



Ressources renouvelables et solutions électriques

Généralité sur l'énergie et les ressources

Génération éolienne

Génération photovoltaïque

Stockage



Unités d'énergie

Systeme international : le **joule J**

1 J = 1 newton x 1m

= 1 volt x 1 ampère x 1 seconde = 1 V x $6,2 \cdot 10^{18}$ électrons

4,18 J accroissent de 1°C un gramme d'eau

Facture d'électricité : le **kilowatt.heure kWh**

1 kW.h = 3600 000 J = $3,6 \cdot 10^6$ J (MJ)

Carburants : **tonne équivalent pétrole tep**

1 tep \Leftrightarrow 11 600 kWh

Puissance

Le **watt** : 1 watt = 1 J/s ou 1 Wh/h





Equivalences

1 Wh = 3600 J (1 TWh = 10^{12} Wh, 1 EJ = 10^{18} J)
1 t.e.p. \cong 11 600 kWh (tonne équivalent pétrole)
1 baril (159 l ou 140 kg) \cong 1700 kWh
1 BTU (British Thermal Unit) \cong 252 cal \cong 1050 J
1 quad BTU : 10^{15} BTU = $290 \cdot 10^9$ kWh

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

Valeurs énergétiques de combustibles

Hydrogène	34 kWh/kg
Uranium naturel (fission)	116 000 kWh/kg
Fuel	11,6 kWh/kg
Essence	12 kWh/kg
GPL	19,7 kWh/kg

Gaz Naturel	17 kWh/kg
Bois	2 à 4 kWh/kg
Bagasse	2,2 kWh/kg
Ordures ménagères	0,3 à 0,5 kWh/kg



Bernard MULTON



Formes de l'énergie

Chaleur

Travail mécanique

Rayonnement

Chimique

Electricité

Matière : $E = m.c^2$

Dans l'univers, la matière se dégrade inexorablement en chaleur.





Vie de l'énergie

réactions nucléaires de fusion dans les étoiles



rayonnement transmis dans l'espace
intercepté par la terre



Évaporation de l'eau



photosynthèse



effet photo-électrique sur des cellules



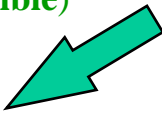
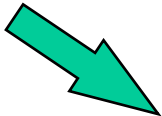
cycle de l'eau



Biomasse (combustible)



électricité



CHALEUR

Ré-émission dans l'espace !





Les besoins en énergie des Hommes

Transports (Hommes et biens) :

Eclairage

Cuisson

Chauffage

Froid besoins très dépendants du climat

Travail mécanique agricole, industriel

Process divers de l'industrie

Traitement de l'information

Divers





Les sources « primitives »

LE **FEU** à partir du bois ou d'huile : il a servi à presque tout.

LA **FORCE ANIMALE** (bœufs, chevaux, chiens, dromadaires...)

L'**EAU** des rivières et des marées (moulins, forges...)

LE **VENT** (pompes, moulins...)



LES **COMBUSTIBLES FOSSILES**

AV J.C. Chine : forages pétrole, XIII^e siècle : charbon, début 1800 : gaz de houille,
1930 : gaz naturel



Bernard MULTON



Les sources « modernes »

L'**ÉLECTRICITÉ** (début au XIX^{ème} siècle) : ce n'est pas une énergie primaire, mais un vecteur (forme intermédiaire) , stockage cher...

LE FEU MODERNE : L'**ÉNERGIE NUCLÉAIRE**
utilisation industrielle depuis les années 1950.

L'**HYDROGÈNE** encore marginal, mais prometteur
vecteur complémentaire de l'électricité.





Énergies **Non Renouvelables** : réserves exploitables

et durées au rythme actuel de consommation

(ou si on devait satisfaire la totalité de la demande primaire)

FOSSILES

pétrole : $1,7 \cdot 10^{15}$ kWh soit 36... 50 ans ? (ou 12 ans total)

charbon : $6 \cdot 10^{15}$ kWh soit 200 ans (ou 40 ans total)

gaz naturel : $1,6 \cdot 10^{15}$ kWh soit 56 ans (11 ans total)

hydrates de méthane : >2 à $10 \cdot 10^{15}$ kWh (15 à 70 ans total)

« **Epuisables** »

NUCLÉAIRE

Fission (U 235): $400 \cdot 10^{12}$ kWh soit 40 ans (2 ans total)

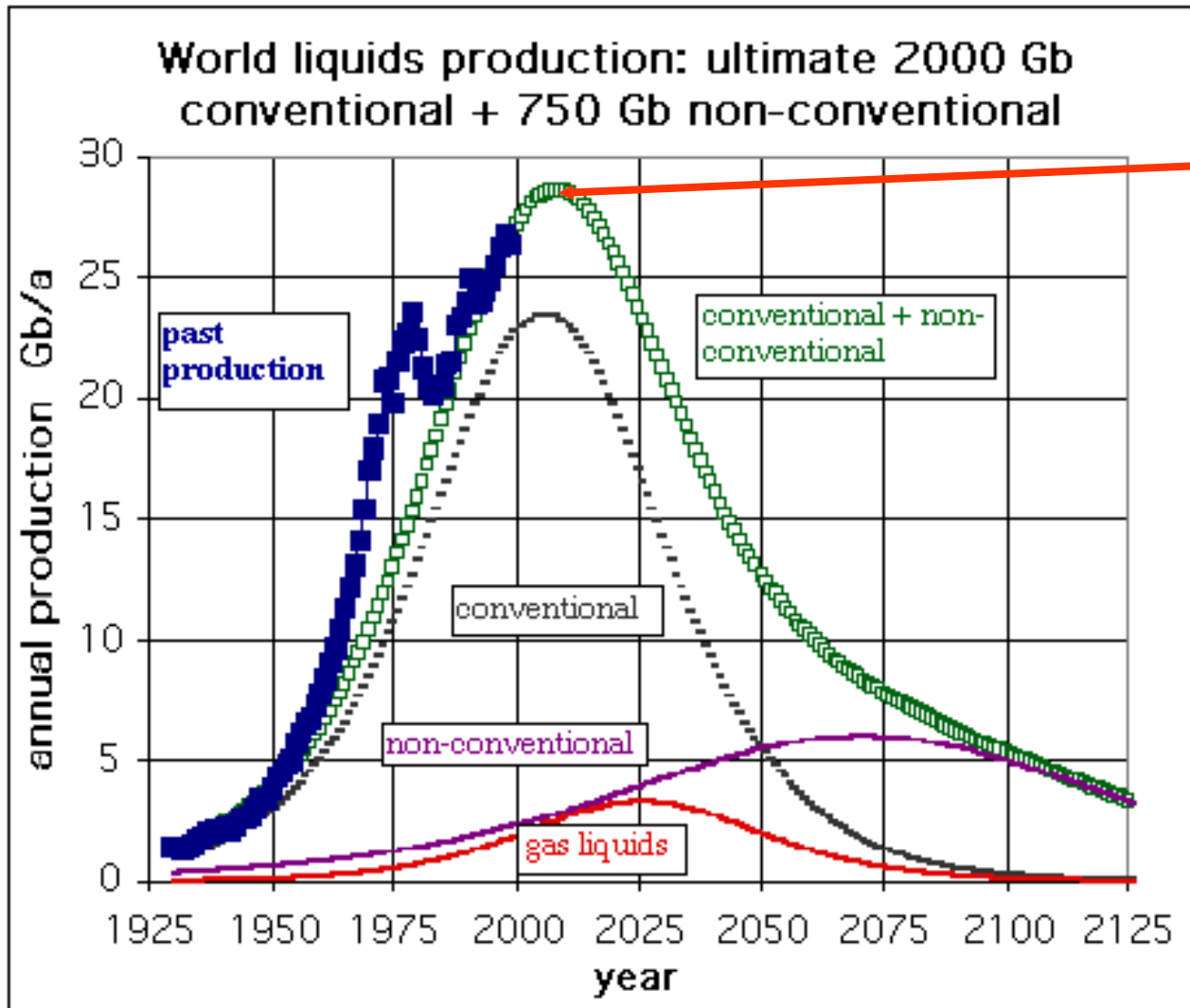
Surgénérateurs (U238): $80 \cdot 10^{15}$ kWh (600 ans total)

Fusion (deutérium et tritium): $80 \cdot 10^{15}$ à 10^{21} kWh **quasi-inépuisable**





Production de pétrole conventionnel et non-conventionnel



1 baril = 1700 kWh

28 Gb = 47.10^{12} kWh

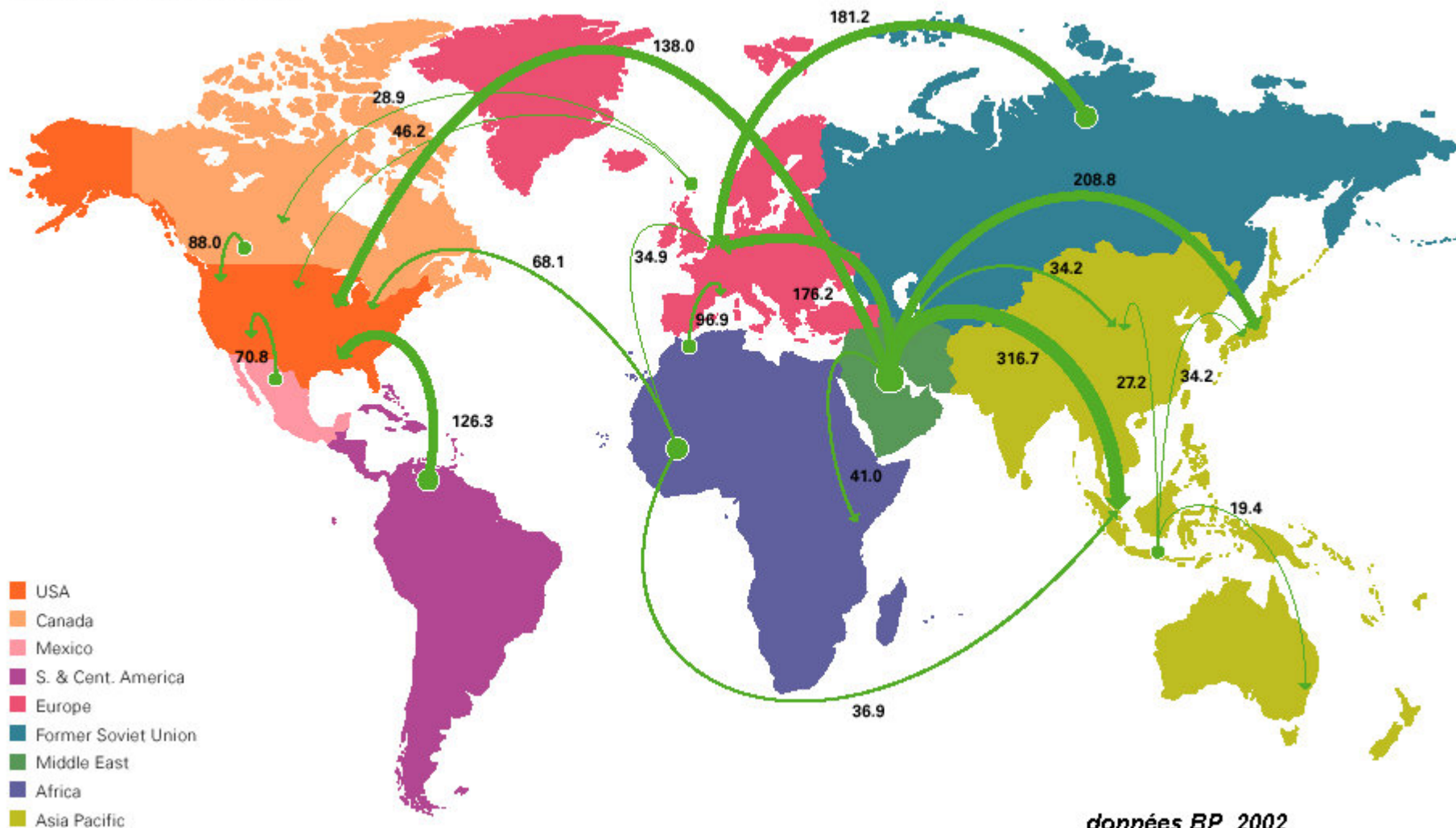




Echanges mondiaux de pétrole

major trade movements
Trade flows worldwide (million tonnes)

pétrole



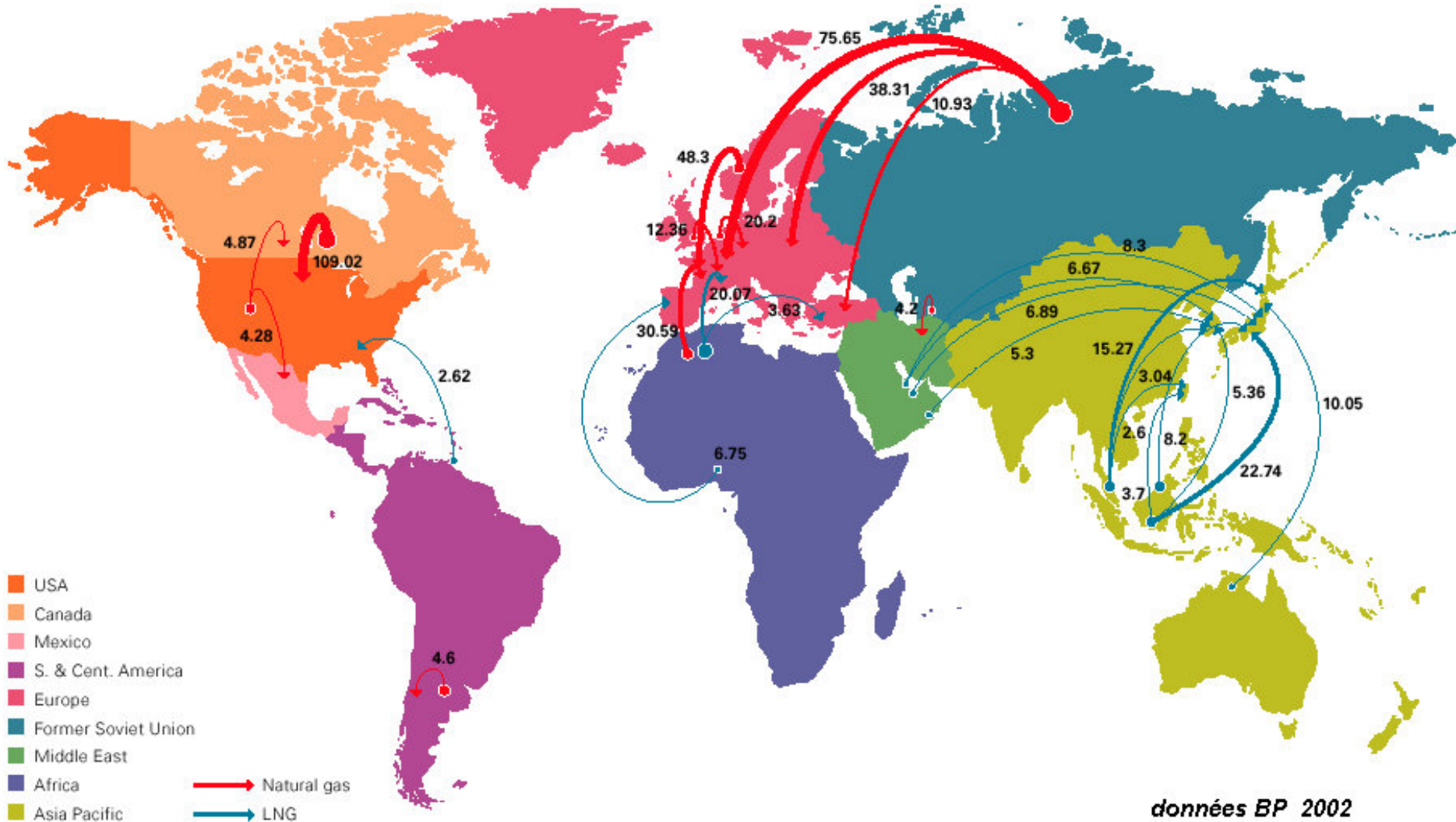
données BP 2002



Echanges mondiaux de gaz

major trade movements **Gaz naturel**

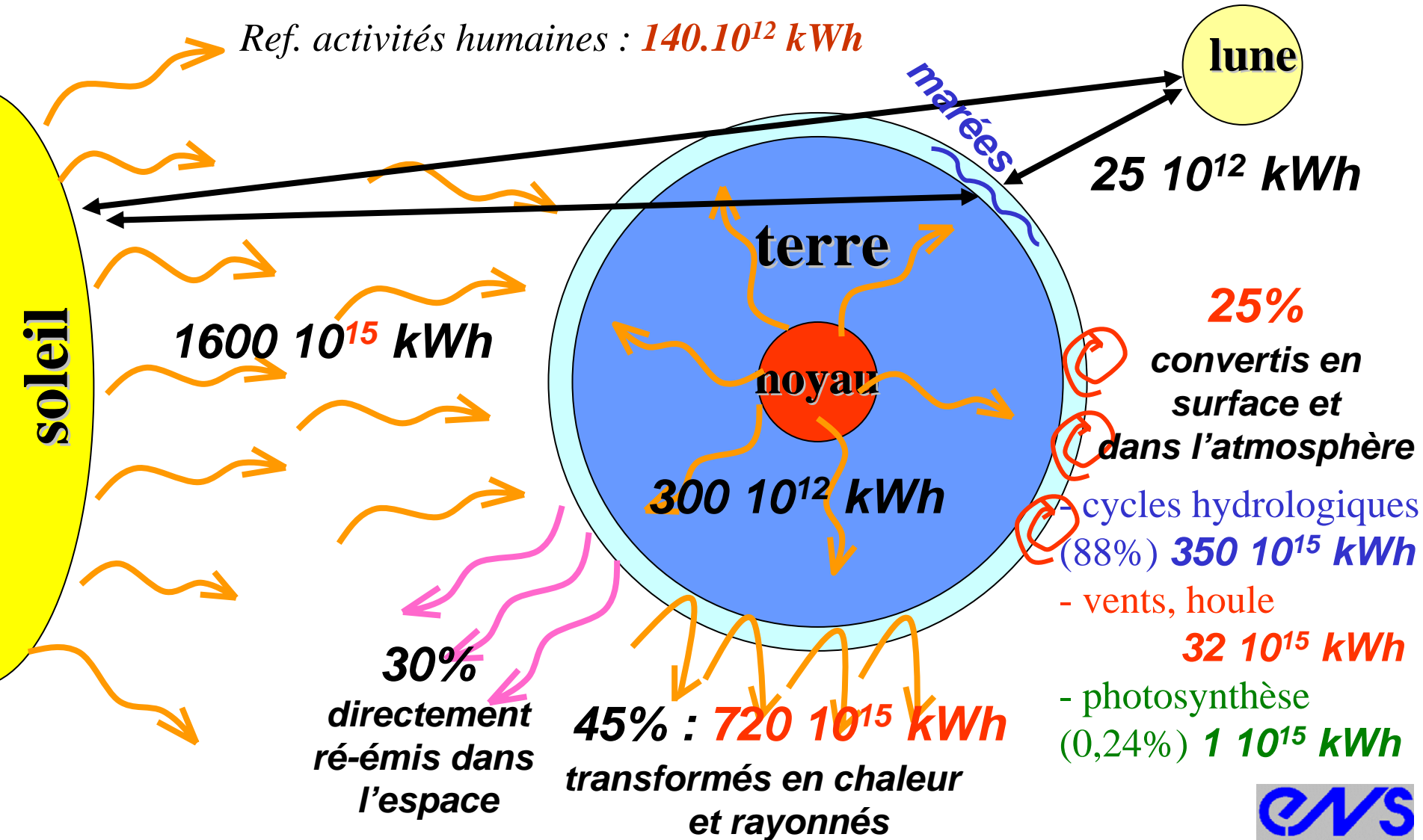
Trade flows worldwide (billion cubic metres)



données BP 2002



Ressources énergétiques de la planète





[référence, consommation humaine 2003 :
140.10¹² kWh et 15.10¹² kWh électriques]

Energies **Renouvelables** : part exploitable ramenée à la
totalité des 140.10^{12} kWh

SOLEIL

rayonnement : 1% des 720.10^{15} kWh =	5000%
hydraulique :	15%
vent : terrestre (plus en offshore)	40%
houle :	0,07% ?
biomasse :	50% à 700%

GÉOTHERMIE

basse température (50 à 90°C) :	0,2%
haute température (150 à 350°C) :	0,03%

MARÉE :

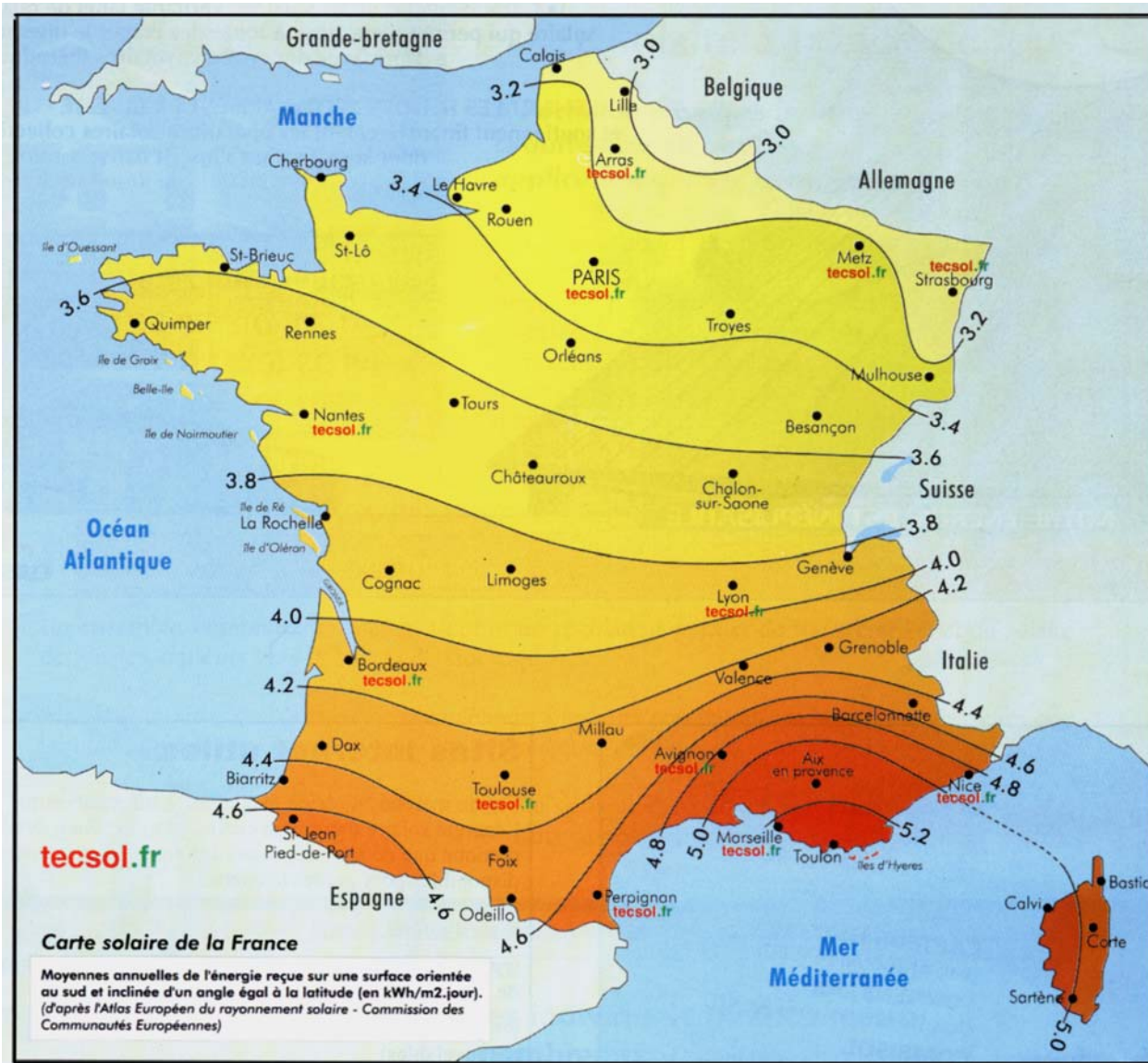
0,2%



Bernard MULTON



Exemple de carte d'ensevelissement : énergie rayonnée en France (moyenne annuelle en kWh/m²/jour)



Par m² :
3 kWh/j ⇔ 1100 kWh/an
Soit 1100 heures
Équivalent plein soleil

4 kWh/j ⇔ 1460 kWh/an



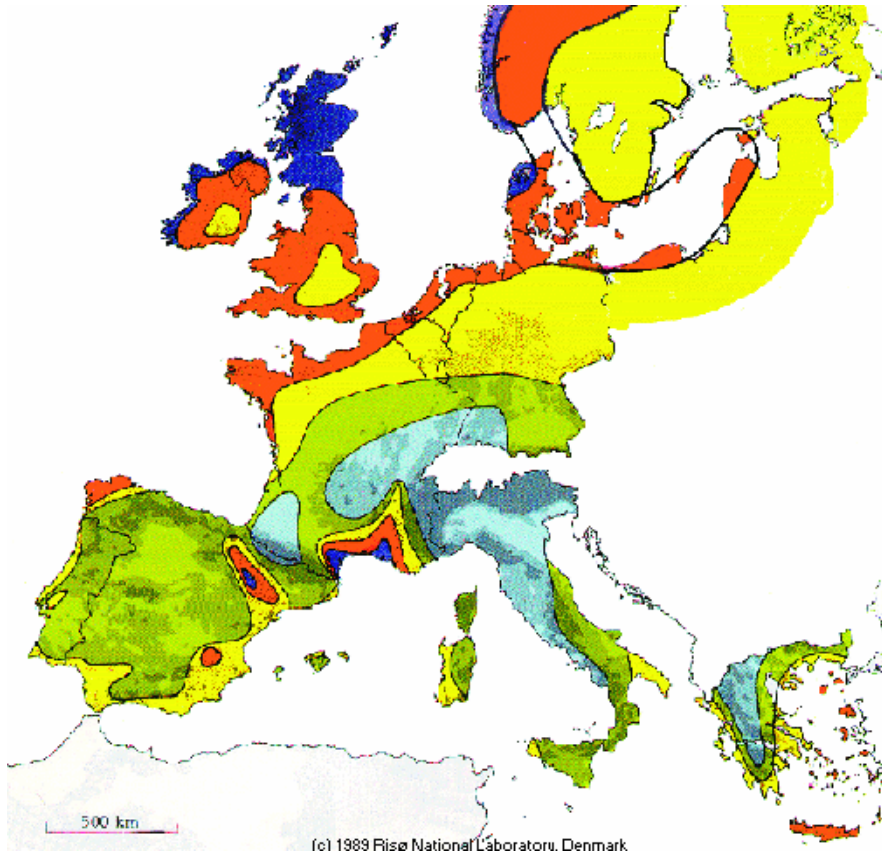
Bernard MULTON



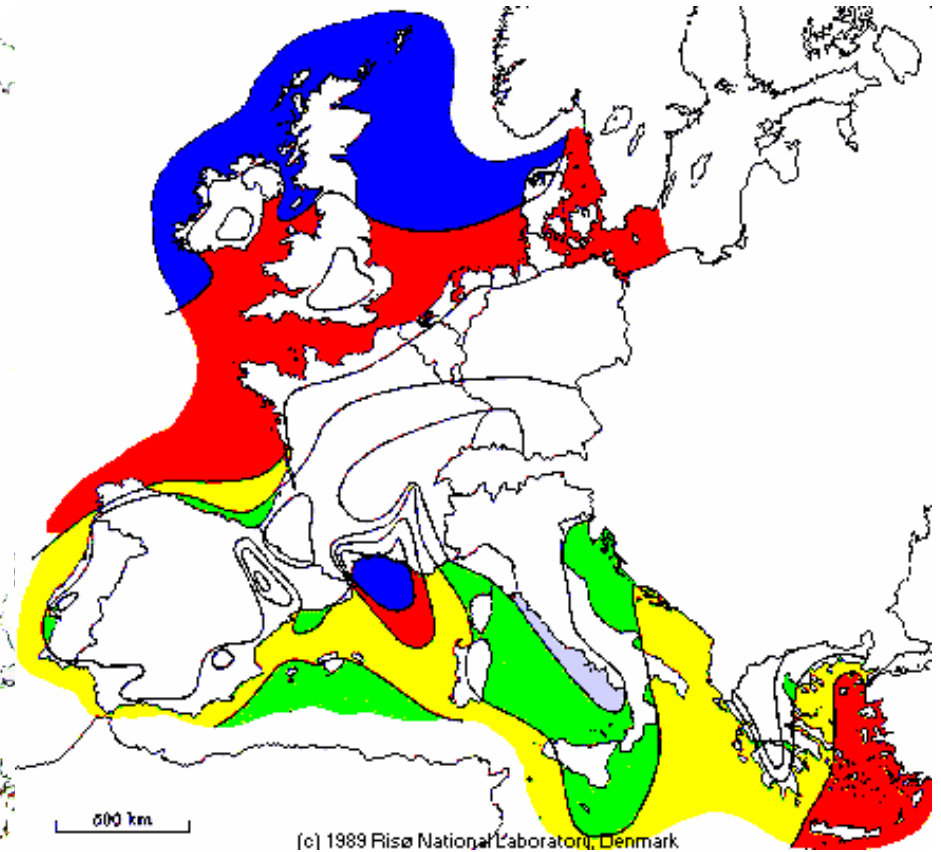
Potentiel éolien en Europe :

Offshore = plus de $5 \cdot 10^{12}$ kWh/an

(plus du triple de la consommation électrique européenne actuelle)



on-shore



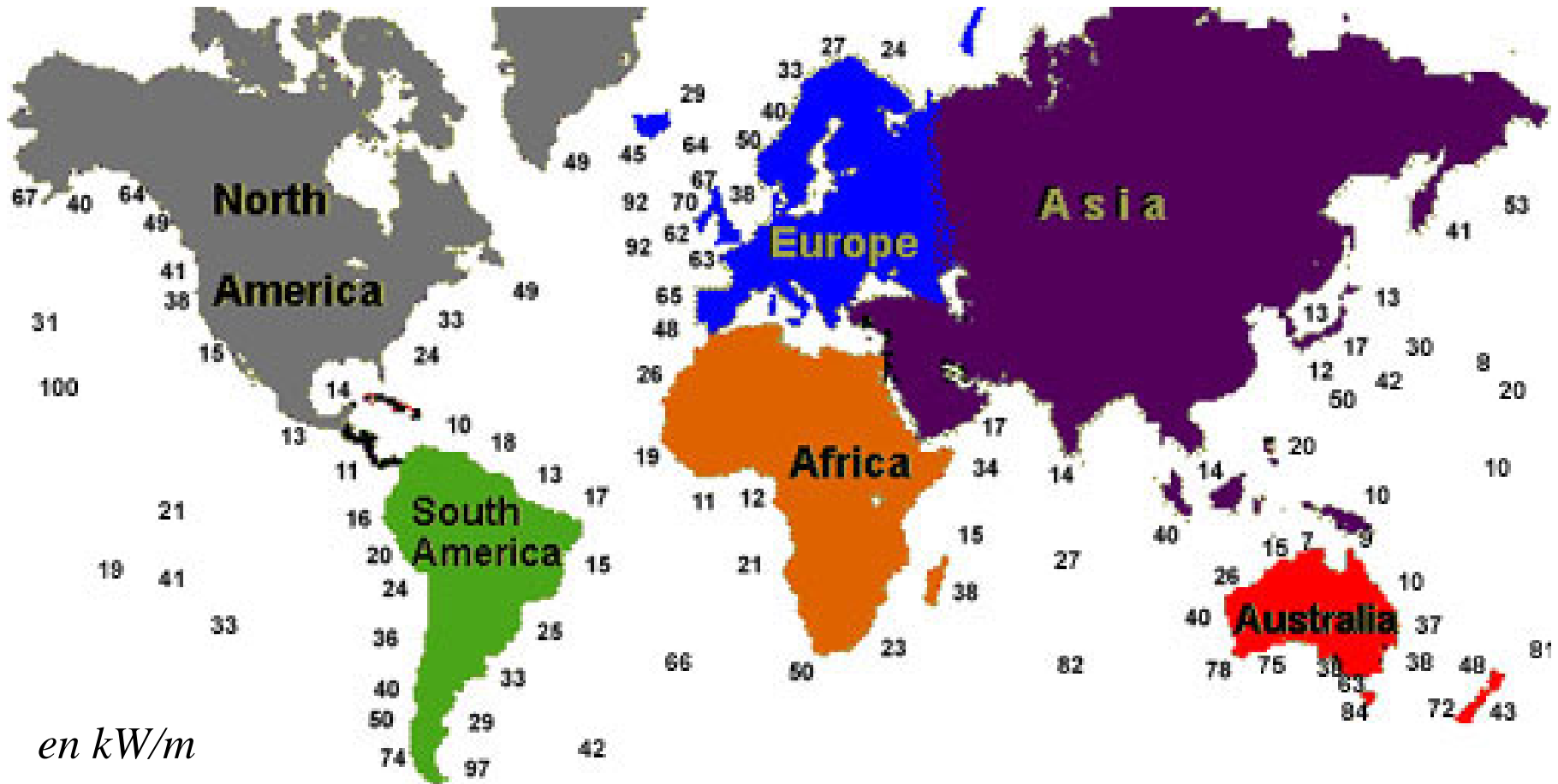
off-shore



Bernard MULTON



La Houle un potentiel considérable en certains endroits :



Source: Wave Energy paper. IMechE, 1991
and European Directory of Renewable Energy (Suppliers and Services) 1991



Bernard MULTON



Ressources de la biomasse

Bois

Bio-carburants (colza, tournesol, betteraves, blé...) en croissance

Méthanisation



Des ressources importantes mais à renouveler.

Consommation

12 à 14% de la consommation primaire mondiale

- pays pauvres : 70 à 90%
- en développement : 40 % (Chine, Inde...)
- industrialisés : < 10%

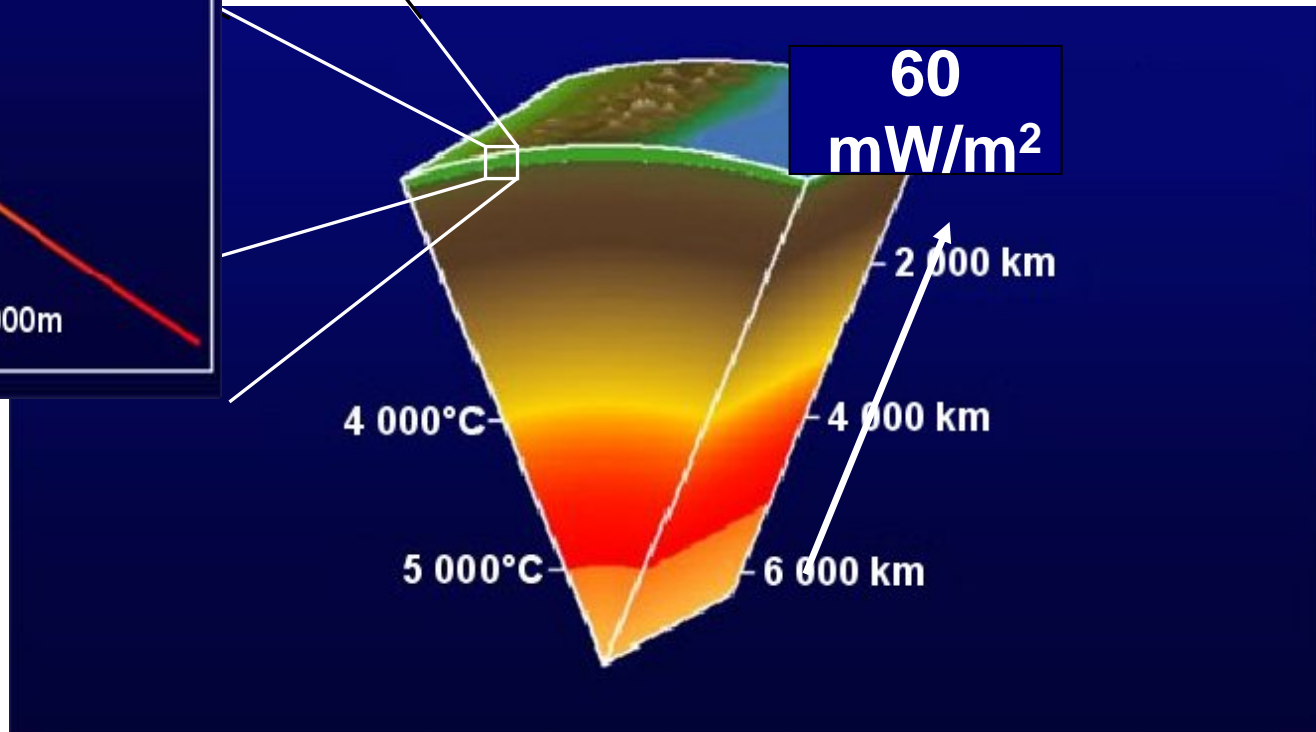
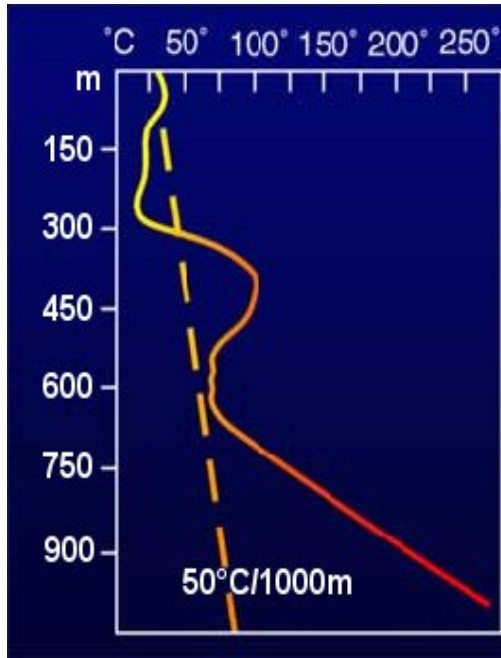


Bernard MULTON



Ressources géothermiques

38 10¹² kWh stockés dans les 5 premiers km de la croûte ; 99 % de la planète a une température > à 200°C



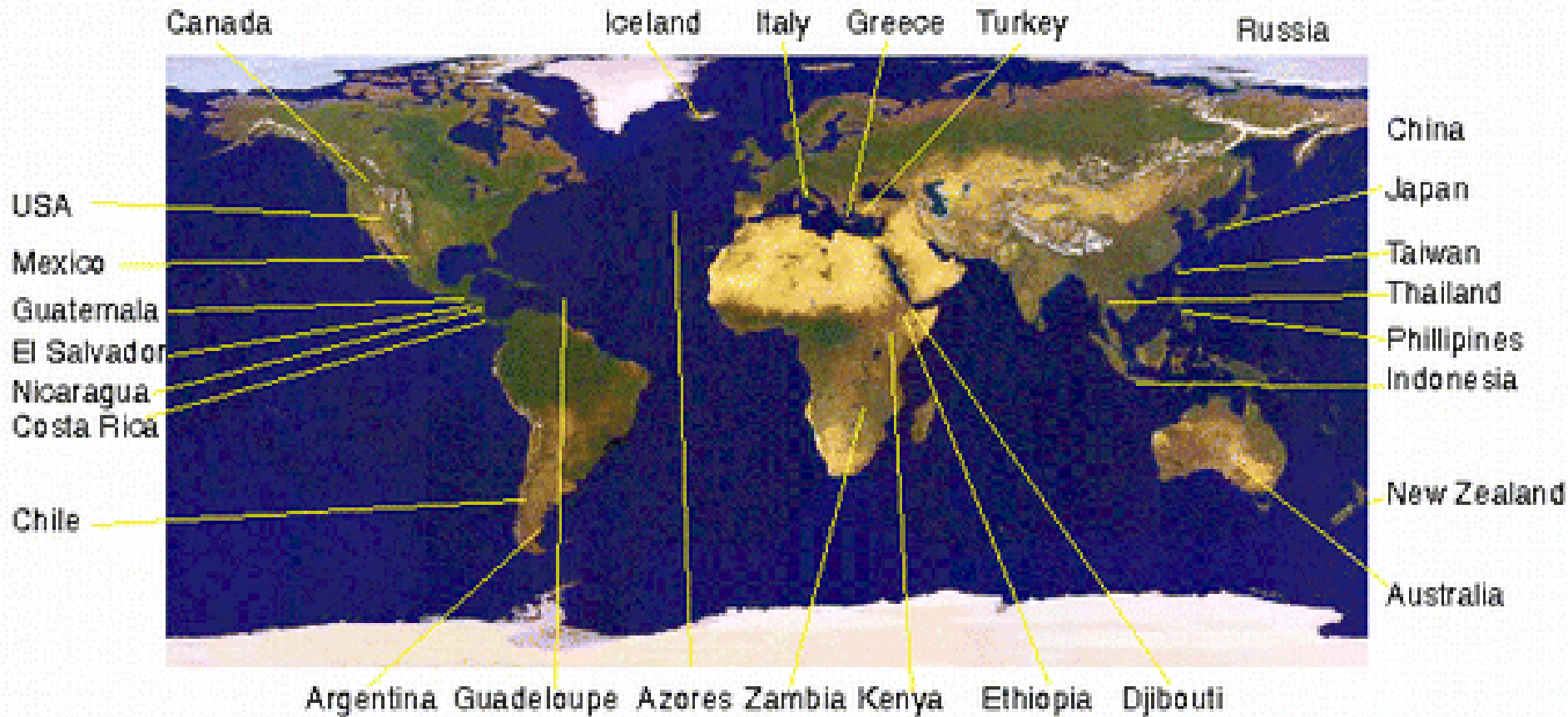
BRGM, C. Fouillac



Bernard MULTON

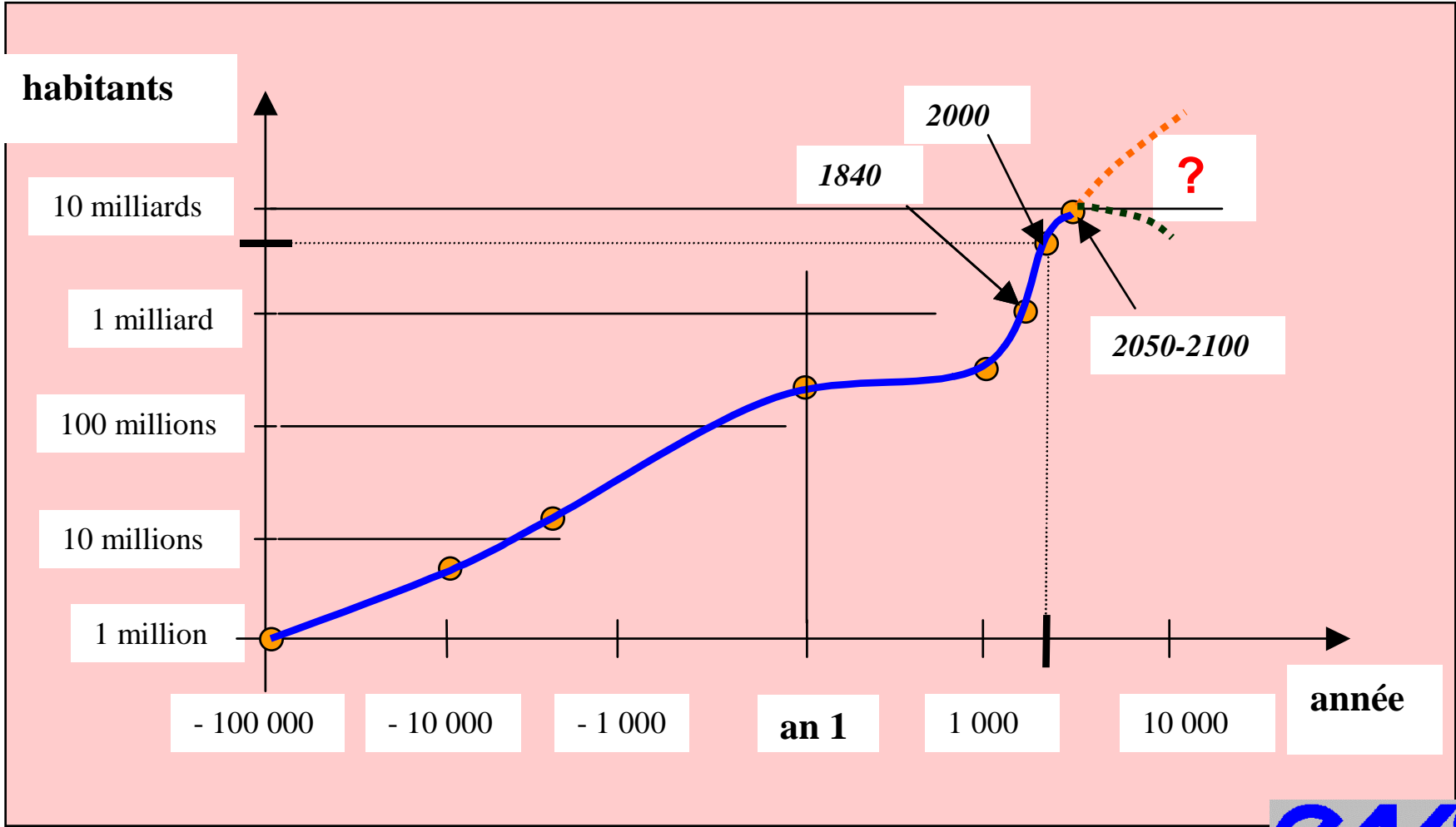


Ressources géothermiques



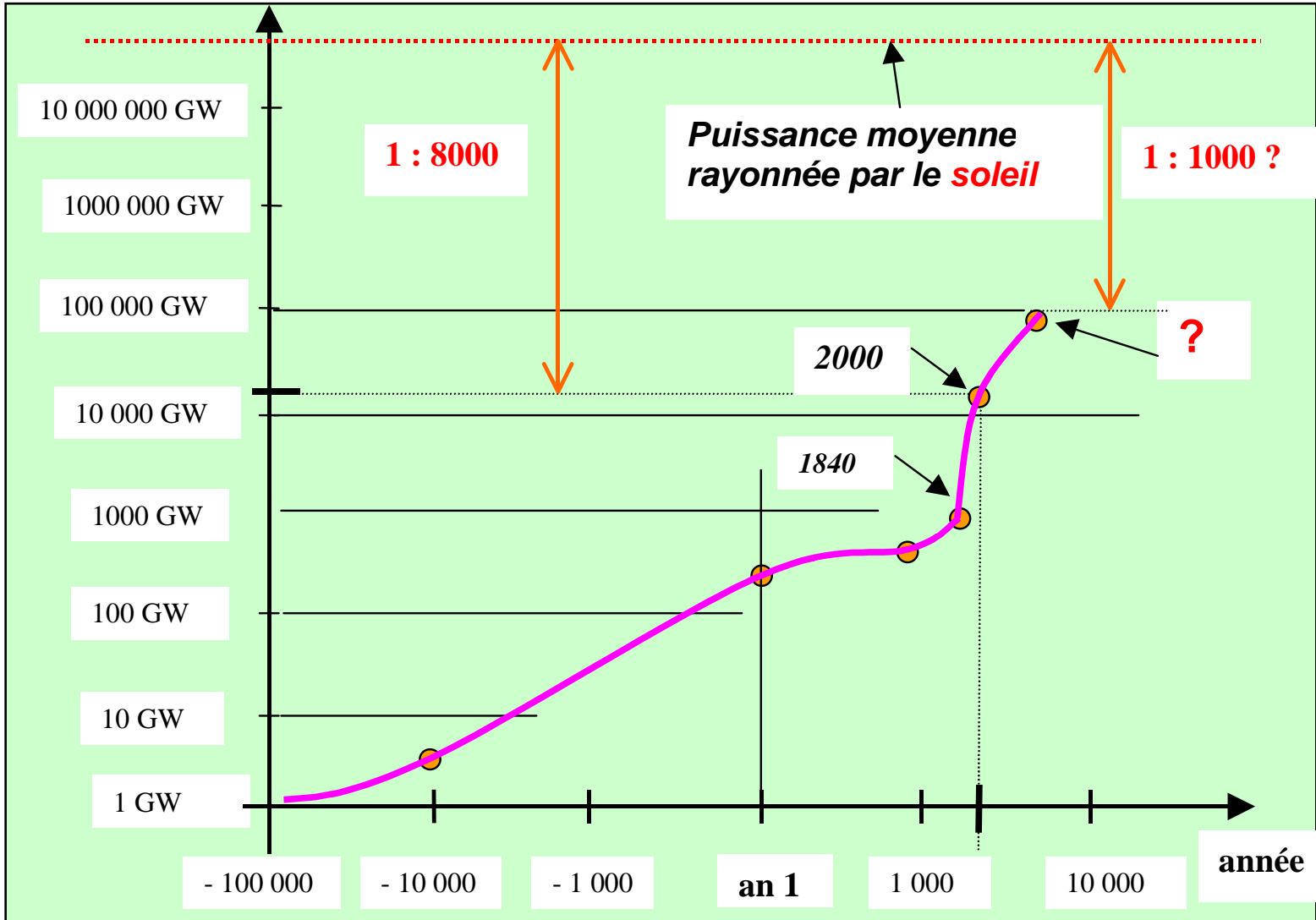


Croissance de la population humaine





Puissance moyenne de l'activité énergétique humaine



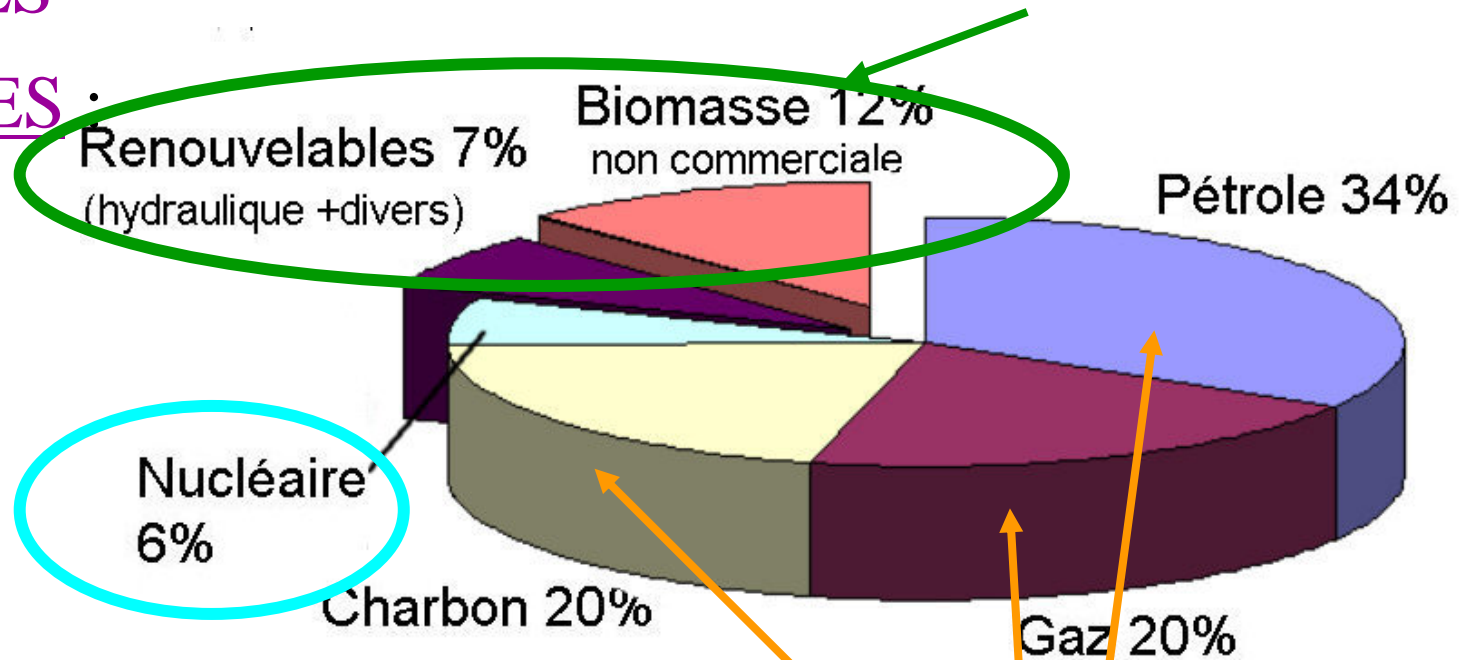


Répartition par sources de la consommation mondiale $\approx 140.10^{12}$ kWh ou 12 Gtep (par an)

Renouvelables : 19%

SOURCES

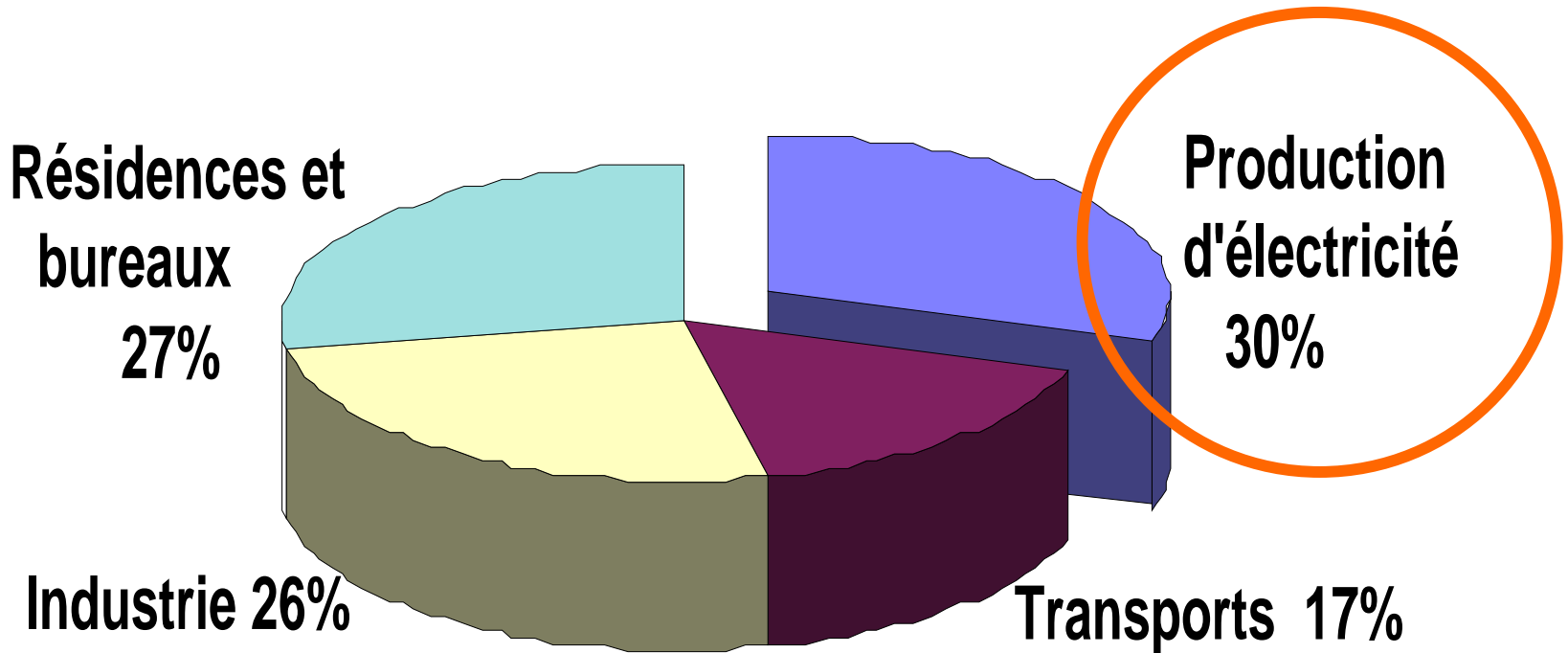
PRIMAIRES



Fossiles : 3/4

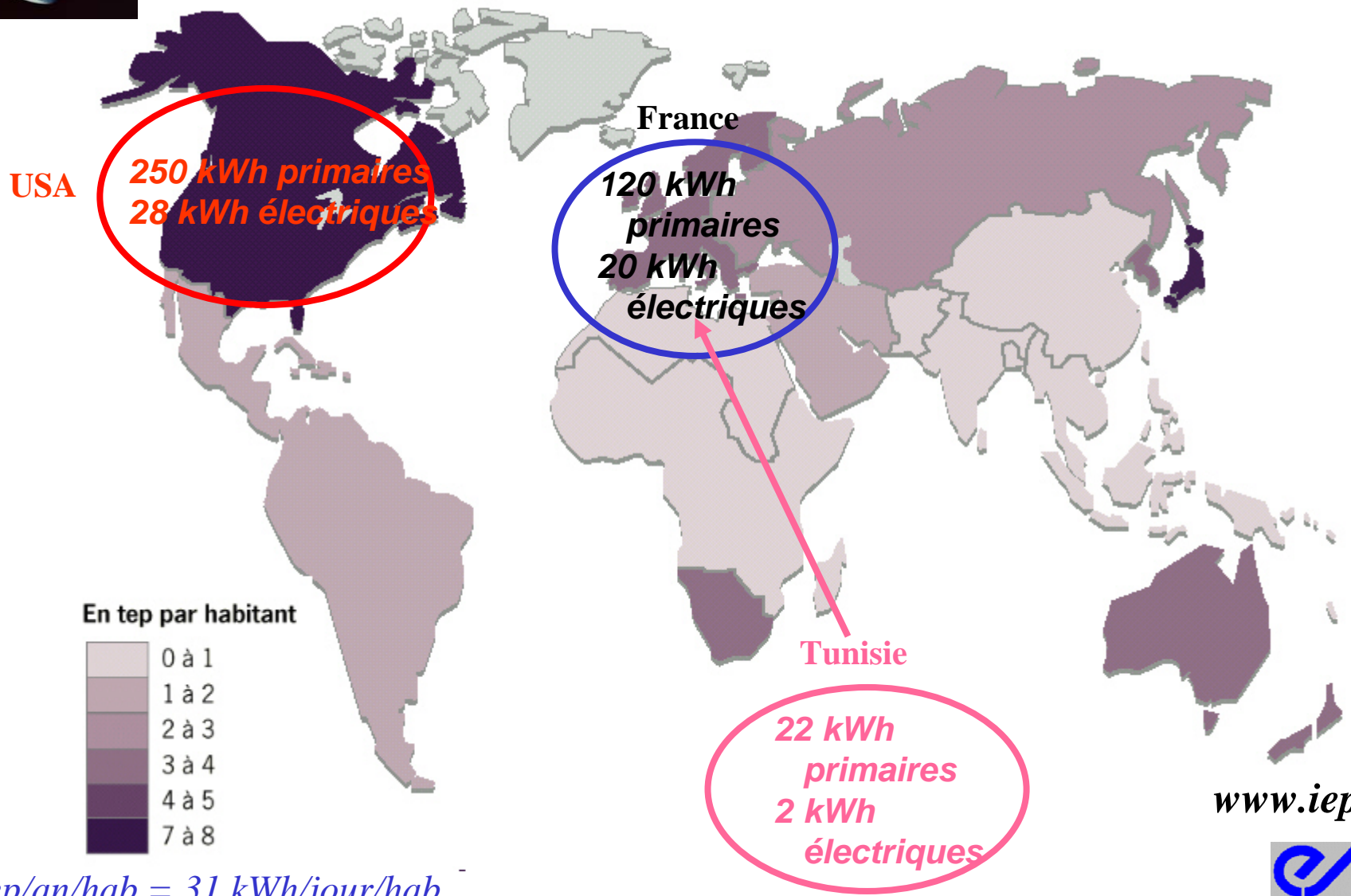


Répartition par secteurs consommateurs de la consommation mondiale d'énergie primaire





Consommation d'énergie par habitant



1 tep/an/hab = 31 kWh/jour/hab

www.iepf.org

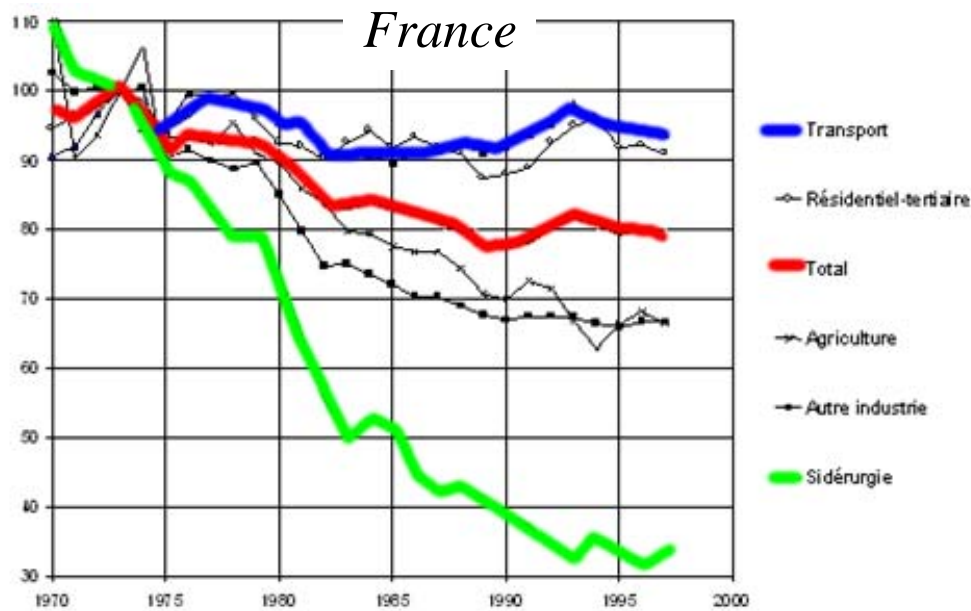
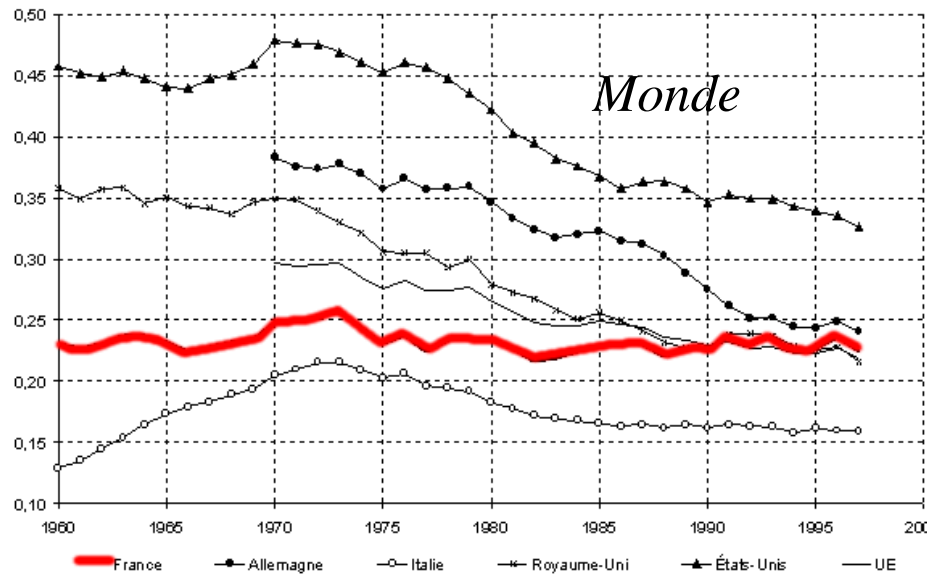


Bernard MULTON



Intensité énergétique

Quantité d'énergie en **tep** dépensée pour obtenir 1000\$ de PIB



L'efficacité s'est globalement améliorée sous l'effet de la compétition économique : l'énergie a un coût !



Bernard MULTON



Répartition de la consommation française annuelle d'énergie primaire

2,9.10¹² kWh ou 250 Mtep en 2000

Charbon :	14 Mtep	5,5%
Pétrole :	98,5 Mtep	38,2 %
Gaz :	37,3 Mtep	14,5%
Electricité nucléaire:	88,6 Mtep	34,4%
Electricité hydraulique :	6,3 Mtep	2,5%
Renouvelable thermique :	12,7 Mtep	4,9%

Fossiles :
58,2%

Renouvelables :
7,4%





Répartition des 280 Mtep de la consommation française annuelle d'énergie primaire

Résidentiel-tertiaire :	45,8 %
Industrie :	27,7%
Transports :	24,9% (95% en pétrole)
Agriculture :	1,7%

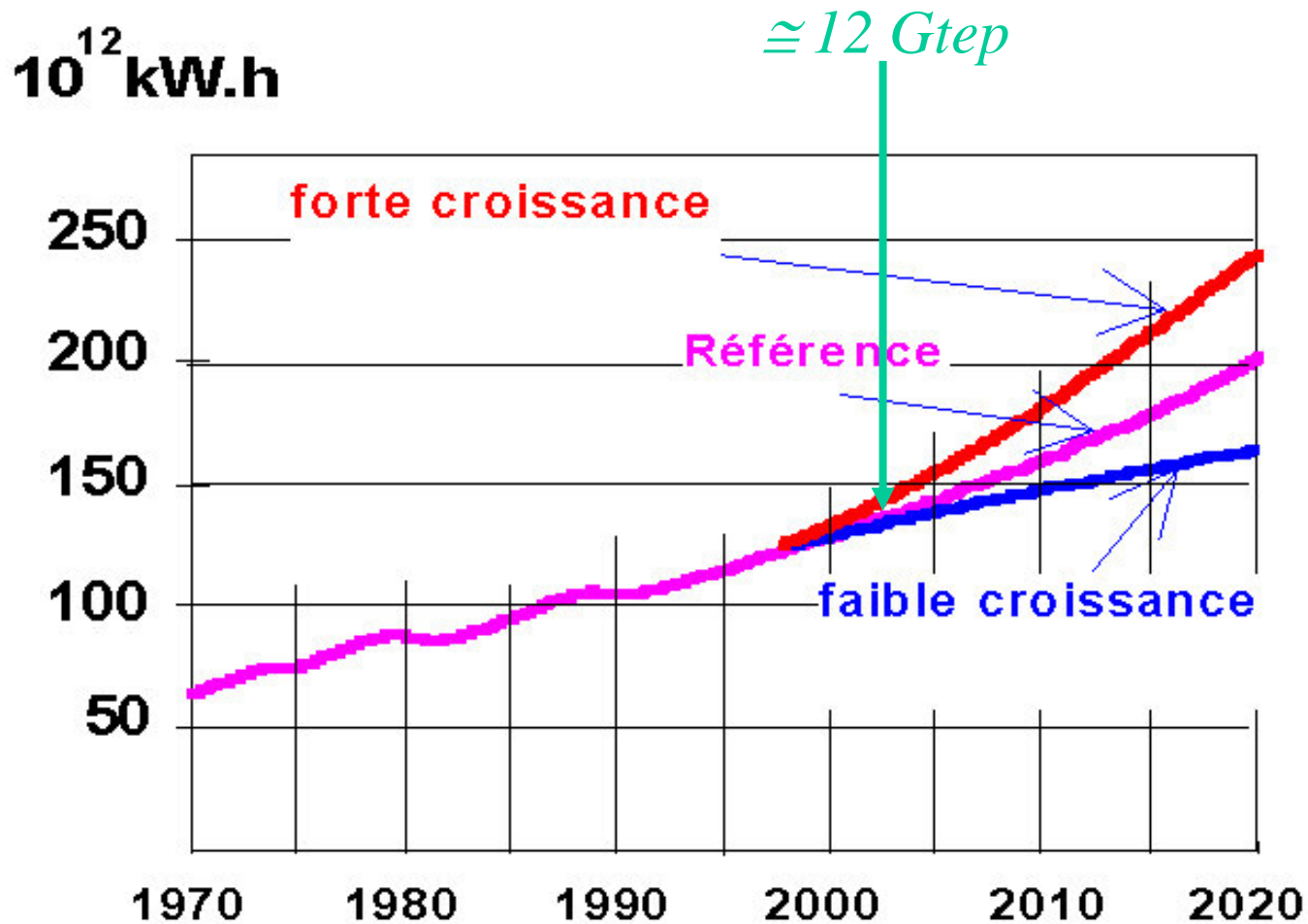
*Note : sur les 280 Mtep, environ 80 Mtep sont de pures pertes
dont environ 70 dans les centrales nucléaires*

(ce qui augmente artificiellement les besoins apparents des secteurs résidentiels et tertiaires)



Croissance de la consommation

source : Agence Internationale de l'Énergie

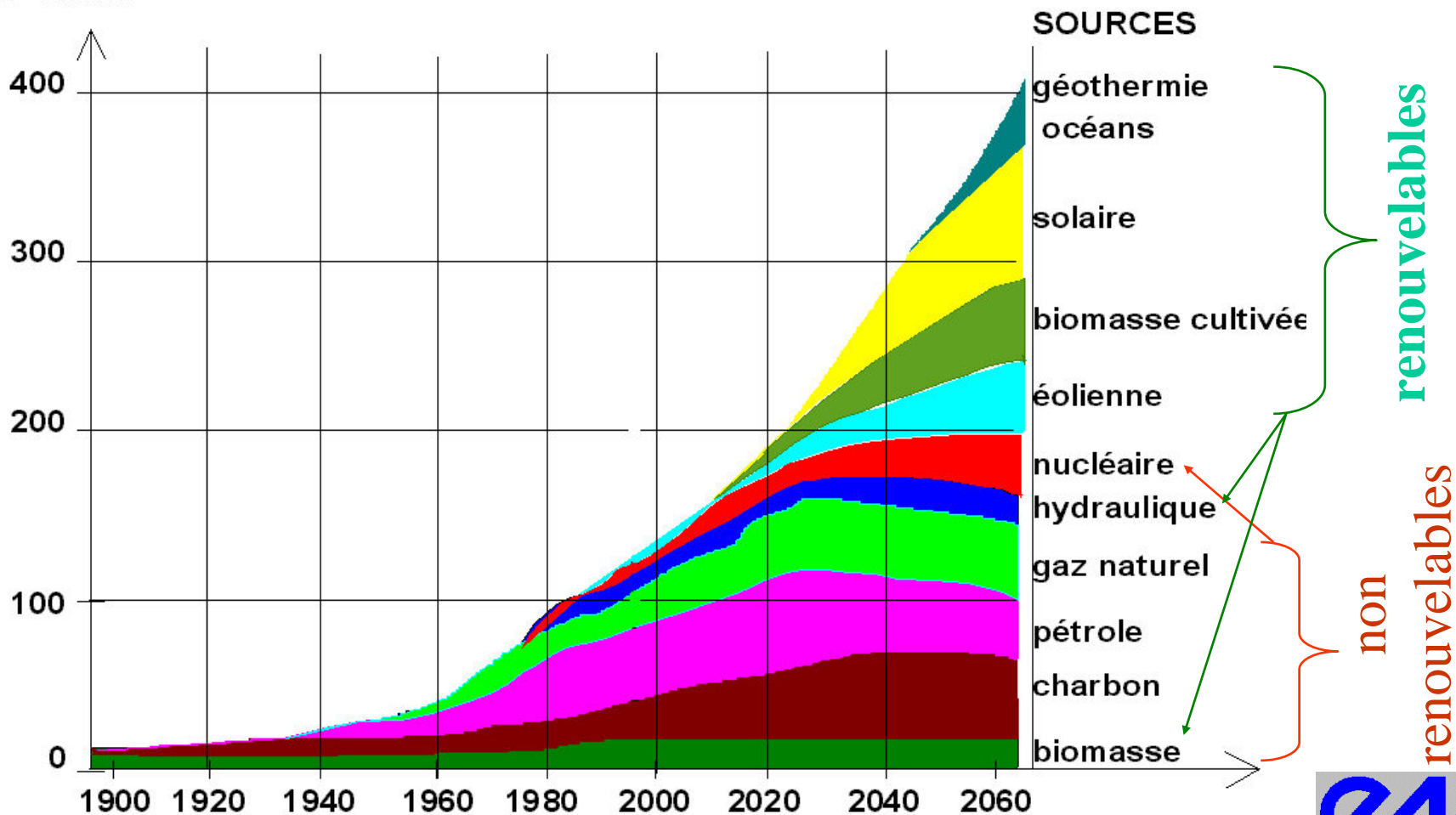


Bernard MULTON



Prévision d'évolution des sources

10^{12} kW.h



Source : Shell



Bernard MULTON



Part de l'électricité-énergie dans la consommation

(hors énergie électrique produite dans les systèmes embarqués.)

10^{12} kW.h	Énergie primaire	Énergie électrique	% électricité
1940	20	0,5	2,5%
1960	40	2	5%
1980	80	7	8,7%
2000	140	15	11%
France 2000	2,7	0,42	16%

Notons que pour une part de 11% en énergie finale,
la production d'électricité consomme
30% de l'énergie primaire mondiale.

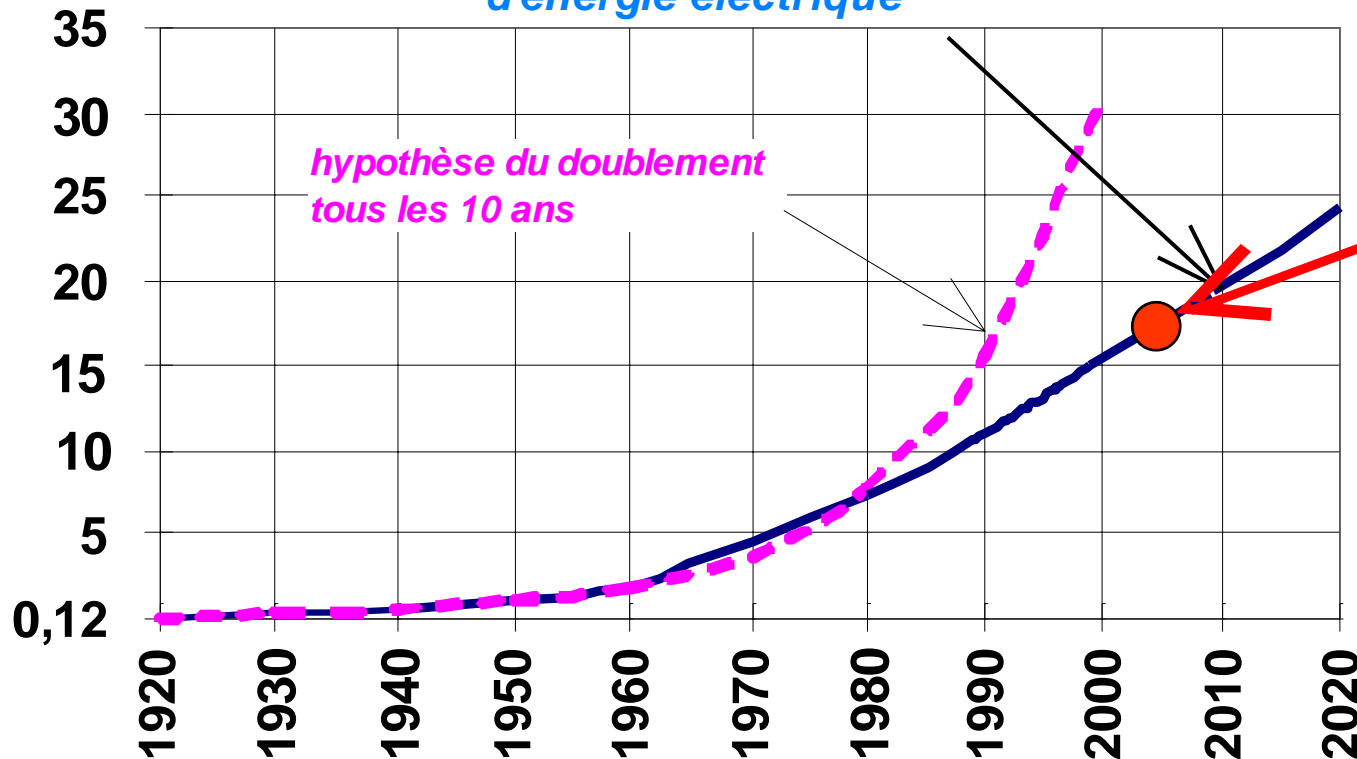




L'énergie électrique : croissance de la production

10^{12} kWh

*croissance de la production mondiale
d'énergie électrique*



15.10¹²kWh

France (2003)

Production :
0,54.10¹²kWh

Consommation nette :
0,46.10¹²kWh

Exportation :
0,066.10¹²kWh

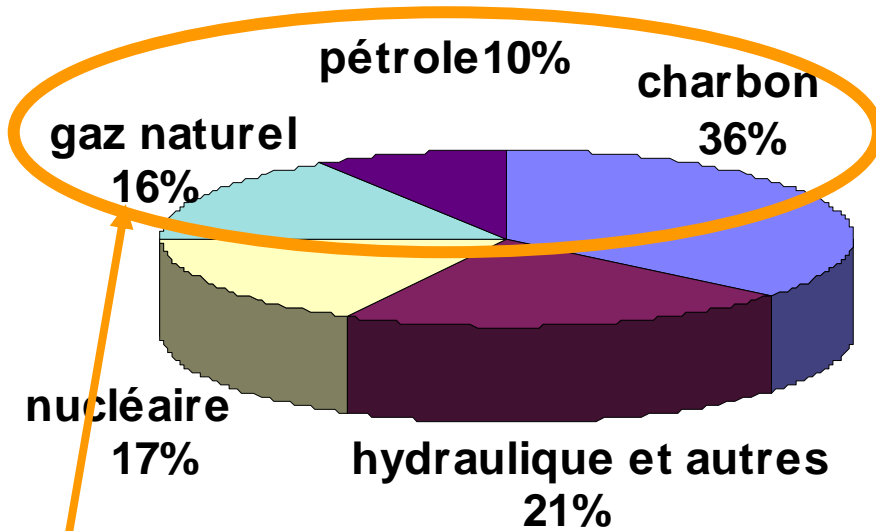


Bernard MULTON



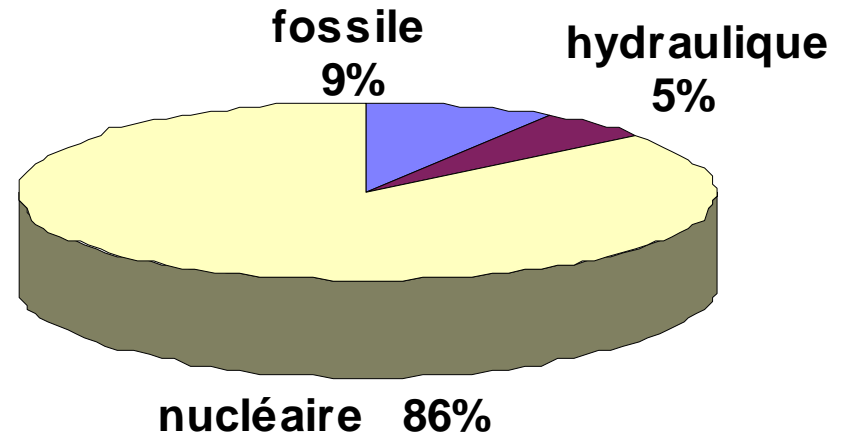
L'énergie électrique : sources primaires pour la produire

Monde : $40. 10^{12}$ kWh
(3200 GW)



Fossiles : 62% pour produire **15.10^{12} kWh**

France : $1,4. 10^{12}$ kWh
(110 GW)



63 GW (59 réacteurs)

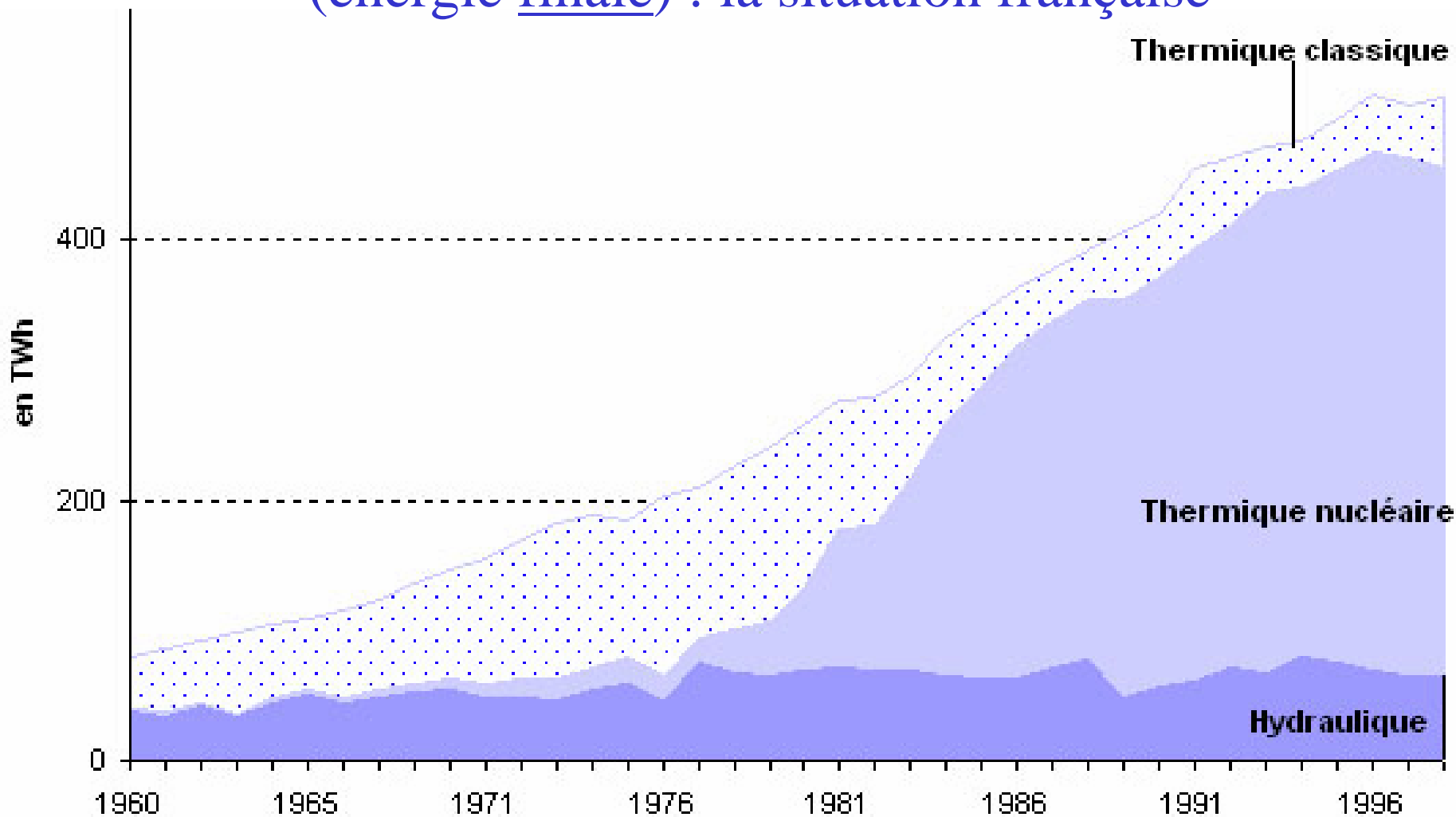
pour produire $0,53.10^{12}$ kWh



Bernard MULTON



Production d'électricité (énergie finale) : la situation française

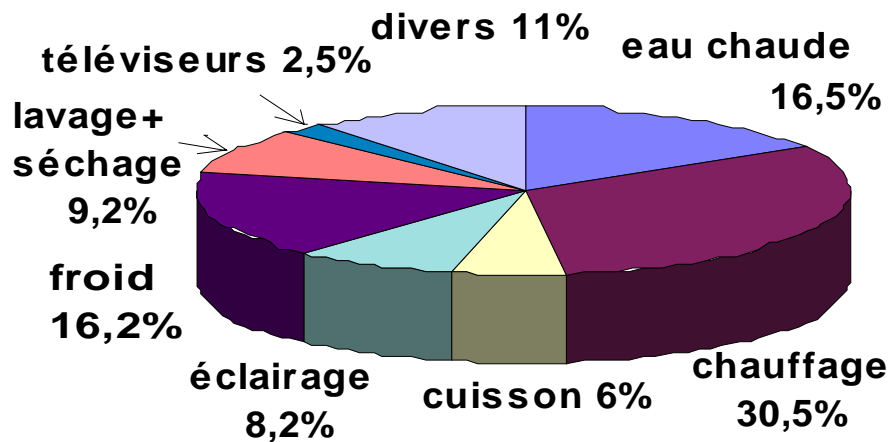
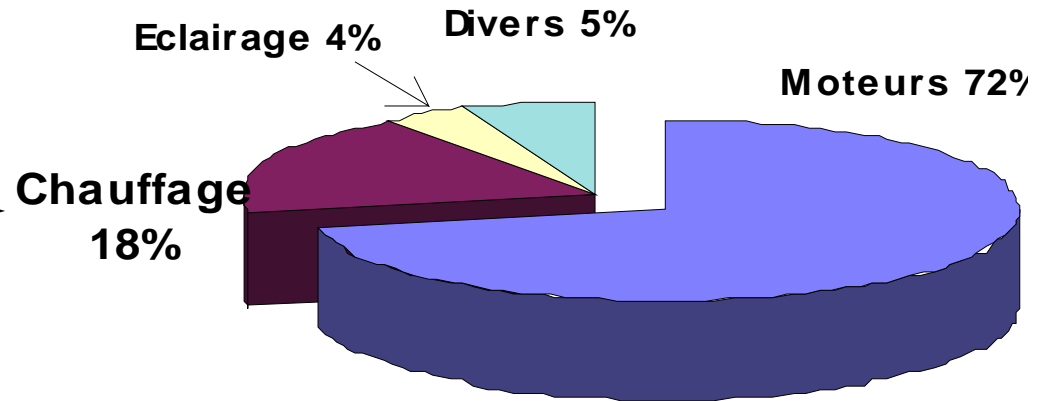
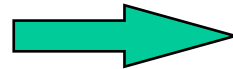




Consommation d'électricité en France

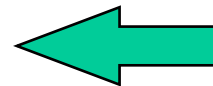
SECTEUR INDUSTRIEL :

≈ 1/3



SECTEUR RÉSIDENTIEL :

≈ 1/3





Production d'électricité par les S.E.R.

L'hydraulique :

- Potentiel le plus facile à exploiter
740 GW installés - $2,7 \cdot 10^{12}$ kWh
(environ 25 GW en France)
- De très loin, la source renouvelable la plus utilisée
- Production centralisée
et décentralisée
- Stockage d'énergie aisé :
pompage - turbinage



Itaipu 12,6 GW - $90 \cdot 10^9$ kWh
(la plus grande centrale du monde)





L'hydraulique :

- Taux d'exploitation proche de la saturation dans les pays industrialisés
- Très forte progression dans les pays à économie émergente
(*potentiel de 260 GW au Brésil*)

Exemple en construction (2009)

Chine barrage des 3 gorges

18 GW (27 X 700 MW) :

84.10⁹kWh/an

renouvelable

mais pas sans conséquences ...

- 1000 km² d'eau
- 1 million de personnes déplacées
- plus de 10 villes englouties
- forte action sur l'écosystème





Les petites centrales hydroélectriques (PCH)

- Définition PCH : $P < 0,5$ à 50 MW (Brésil), en France : $P < 5$ MW
potentiel de 3500 chutes aménageables pour 7.10^9 kWh
- Dans le monde : 85.10^9 kWh produits (plus de 3% de l'hydro-électricité)
- Un potentiel encore peu exploité
très intéressant pour la décentralisation de la production
peu perturbateur pour l'environnement



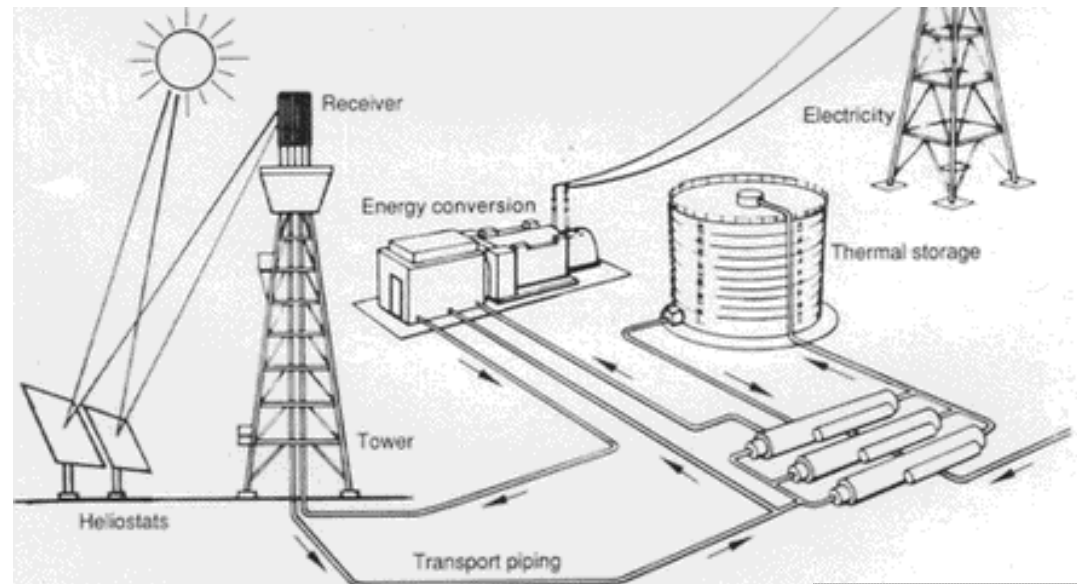


Production d'électricité par les S.E.R.

Le thermique solaire :

- France :
expérience THEMIS 1,8 MWe
(12 MWth), années 80

- USA :
Solar Two 10 MWe (1996)

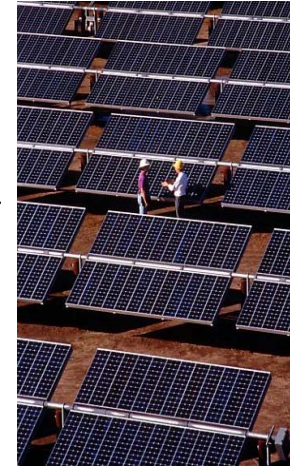




Production d'électricité par les S.E.R.

Solaire photovoltaïque :

- Environ (2003) 2700 MW – 3 10⁹kWh + **30 à 40%/an**
- Très fort potentiel mais encore très coûteux
(baisse des coûts rapide)
- Surtout en production décentralisée
(sites isolés et, maintenant, raccordés au réseau)
- Exemple de production centralisée
Italie Serre : 3,3 MW
- Programmes de toits photovoltaïques
(ex. 100 000 toits solaires en Allemagne)



usine de 500 kW en Californie



Toit solaire de 1,4 kW

Allemagne



Bernard MULTON



Production d'électricité par les S.E.R.

Le vent :

- Environ 37 GW installés fin 2003, croissance + 30% par an (prévision 75 GW en 2010)
- Très fort potentiel encore peu exploité en off-shore
- Intéressant en production décentralisée
- Programmes
Europe : 40 000 MW en 2010
(France 14 000 MW ??)
- source très fluctuante, problèmes stabilité réseau...



1^{ère} ferme off-shore (1991)
Danemark 11 x 450kW



Bernard MULTON



Production d'électricité par les S.E.R.

La houle :

- du « vent concentré »
- attractif pour la production décentralisée
- encore marginal



Réalisation échelle réduite 1/20^{ème}

- exemple Pelamis dispositif 450 kW – 1,5 GWh (ensemble de boudins de 130 m)

- nombreux systèmes expérimentaux dans le monde, quelques grands projets..

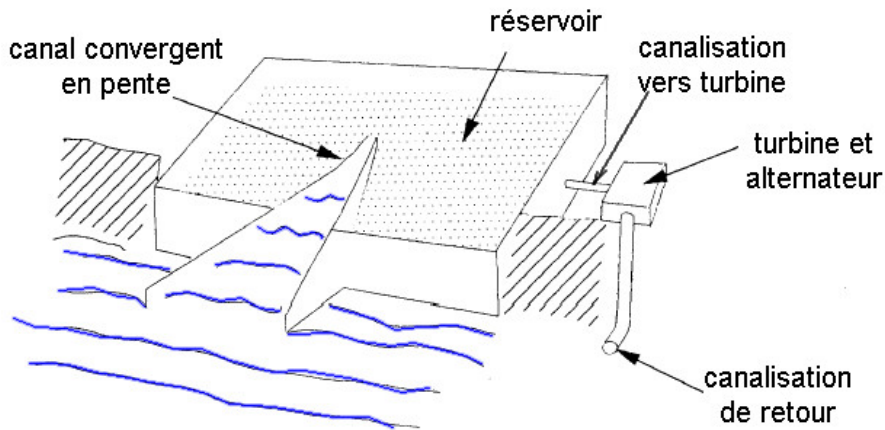


Bernard MULTON

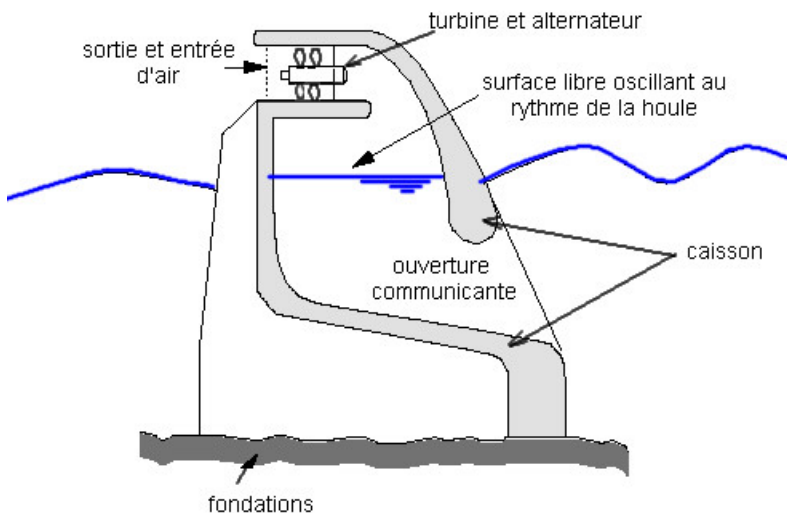


Production d'électricité par les S.E.R.

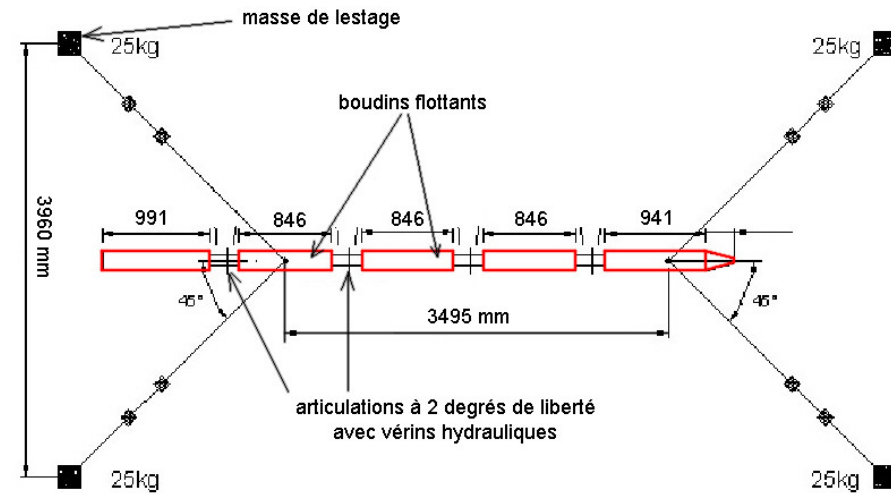
La houle : qq kW/front de vague nombreuses voies :



Système à déferlement



Colonne oscillante

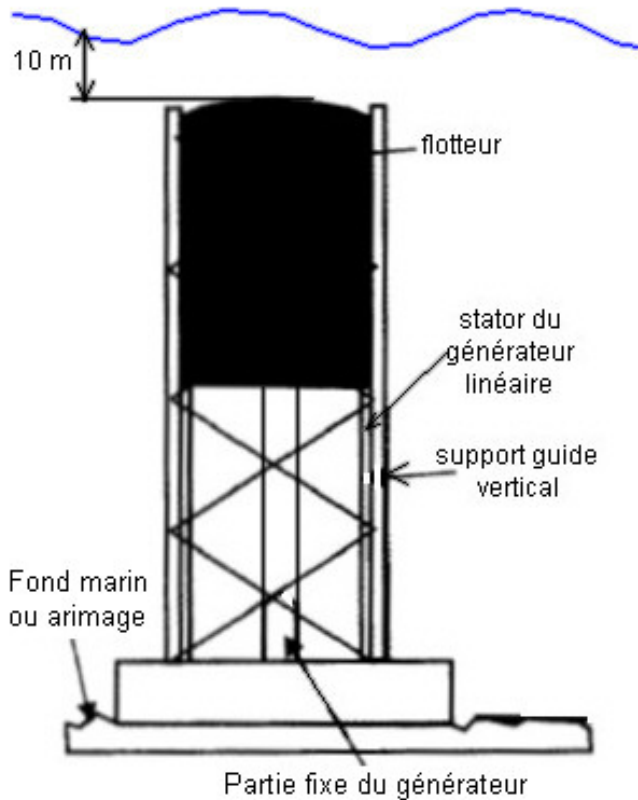


Boudins flottants (Pelamis)



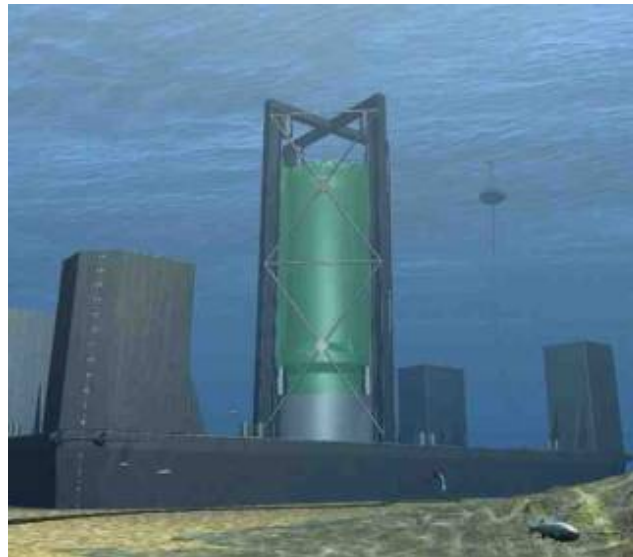
Production d'électricité par les S.E.R.

La houle : qq kW/front de vague



Flotteur immergé

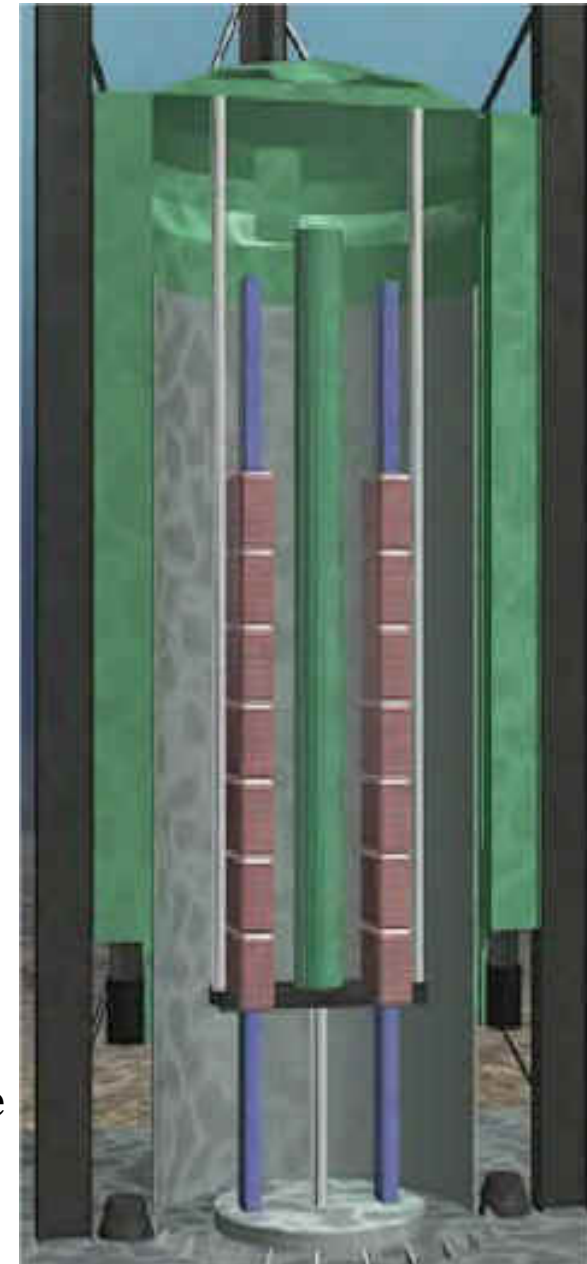
Système AWS



À 8 m sous la surface, un flotteur de 21 m de hauteur et 9,5 m de diamètre actionne un piston

2 MW

Générateur linéaire





Production d'électricité par les S.E.R.

Géothermie haute température :

(Temp. d'eau 150 à 350°C)

- Une énergie bon marché pour des sites privilégiés
- 8,6 GW installés en 2001 (50 TWh)
(12 GW en 2010)

Exemples :

- japonais : Hatchobaru 300 MW
- Guadeloupe : Bouillante 5 MW
(20 MW en 2005)



Bernard MULTON



Energie des marées et des courants marins :

- Peu de sites favorables

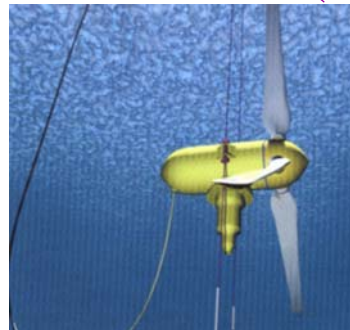
Exemple :
La Rance (1966)
très rentable



240 MW (24 groupes de 10 MW)
540 10⁶ kWh/an

- Récemment : projets d'exploitation
des courants marins (estuaires, fjords...)

Exemple : projet Hammerfest Ström AS (Norvège)
15 000 turbines de 800 kW





Amélioration du bilan énergétique grâce à la COGÉNÉRATION

Production thermique-électrique à partir des combustibles :

- fossiles
- nucléaires
- biomasse
- déchets ménagers
- hydrogène

Moyens

- diesel + alternateur
- turbine à gaz + alternateur
- **pile à combustible**





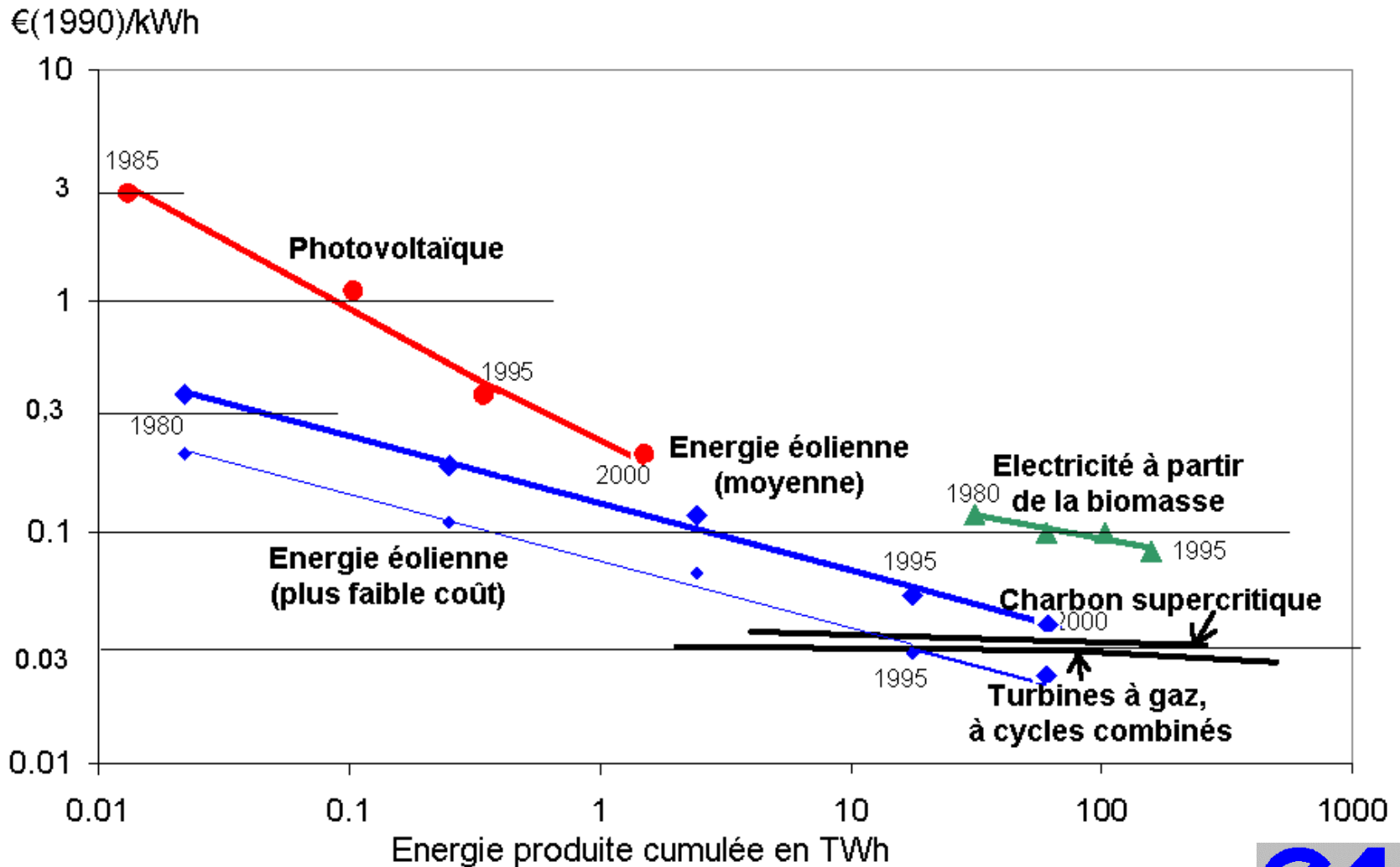
Comparaison des modes de production centralisée

Moyen	Energie annuelle	Puissance installé	kW.h annuels par W installé	Taux d'utilisation	Coût du kWh
Ensemble	13 000 TWh	3000 GW	4,3	0,49	
Thermique fossile	8000 TWh	2000 GW	4	0,44	
Thermique nucléaire	2200 TWh	360 GW	6,1	0,69	3,2 c€ (DIGEC)
Hydraulique	2500 TWh	670 GW	3,7	0,42	
Solaire photo. (Serre)	4,6 GWh	3,3MW	1,4	0,15	8 à 20 c€ ↘ sur 20 ans
Eolien	19 TWh	9,5 GW	2	0,22	4 à 6 c€ ↘
Houle Proto Jamstec	120 MWh	110	1,1	0,12	?
Géothermie	50 TWh	8 GW	6	0,68	?
Marée (Rance)	0,54 TWh	240 MW	2,2	0,25	2,7 c€





Impact des volumes de production sur les coûts



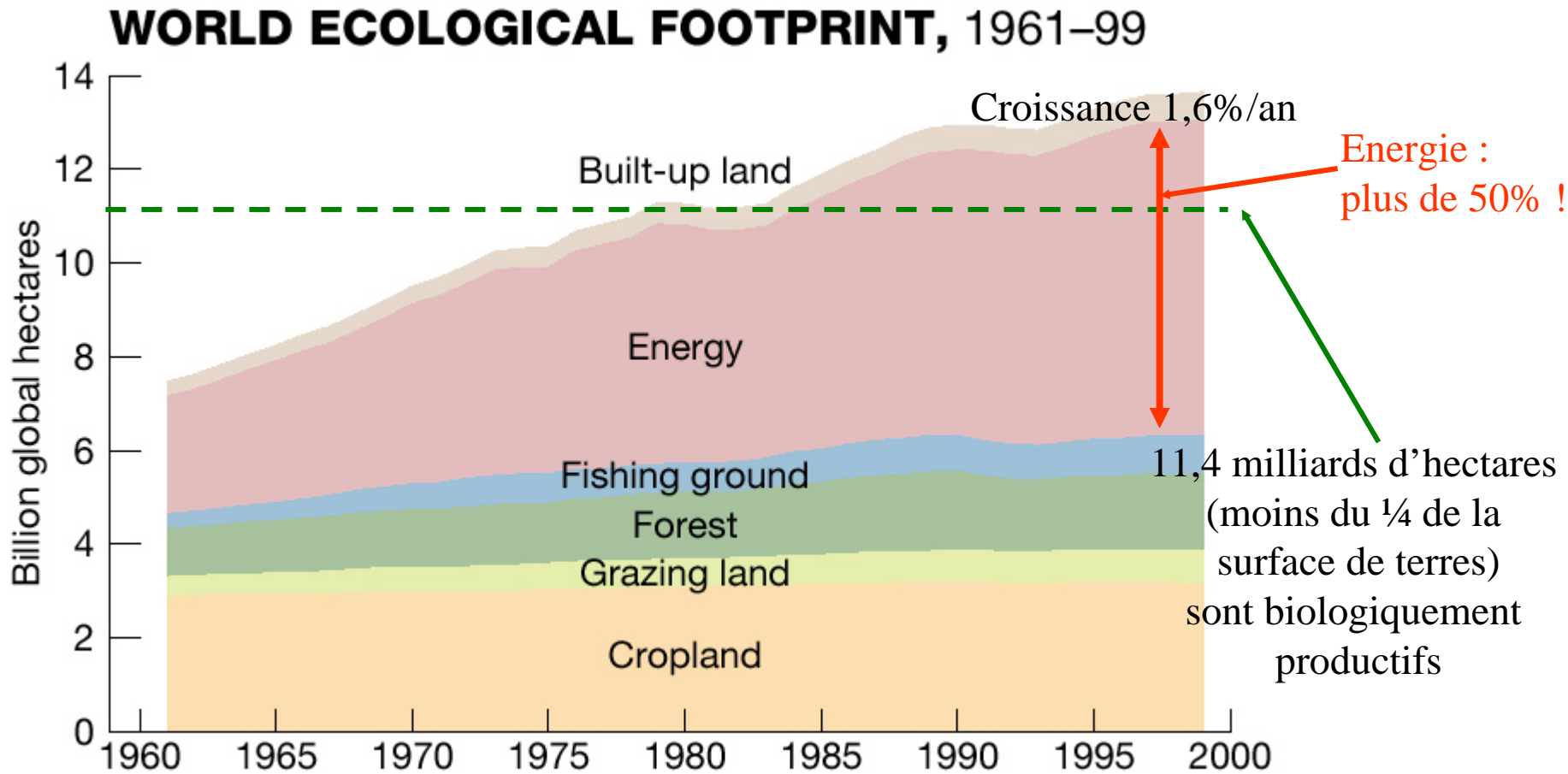
NGCC = Natural gas combined-cycle turbine



Bernard MULTON



Les activités énergétiques sont parmi les plus coûteuses pour l'environnement



LIVING PLANET REPORT 2002



Bernard MULTON



Rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère

Rejets gazeux dus à la combustion des produits carbonés

Pour produire 1 kWh électrique

20 litres d'eau chaude (+40°C)

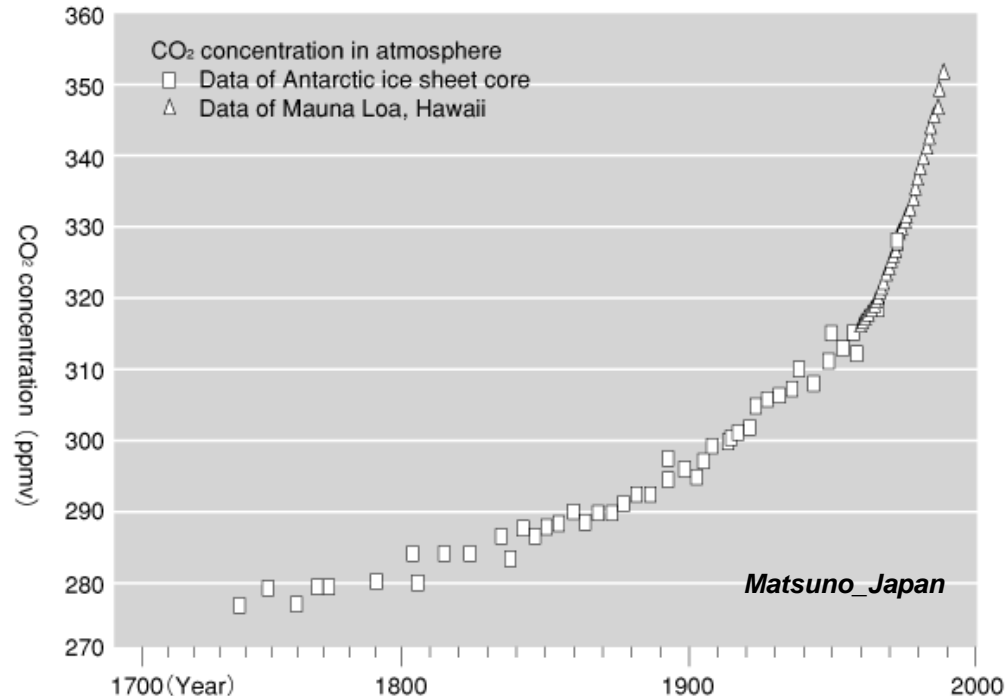
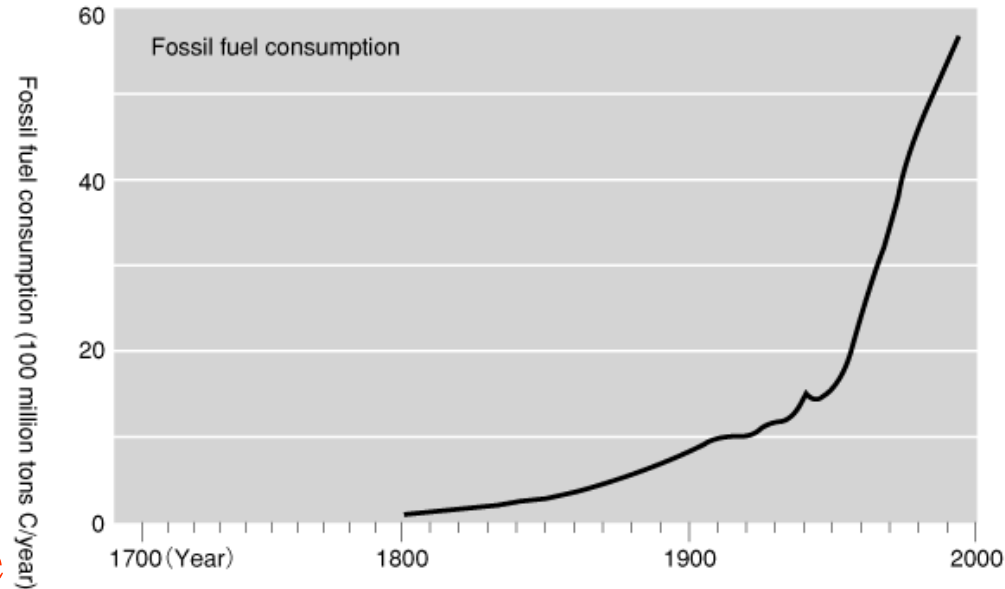
- charbon classique : 1 kg de CO₂

- gaz cycle combiné : 0,3 kg de CO₂

Pour parcourir 10 000 km en

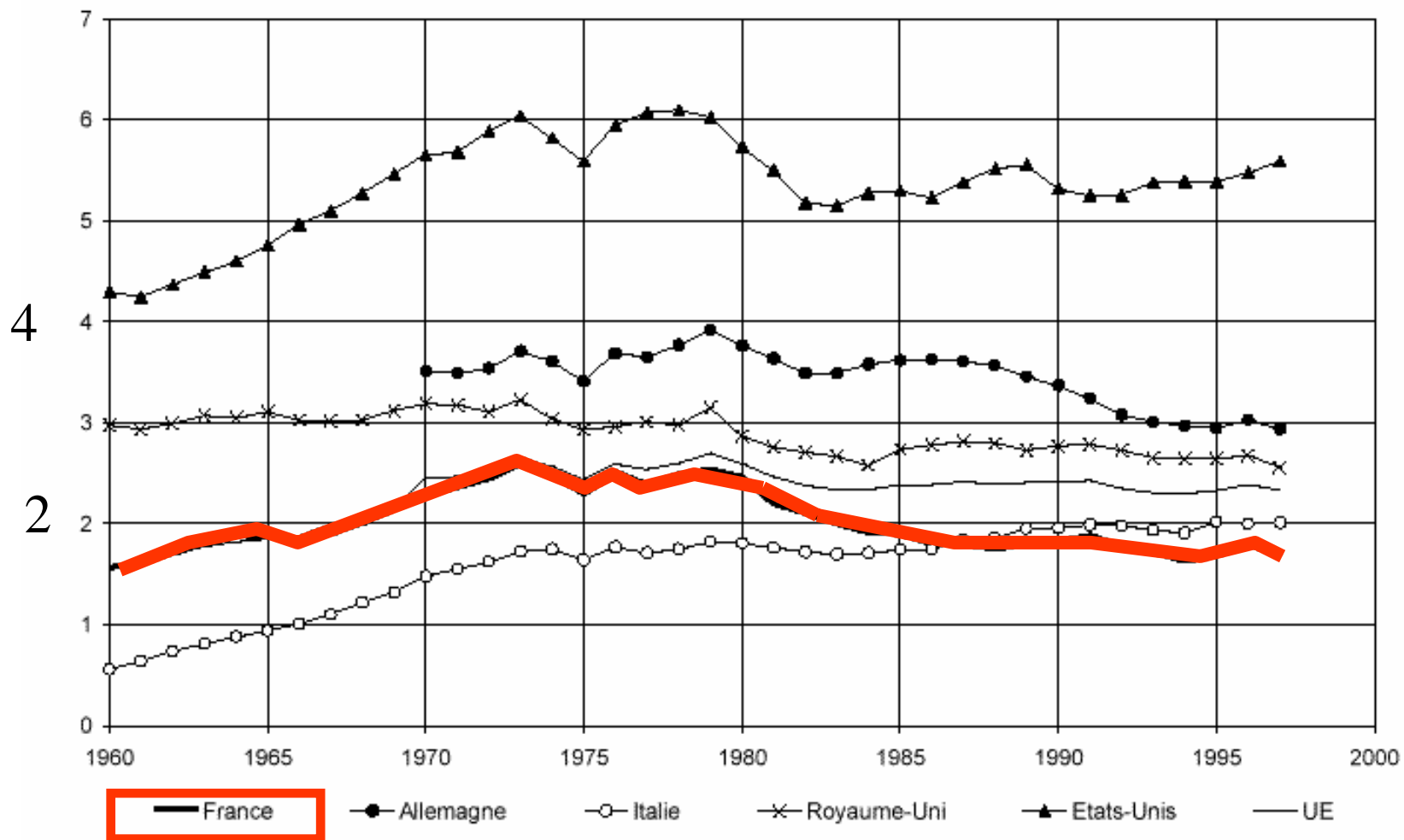
voiture : 3 tonnes de CO₂

La combustion de 1 kg de carbone dégage 3,6 kg de CO₂





Emissions de carbone en tonnes/hab/an en Europe



Source : Observatoire de l'énergie, d'après l'AIE (1999).

environ 2 tonnes/hab