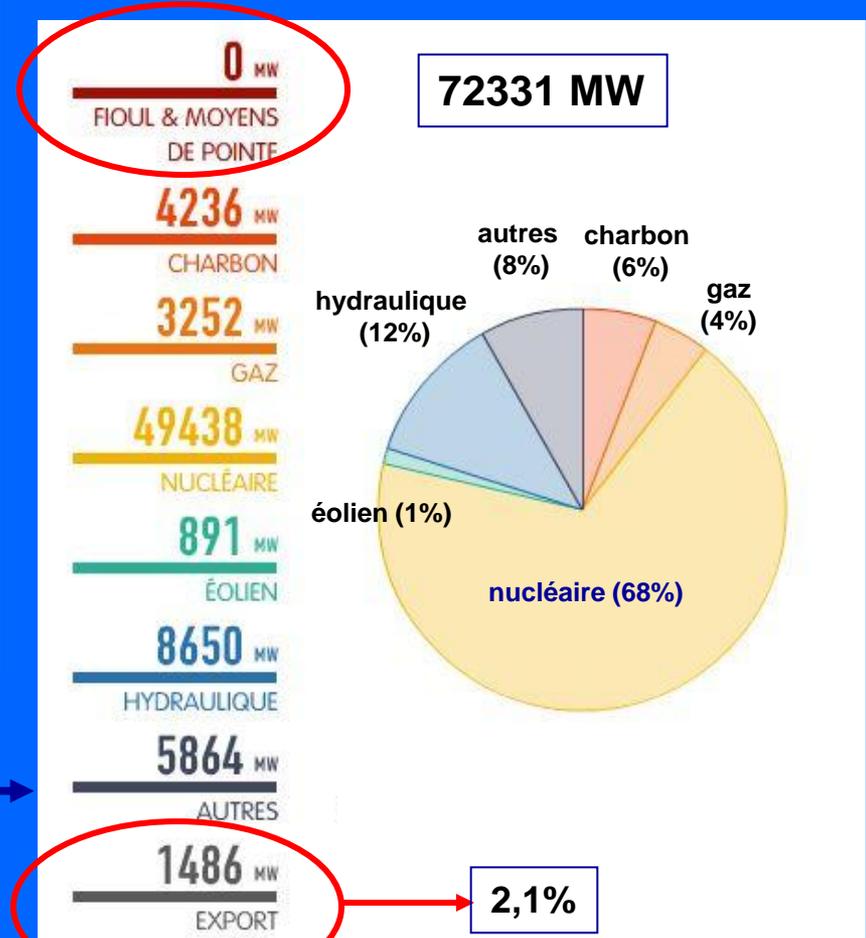
informations fournies par RTE

Détail par filières de la production d'électricité française
pour la journée du : 16 Novembre 2010

SURVOLEZ OU CLIQUEZ POUR AFFICHER LE DÉTAIL CI-DESSOUS. MINIMUM MAXIMUM



19h : 77415 MW
nucléaire : 50107 MW (65%)
hydraulique : 13219 MW (17%)
exportations : 2192 MW (2,8%)



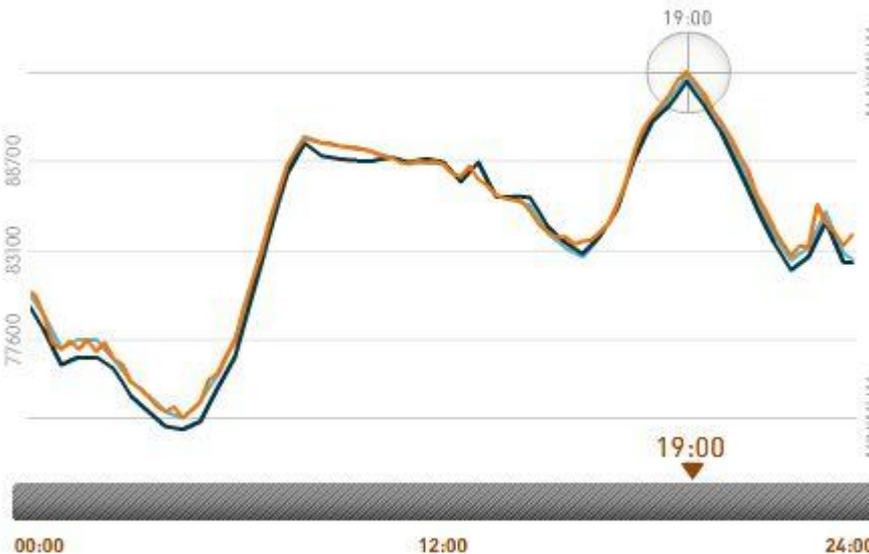
4h30 (61958 MW) :
nucléaire : 48958 MW (79%)
hydraulique : 2417 MW (3,9%)
exportation : 8363 MW (13,5%)

Une journée d'hiver très froide : le Jeudi 14 décembre 2010

Consommation d'électricité du : 14 Décembre 2010

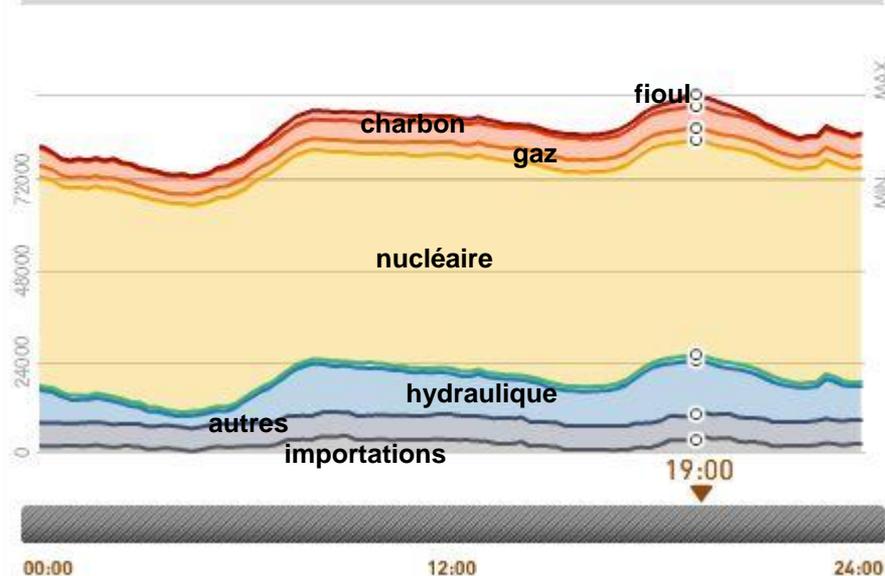
Comparer la consommation réelle avec : **PRÉVISION J** **PRÉVISION J-1**

MINIMUM MAXIMUM



Détail par filières de la production d'électricité française pour la journée du : 14 Décembre 2010

SURVEILEZ OU CLIQUEZ POUR AFFICHER LE DÉTAIL CI-DESSOUS. MINIMUM MAXIMUM

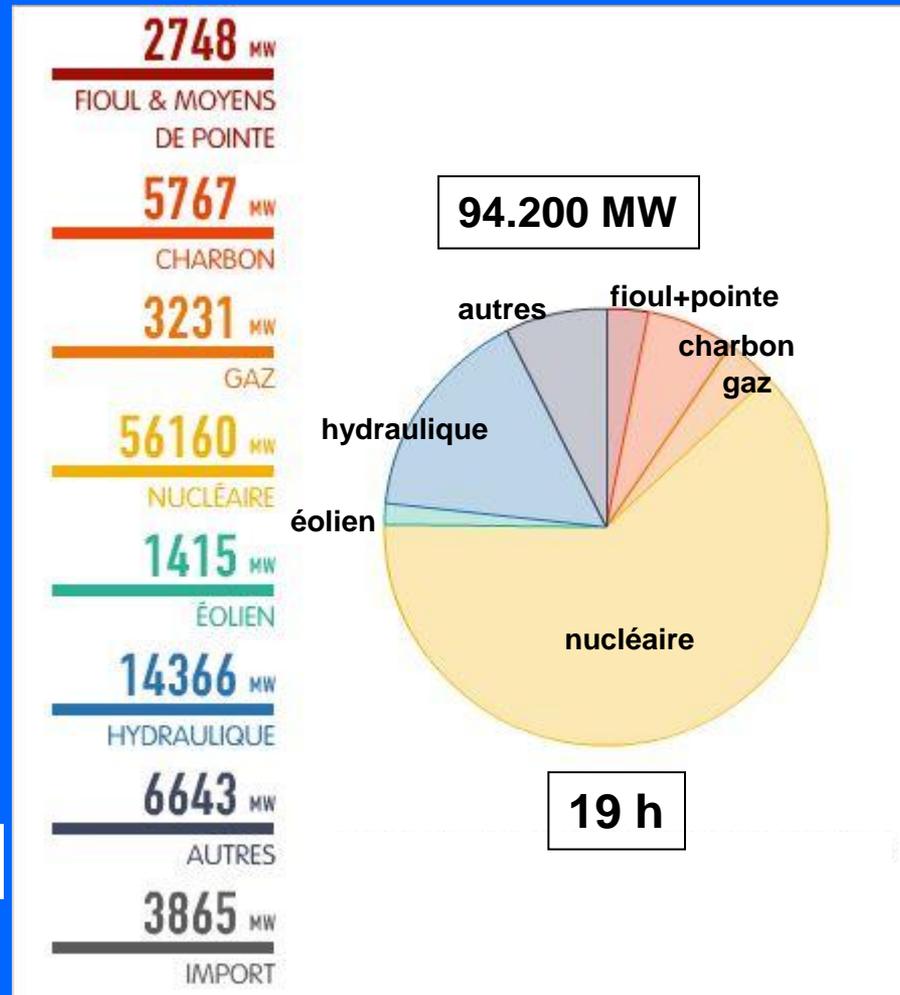
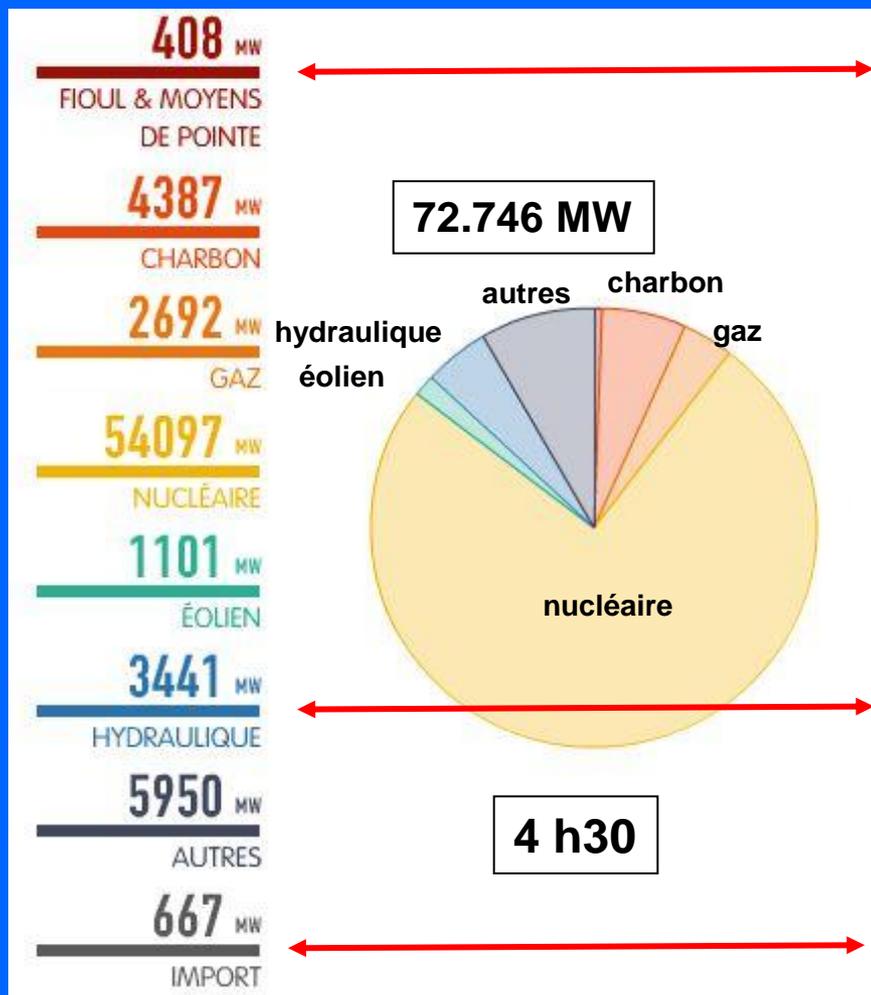


Maximum : 19h 94,2 GW
Minimum : 4h30 72,7 GW

Part des différentes sources au cours de la journée :

Fioul+pointe : 1,52%	Eolien : 1,409%
Charbon : 6,22%	Hydraulique : 11,58%
Gaz : 3,73%	Autres : 7,66%
Nucléaire : 67,78%	

Les importations ont représentées 3,08% de la consommation



- 1 – la production nucléaire reste stable (51 réacteurs sur 58 en service)
- 2 – la production hydraulique sert d'ajustement
- 3 – fioul+pointe en augmentation
- 4 – charbon et gaz constants
- 5 – l'éolien très faible (peu de vent)
- 6 - Importations importantes : mini (4h30) : 667 MW, maxi (9h) 4570 MW

Il faut disposer de différentes sources de production afin de faire face à toutes les demandes :

Pour atteindre sa pleine puissance, il faut :
•quelques minutes à une centrale hydraulique,
•une dizaine d'heures à une centrale thermique
•deux jours à un réacteur nucléaire...

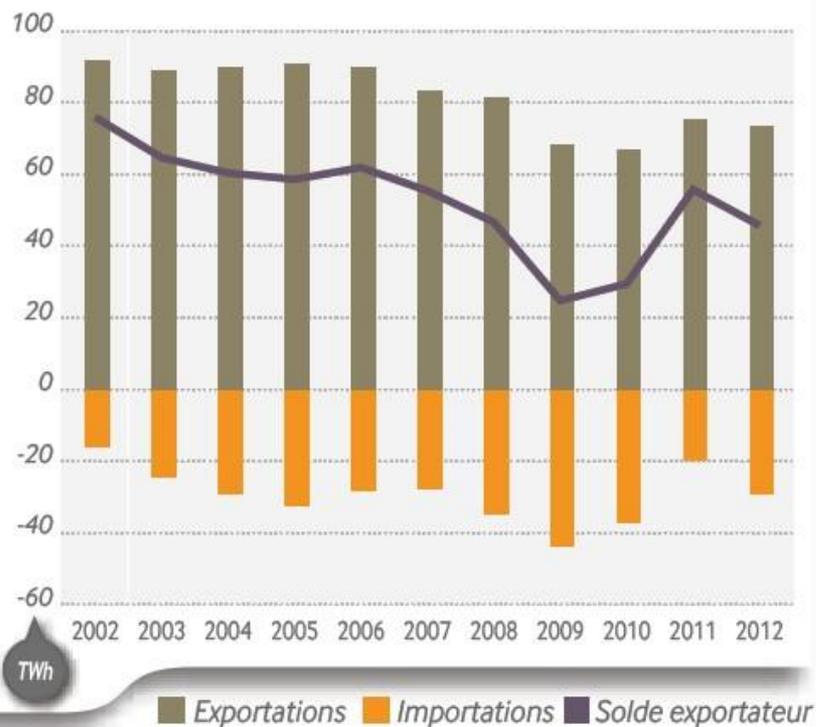
- Production de base : constante toute l'année (40GW)
 - centrales nucléaires
- Production de semi-base (→ 60 GW) : faire face aux fluctuations prévisibles
 - centrales nucléaires (en ajustant la puissance)
 - centrales hydrauliques
 - centrales thermiques à flamme (charbon, gaz)
- Production de pointe (→ 90 GW) : faire face à des demandes ponctuelles très importantes (froid intense, canicule...)
 - turbines à combustibles ou à gaz (TAC)
 - centrales thermique au fioul
 - hydraulique STEP (station de transfert d'énergie)
 - importation d'électricité

On importe en période de pointe de l'Allemagne (centrales thermiques au charbon)

Exemple : 6/01/09 demande 91500 MW :
56 réacteurs nucléaires en service max sur 58
réserves disponibles : de 6000 à 8000 MW
importation : 1000 MW

NB : en 2008, on a exporté durant 359 jours et on a importé pendant 6 jours⁴⁴

Echanges contractuels annuels



Données 2012

En 2012 le solde est positif avec tous les pays limitrophes sauf avec l'Allemagne qui grâce à ses centrales thermiques au charbon nous permet de faire face aux pointes hivernales et qui se « débarrasse » à vil prix de son surplus d'énergie solaire... Situation différente en 2013... la pénurie pointe son nez !

Les échanges avec les pays limitrophes permettent un ajustement de la puissance électrique disponible selon les circonstances.

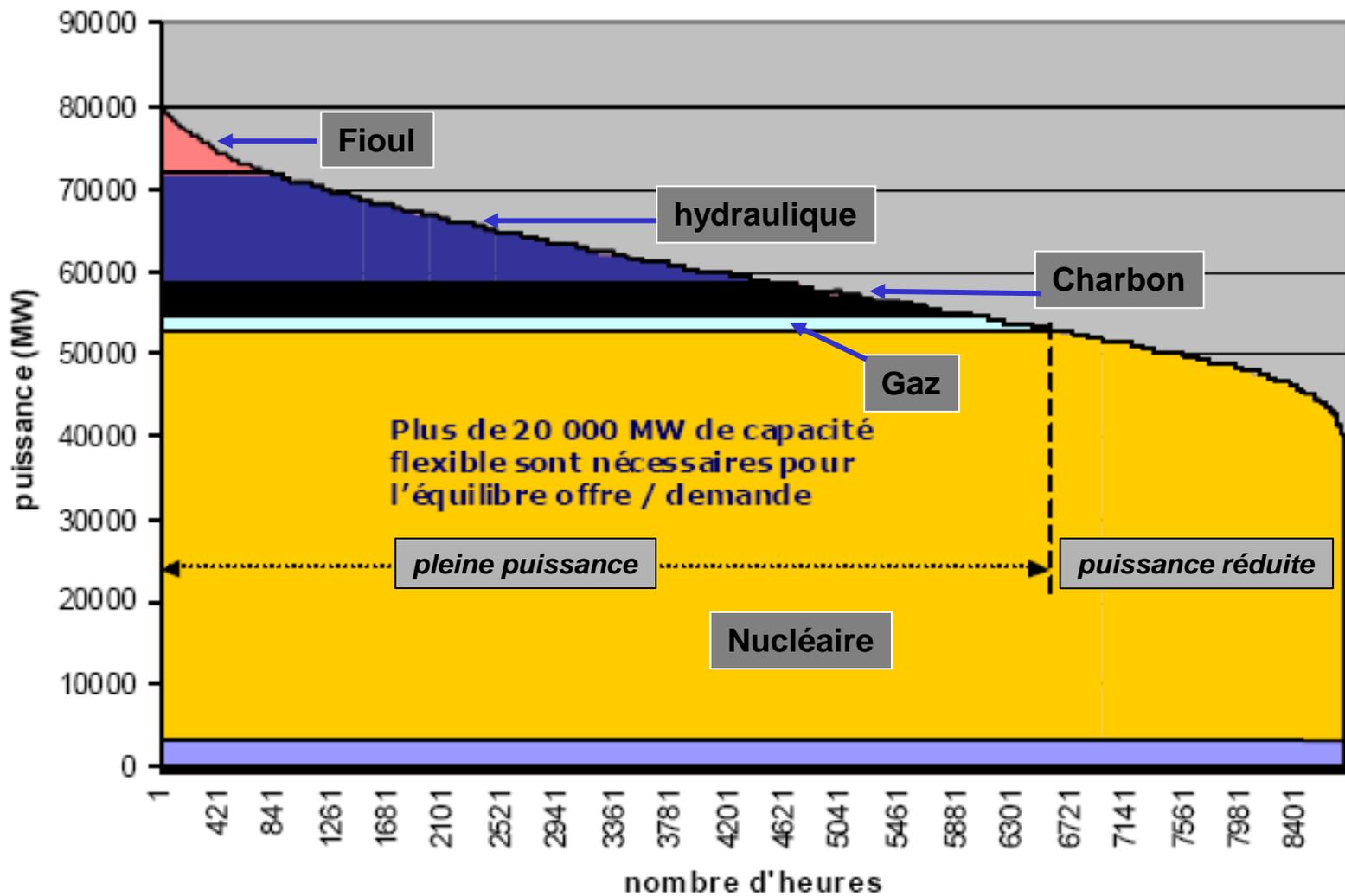
La France exporte plus qu'elle n'importe :
en 2012 elle a exporté 2,5 fois plus qu'elle n'a importé

Elle est la première exportatrice d'électricité (loin devant l'Allemagne...)



Source : RTE (Réseau de transport d'électricité)

monotone de production par filière - historique 2004



Répartition des moyens de production durant 2004

Répartition de la production électrique en 2012

Puissance électrique totale : 126,7 GW
 Production électrique : 546 TWh

	Puissance		Production	Production		Facteur de productivité
	MW	(%)	théorique (TWh)	réelle	(%)	
Nucléaire	63130	49,1%	553,0	409,9	75,0%	74,1%
Thermique	27810	21,6%	243,6	47,9	8,8%	19,7%
<i>Charbon</i>	7910	6,1%	69,3	18,1	3,3%	26,1%
<i>Fioul</i>	9380	7,3%	82,2	6,6	1,2%	8,0%
<i>Gaz</i>	10520	8,2%	92,2	23,2	4,2%	25,2%
Hydraulique	25400	19,7%	222,5	63,8	11,7%	28,7%
Eolien	7450	5,8%	65,3	14,9	2,7%	22,8%
Solaire PV	3510	2,7%	30,7	4,0	0,7%	13,0%
Biomasse	1390	1,1%	12,2	5,9	1,1%	48,5%

Coefficient de productivité réel des différentes sources de production d'énergie électrique

- La part du nucléaire a été légèrement inférieure à son coefficient de disponibilité (82 à 85%)
- Les parts de l'éolien et du photovoltaïque sont liées à leur coefficient de disponibilité
- Les parts de l'hydraulique et du thermique classique ont été nettement inférieures, ces énergies étant employées en semi-base et en pointe

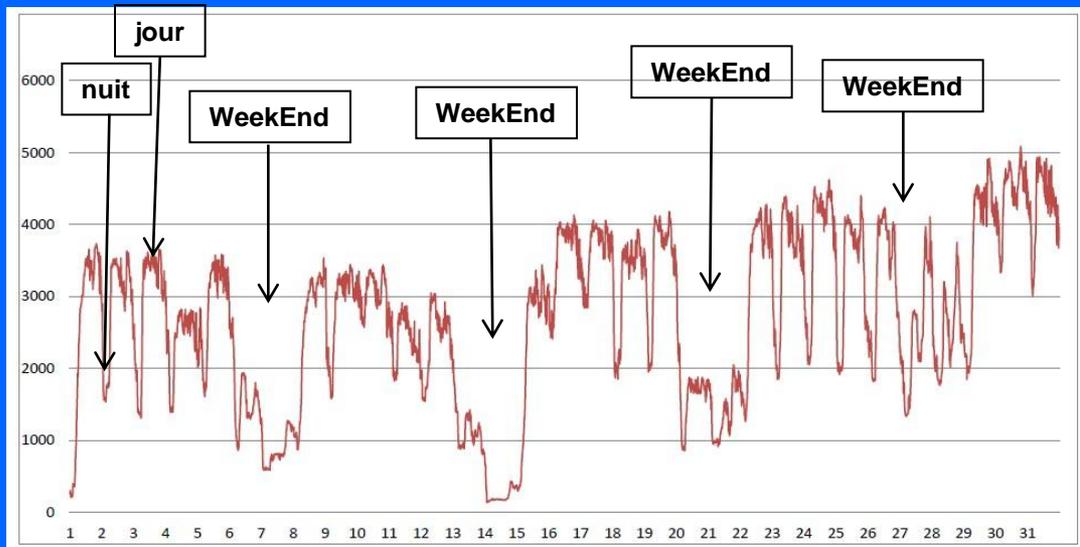
Production électrique française durant le mois d'Octobre 2012



1 – le parc nucléaire (MW)

Montée progressive en puissance avec l'arrivée du froid

$$P_{\text{moy}} = 43.900 \text{ MW}$$



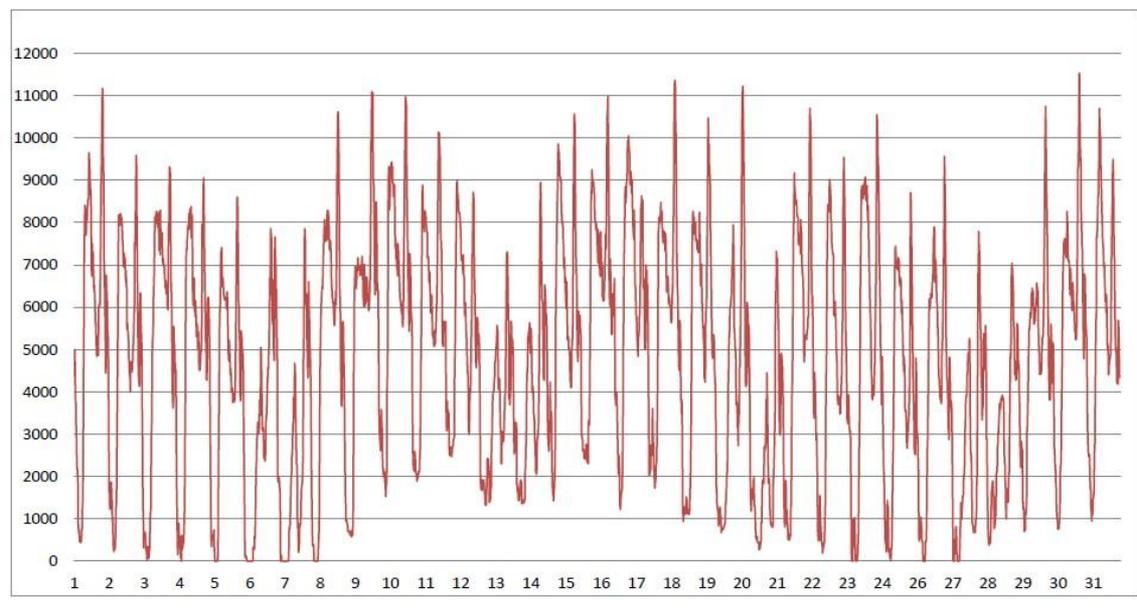
2 – le parc thermique à flamme « charbon » (MW)

$$P_{\text{moy}} = 2.730 \text{ MW}$$

3 – le parc Hydraulique (MW)

$$P_{\text{moy}} = 4.700 \text{ MW}$$

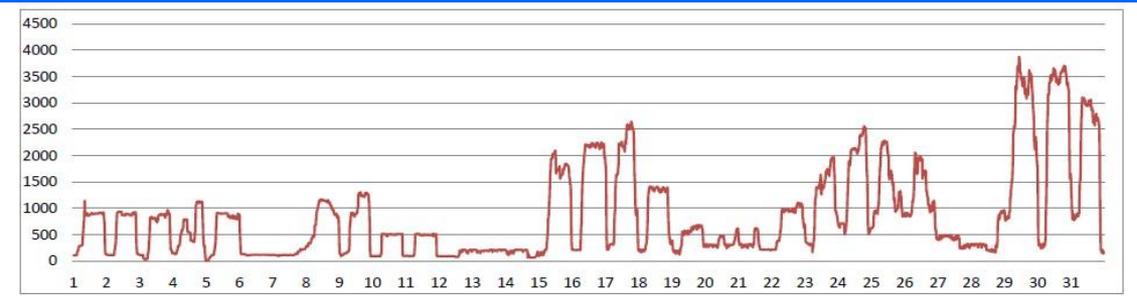
Ajustement instantané



Ajustements programmés :

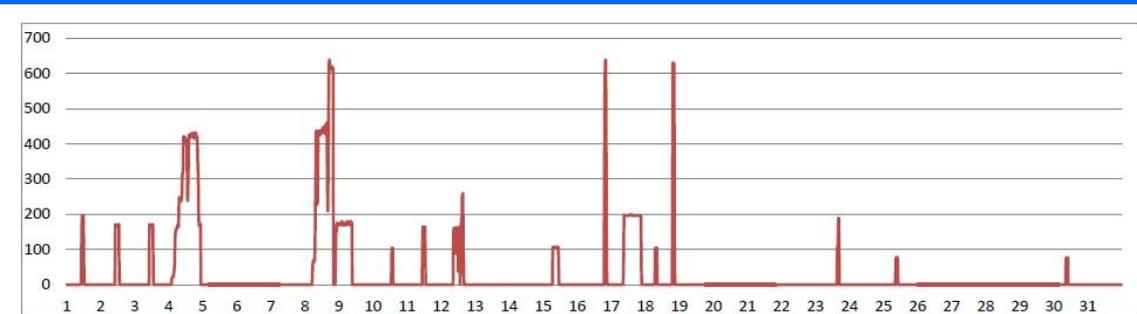
4 – le parc thermique à flamme « gaz » (MW)

$$P_{\text{moy}} = 854 \text{ MW}$$



5 – le parc thermique à flamme « fioul » (MW)

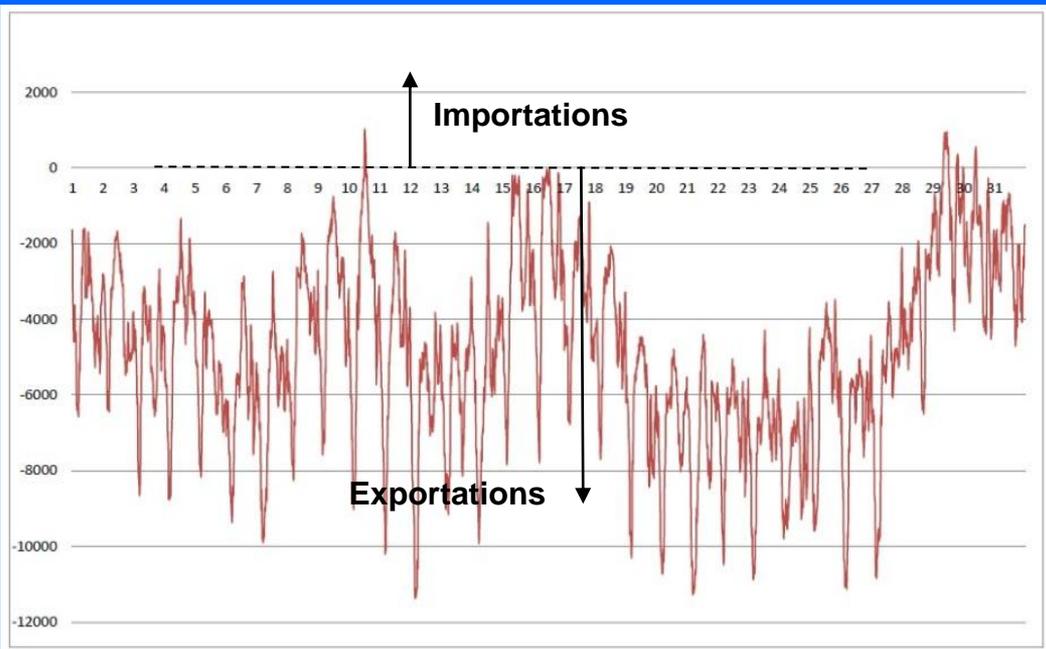
$$P_{\text{moy}} = 29 \text{ MW}$$



6 - Importations-exportations

Solde excédentaire...

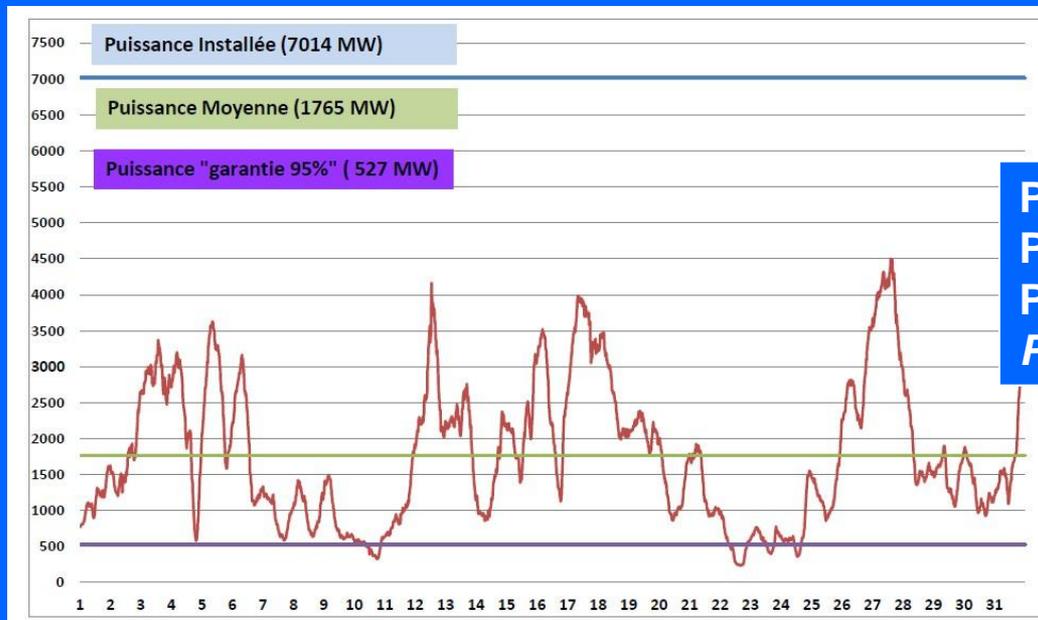
$$P_{\text{moy}} = 4.800 \text{ MW}$$



7 - Production éolienne

incontrôlée, dépend du vent...

Puissance installée : 7.014 MW
Puissance moyenne : 1.765 MW (25%)
Puissance garantie (95%) : 527 MW (7,5%)
Puissance max : 4.500 MW (65%)



Distribution électrique

RTE (réseau de transport d'électricité)

1 328 300 km de lignes

HT : 104 300 km
MT : 596 000 km
BT : 628 000 km

Lignes haute tension grand transport

400 kV - triphasée (21370 km)

Lignes haute tension régionales

225 kV (26490 km)

90 kV
63 kV
45 kV (56440 km)

réseau moyenne tension

20 kV

réseau basse tension

600 V
400 V triphasés
230 V monophasés

- Ligne à 1 terme
- Ligne à 2 termes
- Câble liaison I.F.A. 270 kV courant continu

Lignes 400 kV



Longueur de circuits en exploitation (km)	Total		
	Aérien	Souterrain	Total
Au 31 décembre 2011	100 645	3 993	104 638
Neuf	375	234	609
<i>nouveau</i>	61	147	208
<i>renouvelé</i>	314	14	328
<i>mis en souterrain</i>	0	73	73
Déposé	-454	-2	-456
Autres modifications	-72	-35	-107
Au 31 décembre 2012	100 494	4 190	104 684

Evolution des lignes HT en 2012

Coût d'une ligne 400kV :

- aérienne : 1 M€/km
- enterrée : de 7 à 12 M€/km

Le développement des parcs éoliens va nécessiter la construction de plusieurs milliers de km de lignes HT et MT : coût : 30 à 50 milliards d'euros...



pertes par effet Joule :

$$W_{\text{pertes}} \propto \frac{C^{\text{te}}}{U^2}$$

Sur une ligne de 100 km :

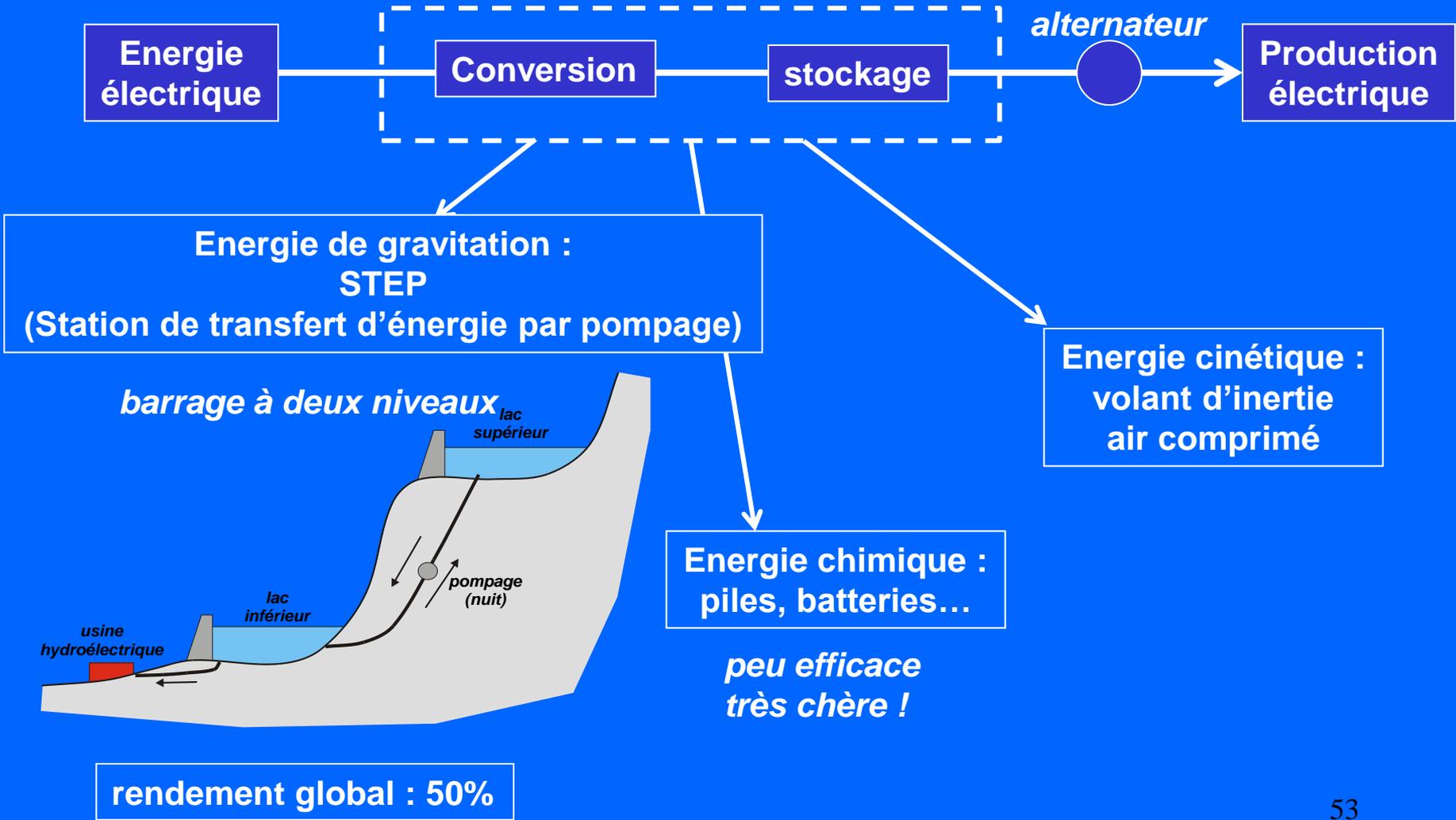
- 1% à 200 kV
- 0,25 % à 400 kV
- (0,04% à 1.000 kV)**

En France, en 2010, les pertes totales ont été de 37,2 TWh pour une production de 550,3 TWh, soit 6,7 %

Pour faciliter les échanges, les pays européens sont interconnectés (450 millions d'abonnés)

Stockage de l'énergie électrique

L'énergie électrique ne peut être stocker directement, elle doit être convertie en une autre forme d'énergie ! (*rendement global ?*)



Le stockage d'électricité en 2010

En 2010 la puissance électrique installée dans le monde était d'environ 4.400.000 MW. Les stockages opérationnels pour la production centralisée d'électricité étaient approximativement les suivants

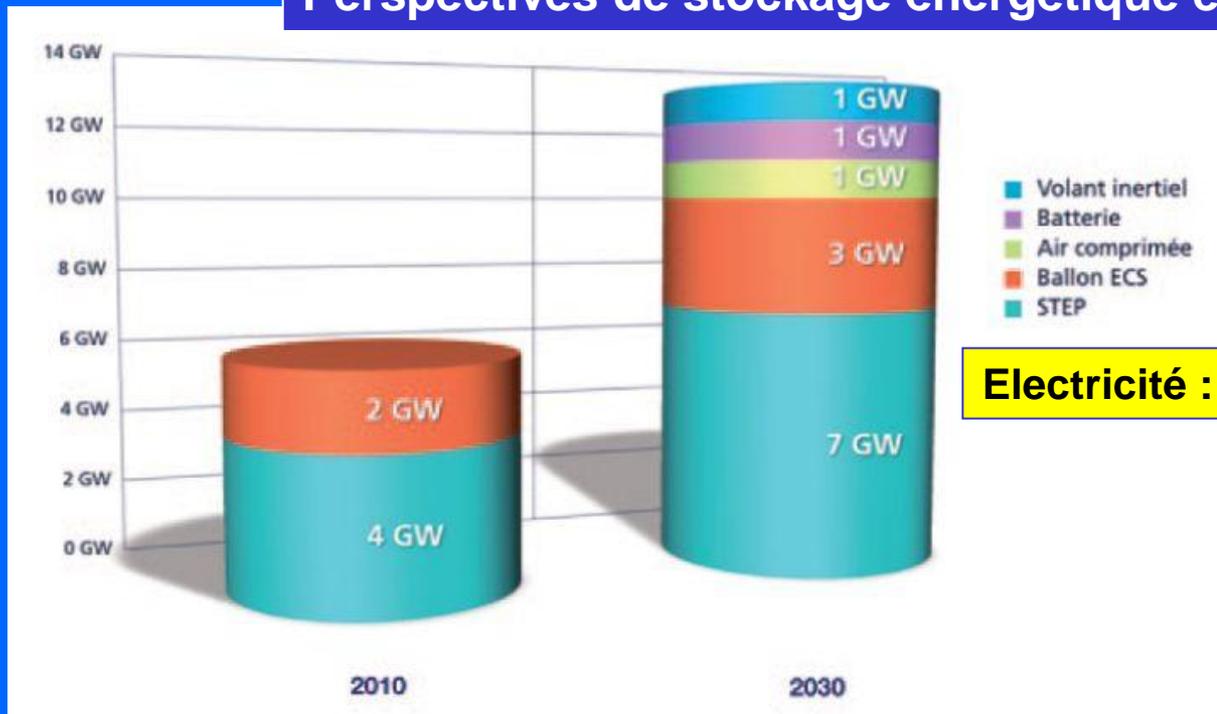
- Stations de transfert par pompage (STEP) : 140.000 MW → (France 4.173 MW)
- Air comprimé : 430 MW (Allemagne et US)
- Batteries NaS : 400 MW (Japon)
- Batteries plomb : 45 MW
- Batteries Li : 45 MW
- Batteries NiCd : 40 MW
- Volants d'inertie : 40 MW (US)
- Batteries Redox : 3 MW

- La Coche
- Le Cheylas
- Super Bissorte
- Grand Maison (1.800MW)
- Montezic
- Revin

**Puissance totale des moyens de production :
4.400 GW**

**Puissance des moyens de stockage :
141 GW (3%)**

Perspectives de stockage énergétique en France



ECS : Eau chaude sanitaire

Electricité : 10 GW

Avenir : l'hydrogène ?

Comment palier les fluctuations de la production éolienne ou solaire ?

Passer par l'étape « hydrogène », produit par électrolyse et restituer l'électricité avec une pile à combustible

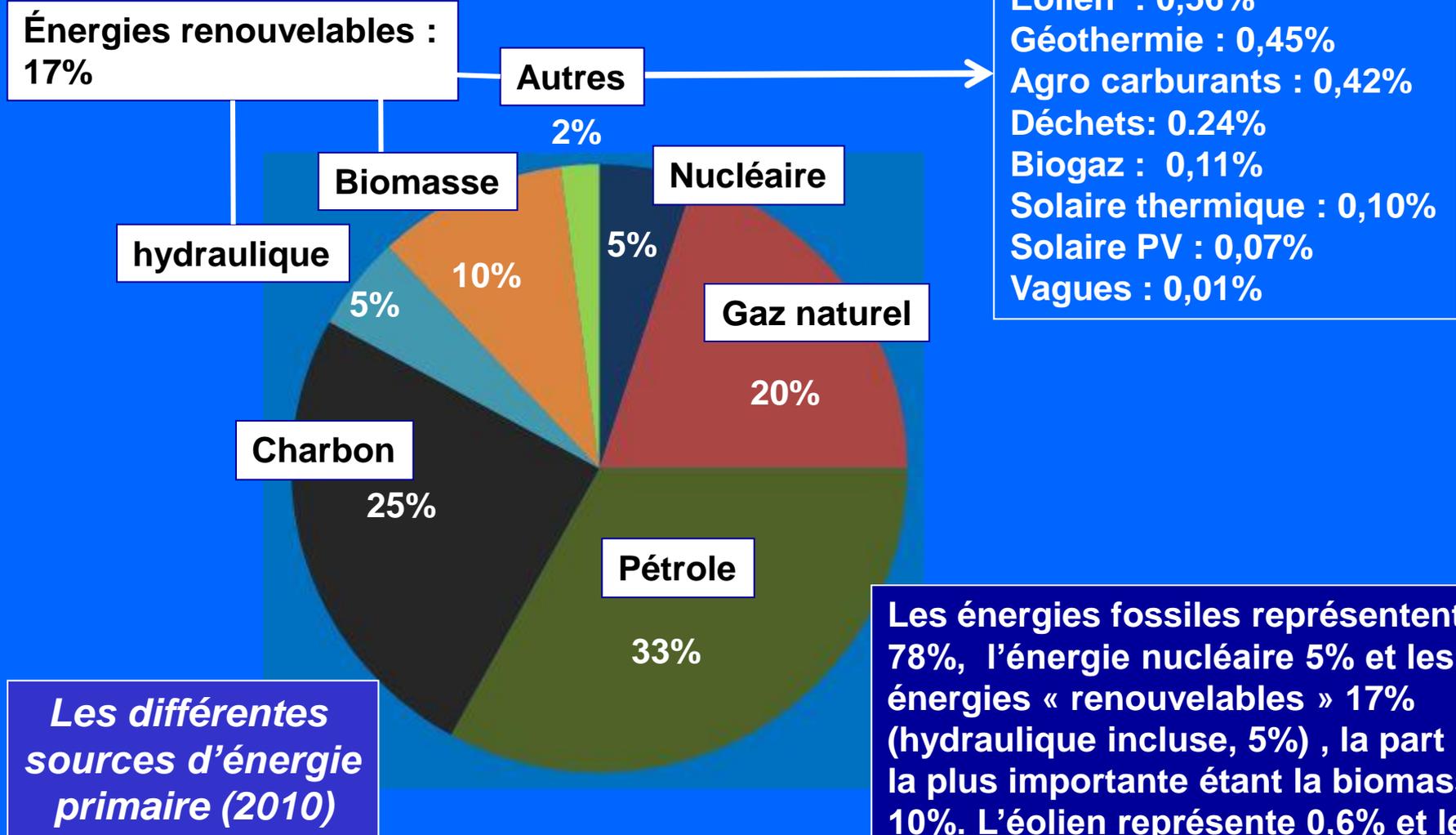
- 1 – Produire (électrolyse)(rendement énergétique 50 à 70%)
- 2 – Stocker (compression ?... coût énergétique ?)
- 3 – Utiliser (pile à combustible)(rendement énergétique 45%)

→ rendement global :
25 à 30% (maximum)

multiplie par 4 le coût d'une électricité déjà très chère...

II - Production et consommation d'énergie primaire dans le monde

I-1 - Production d'énergie primaire dans le monde



Les différentes sources d'énergie primaire (2010)

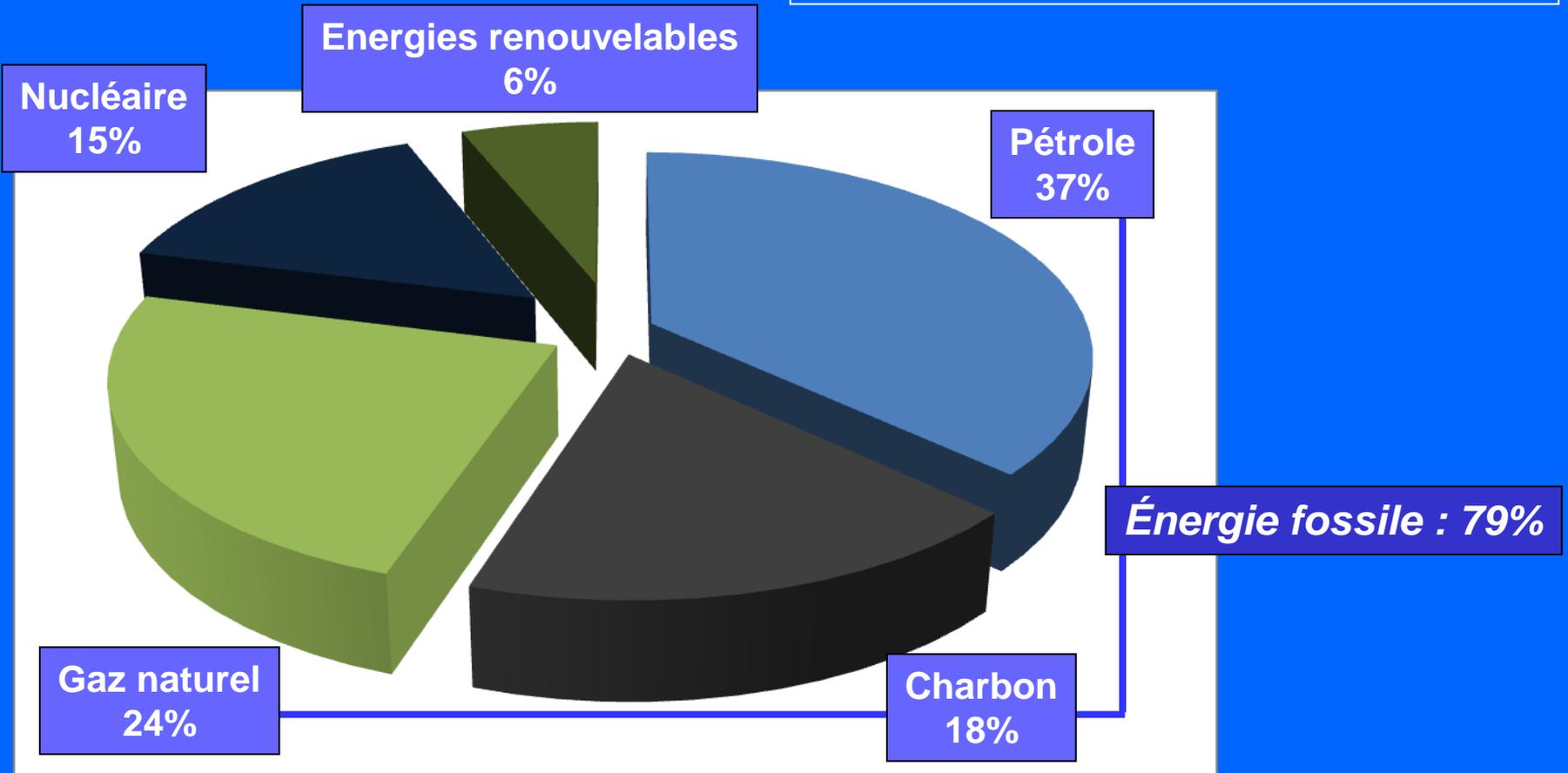
Production totale : 14 Gtep

Les énergies fossiles représentent 78%, l'énergie nucléaire 5% et les énergies « renouvelables » 17% (hydraulique incluse, 5%), la part la plus importante étant la biomasse 10%. L'éolien représente 0,6% et le solaire PV moins de 1%

accroissement : +2,2% par an

Sources d'énergie primaire (suite)

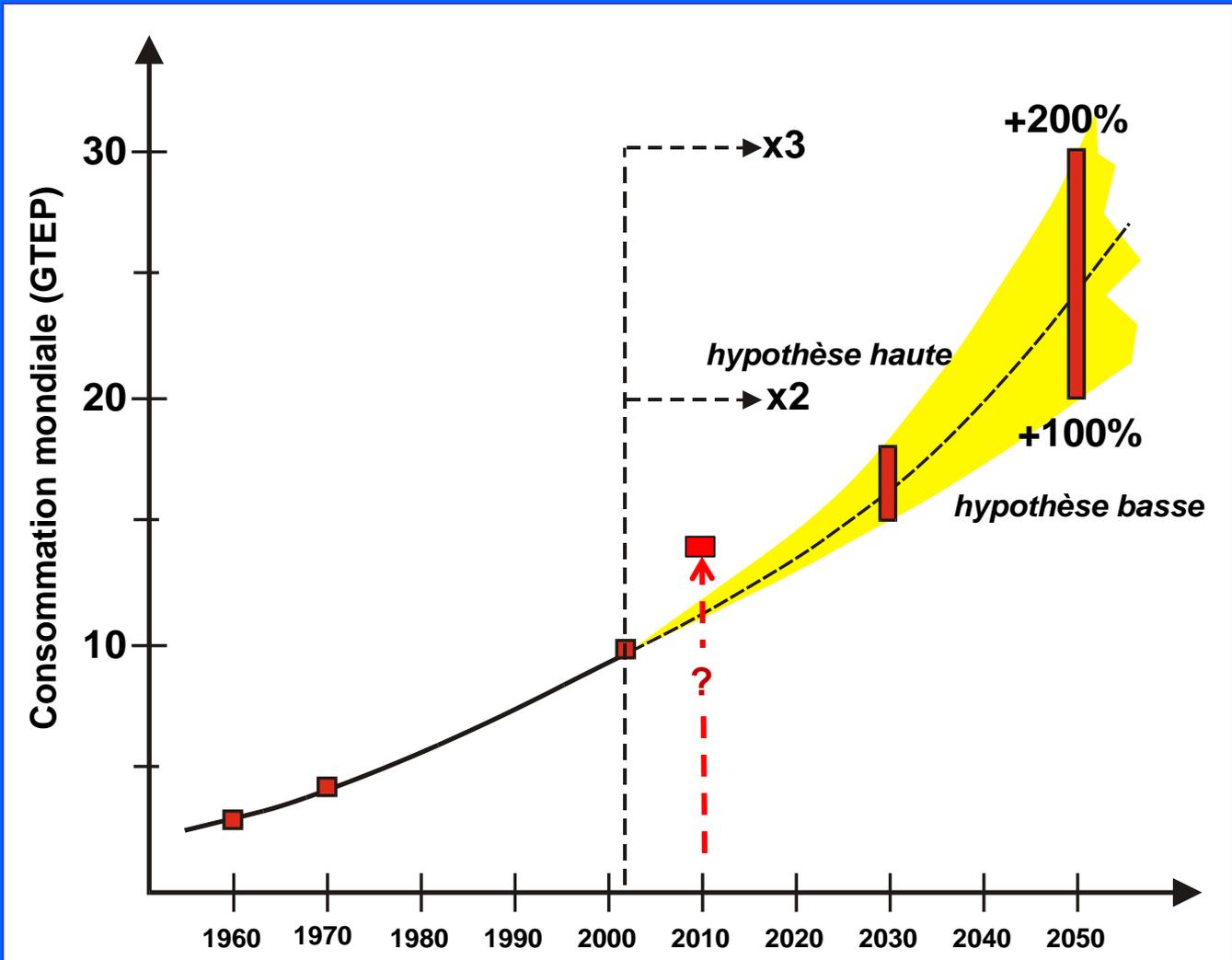
Dans l'Union Européenne des 27



Dépendance énergétique : 59%

75 % du pétrole importé
60 % du gaz naturel importé
40 % du charbon importé

Les besoins mondiaux en énergie vont croître de façon considérable dans les années à venir !



1960 : 3 Gtep

1970 : 4,4 Gtep

2002 : 9,4 Gtep

2006 : 11 Gtep (14 en 2010)

2030 : 15 à 18 Gtep ?

2050 : 20 à 30 Gtep ?

**1973 : 4 Mds hab. 1,5 tep/hab.
2008 : 6 Mds hab. 1,8 tep/hab.
2011 : 7 Mds hab. 2 tep/hab.**

Consommation énergétique – données 2010

en Mtep

Chine	2493
USA	2249
Inde	692
Russie	682
Japon	488
Allemagne	330
Brésil	263
France	262
Canada	258
Corée du sud	249
Grande Bretagne	204
Italie	168
Espagne	129

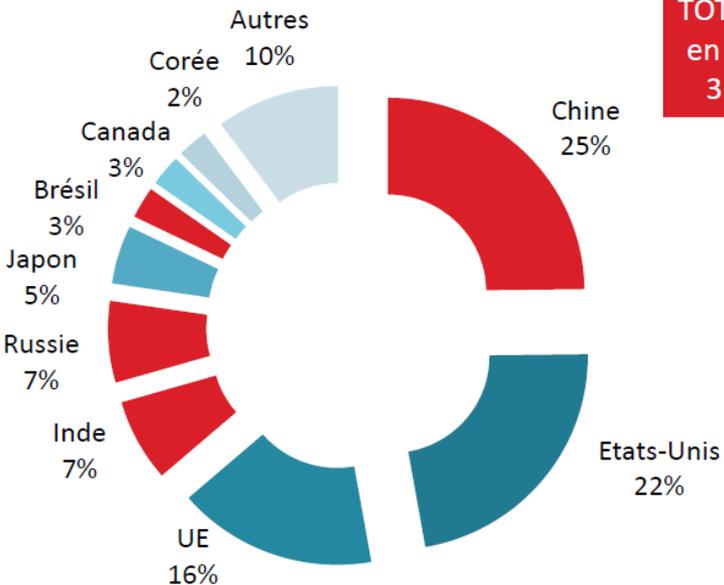


BRIC

Asie	4799	} 4419
Amérique nord	2507	
Europe	1912	
CEI	1025	
Amérique sud	795	
Afrique	670	
Moyen Orient	654	
Pacifique	151	

- La Chine a dépassé les USA
- L'Asie consomme autant que Europe+USA

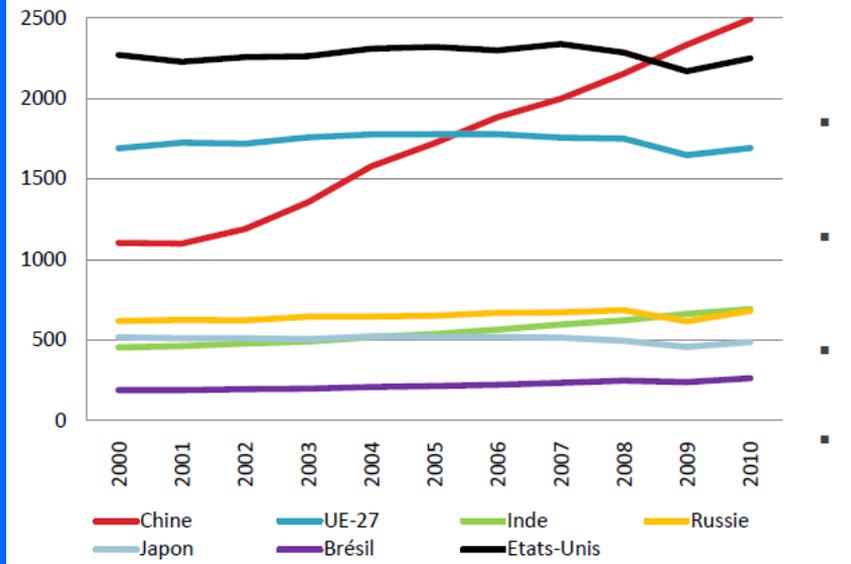
Consommation énergétique du G20



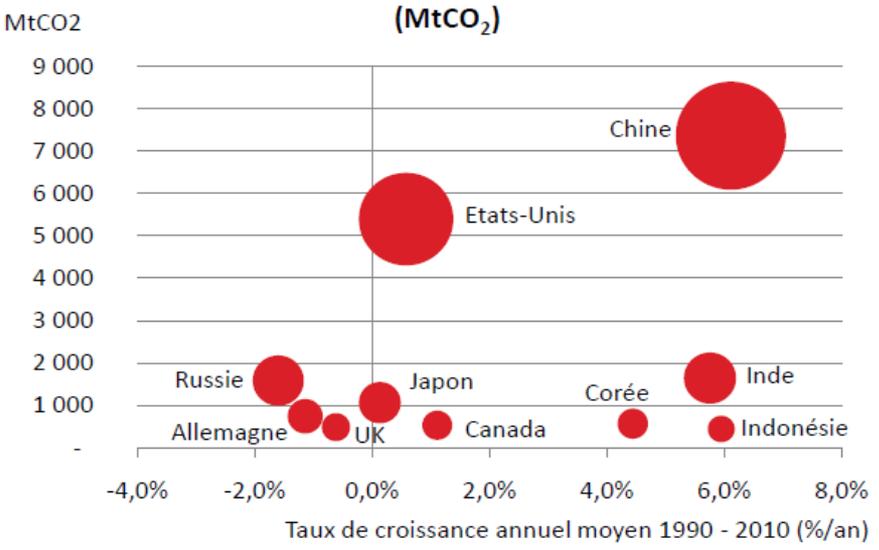
TOTAL BRIC: 44% en 2010, contre 35% en 1990

BRIC : Brésil, Russie, Inde, Chine

Consommation d'énergie aux Etats-Unis, UE, Japon et BRIC* (Mtep)



Emissions de CO₂ liées à l'énergie en 2010 (MtCO₂)



● Niveau d'émissions en 2010

Consommation par an et par habitant

États-Unis
8 tonnes d'équivalent pétrole (TEP) par an

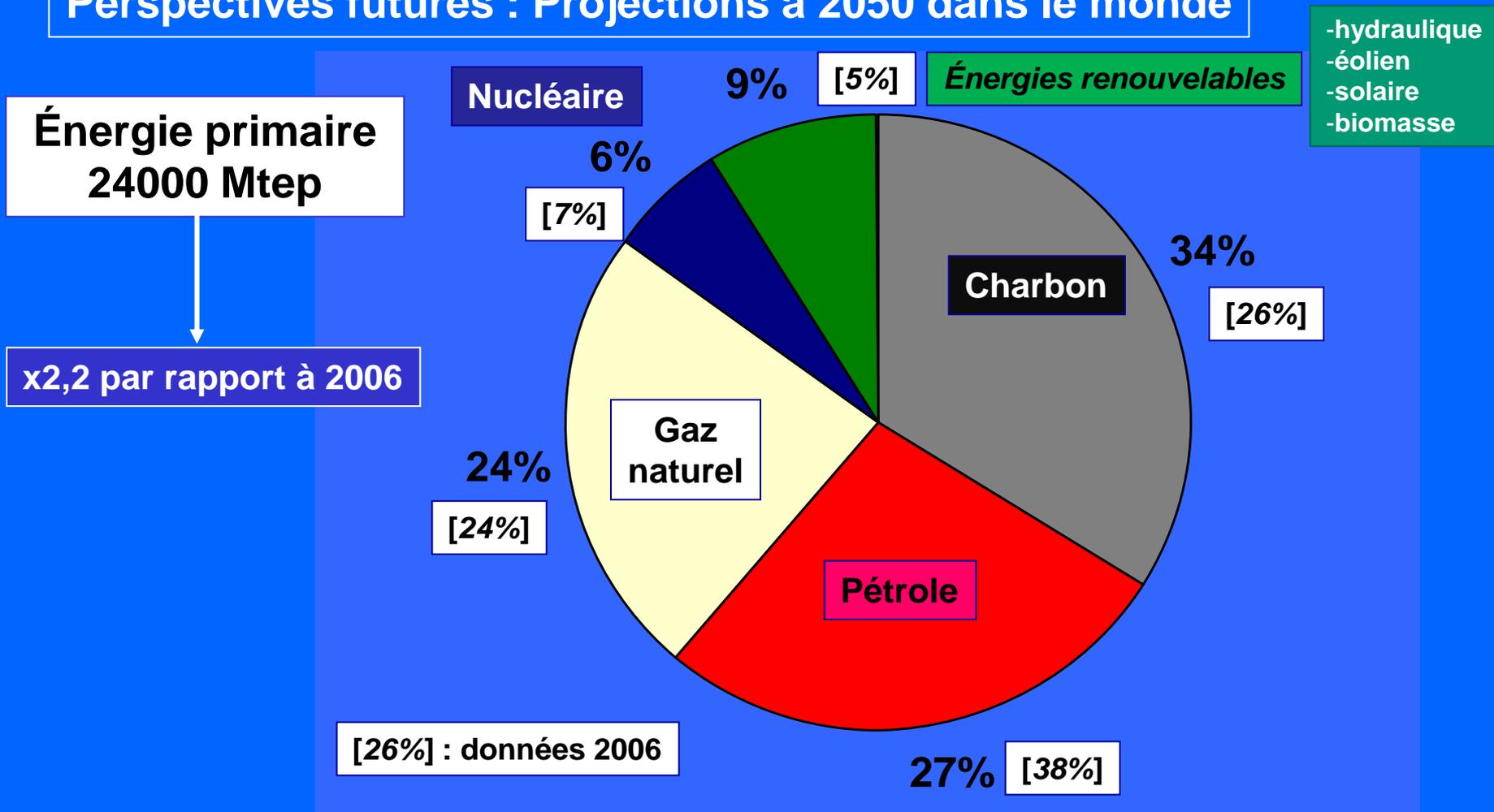
Europe
4 TEP

Chine
< 1 TEP

Afrique subsaharienne
0,5 TEP

USA : 8 tep
Europe : 4 tep
Chine : 1 tep
Afrique : 0,5 tep

Perspectives futures : Projections à 2050 dans le monde



1 - Les énergies fossiles restent prépondérantes

(augmentation de la part du charbon, baisse de celle du pétrole)

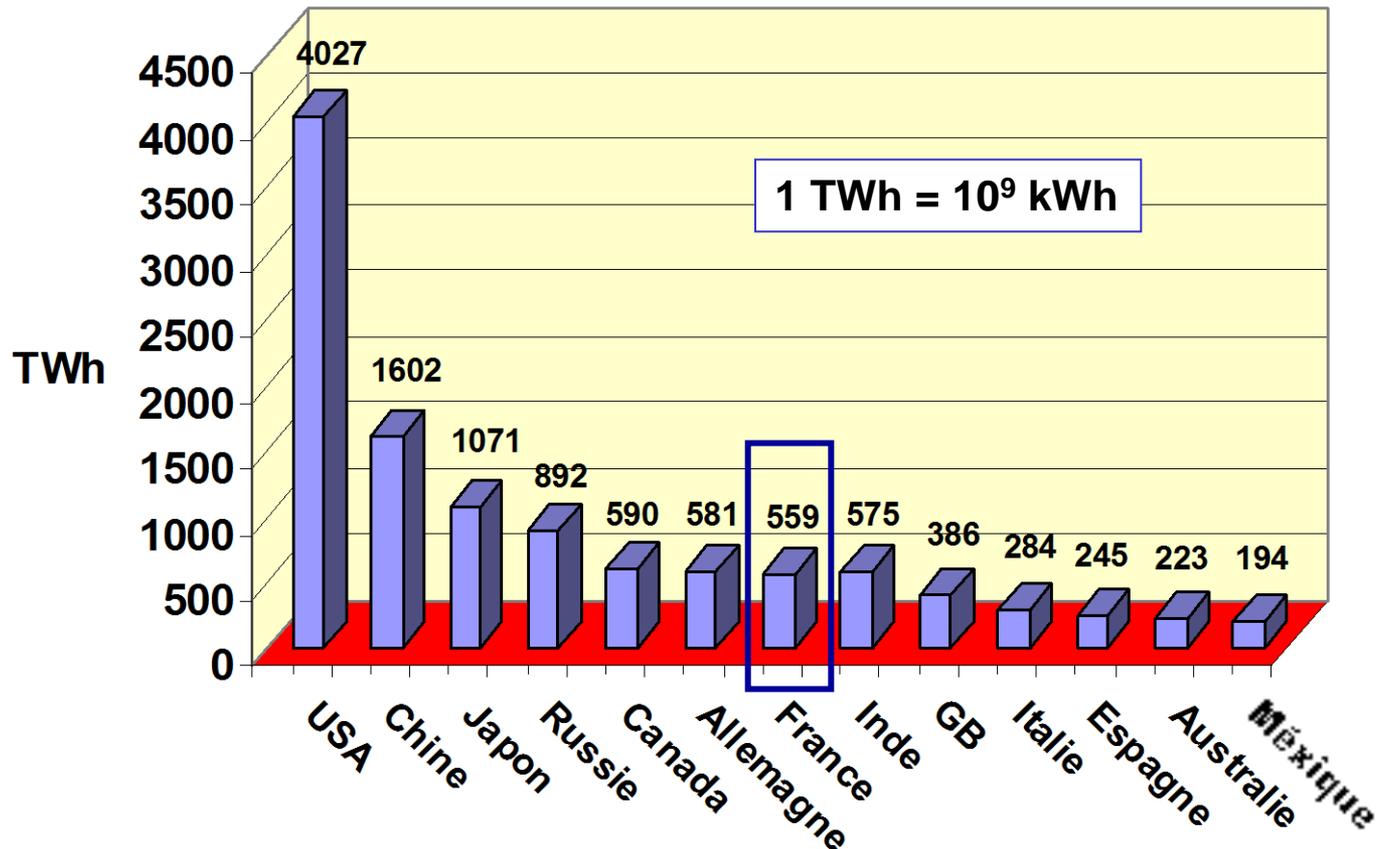
2 - Les énergies renouvelables restent marginales (<10%)

3 - Malgré une nette augmentation de la puissance installée, la proportion du nucléaire reste faible (6%)

III – La production d'énergie électrique

*L'électricité n'est pas une énergie à proprement parler
c'est un vecteur énergétique utilisé pour transporter et
transformer une énergie primaire en une énergie finale utilisable*

La production électrique dans le monde

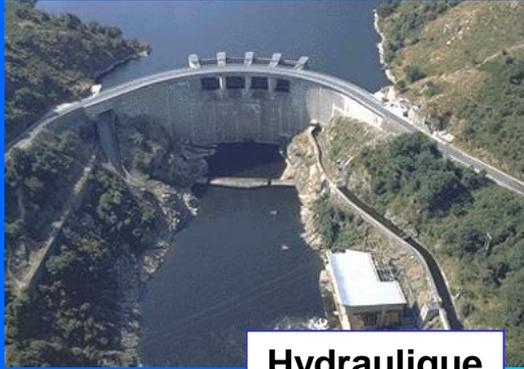


Production électrique en TWh des principaux pays producteurs

de 600 TWh en 1945 à 20.000 TWh en 2012

On observe une forte disproportion entre les pays

La production électrique dans le monde (2006)



Hydraulique
16% (20%)



Biomasse 1,27%
Eolien : 0,64%
Géothermie : 0,31%
Solaire : 0,03%
E. mer : 0,003%

**Énergies renouvelables
(hors hydraulique)**
2%

16% (20%)

↓
**% puissance
installée**

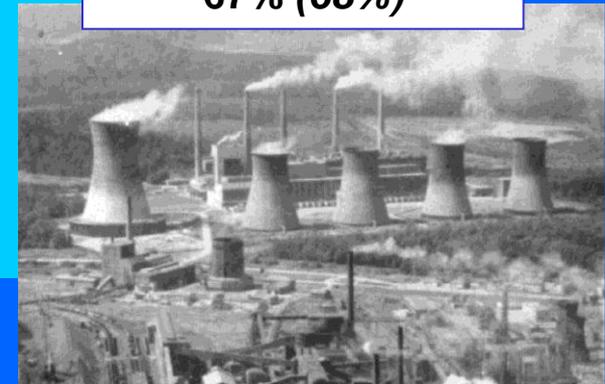
Nucléaire
15% (10%)



18 140 TWh

Charbon
40%

Thermique classique
67% (68%)



Gaz naturel
21%

Pétrole
6%

les énergies fossiles dominent largement...

**Dans le monde, la consommation d'électricité croît plus vite
que les autres sources d'énergie**

*En France, la consommation d'électricité croît en moyenne de 2% par an
(avec un fléchissement des dernières années où elle a baissé légèrement)*

**Sur les 6 milliards d'habitants 2 milliards n'ont pas l'électricité :
On estime à 10 000 GW (150 fois la puissance française) les besoins
mondiaux en nouvelles capacités de production électrique !**

Consommation moyenne mondiale : 2000 kWh/an/hab

France, OCDE : 8000

Chine : 3000

Inde : 600

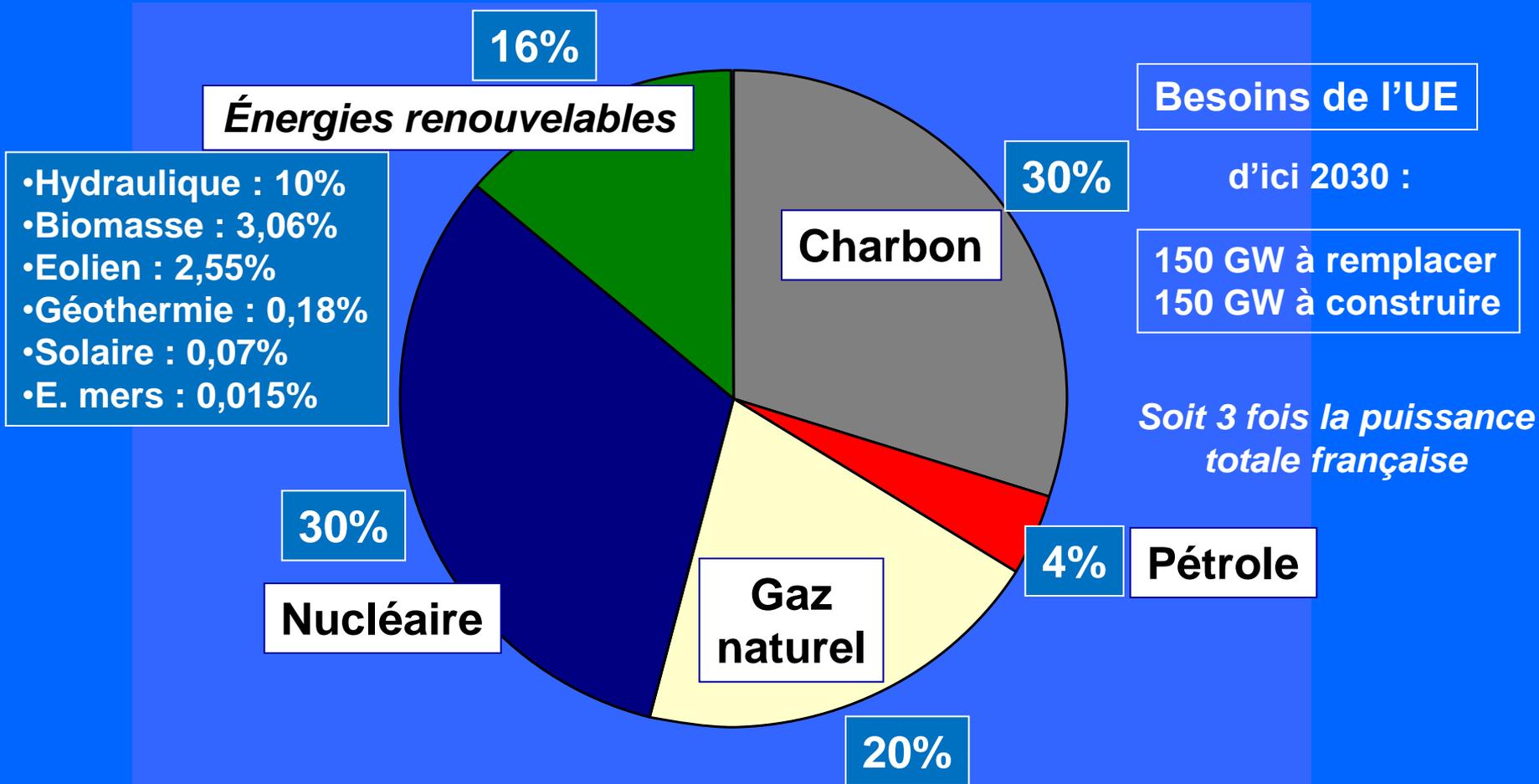
Afrique : 200

*Selon toute probabilité, cette tendance devrait se poursuivre (sinon croître)
encore pendant plusieurs dizaines d'années...*

*l'AEI prévoit d'ici 2030 une croissance de 1,7% en moyenne (0,7% pour l'UE
>3% pour les pays émergents...)*

**ce qui donne pour 2050 un facteur multiplicatif de 1,6 pour l'UE
et de 4,4 pour l'Inde ou la Chine par rapport à 2000 !**

La part des différentes sources d'énergie électrique dans l'Union Européenne (2006 : 3250TWh)

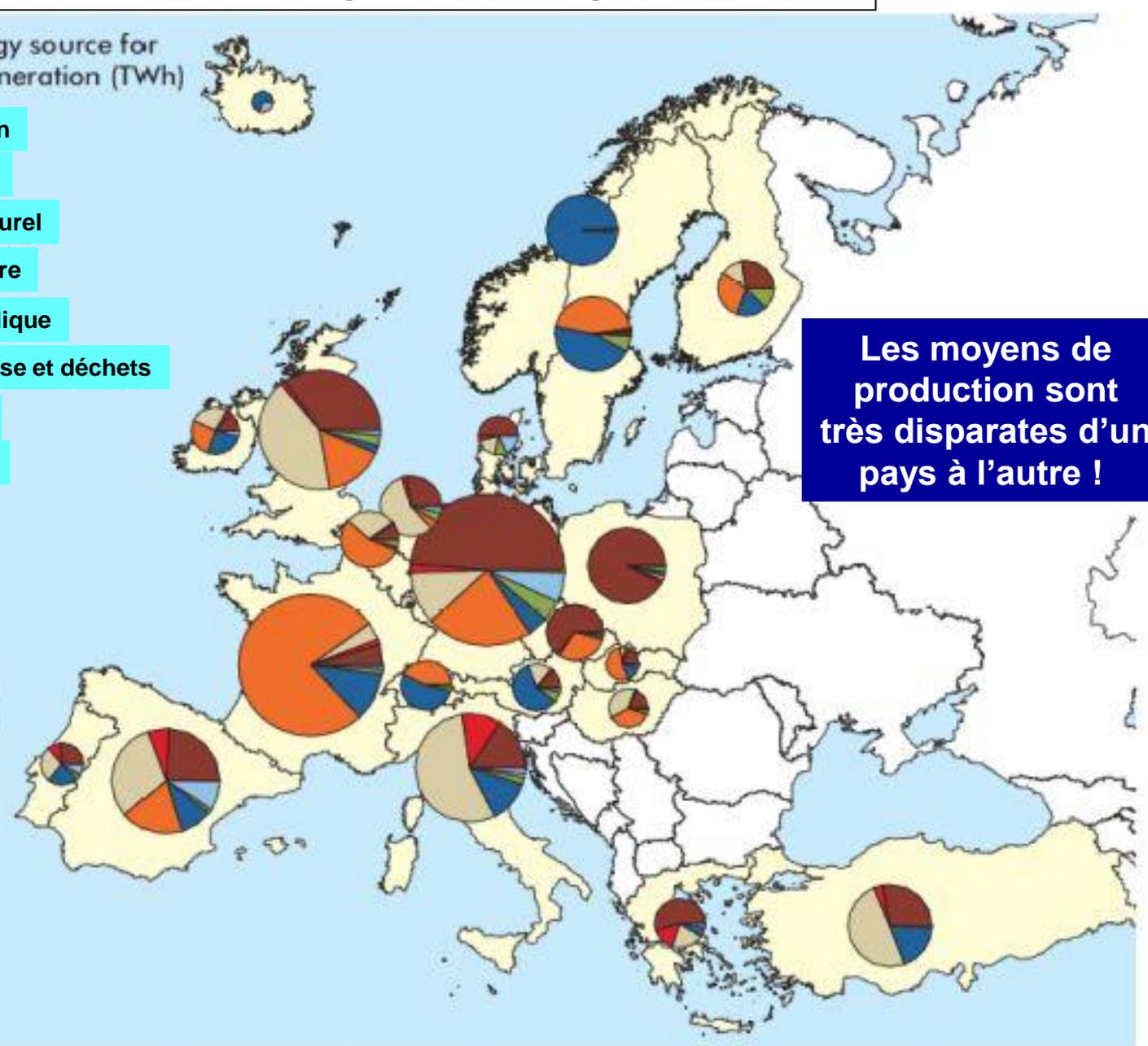
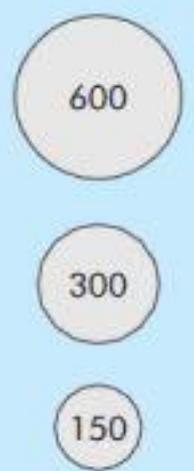


*le thermique classique reste de loin la 1ère source d'énergie dans l'UE (54%)
mais le nucléaire prend une part importante : 30%*

Mix de production électrique en 2007 pour l'OCDE

Type of energy source for electricity generation (TWh)

- charbon
- pétrole
- gaz naturel
- nucléaire
- hydraulique
- biomasse et déchets
- éolien
- solaire
- autre



Les moyens de production sont très disparates d'un pays à l'autre !

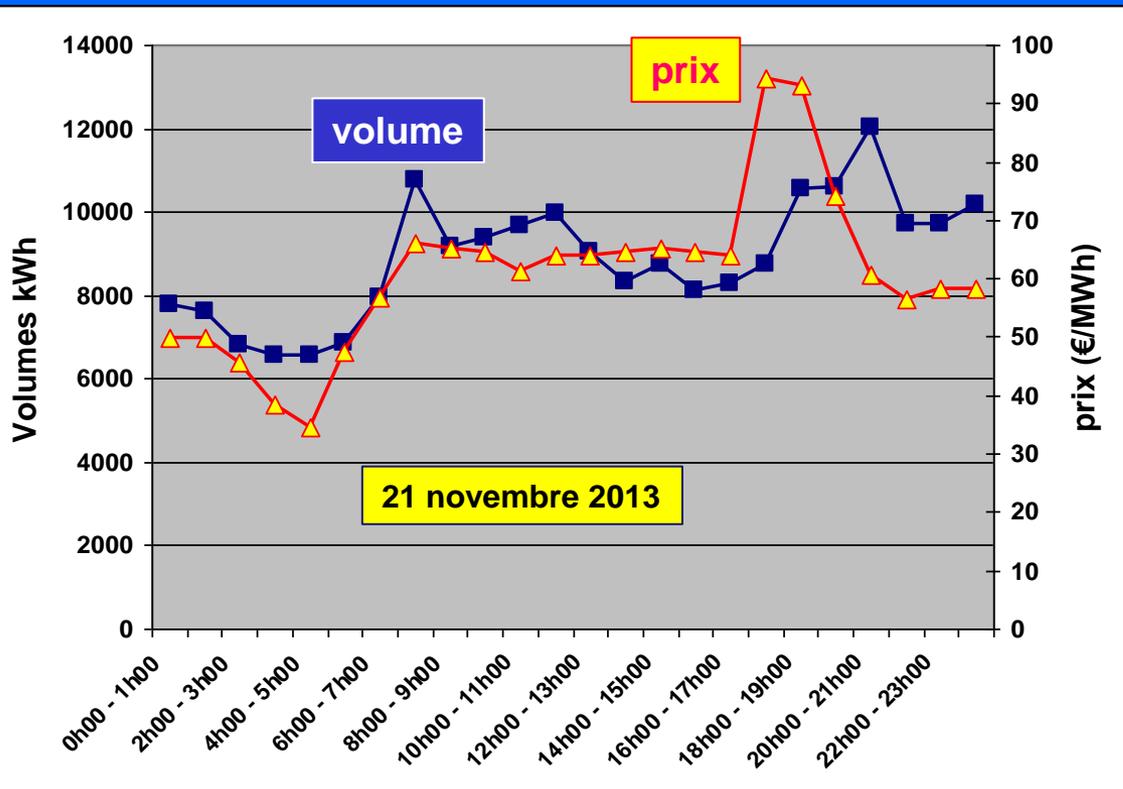
The boundaries and names shown and the designations used on maps included in this publication do not imply official endorsement or acceptance by the IEA.

EPEX Spot

Marché de l'électricité entre la France, l'Allemagne, la Suisse et l'Autriche (mis en place en 2008) :

« day ahead » : négociation pour le jour suivant (prix établi à 12h)

« intraday » : négociation en continu



Exemple de l'évolution des volumes négociés et du prix instantané du MWh :

Prix minimum : 34,39 €/MWh

Prix maximum : 94,26 €/MWh

Les volumes échangés vont de 6552 kWh (3h) à 12011 kWh (20h)

Comparaison entre 3 pays européens proches et cependant très différents :

France

Belgique

Allemagne

Très forte production nucléaire (78%)
Forte production hydraulique (11%)
Faible production thermique (10%)
Faible émission de CO₂ (6 t/hab, 55 g/kWh)

Le Royaume Uni :
- met un frein aux EnR (*)
- relance son programme nucléaire

Forte production nucléaire (55%)
Forte production thermique classique (39 %)
Faible production hydraulique (2 %)
Arrêt programmé du nucléaire ?
Assez forte émission de CO₂ (11t/hab, 305 g/kWh)

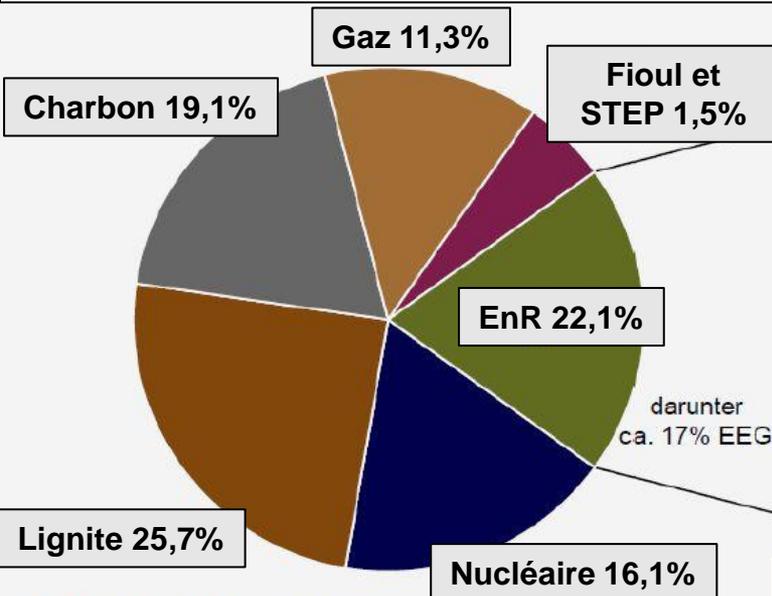
*Remplacement par des centrales thermiques au charbon et au lignite
Utilisation des « énergies indigènes » (*)*

() mot de code de Bruxelles pour désigner le gaz de schiste*

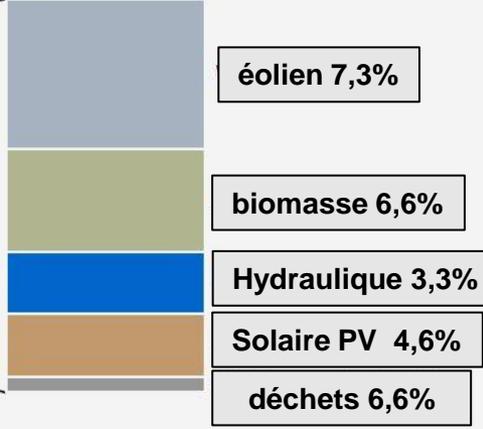
Production nucléaire en baisse (16%)
Très forte production thermique classique (62%)
Faible production hydraulique (4%)
Arrêt programmé du nucléaire
Forte production éolienne et solaire (12%)
Très forte émission en CO₂ (10 t/hab, 500 g/kWh)

() « débarrassons nous de cette merde verte » (David Cameron, novembre 2013)*

Mix énergétique allemand en 2012 (618 TWh)



**éolien+solaire : 73TWh (12%)
pour 64 GW(*)**



centrales nucléaires fermées

() six fois moins de production que le parc nucléaire français de même puissance*

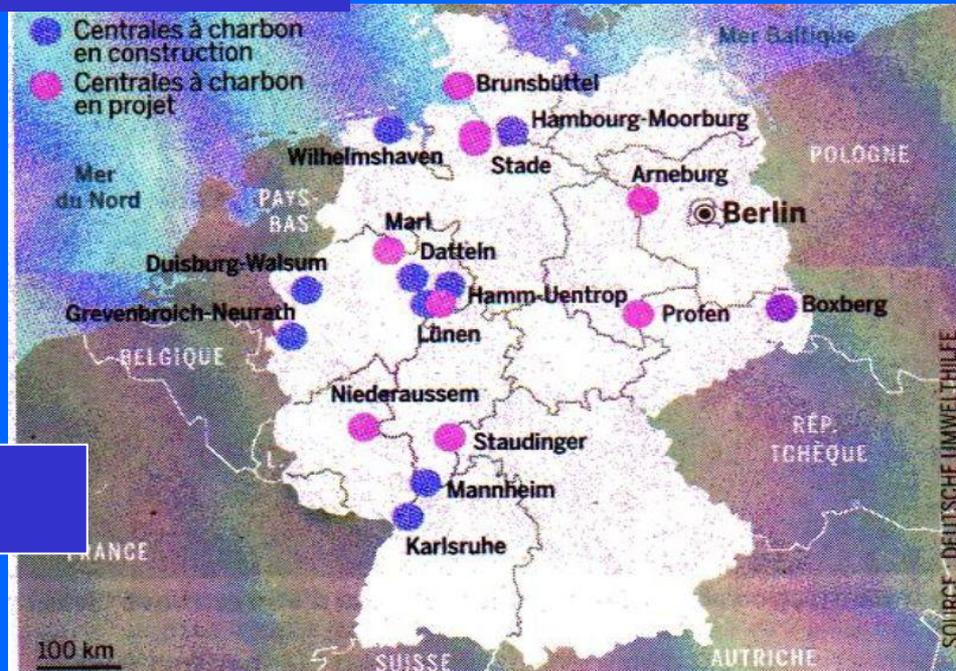
Quellen: BDEW, AG Energiebilanzen
Stand: 14. Dezember 2011

	France	Allemagne
prix (ct€/kWh)	14	27
CO ₂ (t/hab)	5,52	9,32

Le coût de la transition énergétique allemande est estimé à 1000 milliards d'euros d'ici 2030 (avec un déficit de production estimé à 100 TWh en 2050)

Programme de construction de centrales thermiques au charbon en Allemagne

23.000 MW programmés



SOURCE: DEUTSCHE UMWELTHILFE

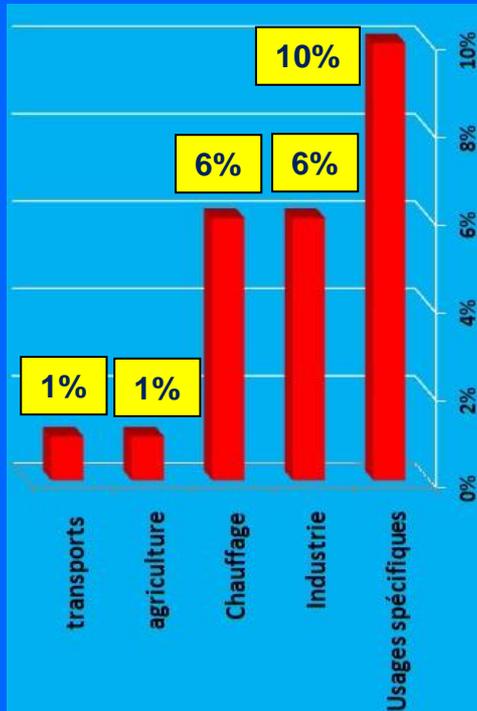
L'énergie en France

3 % du PIB

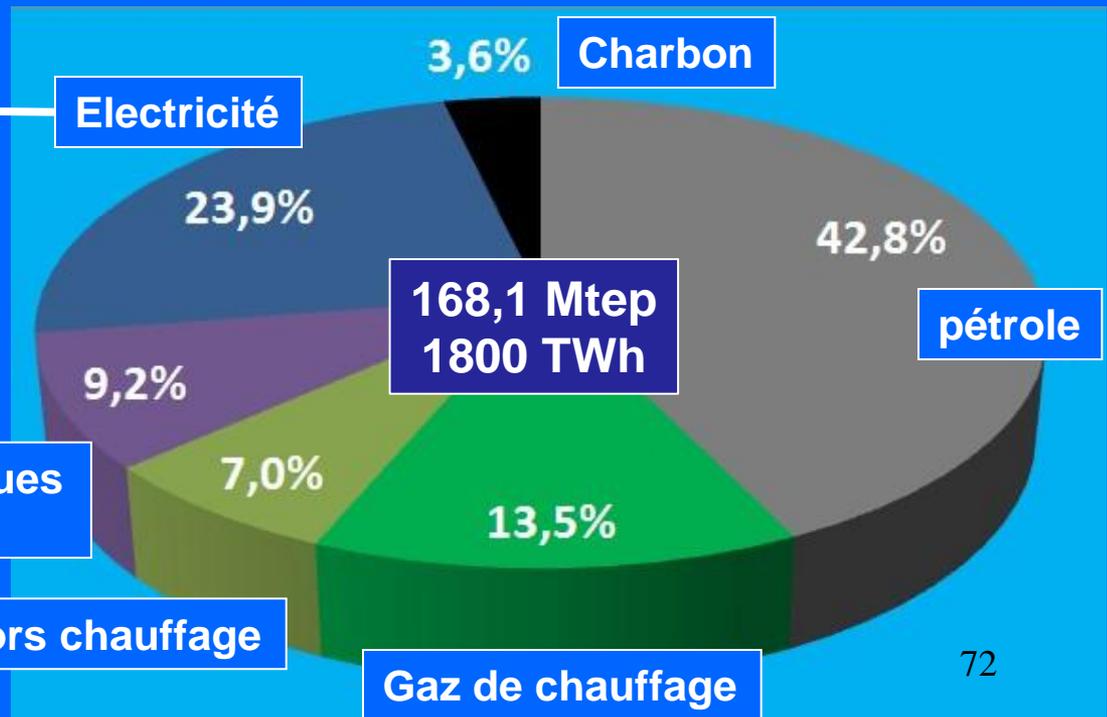
26 % des investissements industriels

192 000 emplois en 2008

88% du déficit commercial en 2011 (61 Md€ dont 50 pour le pétrole)



La consommation d'énergie en 2011

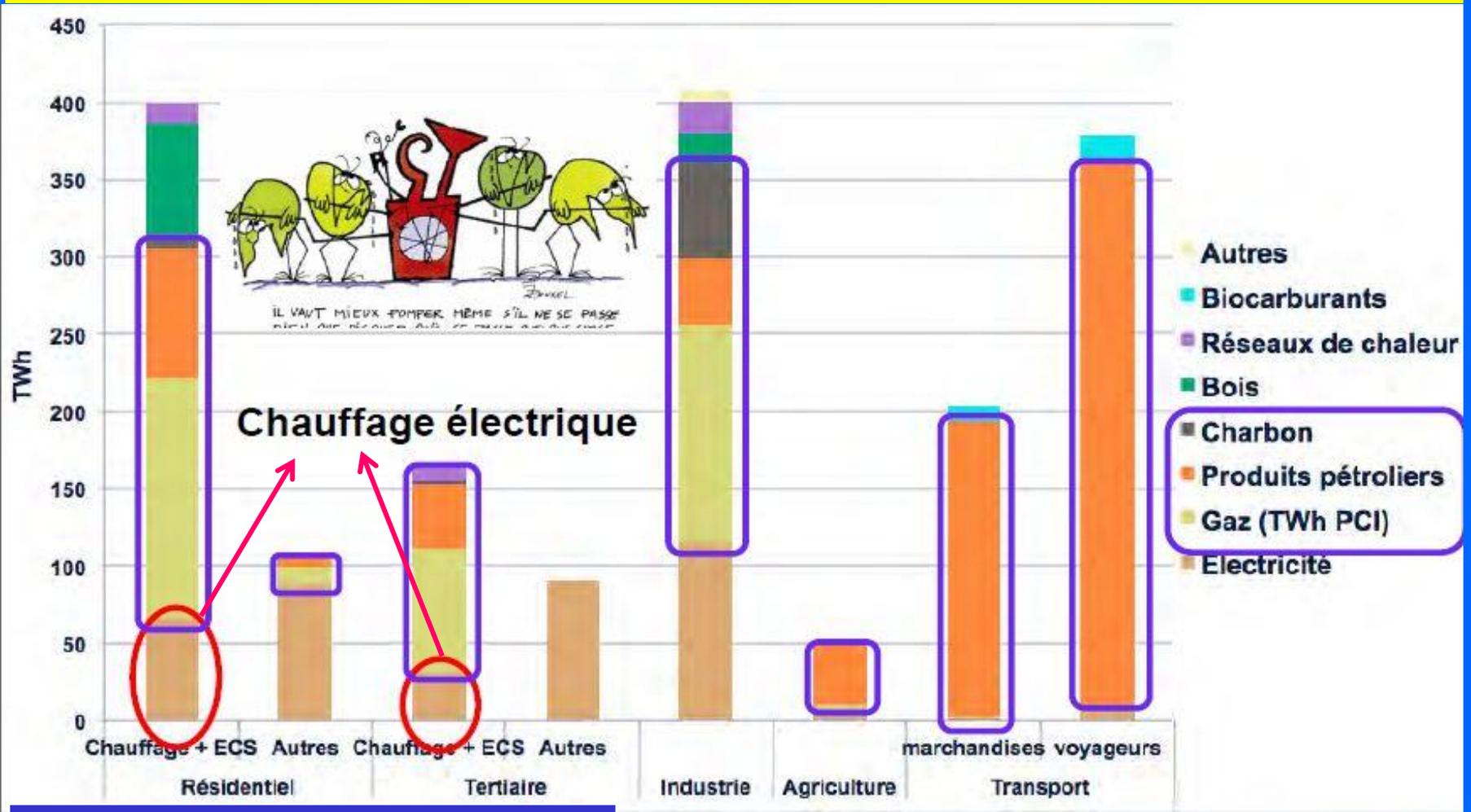


Energies renouvelables thermiques
Bois, biomasse, pompe à chaleur..

Gaz hors chauffage

Gaz de chauffage

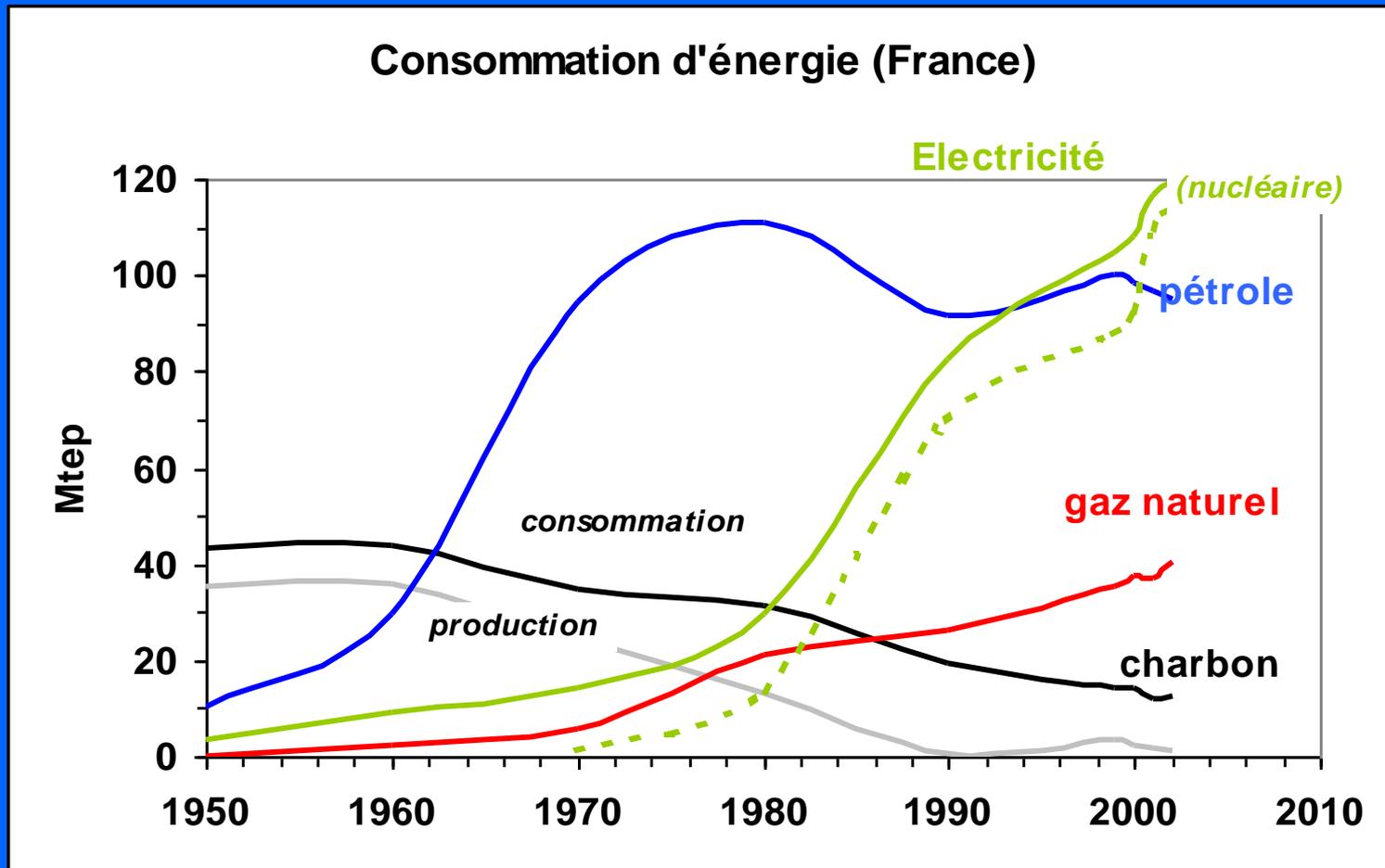
France : la part des différentes sources d'énergie selon les secteurs



ECS : Eau chaude sanitaire
 Autre : électroménager, ascenseur etc.

le chauffage électrique ne représente que 100 TWh soit 20% de la consommation totale d'électricité

Évolution des sources d'énergie en France depuis 50 ans...



On observe un accroissement puis une stabilisation de la consommation de pétrole, une diminution progressive de l'utilisation du charbon et un très fort accroissement depuis 1980 de la consommation en électricité (et en particulier grâce à l'énergie nucléaire)

Facture énergétique

61,4 milliards d'euros
(+32%)



88% du déficit commercial total

Dont

Importations

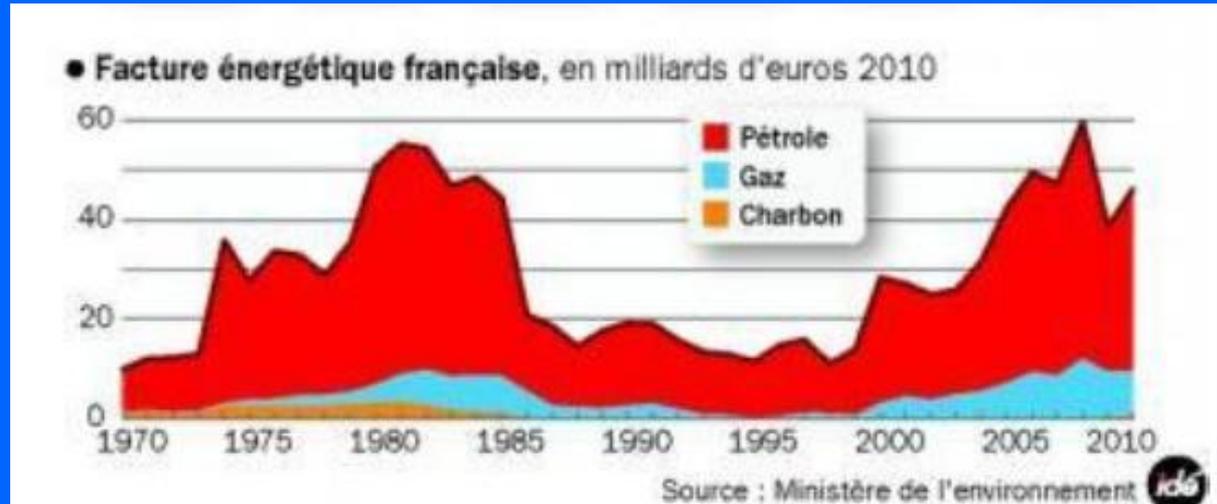
pétrole _____ 50,2 milliards
+
gaz naturel _____ 11,5 milliards

Exportation

électricité _____ 2,6 milliards

AFP

La facture énergétique (2011)



En 2011 la facture énergétique a été de 61 milliards d'euros (soit près de 90% du déficit de la balance commerciale)

Elle dépend essentiellement du prix du pétrole :

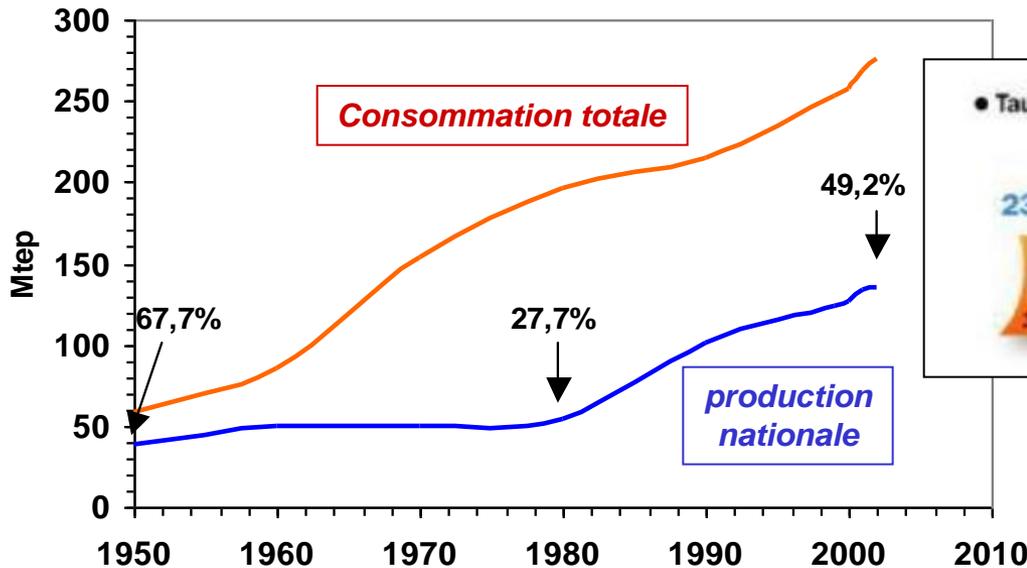
10 milliards en 1970, 55 dans les années 80, elle retombe à 15 milliards en 95 pour remonter dans les années 2000 !

Le nucléaire en France :

Économies en combustible fossile : 25 à 30 milliards d'€

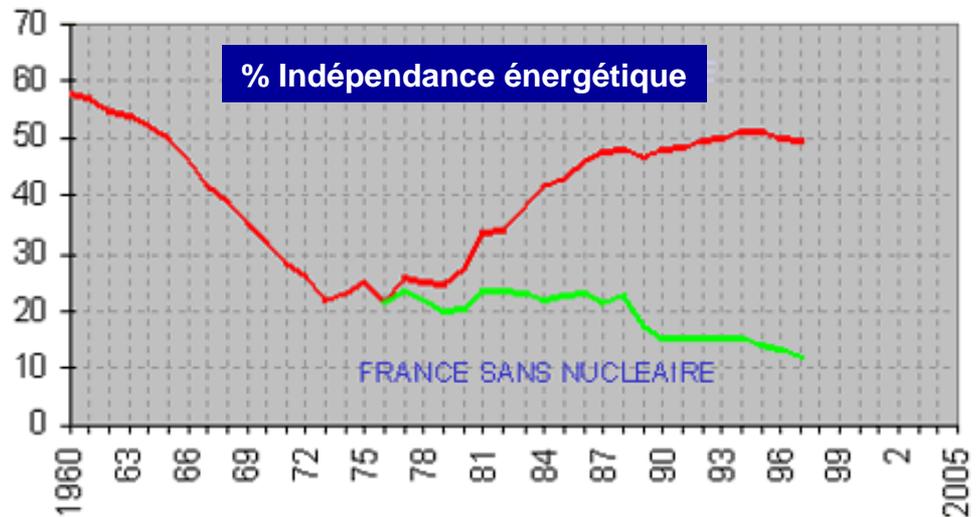
Balance commerciale (ventes) : + 6 milliards d'€

L'indépendance énergétique de la France



de 68% en 1950 (grâce au charbon), elle chute à 24% en 1973 (à cause du pétrole), pour remonter aux alentours de 50% à partir des années 90 (grâce à l'énergie nucléaire)

Sans l'énergie nucléaire, l'indépendance ne serait que de 10% !



Les Groupes énergétiques français

1 – Le Groupe EDF (447,7TWh)

169 139 salariés
chiffres d'affaires (2009) : 66,3 Mds €
(CA 1^{er} semestre 2010 : 37,5 Mds €)
Bénéfice net : 3,9 Mds €
Investissements : 12,4 Mds €
Dette : 36,3 Mds € (juin 2009)
Recherche : 2500 chercheurs

58 réacteurs nucléaires en France
15 réacteurs nucléaires en Grande Bretagne
5 réacteurs nucléaires en Allemagne (EnBW)
(86% de l'électricité produite du groupe)
220 barrages (447 centrales hydrauliques)
15 centrales thermiques en France
4 centrales thermiques en Grande Bretagne

Clients :
Total : 38,1 millions
France : 26,5 millions

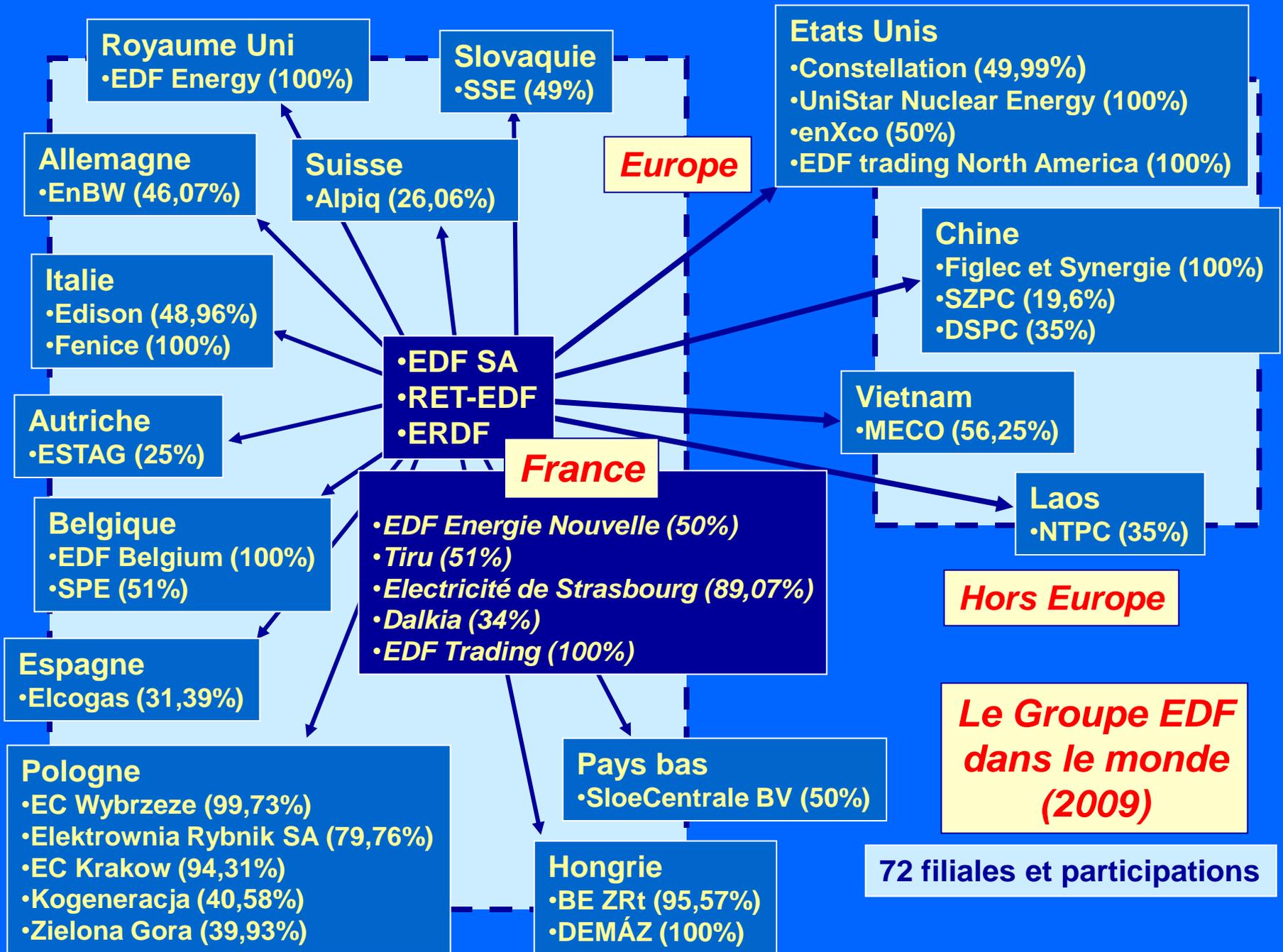
2 – GDF Suez (276 TWh)

200 650 salariés
chiffres d'affaires (2008) : 83,1 Mds €
Recherche : 1200 chercheurs

France (2008) :
6,4 GW capacités électriques (29,8 TWh)
dont 1100 MW nucléaire
Ventes :
31,7 TWh électricité (589 000 clients)
294 TWh gaz (10,7 millions de clients)

3 – POWEO-Direct Energie

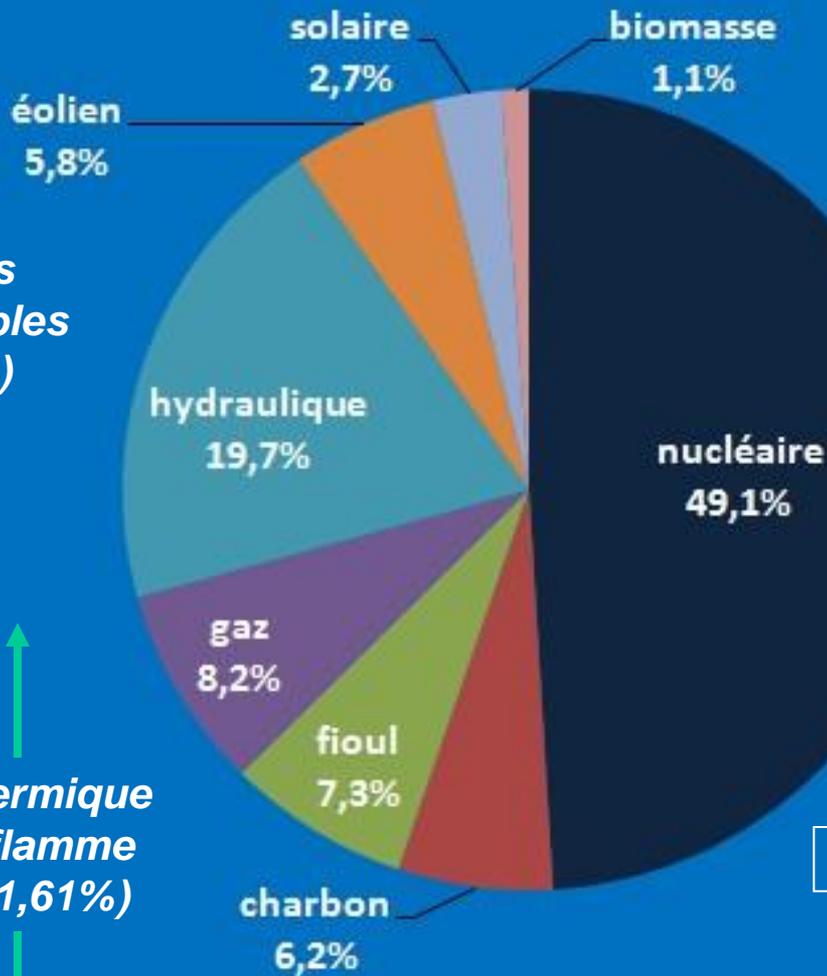
Europe et International :
68,4 GW production électrique (20 en constr.)
(dont 31 GW en Europe)
7 réacteurs nucléaires en Belgique (5800 MW)
700 MW nucléaire en Allemagne
276 TWh d'électricité
373 TWh de gaz
1^{er} producteur d'électricité en Belgique,
Pays bas, Brésil, Thaïlande, pays du Golfe
2^{ème} fournisseur d'électricité au détail aux
USA et 2^{ème} en gaz naturel en Europe Centrale



Puissance (GW) des moyens de production électrique en France (2012)

Mix énergétique...

128,68 GW



	GW
Nucléaire :	63,13
Thermique :	27,81
Charbon :	7,91
Fioul :	9,38
Gaz :	10,52
Hydraulique :	25,40
Eolien :	7,45
Solaire :	3,51
Biomasse :	1,39
(EnR : 35,54)	

30% « fil de l'eau » (52% de la production)

Energies renouvelables (29,33%)

Thermique à flamme (21,61%)

Nous sommes loin du « tout nucléaire » !

Production électrique (TWh) en France (2012) *facteur de charge de chaque moyen de production*

Energies renouvelables : 16,2% (hydraulique : 11,68%)

Total : 541,9 TWh

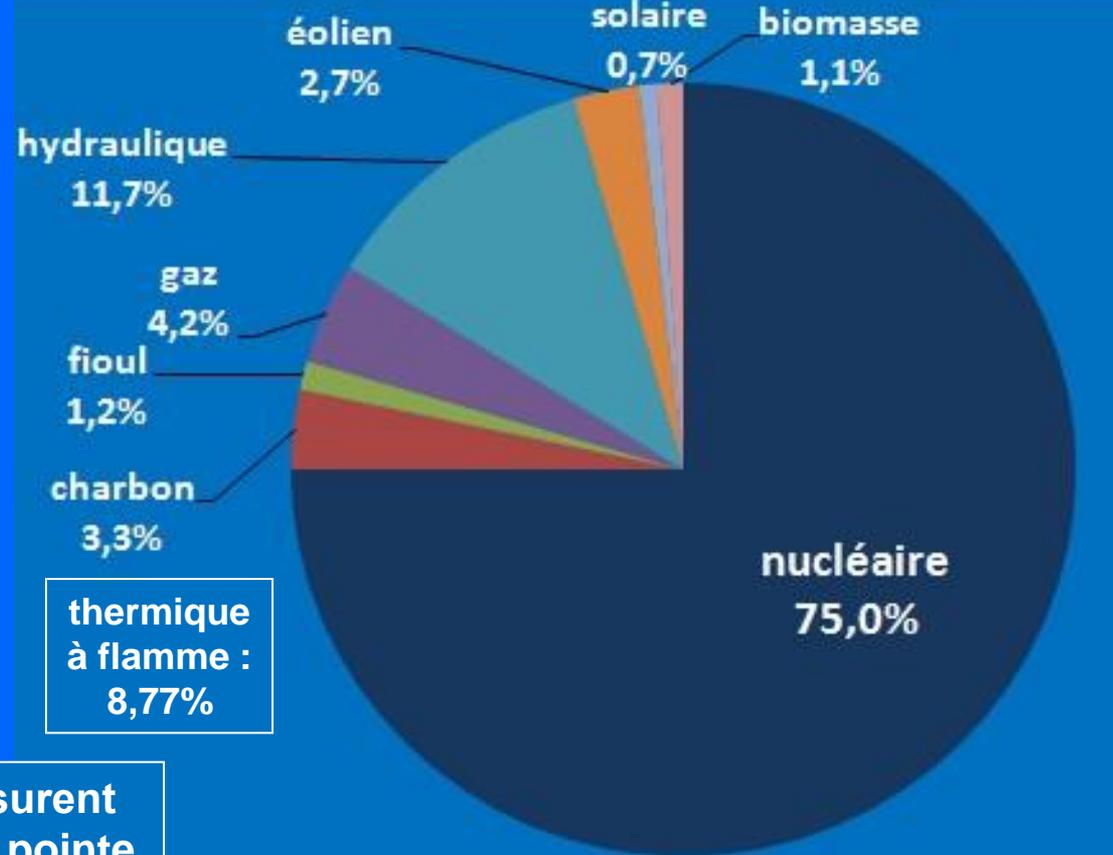
(Kp)

Nucléaire :	409,9	(74,12%)
Thermique :	47,9	(19,66%)
Charbon :	18,1	(26,11%)
Fioul :	6,6	(8,04%)
Gaz :	23,2	(25,17%)
Hydraulique :	63,8	(28,69%)
Eolien :	14,9	(22,83%)
Solaire :	4	(12,99%)
Biomasse :	5,9	(48,45%)

Importations : 29,3 TWh

Exportations : 73,5 TWh

solde : +44,2 TWh



thermique
à flamme :
8,77%

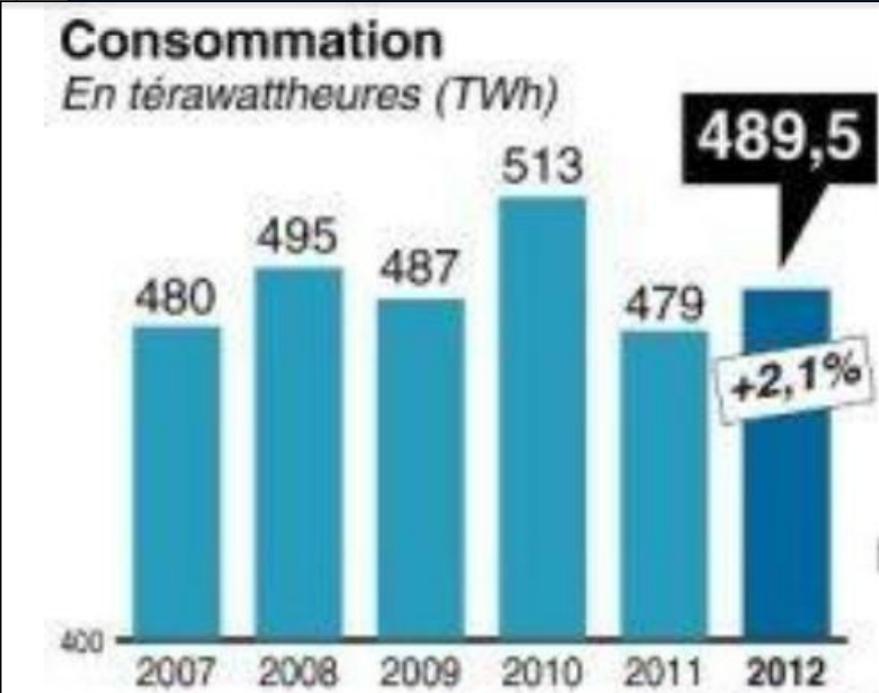
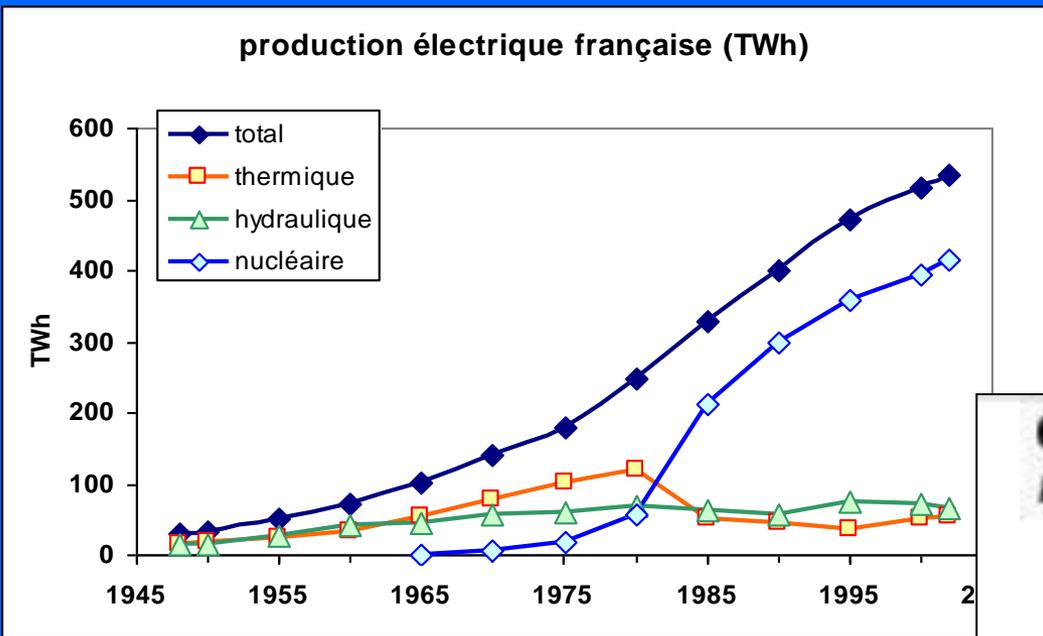
Le thermique et l'hydraulique assurent la production de semi-base et de pointe (en fonction de la demande)

Pour l'éolien et le solaire, le facteur de charge est fonction « du temps »

Pour atteindre sa pleine puissance, il faut :

- quelques minutes à une centrale hydraulique,
- une dizaine d'heures à une centrale thermique
- deux jours à un réacteur nucléaire...

- En France, la consommation d'électricité a augmenté en moyenne de 2% par an
- Durant les 10 dernières années, elle a progressé de 13%
- Les moyens de production ont énormément varié au cours des 50 dernières années...

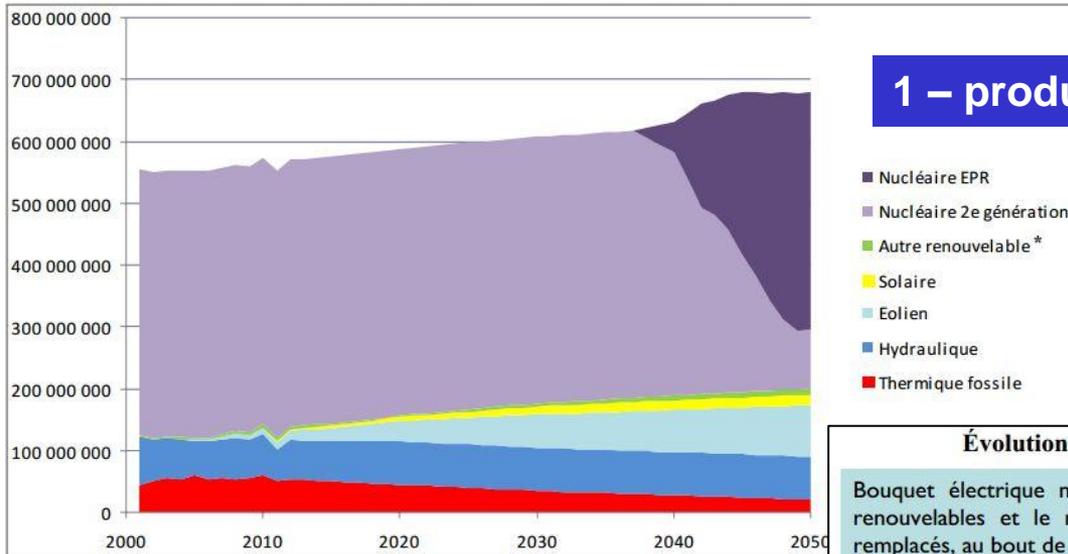


Denier record de consommation :
 8 février 2012, 19h : 102,1 GW
 (soit 2,26 TWh pour la journée)

L'avenir de la production électrique française

Évolution indicative de la production d'électricité (scénario « Nucléaire NG »)

Maintien de la part du nucléaire à moyen et long terme, fondé sur le remplacement des centrales actuelles par les technologies nucléaires de nouvelle génération (EPR, voire 4e génération)



* : essentiellement de la biomasse

Unité :

l'Union Française de l'Electricité (UFE) a imaginé 3 scénarii pour 2030 :

1 – production nucléaire maintenue à 70%

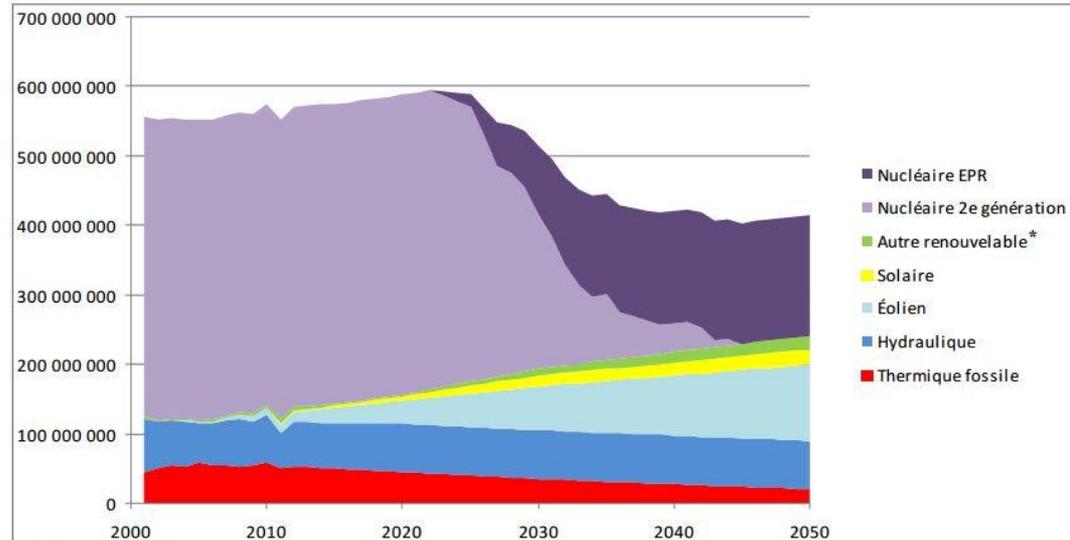
2 – production nucléaire réduite à 50%

3 – Réduction de la part nucléaire à 20% en 2030 et sortie totale en 2040

très peu réaliste !

Évolution indicative de la production d'électricité (scénario « intermédiaire »)

Bouquet électrique mixte à moyen terme, s'appuyant sur un développement important des énergies renouvelables et le maintien d'une part limitée de nucléaire, les réacteurs de 2^{ème} génération étant remplacés, au bout de 45 à 50 ans d'exploitation, par un petit nombre d'EPR



* : essentiellement de la biomasse

Unité : MWh. Graphique Sénat

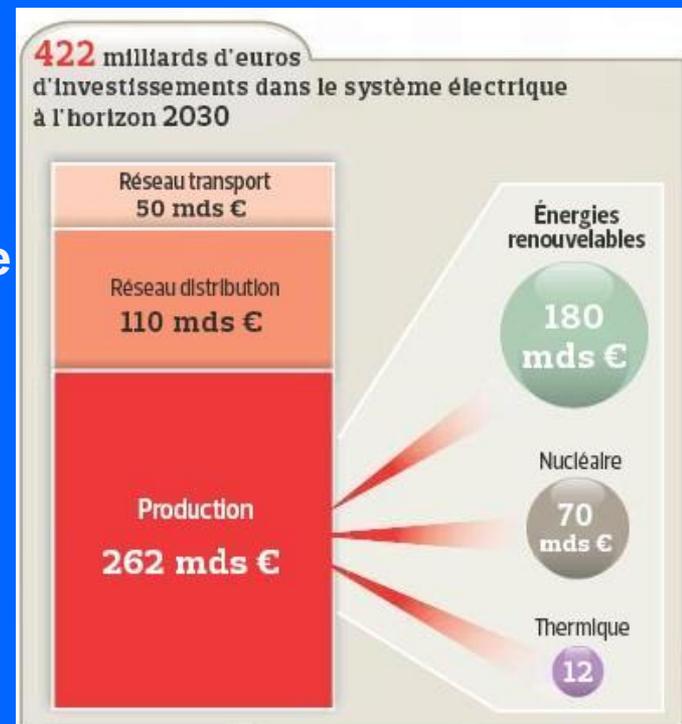
Scénario n°2 → énormes investissements à prévoir...

La réduction de la part du nucléaire à 50% implique :

- 1 – le développement massif des énergies renouvelables éolienne et solaire (?)
- 2 – le développement très important du thermique à flamme (gaz, charbon)

A l'horizon 2030 on estime le montant des investissements à 422 milliards d'euros !

*plus 170 Mds€ pour augmenter l'efficacité énergétique :
total 590 Mds€ !*



Remarques :

- 1 – compte tenu d'impératifs techniques, la réduction à 50% d'ici 2030 est irréaliste avec un coût inacceptable en période de crise...
- 2 – EDF investit massivement pour une prolongation à 60 ans de la durée de vie de ses réacteurs, en contradiction avec l'hypothèse précédente...
- 3 – l'échec patent de la transition énergétique allemande devrait servir d'exemple...

En résumé, quelles seraient les conséquences du Scénario n°2 :

- 1 – Investissements importants en EnR, peu efficaces, très chères et à production aléatoire et centrales thermiques charbon et gaz
- 2 – Importations massives de combustibles fossiles (gaz et charbon) pour palier la versatilité des énergies renouvelables...
- 3 – Développement de lignes à haute tension pour relier les multiples parcs éoliens terrestres et off-shore et les interconnexions avec les pays limitrophes
- 4 – Augmentation importante des émissions de GES (CO₂)(?)
- 5 – réduction très importante de nos exportations d'électricité et augmentation des importations (si ça sera encore possible d'en importer ?) et donc risque de pénurie

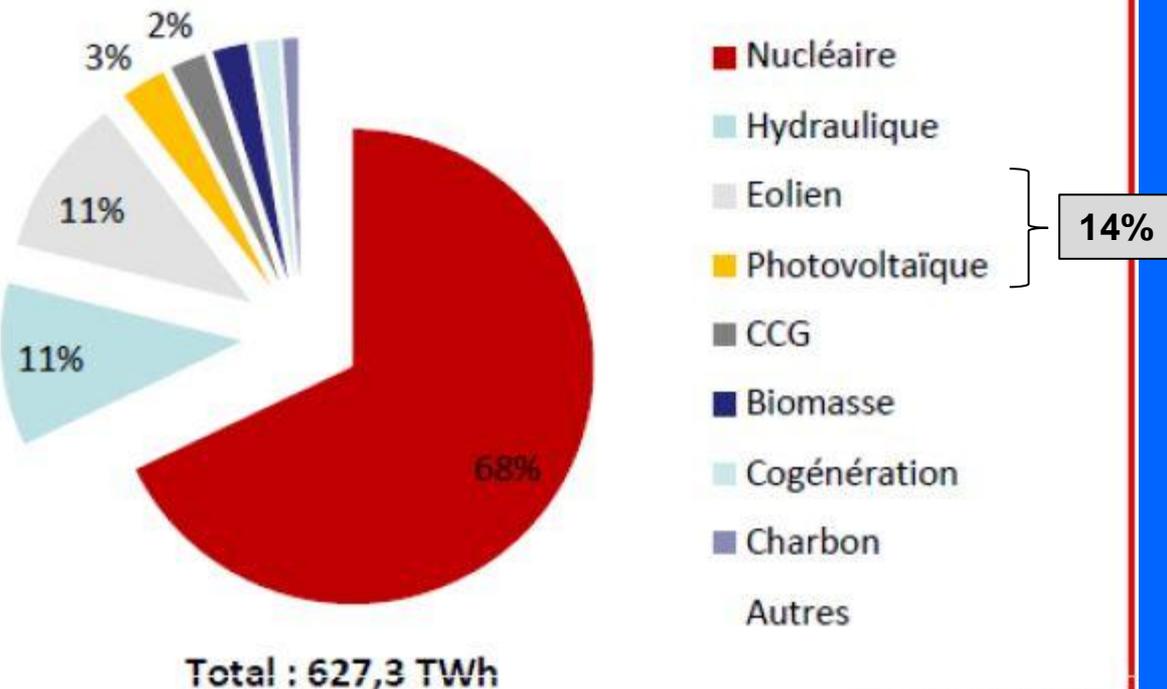
Coût : plusieurs centaines de milliards d'euros d'investissement et des dizaines de milliards d'euros annuels d'importation qui vont se traduire pour le consommateur à un doublement du prix de l'électricité...

Sondage du 16/11/2011 (Le Figaro) :

« êtes vous prêt à payer plus cher pour réduire la part du nucléaire ? »

OUI : 16,35%
NON : 83,65% (41625 votants)

Mix Electrique France 2030 selon le scénario principal du RTE



(Source : RTE 2011)

Autre scénario, celui du RTE (2011)

En résumé quels seront les besoins en énergie électrique et comment y ferons nous face?

Production électrique : Perspectives futures : Projections à 2050 dans le monde

[40%] : données 2006

Production électrique
46 600 TWh

x2,6 par rapport à 2006

Énergies
renouvelables

[2%]

8%

[16%]

3%

Hydraulique

9%

[15%]

Nucléaire

Charbon

47%

[40%]

Gaz
naturel

28%

[21%]

Pétrole

5%

[6%]

La part du :
Charbon, gaz naturel : en hausse
Pétrole : constant
Nucléaire, hydraulique : en baisse
Énergies renouvelables : légère hausse

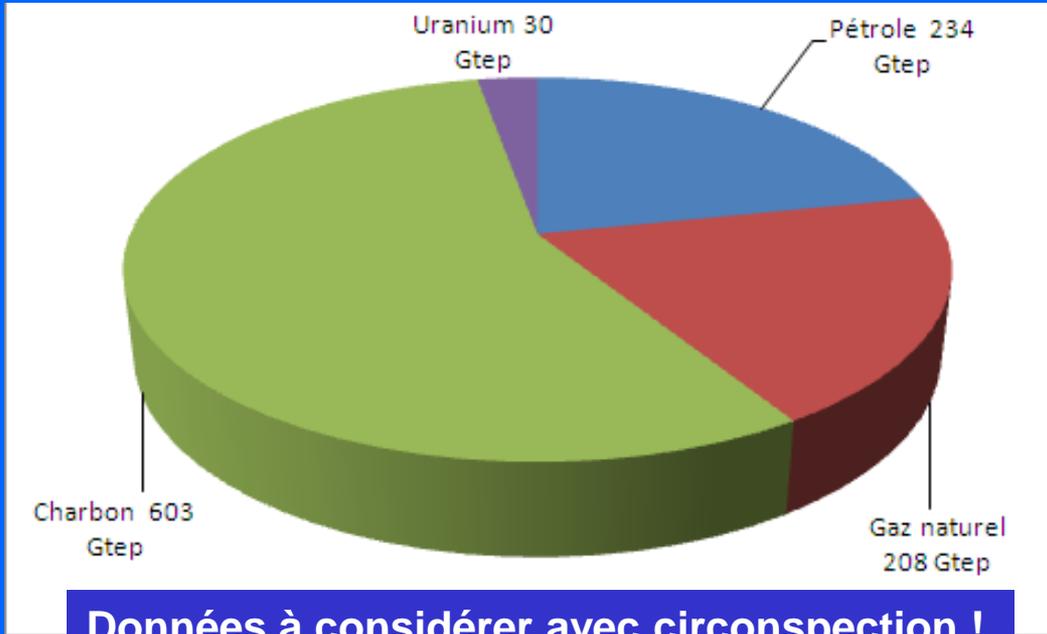
*En 2050 la Chine envisage
d'exploiter plus de 500 réacteurs
nucléaires (jusqu'à 1500...)*

Selon toutes les prévisions, on devrait dans l'avenir faire encore massivement appel aux énergies fossiles...

III - Quelles sont les réserves prévisibles en énergie fossile ?

*"Le pétrole est une ressource inépuisable qui va se faire de plus en plus rare"
(Dominique de Villepin, 2006)*

Réserves mondiales estimées en 2011



Données à considérer avec circonspection !

Consommation : 14 Gtep
- charbon : 3,5 Gtep/an
- pétrole : 4,6 Gtep/an
- gaz : 2,8 Gtep/an

A ce rythme, peut-on faire face et pendant combien de temps ?

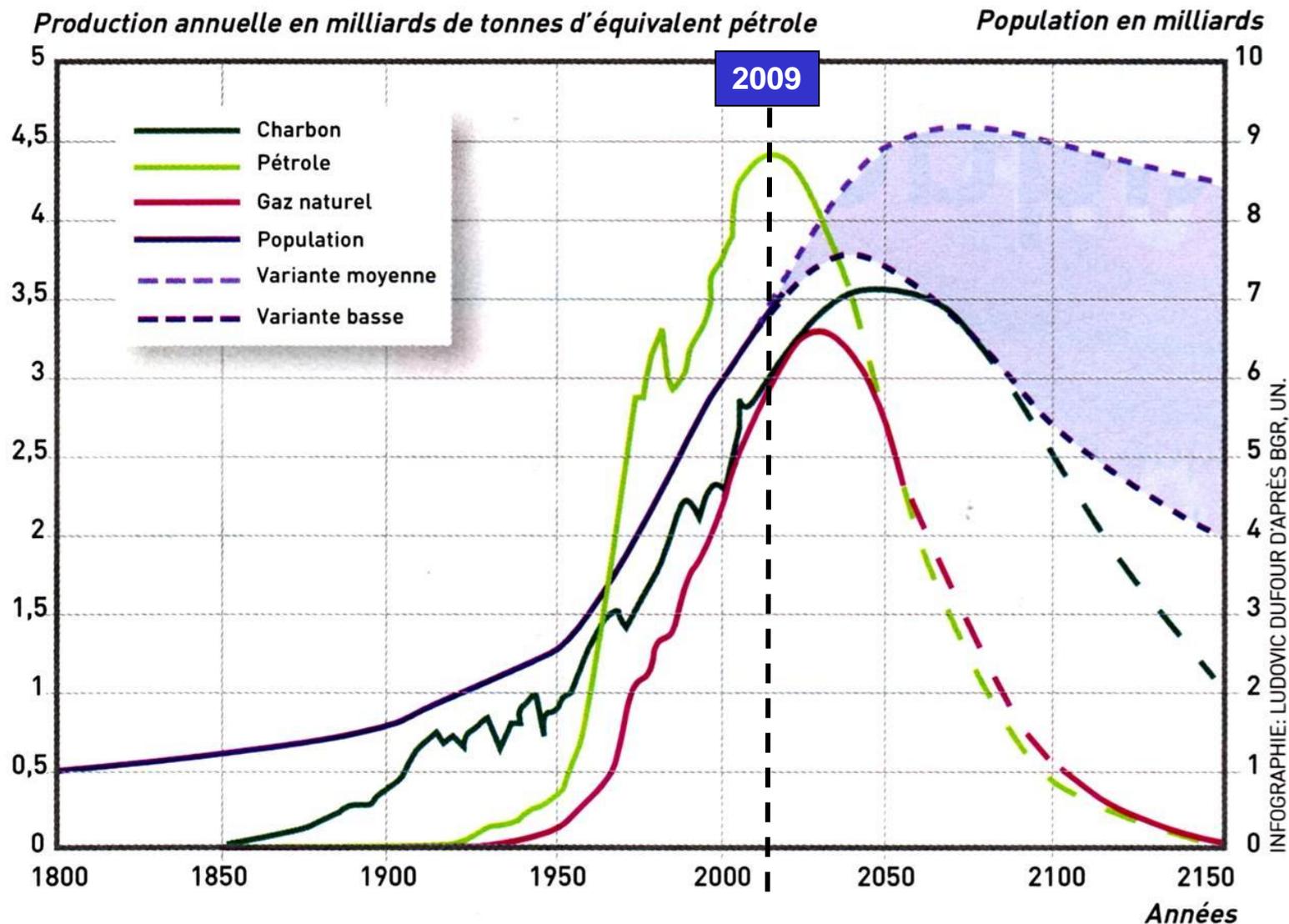
Ce qui donnerait au rythme actuel de consommation :

- 50 ans pour le pétrole
- 75 ans pour le gaz
- 180 ans pour le charbon

**Durées de production très approximatives qui ne tiennent pas compte ni de possibles découvertes de gisements facilement exploitables (peu probable) ou plus difficiles...
*ni aussi de l'augmentation de la consommation...***

Ces durées dépendent aussi du prix de l'énergie... plus il augmente et plus certains gisements deviennent rentables et donc exploitables...

L'avenir ? La production doit passer par un pic puis décroître... quand ???



Les pics de production sont prévus vers 2010 pour le pétrole, 2030 pour le gaz, 2050 pour le charbon, en même temps que l'amorce de la décroissance démographique.

Le pétrole ?, le gaz naturel ?

Il n'a probablement pas dit son dernier mot !

En 1970 on estimait les réserves pour 40 ans... 40 ans après on les estime à 50 ans !

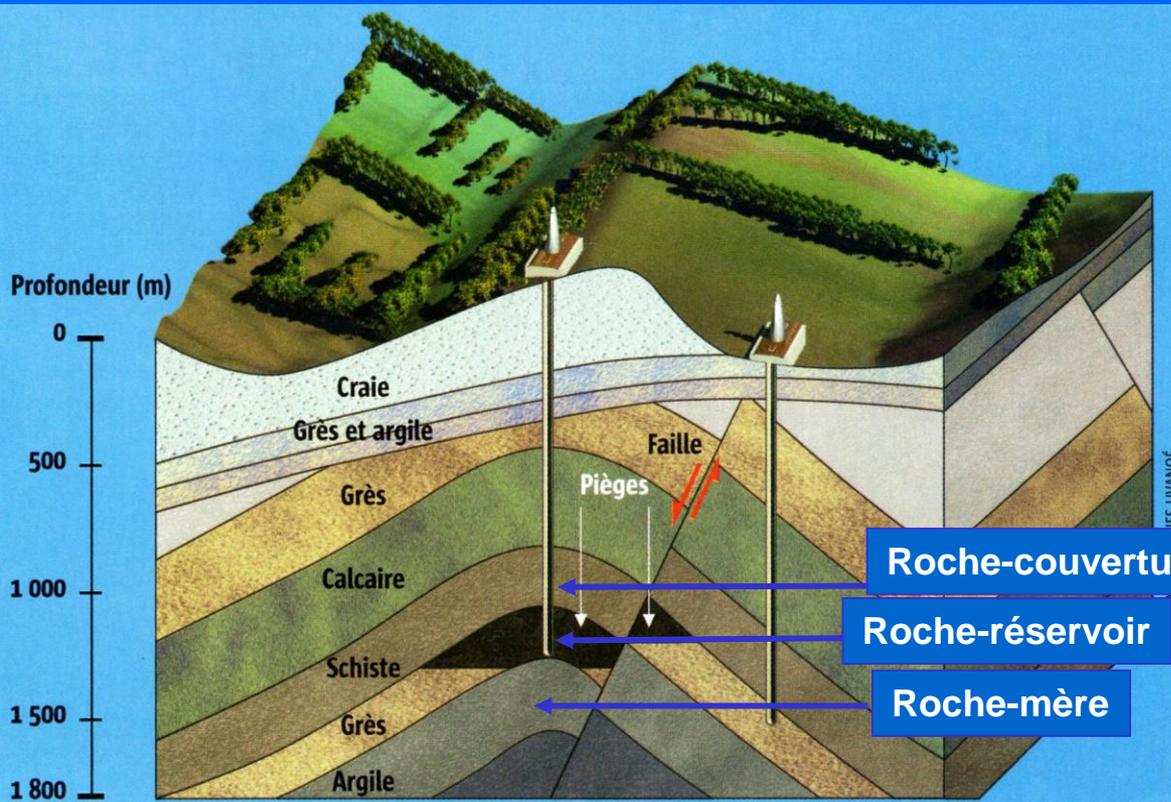
roche mère :
roche sédimentaire à faible granulométrie riche en matière organique (kérogène)

2200 m : formation de charbon et bitume

3800 m : formation de pétrole

5000 m : hydrocarbures légers et gaz...

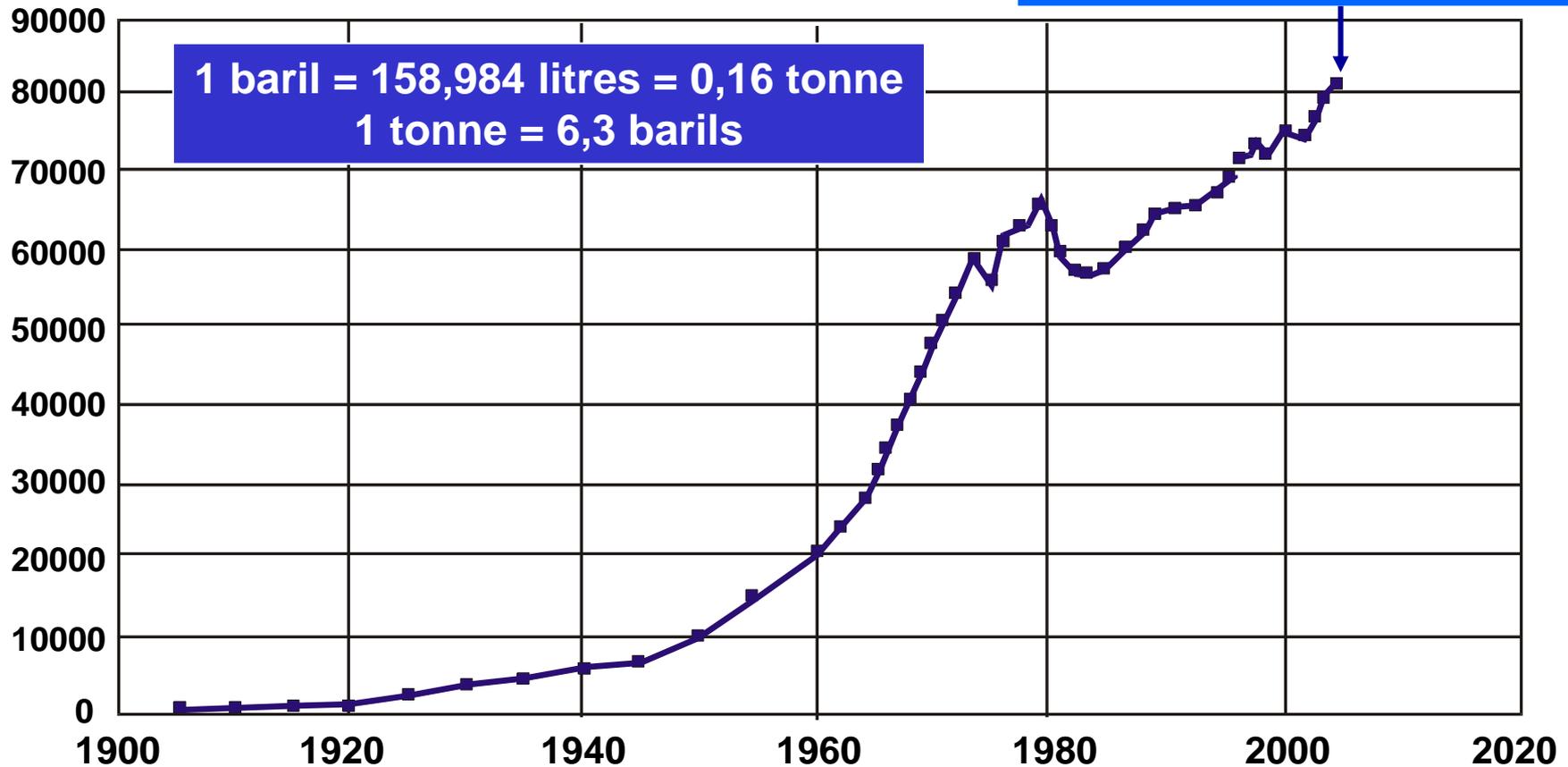
Les huiles et gaz migrent jusqu'à trouver une roche imperméable (« couverture ») qui les piège dans un réservoir



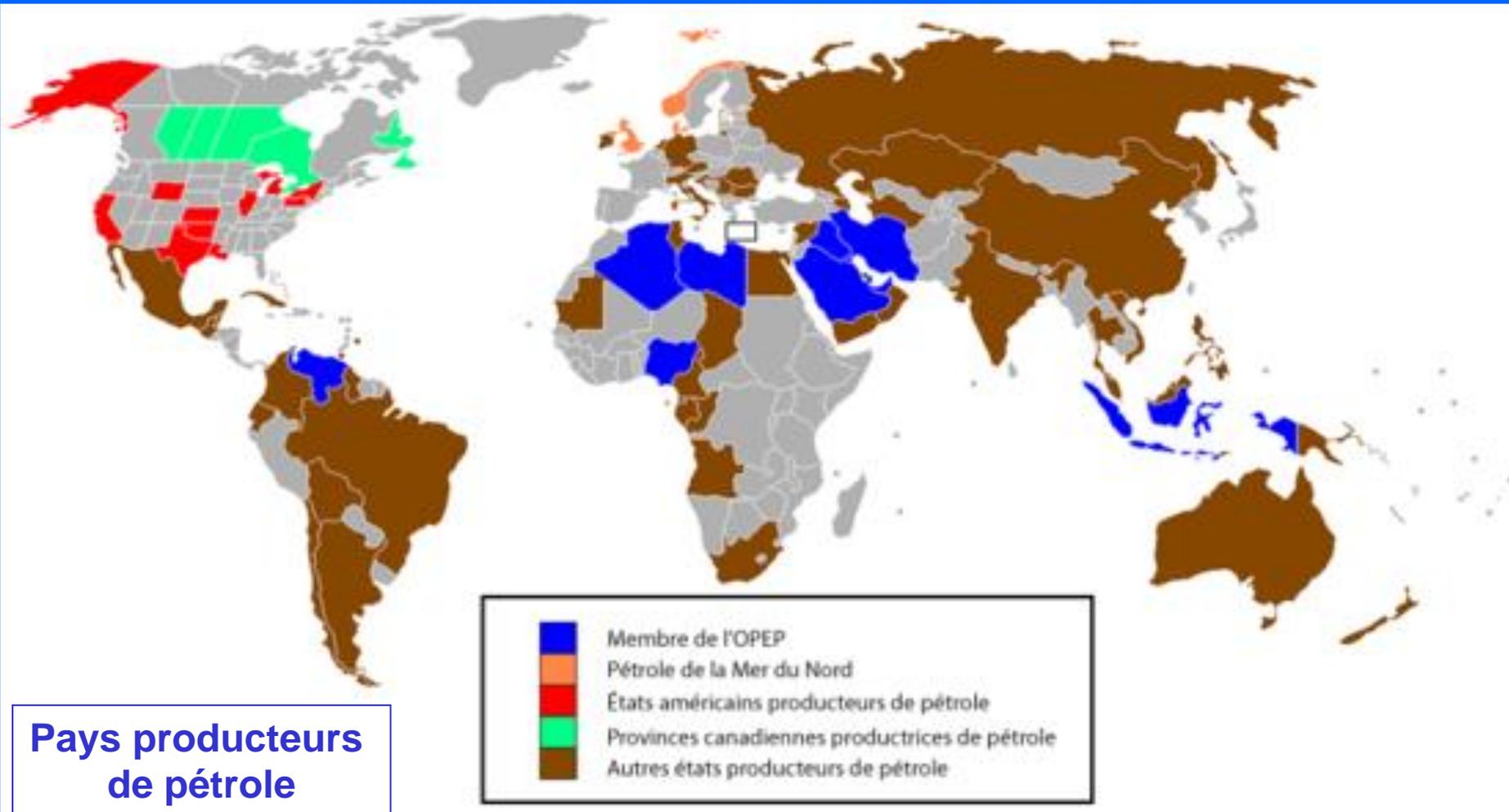
Production mondiale de pétrole (en 10^3 barils/jour)

environ 5 Gt/an

80 millions de barils/jour
soit 13 milliards de litres /jour



En progression constante +1,5%/an (avec une légère baisse provisoire en 1980)



**Production annuelle
(millions de tonnes)
*données 2004***

**Arabie saoudite : 454
Russie : 439
USA : 271
Iran : 199
Chine : 174**

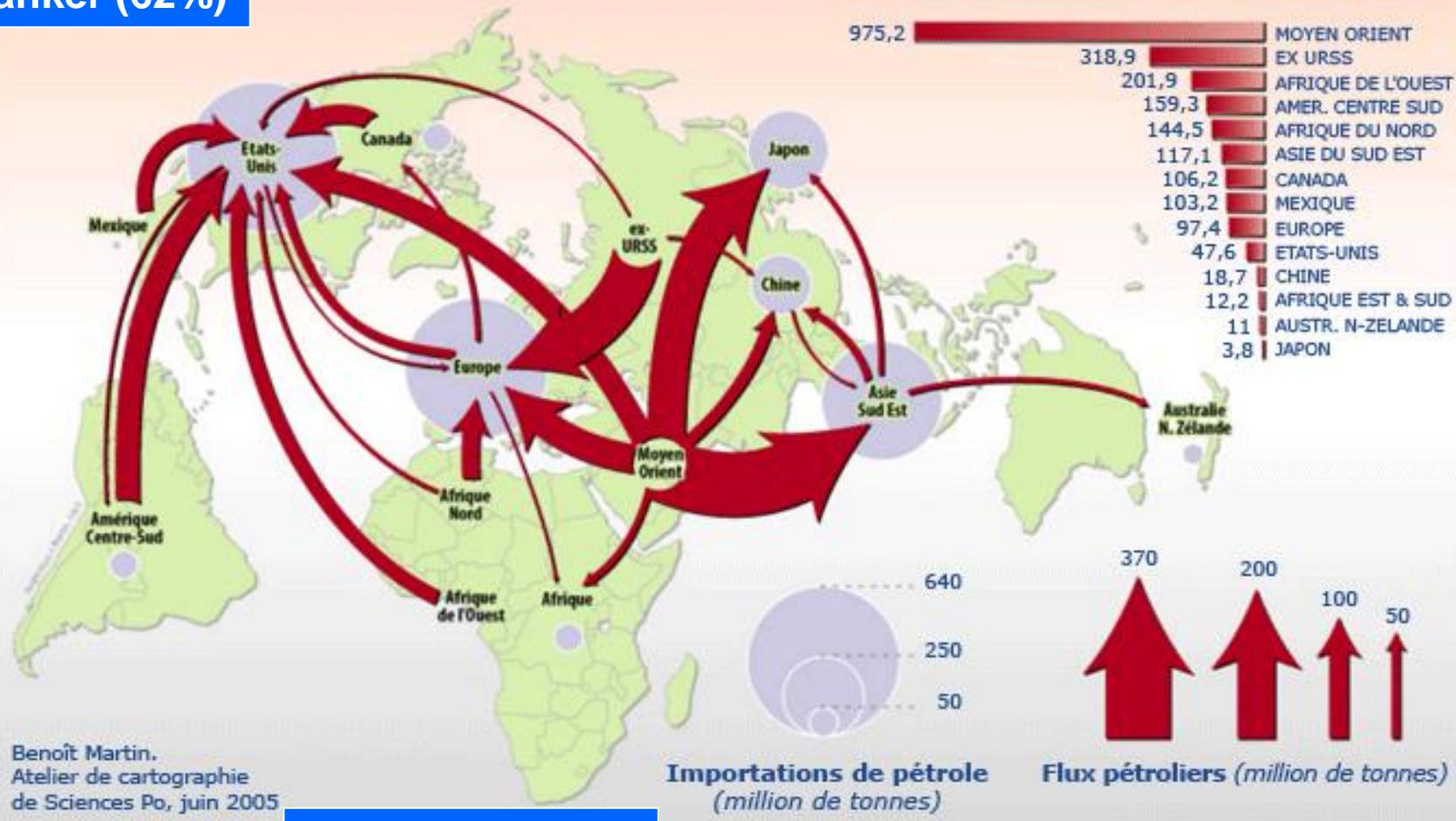
**Mexique : 169
Norvège : 148
Venezuela : 127
Nigeria : 125
Émirats Arabes Unis : 123**

**Oléoducs
Tanker (62%)**

Principaux flux pétroliers en 2004

(Source : Statistical Review of World Energy, BP 2005)

Exportation de pétrole (million de tonnes)



Benoît Martin.
Atelier de cartographie
de Sciences Po, juin 2005

**Supertanker :
de 200 000 à 500 000 t**

La situation française

Consommation française :
3640 litres/seconde
(2 mbj)

→ 110 Mtep par an

Production française : 1,05 Mtep/an
(1% de la consommation)

0,59 Mtep en Région Parisienne
0,46 Mtep en Région Aquitaine

Les importations françaises
de pétrole brut

(90 Mtep) diminuent chaque année :

2004	-0,4 %
2005	-1,1 %
2006	-2,4 %

*En 2011, la facture a été de
61,4 milliards d'euros*



La provenance
est diversifiée :

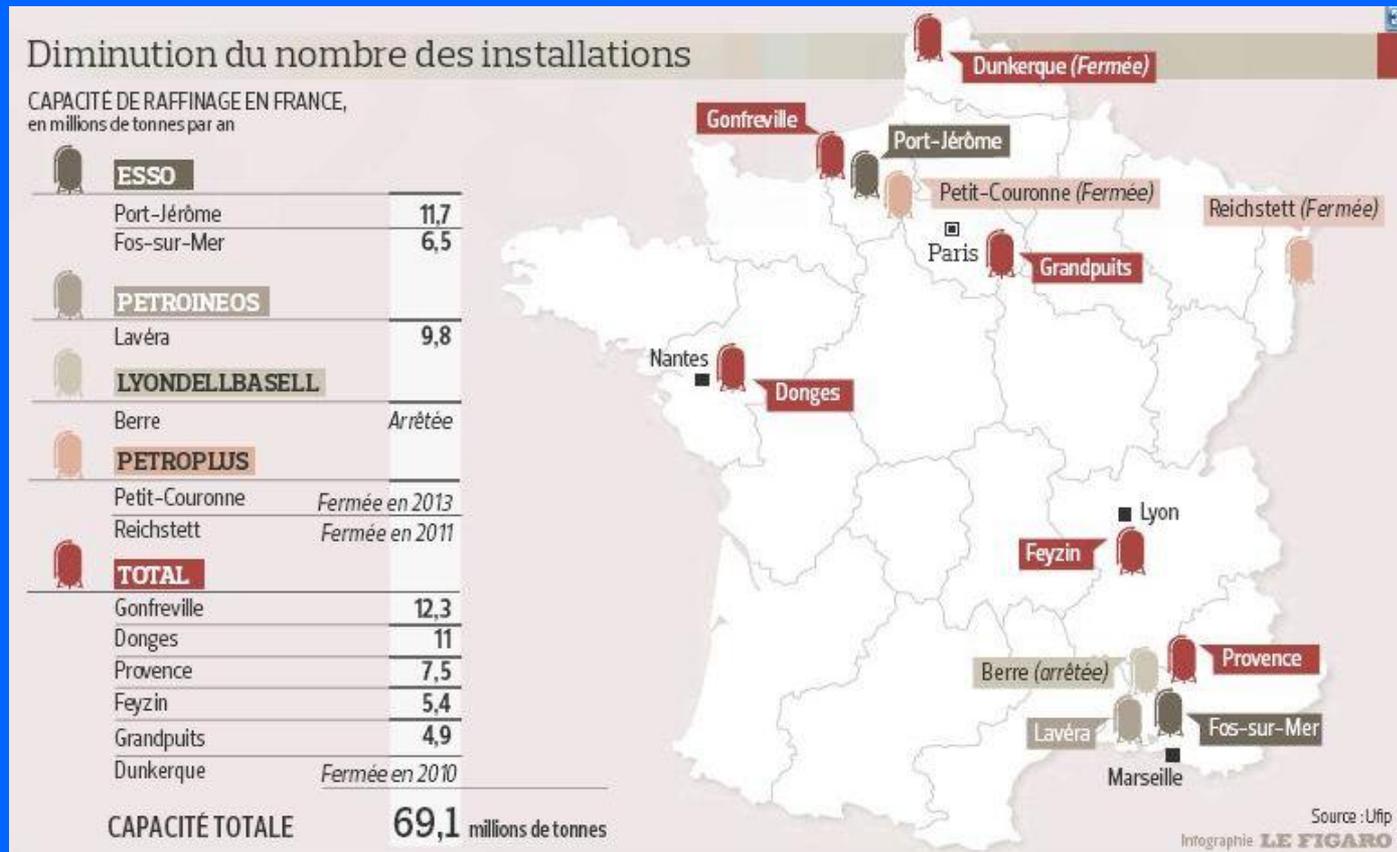
Moyen Orient	28 %
Mer du Nord	25 %
ex URSS	24 %
Afrique	21 %

Raffinage (2013) : 69,1 Mtep/an

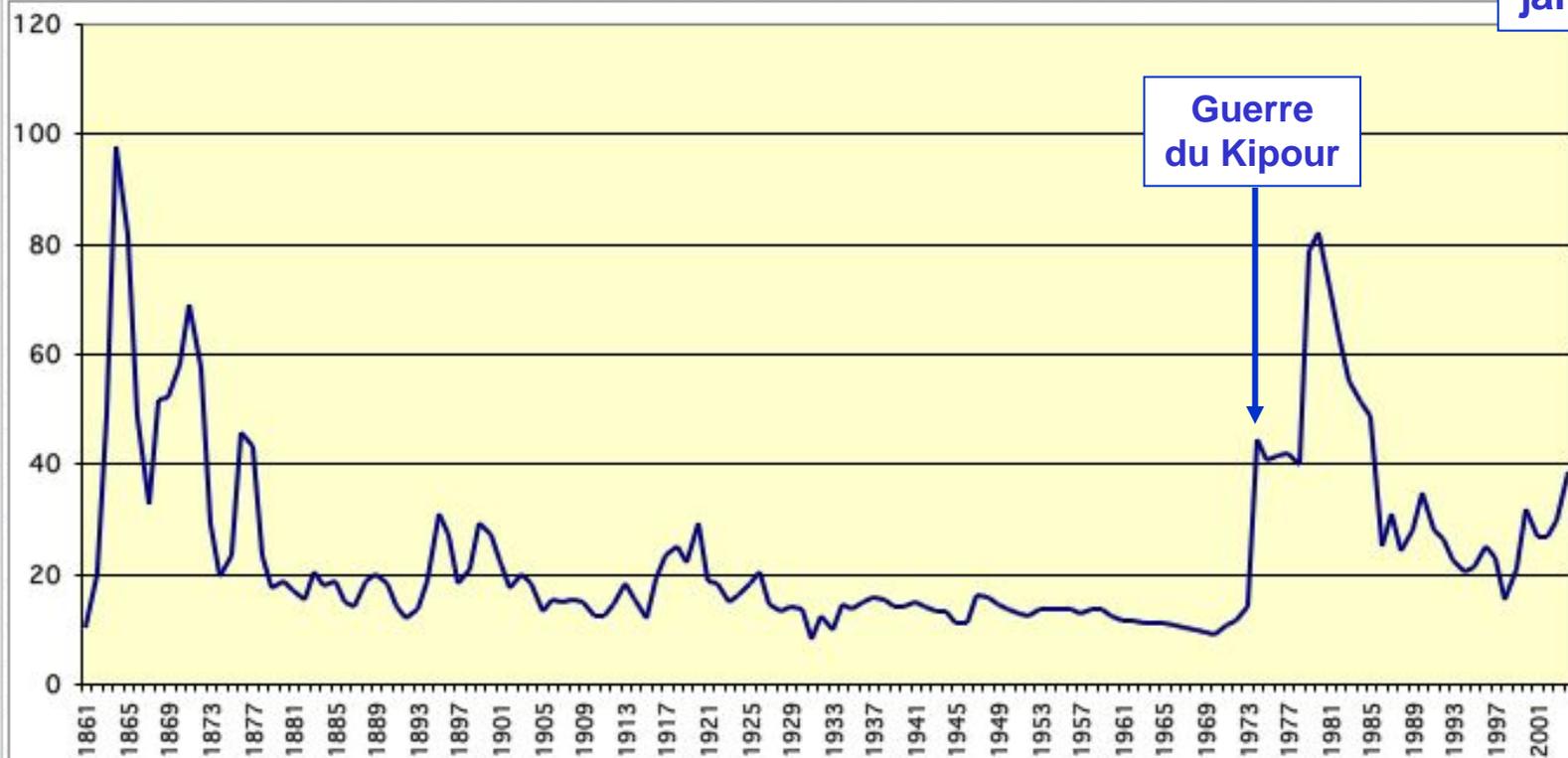
L'importation des produits raffinés est en hausse constante : +10 à 13% par an

Les raffineries françaises sont mal adaptées au marché et doivent faire face à la baisse de la consommation et de la diminution des importations US
Beaucoup ferment...

On importe du gasoil (10 Mt/an) et on exporte de l'essence et du fioul lourd (5 Mt/an)



Prix du baril de pétrole brut en \$ constant (2004) depuis 1861



niveau
janvier 2008

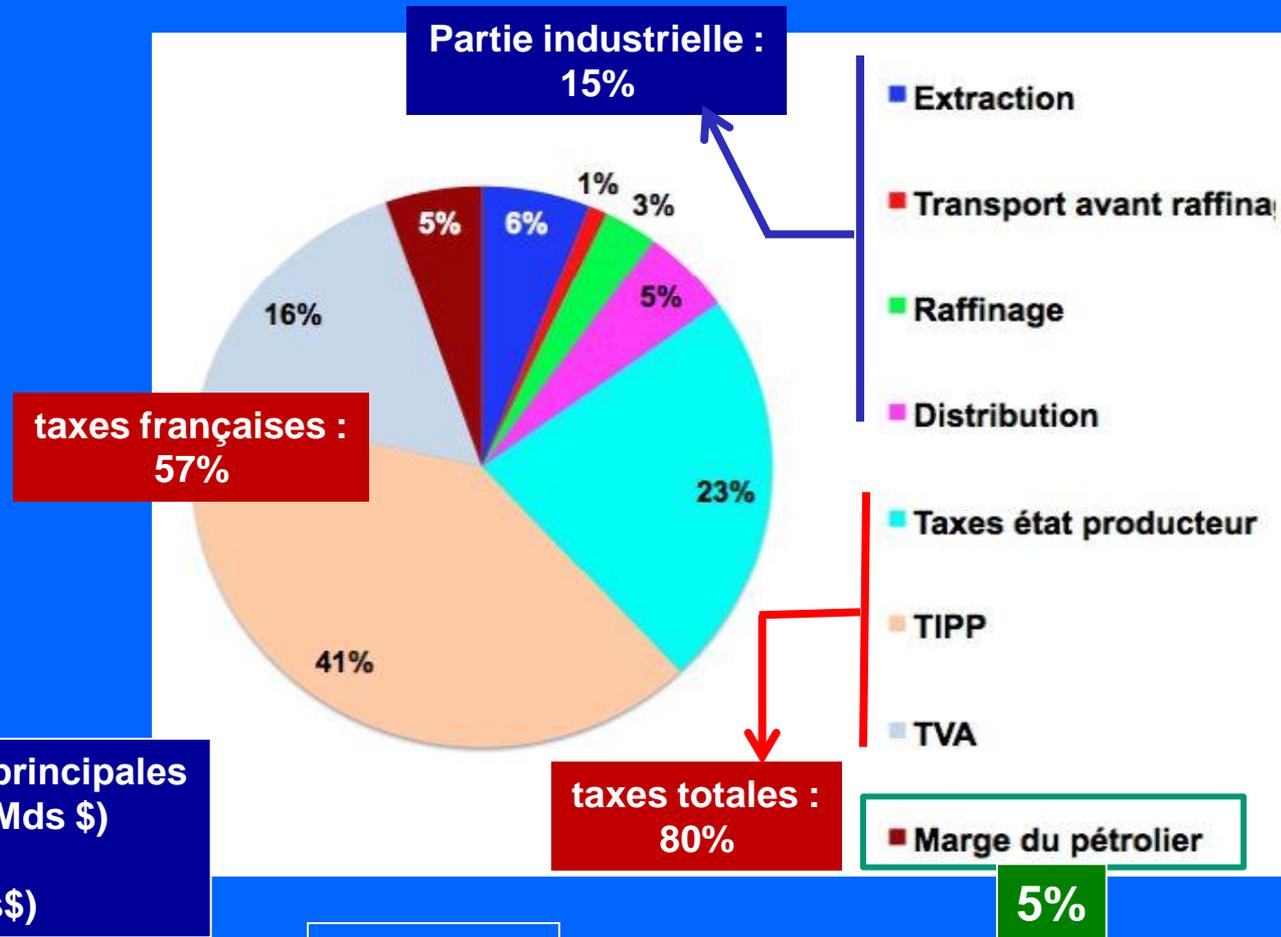
Guerre
du Kipour

Evolution du prix du baril en dollars constants (dollars de 2004) depuis 1861. Même à 60 dollars le baril, nous sommes encore sous les records du 20^è siècle, avec plus de 80 dollars (dollars 2004) le baril en moyenne sur 1980.

Source des données : BP Statistical Review, 2005

Janvier 1999 : 10 \$
Janvier 2007 : 50 \$
Décembre 2007 : 100 \$
Juillet 2008 : 147 \$
Novembre 2008 : 48 \$
Février 2011 : ~100 \$

Prix de l'essence (France) : part respective des différents postes



Chiffres d'affaires (2007) des principales compagnies pétrolières (Mds \$) (« Super Major ») et résultats nets (Mds\$)

1 - Exxon Mobil (USA) :	405 (41)
2 - Royal Dutch-Shell (NL-GB) :	357 (31)
3 - BP Amoco (USA) :	285 (21)
4 - Chevron Texaco (USA)	221 (19)
5 - Total Final Elf (F) :	202 (19)
6 - ConocoPhillips (USA)	194 (12)

Total-Elf :

Bénéfices nets :

2008 : 13,9 Mds€

2009 : 8,5 Mds€

2010 : 10,6 Mds€

Investissements 2011 : 20 Mds\$

Réserves mondiales

28 000 gisements répartis dans 97 pays , dont :

400 à 500 « géants » ($> 70 \cdot 10^6$ T)

dont 60 « super géants » ($> 700 \cdot 10^6$ T)

(60 % au Moyen Orient, 40% des réserves)

production actuelle : 85 millions de barils par jour ($13\,500\,000 \text{ m}^3$)

soit environ 5 milliards de tonnes par an

Coûts techniques

Moyen Orient : 0,5 \$ /baril

Off Shore : 8 – 12 \$ / baril



Le rythme de consommation est 10 000 fois supérieur au rythme de renouvellement dans les bassins sédimentaires

Production totale cumulée : 1100 milliards de barils

Réserves estimées : 1000 à 1265 milliards de barils

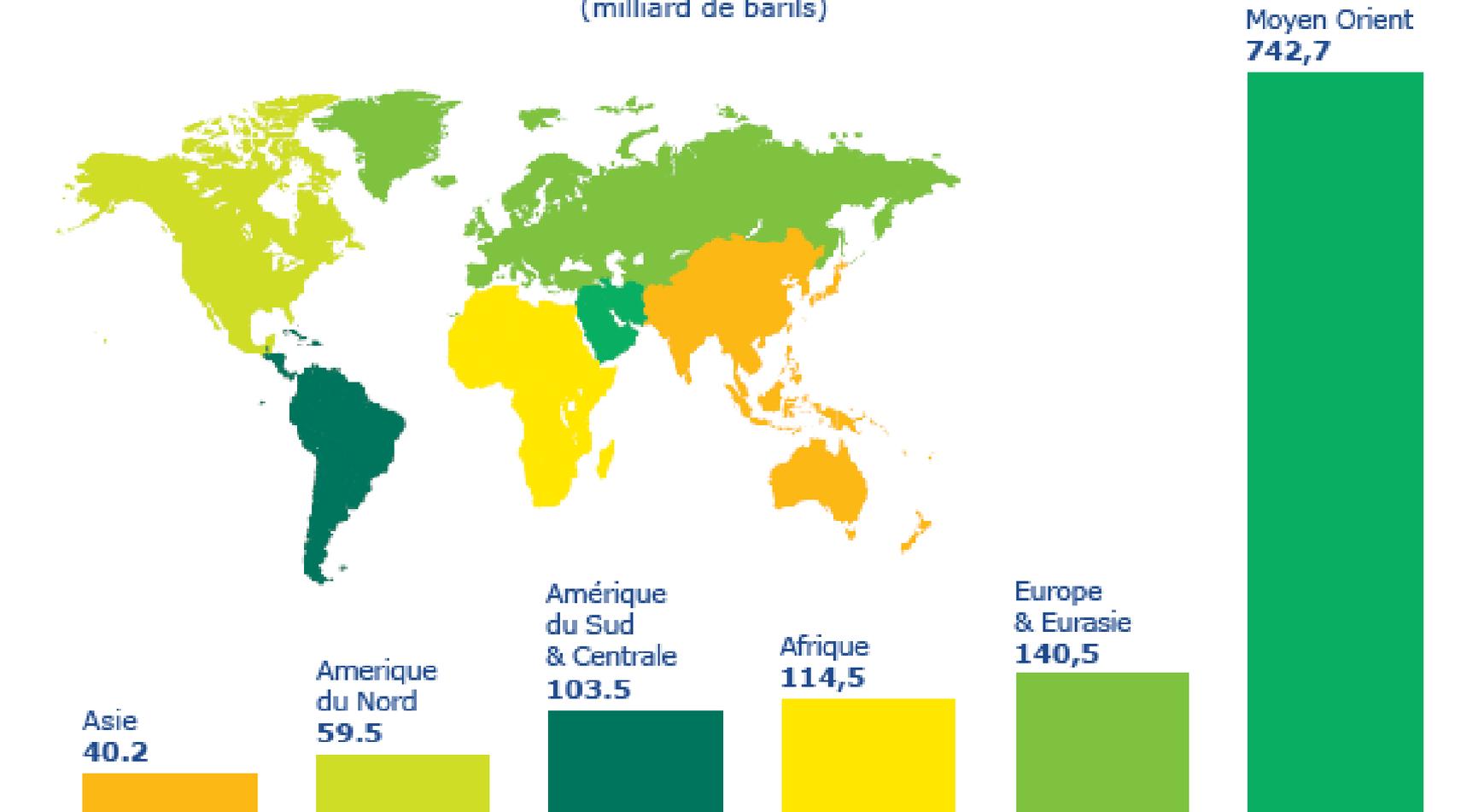
Ressources à découvrir : 200 à 600 milliards de barils ?

Selon l'AIE (2004) réserves cumulées : environ 3345 milliards de barils

98

Réserves mondiales en pétrole

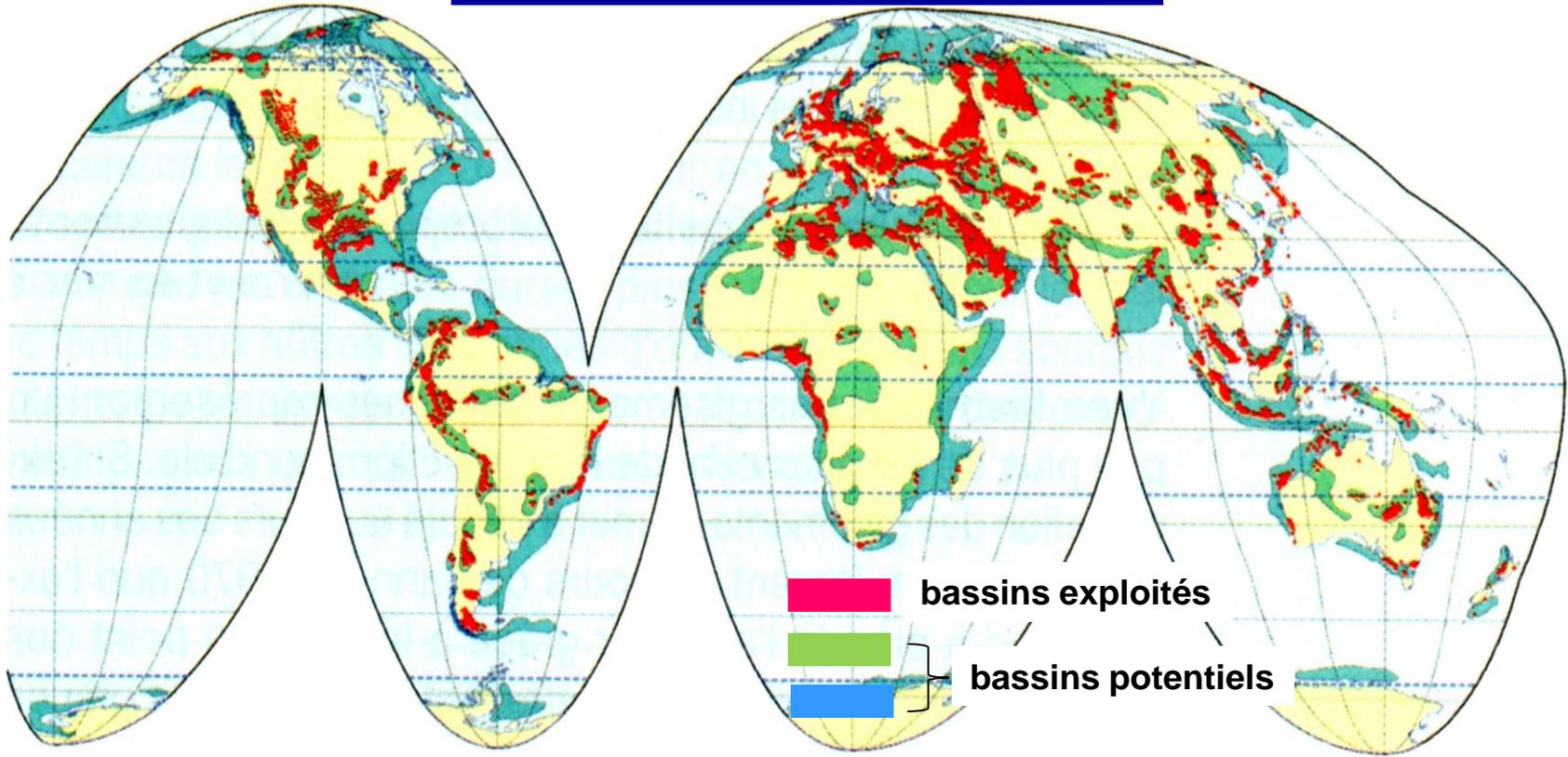
Les réserves mondiales de pétrole (Source BP, 2007)
(milliard de barils)



Données surévaluées ? réelles ?

Quel avenir pour le pétrole ?

Institut Français du Pétrole



Carte des domaines qui présentent un intérêt potentiel ou avéré pour l'exploration des hydrocarbures. En bleu et vert, les bassins terrestres et maritimes qui contiennent potentiellement du pétrole. En rouge, les gisements déjà découverts.

La théorie de la pénurie future est toujours bien vivant !
Selon certains experts, le pic de production a été atteint et la production devrait diminuer progressivement (bien que la demande ne peut qu'augmenter)

1 - améliorations techniques

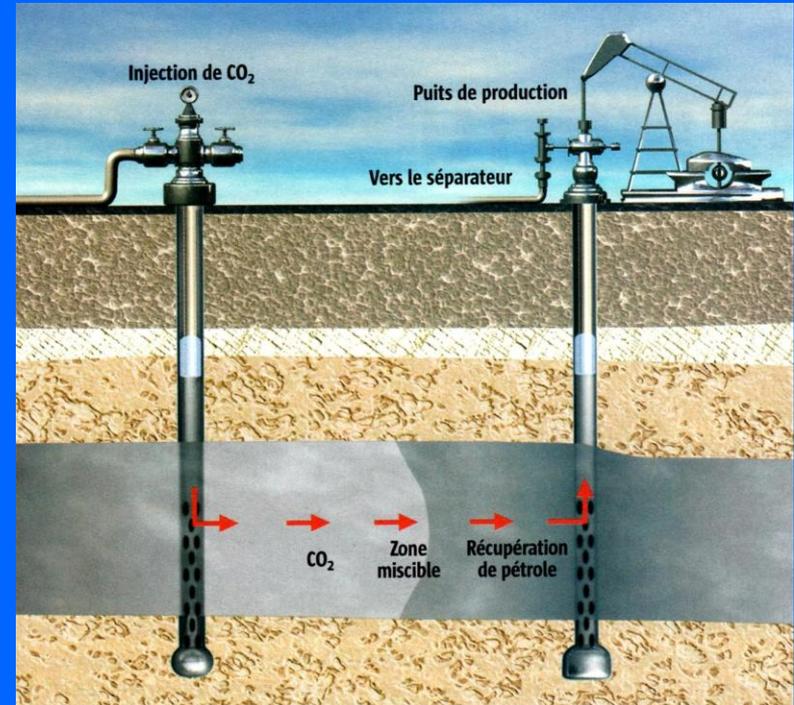
actuellement un gisement n'est exploité qu'à 30 ou 35%

→ gagner 1% équivaut à 3 à 4 années de production supplémentaire

injection de vapeur d'eau ou de gaz (CO₂) sous pression

Équipent 200 puits dans le monde.

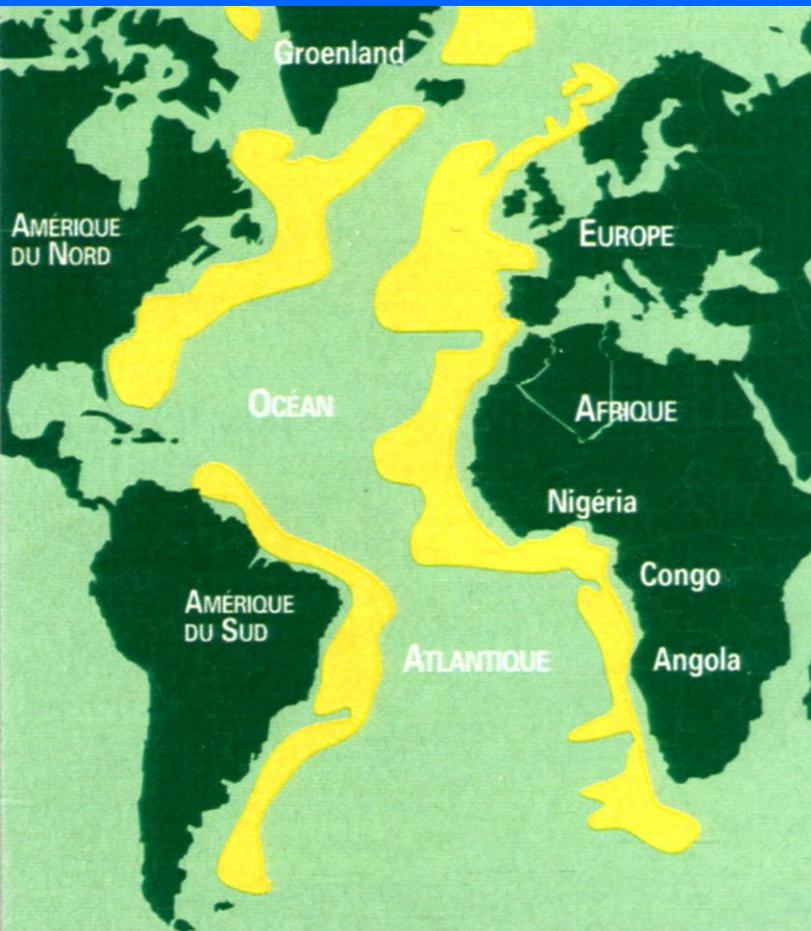
but : atteindre 50% (60 à 65% possible)



Autre progrès : dans les « vieux » réservoirs, on produit plus d'eau que de pétrole (3 à 7 fois plus), ce qui coûte très cher à traiter.

Des vannes « intelligentes » qui empêche l'eau de pénétrer dans le réseau permet de récupérer plus de pétrole...

2 – Les réserves off-shore



Il existe encore d'énormes possibilités
(mais d'accès difficile et coûteux)

*L'Atlantique sud recèlerait 7% des réserves
mondiales*

Les gisements Girassol et Jasmain (Angola) sous
1400m de fond fournissent 240.000 barils par jour...

Il existe de gigantesques gisements à 300 km
au large du Brésil :
Tupi, Jupiter, Carioca-Suger Loaf (3^{ème} mondial)
sous 2000m d'eau et 5000 m de sédiments

La fonte de la banquise arctique (?)
devrait rendre accessible de nouveaux
gisements

(500 milliards de barils ?)



3 - forages à grande profondeur (14 km)

- Golfe du Mexique : forage de 8km (la moyenne est de 1km)
en train de devenir l'un des plus importants au monde (500 000 barils/jour)
- Russie : 300 puits profonds (jusqu'à 14km)
le Russie est en passe de devenir le 1^{er} producteur mondial devant l'Arabie !

- *coûts élevés*
- *conditions extrêmes (300°C, 2500 bars)*

- Guyane : sous 2.000 m d'eau et à 4.000 m de profondeur forte réserve de pétrole ? (plusieurs milliards de barils ?)
Les 3 premières campagnes de forage n'ont rien donné
Peut être la prochaine ?



Autre théorie (cosmique) de l'origine du pétrole développée par les Soviétiques dans les années 50 et redécouverte par Thomas Gold dans les années 80...

Il existerait à très grande profondeur (100 à 200 km) des réserves immenses de pétrole dont les gisements exploités ne seraient que de faibles résurgences !

Pour les exploiter, il suffit de forer n'importe où à grande profondeur !

4 – Exploitation des gisements non conventionnels

- huiles lourdes et roches tendres
- huiles légères et roches compactes

- huiles lourdes

(pétrole non conventionnel – réserves conventionnelles)

Sables bitumineux

*En provenance de gisements anciens où les éléments volatils ont disparus.
Ce pétrole peut être exploité en injectant de la vapeur sous pression.*

Problèmes :

- 1 – pour être exploité, utilisation de gaz naturel (50% du coût d'exploitation)
utilisation de vapeur « nucléaire » à l'étude (HTR et VHTR)*
- 2 – taux de gaz à effet de serre 3 fois plus que le pétrole classique*

Schistes bitumineux

*Mélange de roches et de kérogène avant la pyrolyse...
Plus proche de la tourbe/lignite que du pétrole
Ce gisement est exploité comme une mine classique.*

Traité à 500°C, peut être transformé en pétrole mais coût énergétique important !

Ne sont rentables que si le prix du pétrole est élevé... ce qui est le cas

sables bitumineux

Canada : 250Gt (> Arabie), Venezuela (7,5 Gt)

Schistes bitumineux

Australie: 3,8 Gt

Estonie, Brésil, Suède, USA, Chine...

total possible : 100 Gt > 600 milliards de barils)



COUVERTS DE BITUME, les grains de sables asphaltiques ressemblent à du marc de café.

Athabasca



l'Alberta produit plus que l'Angola (80% de sables bitumineux) et devrait en 2020 produire 3 millions de barils par jour soit plus que l'Iran. problème : jugée peu écologique cette production est boycottée par l'UE

exploitation très néfaste pour l'environnement

Orénoque



Autre pétrole « non conventionnel » : huiles de « roche mère »

(pétrole conventionnel – réserves non-conventionnelles)

On fore horizontalement puis on injecte dans le puits de l'eau sous pression pour fracturer la roche.

En 2017 les USA seront les 1^{er} producteurs mondiaux de pétrole...

Deux sociétés américaines « Toreador » et Hess s'intéressent au Bassin Parisien.

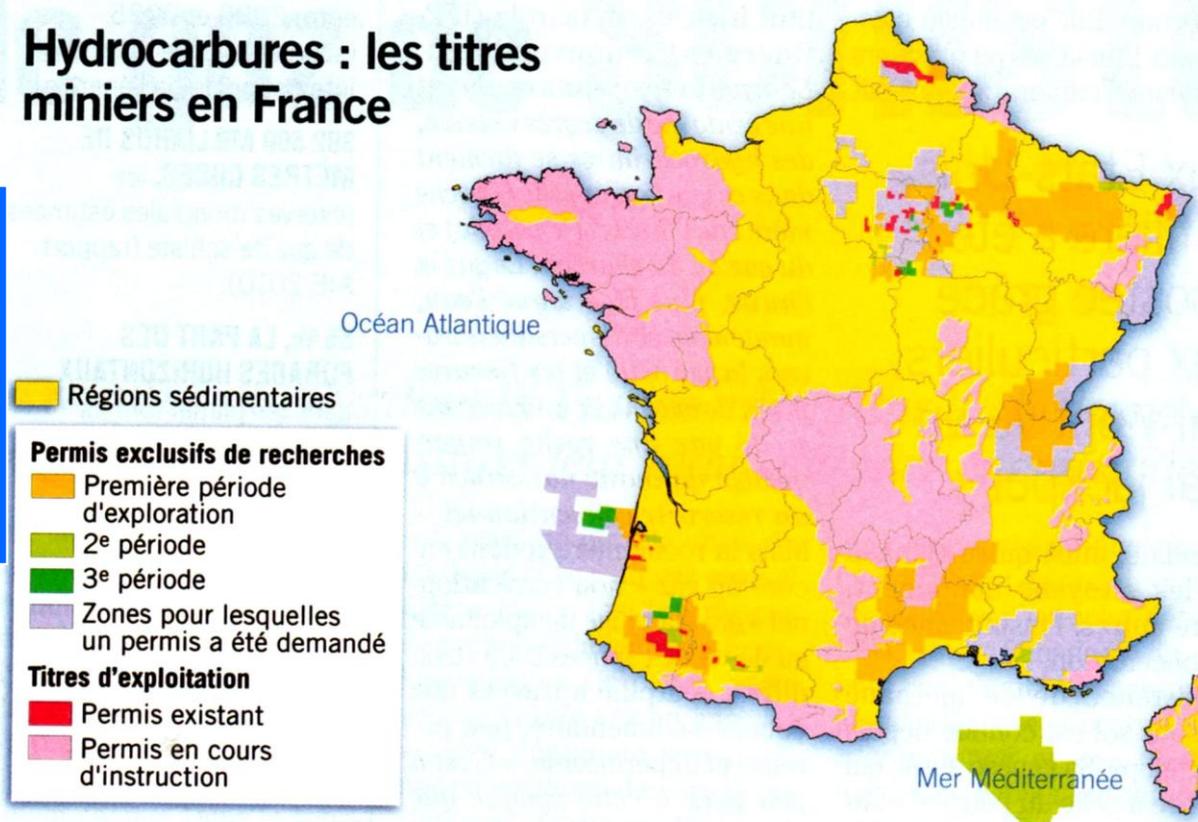
Toreador va forer en région parisienne à grande profondeur (2500m) :

- 1^{ère} étape : en 2011, 6 puits d'exploration (56 M\$)

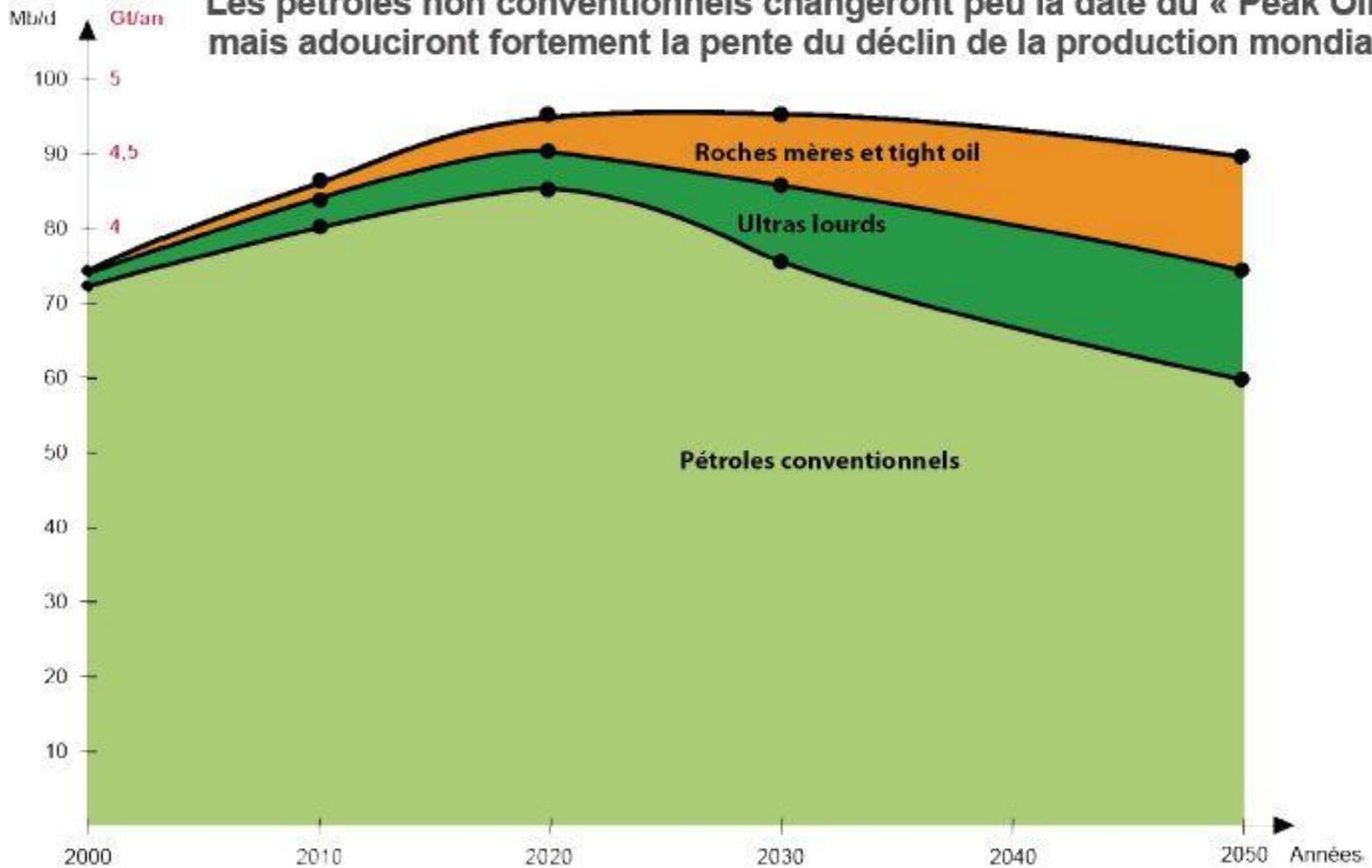
- en 2012, il était prévu des centaines de puits... un jour peut être

*Il y aurait en Région Parisienne
entre 20 et 65 milliards de barils
en pétrole de schiste à 2300m
(soit plus que le Koweït et les
Emirats Arabes unis !)
Mais seuls 2 milliards de barils
pourraient être extraits.*

Hydrocarbures : les titres miniers en France



Les pétroles non conventionnels changeront peu la date du « Peak Oil » mais adouciront fortement la pente du déclin de la production mondiale

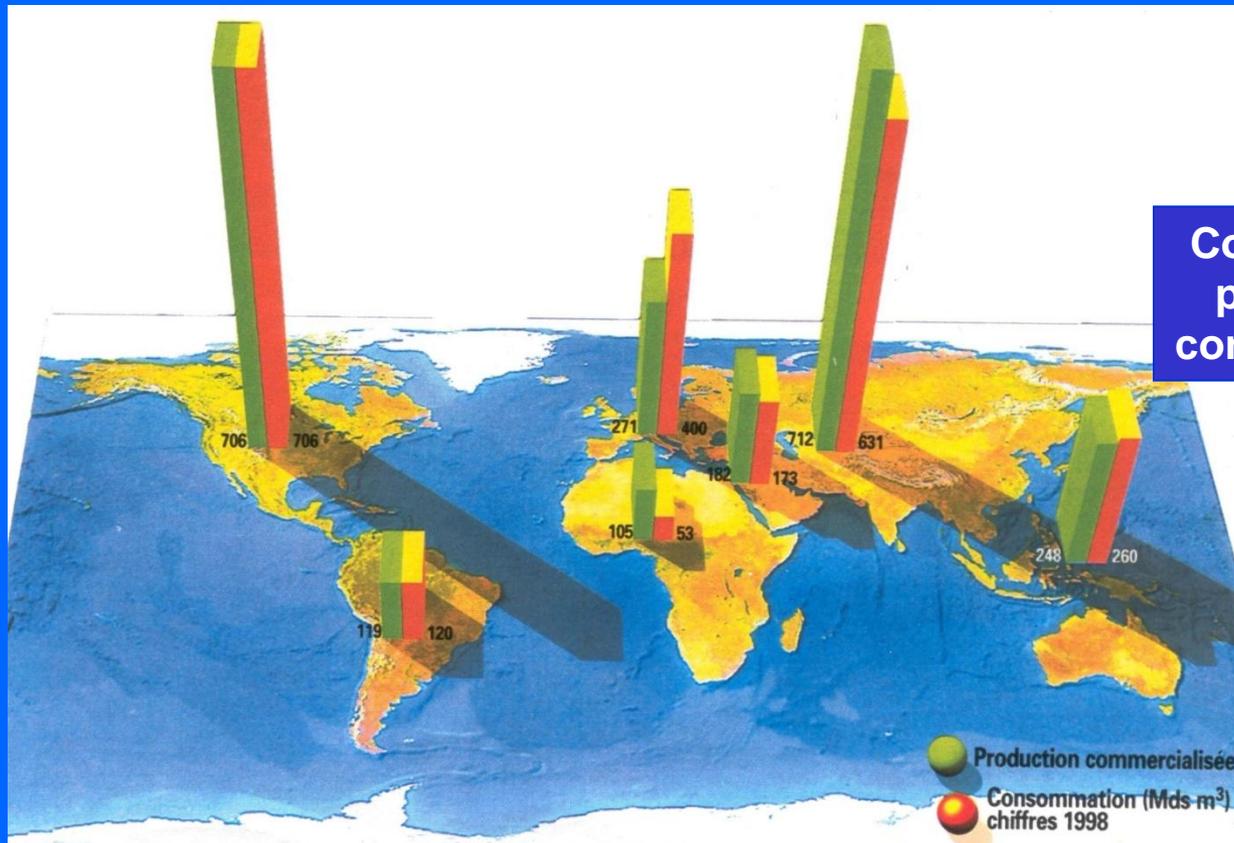


Source PR Bauquiss – Oct 2013 (Delphi ASPO France)

Le gaz naturel (méthane)

94 % production d'énergie (62 % dans le résidentiel, tertiaire)
6 % comme matières premières

Consommation : $3 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ (3 Tm³ ou TMC) en 2007 → 4,4 TMC en 2030



On observe que contrairement au pétrole, la répartition mondiale des ressources en gaz naturel est plus équilibrée par rapport à la demande.

Par rapport au pétrole, le coût du transport est très élevé et dépasse le coût de production.

Différentes variétés de gaz

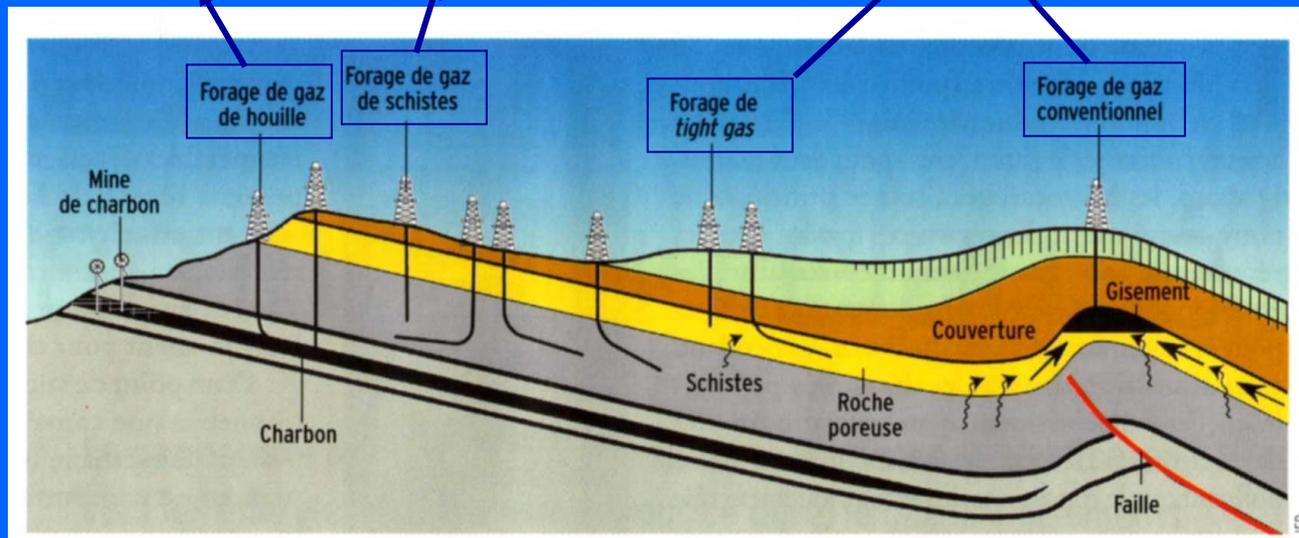
Gaz « conventionnel » (CH_4 localisé) :
se trouve dans des réservoirs constitués de roches poreuses et perméables

Gaz « non conventionnel » (gaz de roches mères) :
se trouve dans des roches argileuses imperméables et profondes (3 à 5 km) ...

gaz de houille

gaz de Schistes(*)

gaz de réservoirs ultra-compacts(**)



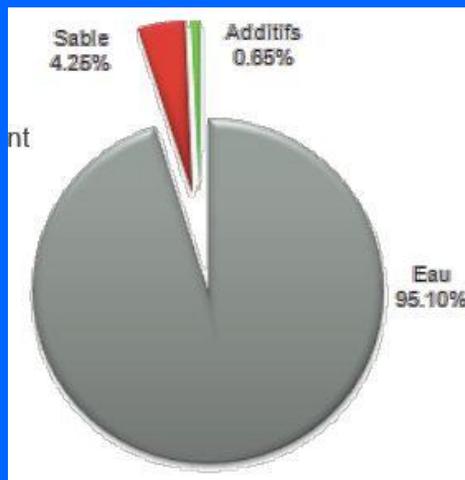
(*) shale gas (**) tight gas

Gaz non conventionnel

Principe d'extraction :

- forage vertical jusqu'à 1500 à 3000 m
- forages horizontaux pour traverser la roche sur toute sa longueur (jusqu'à 8km)
- injection d'eau sous haute pression pour fracturer la roche

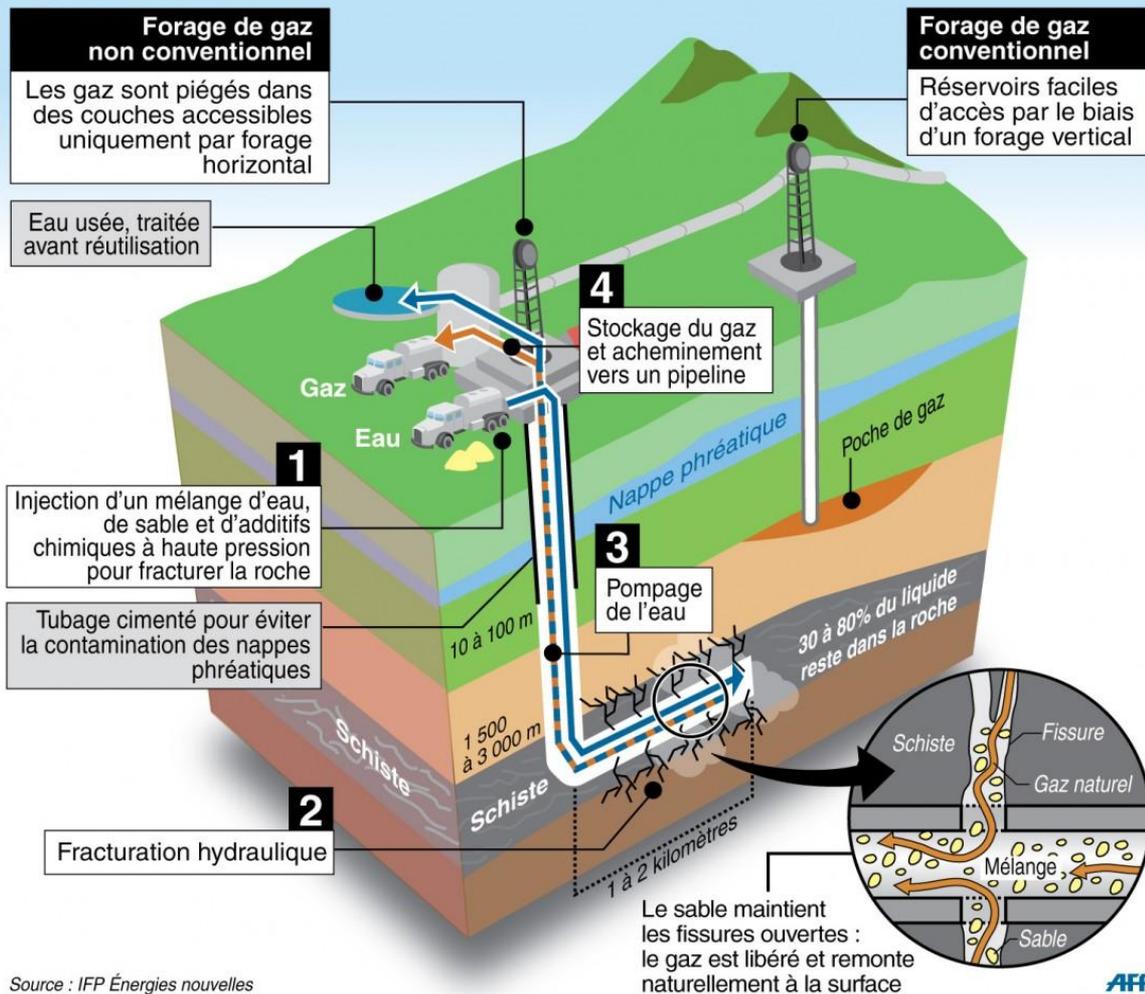
Il s'agit d'injecter des grandes quantité d'eau (10.000 à 30.000 m³) sous pression, mélangée à du sable, et des produits décapants et bactéricides (benzène, toluène, acide borique etc. jusqu'à 600 composants).



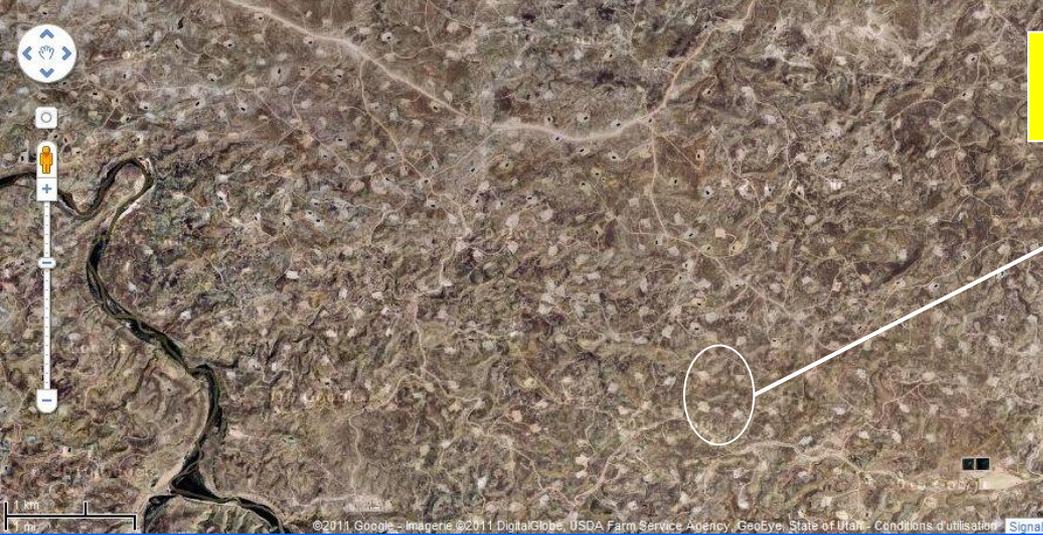
D'autres techniques de fracturation (onde de choc électrique, gaz sous pression...) sont à l'étude.

L'exploitation du gaz de schiste

Les réserves mondiales de gaz de schiste représenteraient plus de quatre fois les ressources de gaz conventionnel



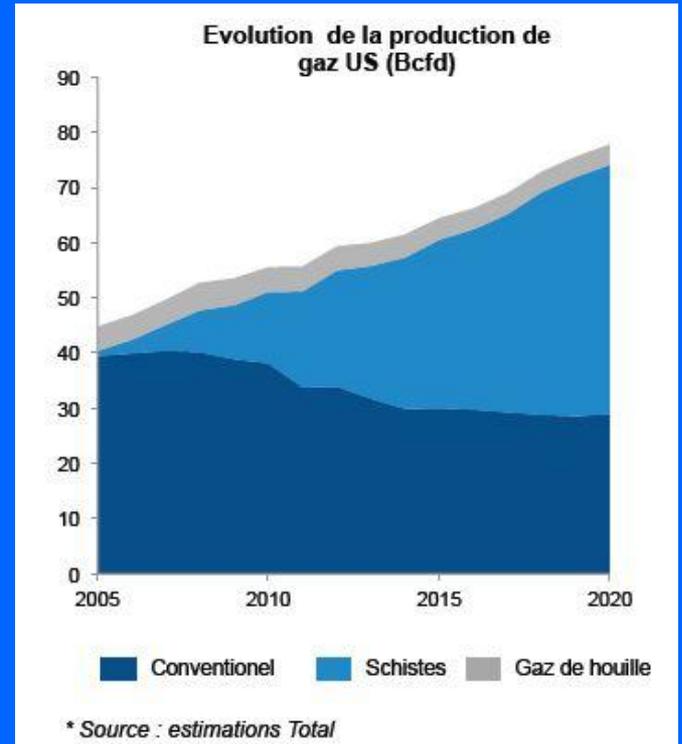
Vue satellite d'une région de l'Oklahoma et des puits d'exploitation du gaz de schiste



*chaque carré représente un puits !
(durée de vie ~ 2 ans)*

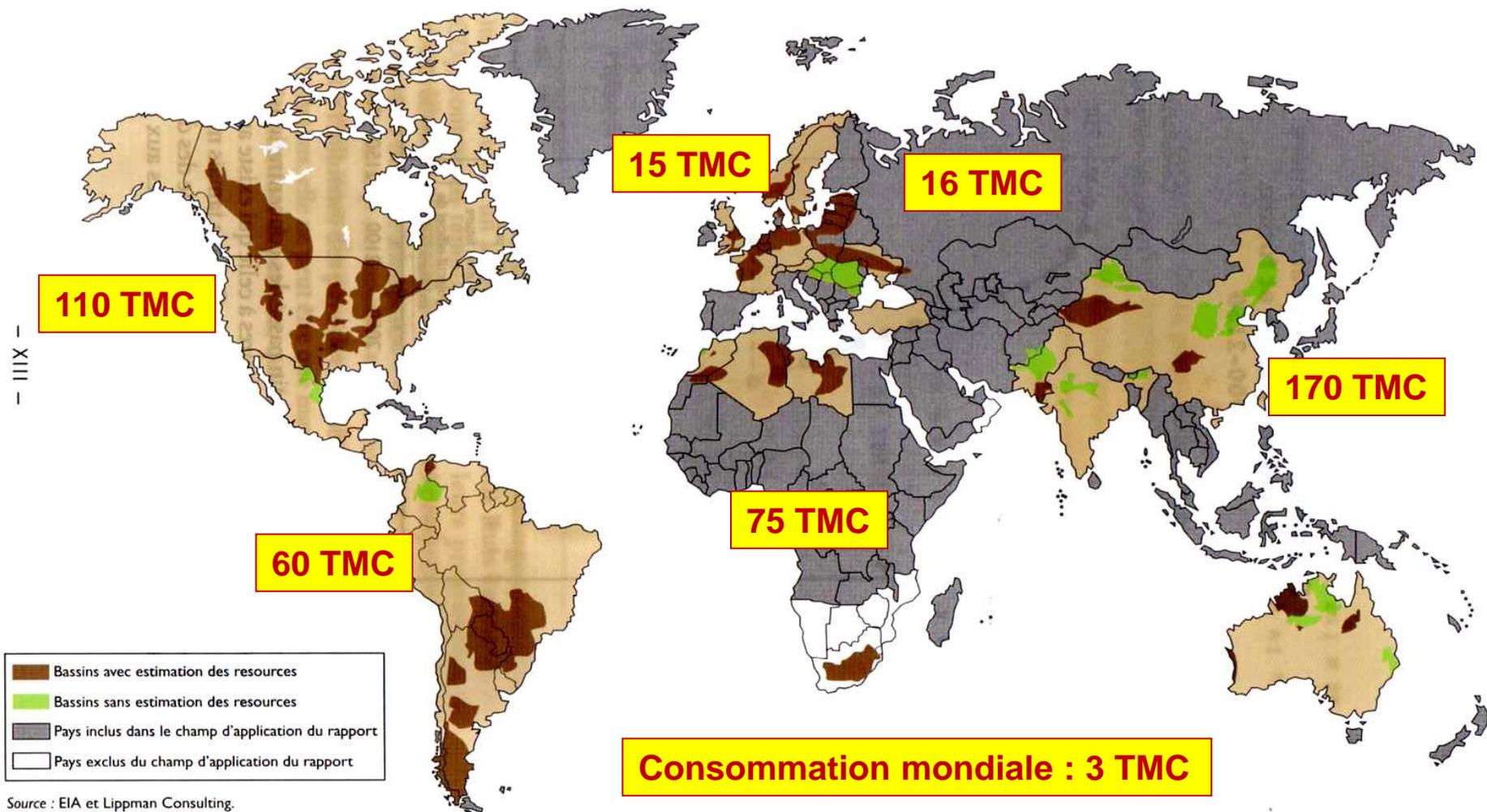
*Il faut noter que 60% des puits
sont improductifs...*

*Méthode d'extraction utilisée depuis 15 ans
aux USA (52% de la production de gaz) qui
est devenu le 1^{er} producteur de gaz...*



*En 2011 la production a été de
170 milliards de m³ (0,17 TMC),
d'où un coût très bas !*

**Estimation initiale des ressources en gaz de schiste
dans 48 bassins majeurs répartis sur 32 pays à fort potentiel**



En février 2012, l'Institute for Energy Research estimait la totalité des réserves Nord Américaine à 50.000 TMC ! (soit près de 600 ans de consommation)

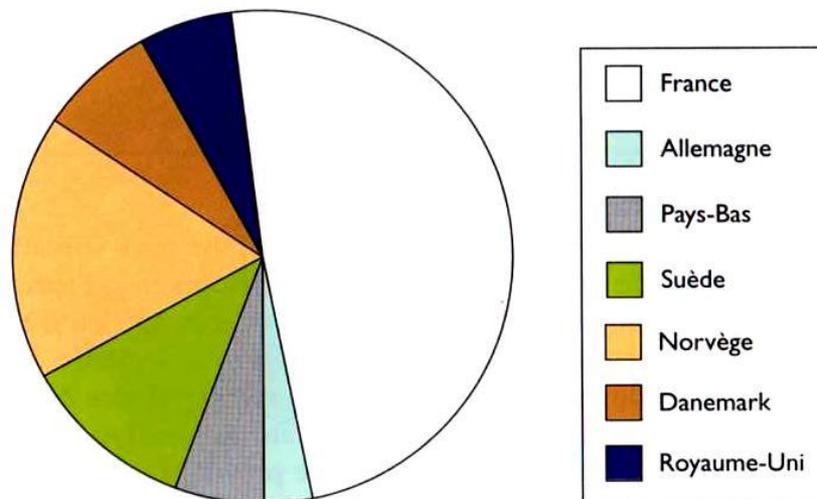
En Chine les réserves sont estimées à 42.000 milliards de m³ (45 TMC) et pour 2015 la production serait de 260 milliards de m³

Il semble également que les réserves européennes soient très importantes : 18.000 milliards de m³ (18 TMC)
Elles sont majoritairement réparties en France (5,1 TMC), en Pologne et en Ukraine.

Les bassins de gaz de schiste en Europe



Répartition des ressources de gaz de schiste en Europe de l'Ouest



Source : EIA ARI World Shale Gas Ressources.

En Europe, création du GASH (Gas Shale in Europe) : programme de recherche interdisciplinaire sur l'extraction du gaz de schiste (shale gas)
Y participent Total, GDF-Suez et l'IFP.

Remarques : les indications sur les réserves estimées, supposées, exploitables etc. sont souvent très différentes ! pour connaître les données exactes il faut forer ! 114

Elles seraient en Pologne de 6.300 milliards de m³ (6,3 TMC, soit plus de 100 ans de consommation) d'où une volonté d'exploitation massive de ces réserves (afin de se libérer du gaz russe et de vendre massivement à l'Allemagne, gros consommateur avec la fermeture de ses centrales nucléaires).

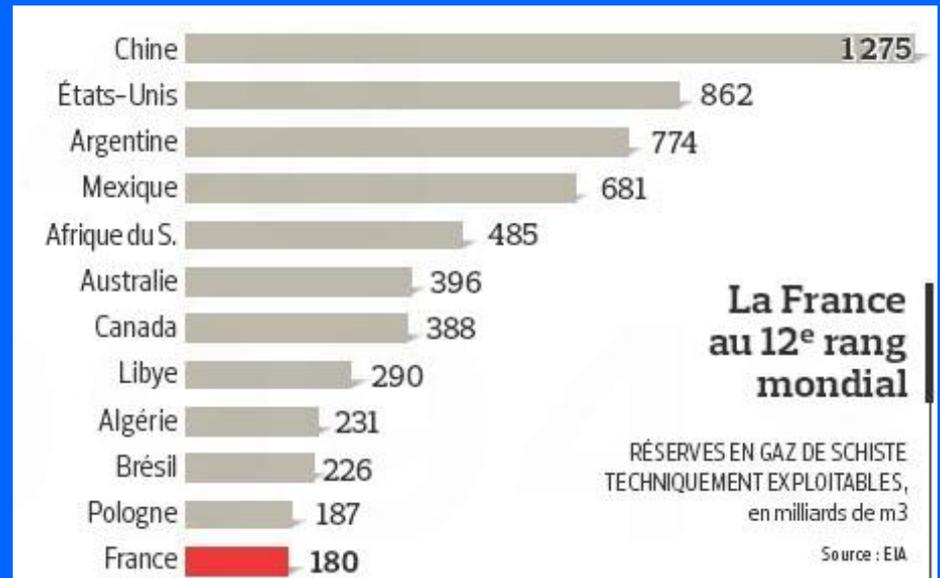
L'Ukraine va investir avec Shell dans l'exploitation du gaz de schiste pour produire dès 2020, 20 milliards de m³ par an...

La Grande Bretagne et le Danemark (avec Total) vont reprendre les forages. Le Pays Basque espagnol y est favorable.

Seules l'Allemagne et la Bulgarie ont gelé pour l'instant tout forage.

Et la France ?

Au 12^{ème} rang mondial pour ses ressources exploitables...



- 1 – Elle va accroître l'exploitation du gaz de houille
- 2 - Elle va exploiter le gaz de schiste algérien...

En France la zone « Ardèche, Drôme, Hautes-Alpes » semble propice et recèlerait 6.300 milliards de m³ soit plus de 100 ans de consommation ! (A raison de 0,05 TMC par an...)

(en raison des plissements de terrains, les gisements sont à faible profondeur, de 500 à 2500m)

Total a obtenu en 2010 du ministère de l'Écologie et de l'Énergie un permis de recherche d'hydrocarbures dans la région de Montélimar, dans la Drôme, pour une durée de cinq ans.

La facture « gaz » est actuellement de 11, 5 milliards d'euros par an l'économie représenterait plus de 7 milliards d'euros annuel...

Février 2011 : le gouvernement suspend provisoirement les permis de forage interdiction maintenue même au titre de prospection !

Raison invoquée : production très polluante... *bien que :*

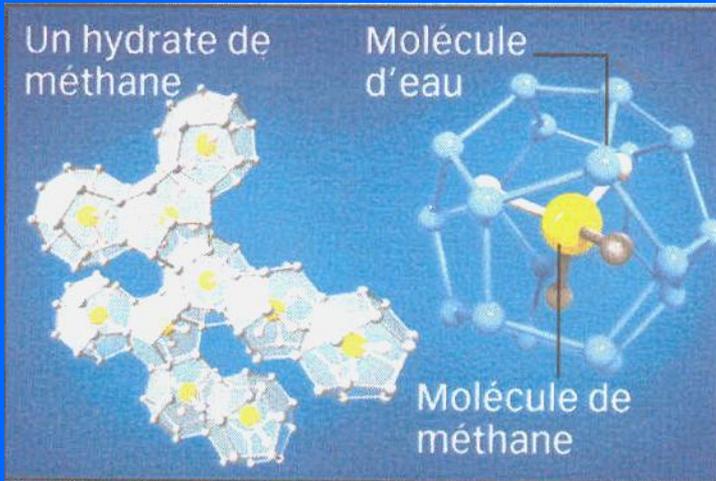
1 – les effets sur l'environnement ont été fortement exagérés

2 - de nouvelles techniques d'exploitation non polluantes sont envisageables !)

La France sera donc un des rares pays au monde à ne pas l'exploiter !
et s'interdit toute recherche vers des solutions plus propres...

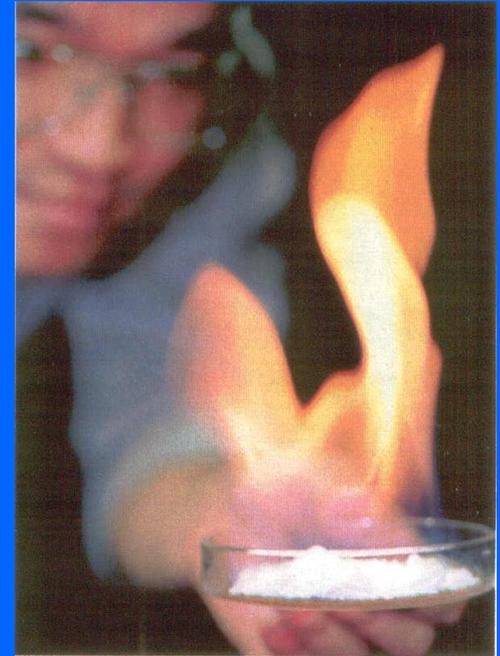
Mais garde une option en cas où de nouvelles techniques seraient développées!

et les hydrates de méthane ?



- gisements probables considérables
(peut être 180 000 Gtep ou 1.000 TMC ?)
- difficultés d'exploitation
 - risque majeur pour l'environnement

Des essais d'exploitation sont menées en Russie, au Canada et au Japon



▲ A l'approche du feu, le cube blanc s'enflamme, tandis qu'une flaque d'eau se forme. C'est un hydrate de méthane !



Le charbon

Différentes variétés et qualités du charbon Terminologies Européenne, américaine et française

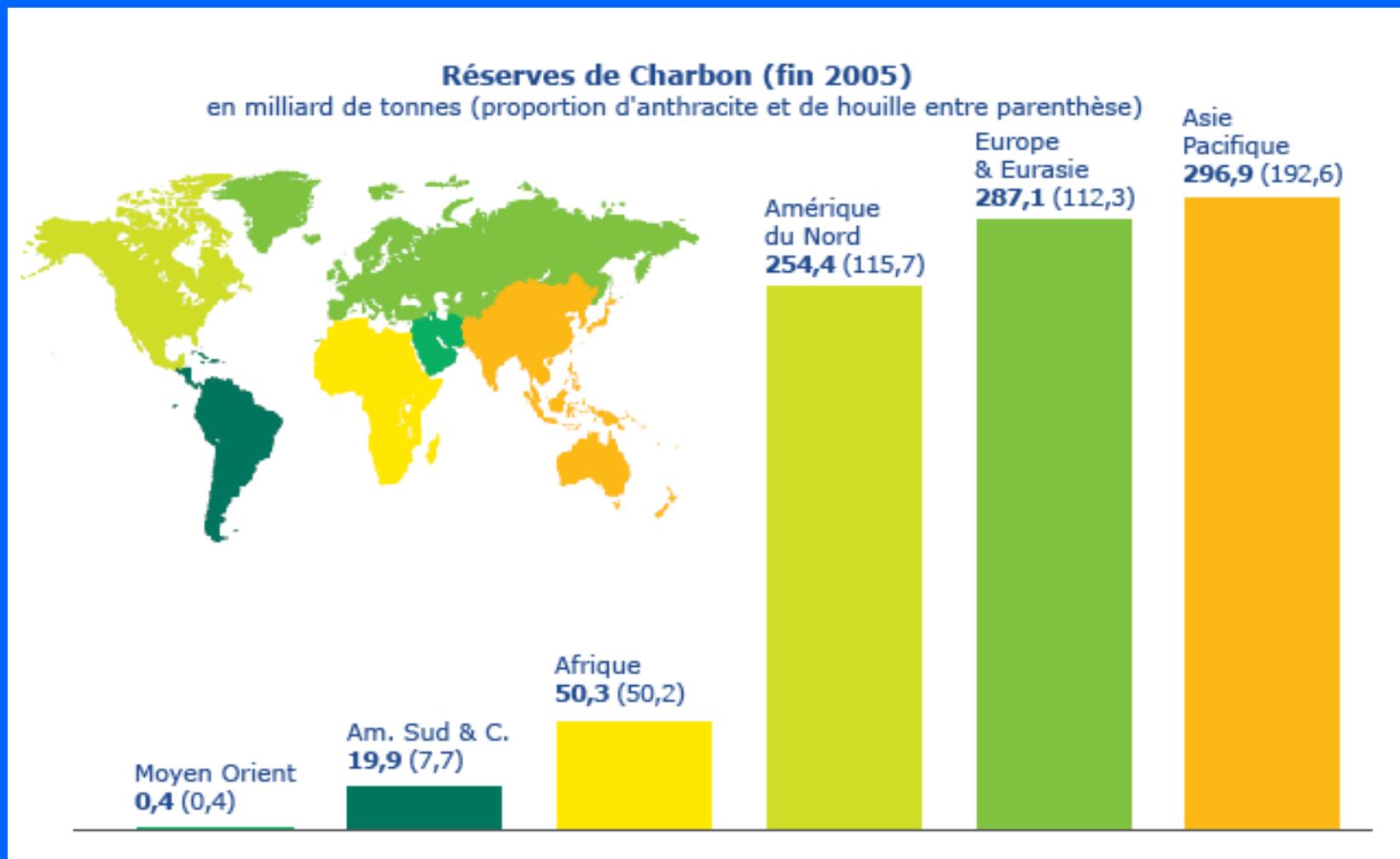
CEE	Peat	Lignite	Sub-Bitumineux	Bitumineux Haut volatiles	Bitumineux Bas volatiles	Anthracite
USA		Browncoal	Hard coal			
France	Tourbe	Lignite	Flambant sec	Flambant gras	Gras	Anthracite
Pouvoir calorifique kcal/kg	1000-1500	3500-4500	4500-6500	6500-7800	6500-7800	7800-8500
Humidité %	> 50 %	25-50 %	14-25 %	5-10 %	5-10 %	1-6 %
Matières volatiles %	> 75 %	50 %	25-50 %	30-40 %	15-25 %	< 10 %
Teneur en cendres	50 %	30-50 %	20-30 %	10-20 %	10-20 %	0-10 %

*représente 50% de la consommation
de « charbon » en Allemagne
pour les centrales thermiques...*

Mine de lignite



Le charbon : combustible de l'avenir ?



Les réserves mondiales de charbon sont considérables (73% des réserves fossiles) réparties à peu près partout dans le monde.

Malgré qu'il soit très polluant, le charbon représente très certainement le combustible de l'avenir!

La production mondiale augmente de 3% par an

Exploitation : $\left\{ \begin{array}{l} \text{mines à ciel ouvert} \\ \text{mines en profondeur} \end{array} \right.$

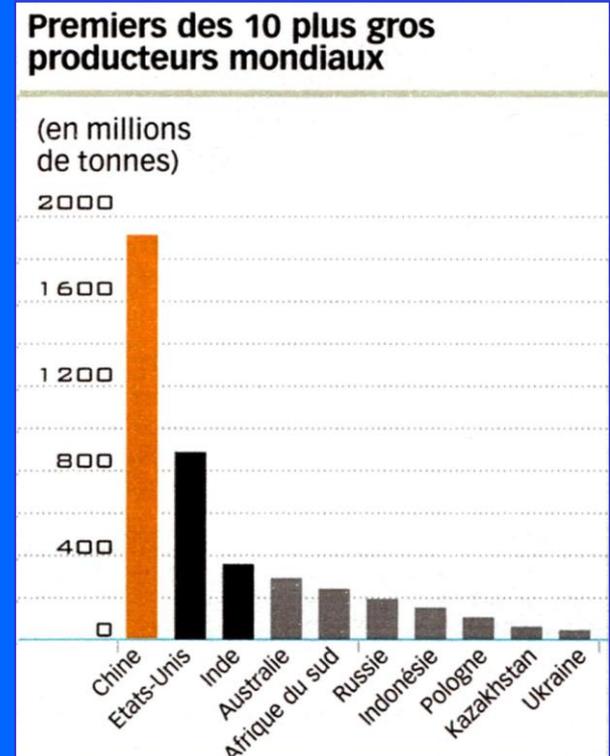
*Risques importants : silicose, grisou (6000 à 20000 morts/an en Chine !)
et pollution (500.000 morts par an en Chine)*

USA : 2000 mines de charbon en activité, 100 000 mineurs
(50% de la production électrique)!

5 grands producteurs (70 % des réserves) :

USA :	25 %
Russie :	16 %
Chine :	11,6 %
Inde :	8,6 %
Australie :	8,3 %

Selon d'autres estimations, 85% des réserves de charbon serait inaccessible (gisement sous-marin) mais pourrait être exploitées par une technique de gazéification avec récupération du gaz produit...



Selon les experts, la production de charbon devrait augmenter de 73% d'ici 2030

**2002 : 3,4 Gt (6200 TWh)
2030 : > 7 Gt (12000 TWh)**

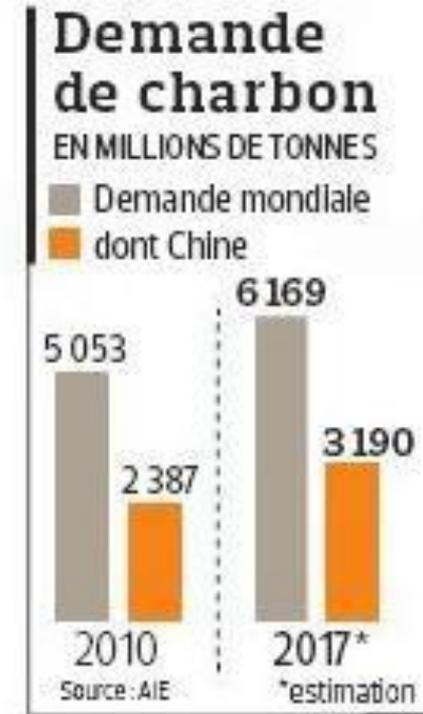
A partir de 2017 le charbon (4,3 Gtep) devrait dépasser le pétrole (4,8 Gtep)

**La Chine consomme plus de 46% du charbon mondial et devrait dépasser les 50% en 2014
(une nouvelle centrale thermique par semaine !)**

En 2017 l'Inde sera le 2^{ème} consommateur de charbon devant les USA

! L'exploitation massive du gaz de schiste aux USA a permis une baisse très important du prix du charbon qui concurrence sérieusement le gaz naturel en Europe (aux USA la consommation de charbon a diminué de 14%

l'Allemagne dispose de 130 centrales thermiques au charbon et exploite massivement ses gisements de lignite et de charbon, quitte à raser des villages entiers...



Situation en France :

La France importe 22 10⁶ tonnes par an (soit 13,7 Mtep)

Provenance :

Australie

Afrique du Sud

Russie

En France : en 1950 production 50 Mt/an

2004 : fermeture de la dernière mine...

GDF Suez ferme 3 de ses 4 centrales au gaz CCG au profit de centrales au charbon...

Projet de réouverture :

Mine de Bertholène (Decazeville, Aveyron)

concession accordée à Aardvark TFC Limited (GB)

4,5 10⁶ tonnes (concession de 10 ans)

Nièvre : gisement de 250 10⁶ tonnes (découvert en 1980) avec projet d'une centrale de 1000 MW

Les ressources naturelles en Uranium

production mondiale : 60.000 t (2013)
(besoin en 2006 : 440 réacteurs, 370 GW \Rightarrow 67450 tonnes)

coût : de 20\$/kg en 2001 à 100\$/kg en 2006 (x5) (en baisse)

Besoins futurs : en 2025, 450 à 624GW (+22 à +46%) \Rightarrow 80 à 100 000 tonnes/an)

Principaux producteurs :

Kazakhstan : 21.900 t	Ouzbékistan
Canada : 9.000 t	Afrique du Sud
Australie : 7.200 t	Namibie
Russie : 3.400 t	Brésil
Niger : 3.150 t	Ukraine...
USA : 1.750 t	

et bientôt le Groenland

réserve mondiale en U:

- <40\$/kg : 2 millions de tonnes
- < 80 \$/kg : 3,1 millions de tonnes (soit plus de 50 ans de consommation RNT)
- 130 \$/kg : 5,5 millions de tonnes
- >130\$/kg : 85 millions de tonnes

océans : 4 milliards de tonnes (3mg/m³) coût 250 à 1000 \$/kg !

équivalent à 170 Gtep (RNT) ou 15 000 Gtep (surgénérateur RNR)

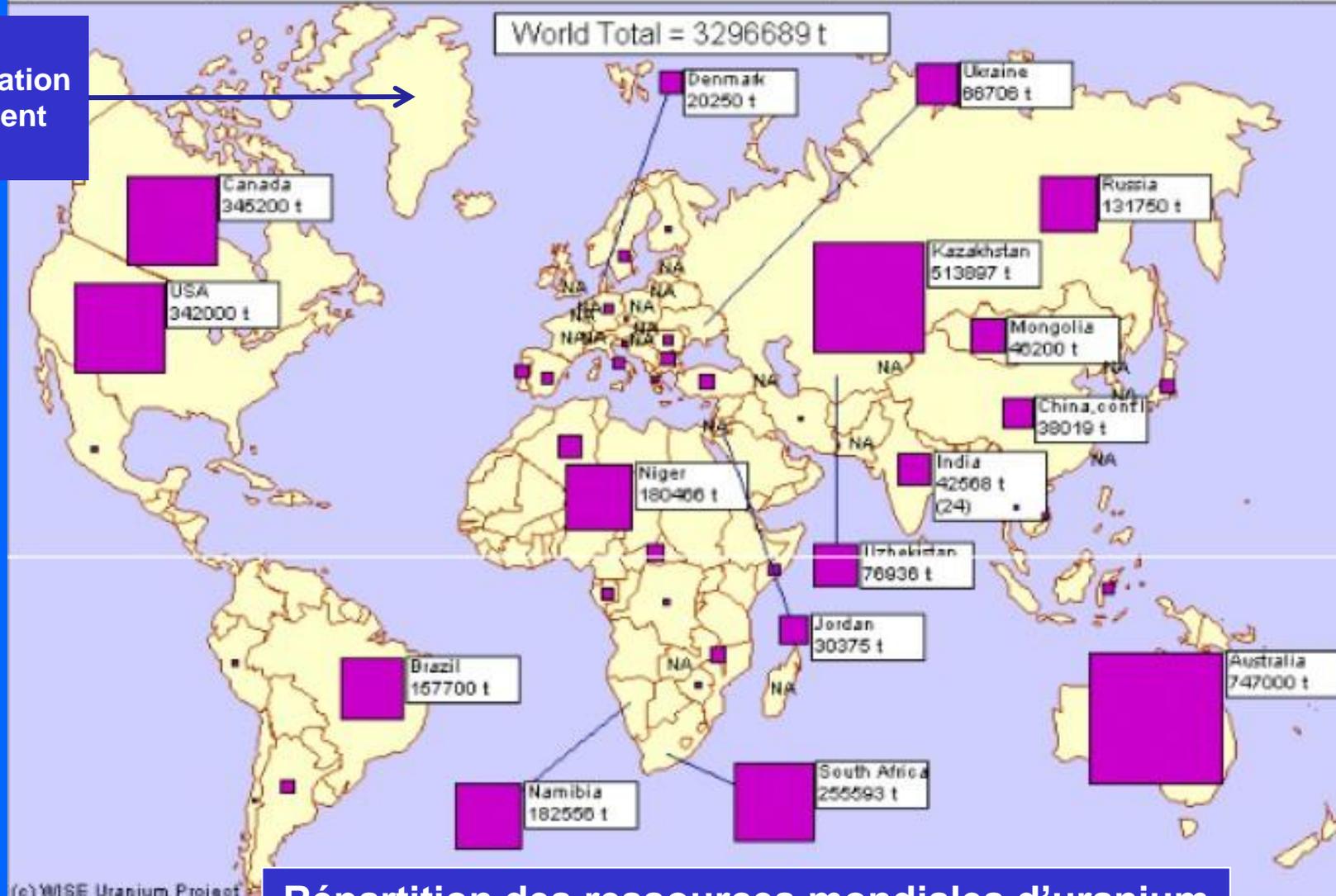
*réacteurs à neutrons thermiques
(REP, REB...)*

réacteurs à neutrons rapides

Uranium Resources (RAR - \$130/kg U)

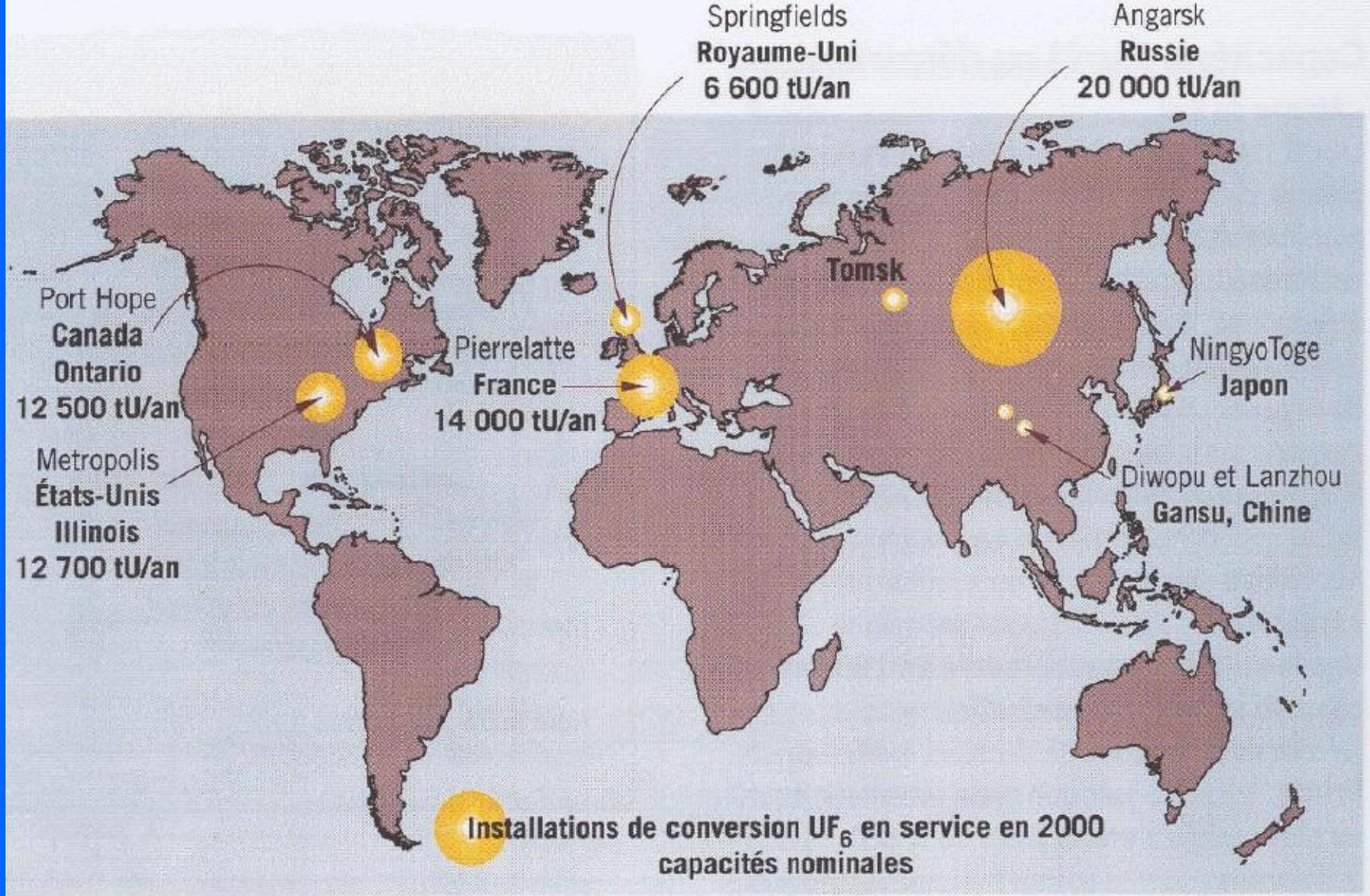
[t U] Reasonably Assured Resources, recoverable res. as of 1/1/2005, Cost range < US\$130/kg U (OECD 2006)

2014 :
mise en exploitation
du 5^{ème} gisement
mondial



Répartition des ressources mondiales d'uranium
(pour un prix de revient inférieur à 130 \$ le kg)

teneur moyenne de la croûte terrestre : 2,7 ppm



Autre source : le démantèlement des têtes nucléaires : la destruction par les USA depuis 2011 de 18.000 ogives russes (500 t d'U fortement enrichi) donneront environ 8.000 t d'U enrichi à 5% , de quoi alimenter la moitié des centrales US pendant 15 ans...



Réacteurs actuels (générations 2 et 3) :

uranium enrichi (3 à 5 % d'U²³⁵)
 combustible MOX (5% Pu²³⁹)

*On n'exploite que 0,7% du potentiel énergétique
 2 siècles environ...*

Génération 4 (2020- 2050) : filières à neutrons rapides

On transforme l'U²³⁸ en Pu²³⁹ → x100 le potentiel énergétique

La France dispose d'un stock d'U appauvri considérable : 250.000 tonnes
 (soit entre 3.000 et 5.000 ans de consommation au rythme actuel)

autres possibilités de certaines filières de G-IV :

- on exploite les capacités énergétiques des actinides (actuellement déchets)
- on exploite le thorium : 3 à 4 fois plus abondant que l'uranium



Perspectives : plusieurs milliers d'années

Fusion thermonucléaire ? (ITER et sa suite... 2080 ?) : D, T, Li... des millions d'années !

Conclusions

On parle beaucoup de l'épuisement des ressources fossiles

1 – Le charbon reste encore très abondant et sans aucun doute le combustible roi du XXI^{ème} siècle !

2 – Le pétrole et le gaz naturel sont encore probablement assez abondants mais le coût va croître inéluctablement !

3 – L'uranium est assez abondant pour satisfaire nos besoins pendant plusieurs siècles (et même des millénaires) à la condition de construire des réacteurs à neutrons rapides surgénérateurs (réacteurs de 4^{ème} génération) et d'exploiter le thorium.

Face au défi énergétique (doublement prévisible de la demande) quelles solutions ? 4 voies possibles :

1 – L'amélioration de l'efficacité énergétique

*Exemple : l'éclairage consomme 20% de la production électrique mondiale...
L'utilisation de lampes fluo-compactes permettrait de la réduire de 50 à 80% !
Limiter les mises « en veille » (télévision, ordinateur etc.)*

*indispensable pour limiter l'accroissement de la demande... mais
n'empêchera pas l'accroissement lui-même !*

2 – Les énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole)

inévitables ! ressources à long terme ? pollution ?

3 – L'énergie nucléaire

incontournable...fiabilité, sécurité, investissement élevé, gestion des déchets

4 – Les énergies « renouvelables »

réalistes ou fausse solution ? économiques ? suffisantes ?