

**Le « paysage » énergétique
et ses évolutions à long terme :
quelles perspectives ?
quelles actions à moyen et long termes ?**

Michel COMBARNOUS
Université de Bordeaux
(Université de Gabès)

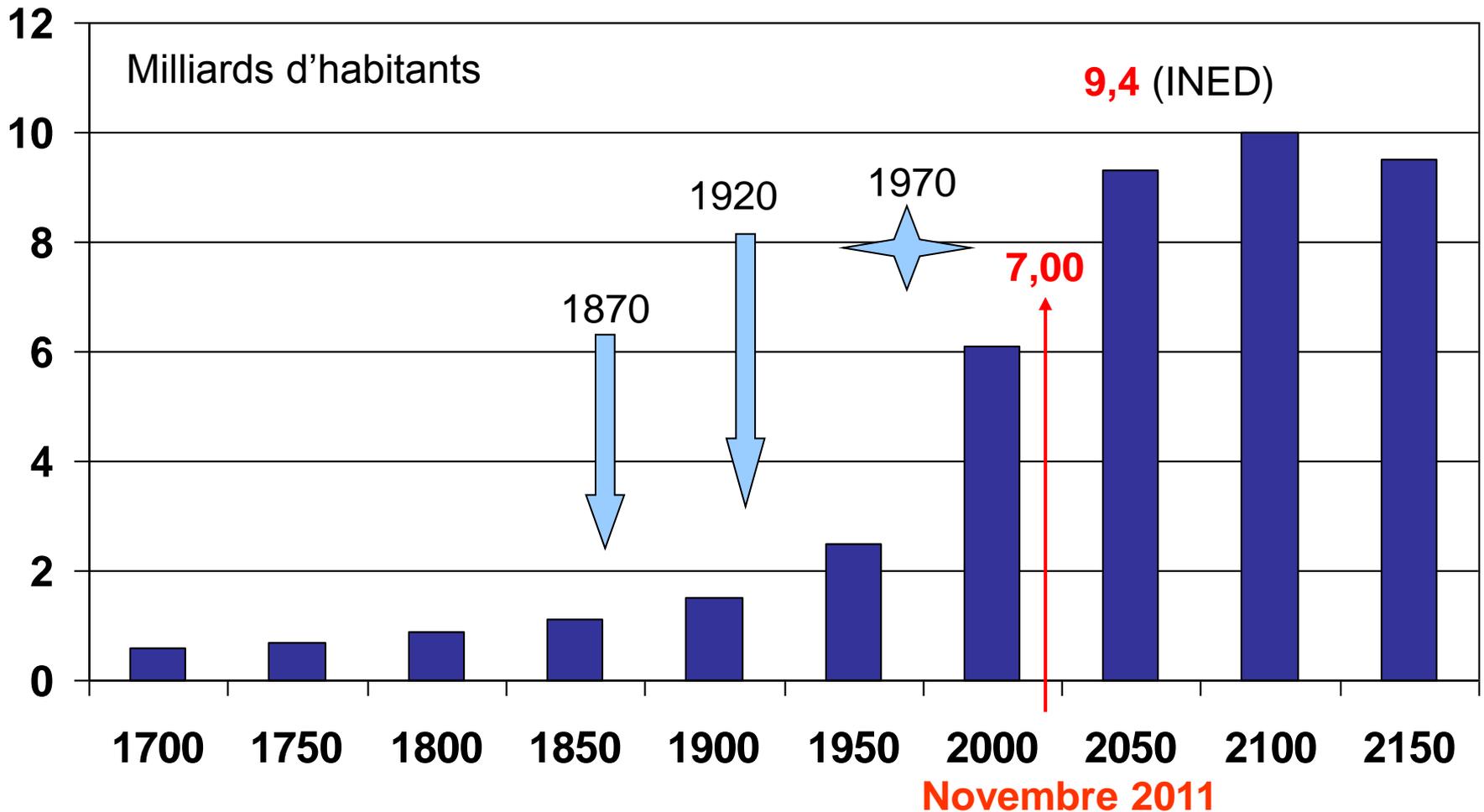
Centrale Energies et Centraliens du Gaz – Soirée « Gaz de Schistes »

ASIEM Paris - 13 décembre 2012

- **Quelles populations demain ?**
- Quel « bouquet énergétique » ?
 - Les besoins en énergie, implicites et explicites
 - L'actuel bouquet énergétique
- Quelles actions à court et long termes ?
 - Le court terme, un enjeu essentiel
 - Une démarche complémentaire « nouvelle »
 - L'énergie solaire, quelques chiffres
 - Les renouvelables : quelles voies ?
- Quels environnements ?
 - Des contraintes, ou « il n'y a pas que l'énergie »
- En guise de conclusion....
 - 2200 : le bouquet des renouvelables
 - Et tout le reste....

La population mondiale

Actuellement, chaque jour, la Terre accueille environ 195000 habitants de plus !



Hypothèses d'évolutions après 2007 : un taux de fécondité égal à 2,07
(en 2150, avec un taux de 1,55 : 3 Ghab ; de 2,55 : 25 Ghab)



Hong Kong - Aberdeen



Hong Kong Aberdeen



Claude Levi-Strauss

(28-11-1908 – 30-10-2009)

- Anthropologue, auteur de « *Tristes tropiques* »,
- Séjour au Brésil, de 1935 à 1939, chez les indiens Caduevo, Bororo et Nambikwara (il existait encore des populations complètement isolées),
- L'un de ses derniers entretiens (*), Le Monde, 2005 :
 - « *Quand je suis né, il y avait environ 1,5 milliard d'hommes sur Terre, quand j'étais au cœur de ma vie professionnelle, il y en avait 3 milliards et demain 8 à 9 milliards* »,
 - « *C'est ça le problème fondamental de l'avenir de l'humanité* »,
 - « *Je ne peux pas avoir beaucoup d'espoir pour un monde trop plein...* ».

(*) « Loin du Brésil », 28 pages, Editions Chandeigne, juin 2005

Le Radeau de la Méduse – Théodore GERICAULT (1791 – 1856)



Plus d'un milliard d'hommes souffrent de la faim !

- Quelles populations demain ?
- **Quel « bouquet énergétique » ?**
 - Les besoins en énergie, implicites et explicites**
 - L'actuel bouquet énergétique**
- Quelles actions à court et long termes ?
 - Le court terme, un enjeu essentiel**
 - Une démarche complémentaire « nouvelle »**
 - L'énergie solaire, quelques chiffres**
 - Les renouvelables : quelles voies ? Quelles ampleurs ?**
- Quels environnements ?
 - Des contraintes, ou « il n'y a pas que l'énergie »**
- En guise de conclusion....
 - 2200 : le bouquet des renouvelables**
 - Et tout le reste....**

- Les trois grands usages de l'énergie :
transports, habitats, industrie (agriculture)
- Distinction à faire entre : Sources d'énergie et Vecteurs
- Unités : k (10^3), Méga (10^6), Giga (10^9), Téra (10^{12})
! US : « billion » = milliard (G), UK : « billion » = téra = (T ou MM) !

Deux unités de base, en puissance :

☺ **Watt** (une lampe : 20 - 100 W, une voiture : 50 - 100 kW,
TGV : 10 MW, Ariane 5 : 50 GW)

Une « tranche » (« virtuelle ») : environ **1000 MW**

☺ **Tonne d'équivalent pétrole / an, t.e.p./an**

1 t.e.p. = 42 GJ (PCS)

1 t.e.p./an = 1400 W

Attention aux équivalences (Rendement : 100% !)

Implicites, Explicites

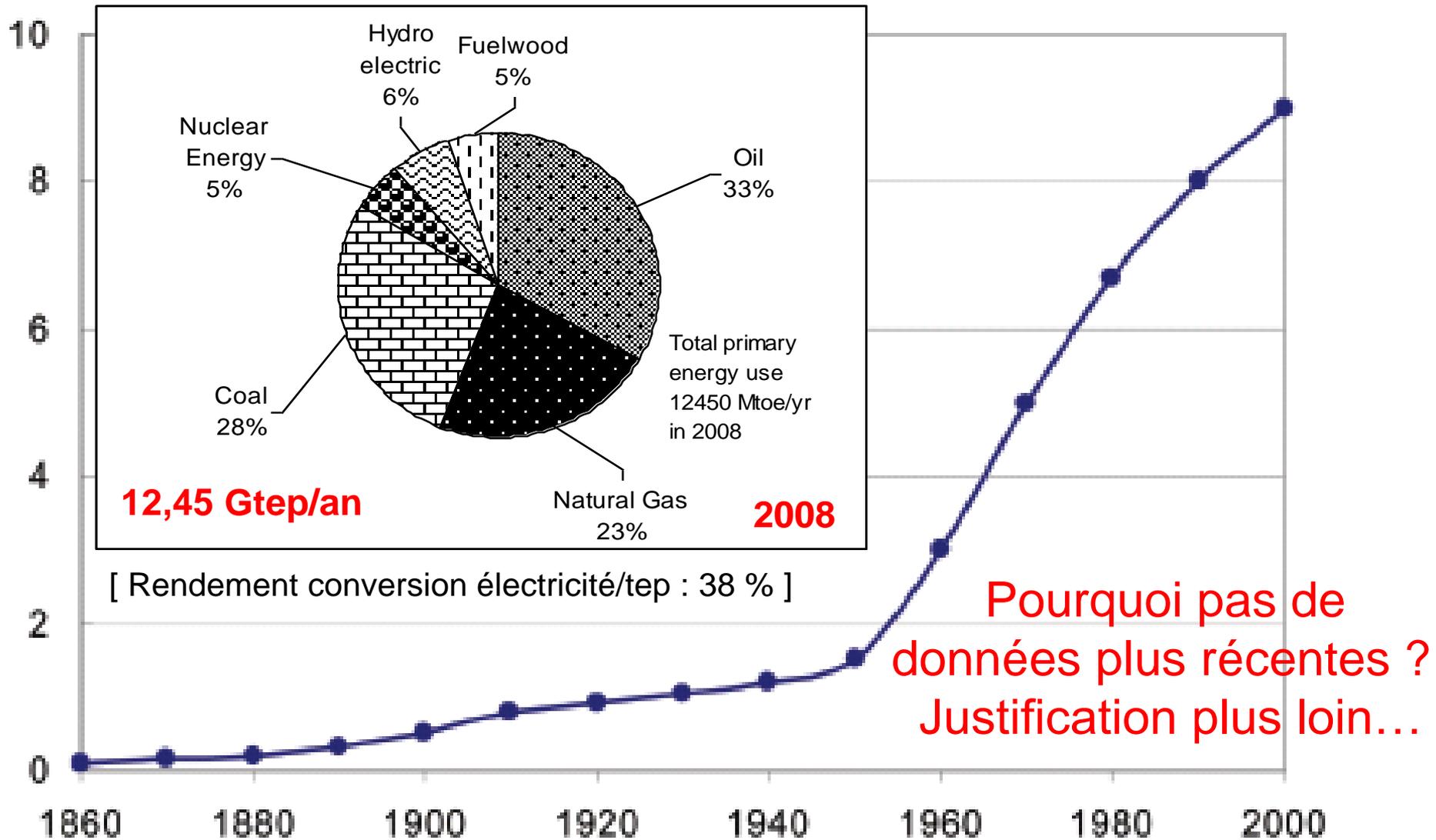
- **Consommations explicites** : celles dont on parle le plus généralement, quantifiables simplement (attention aux rendements !),

Usuellement notées comme telles : charbon, pétrole, gaz, hydroélectricité, énergie nucléaire, et souvent « bois combustible »

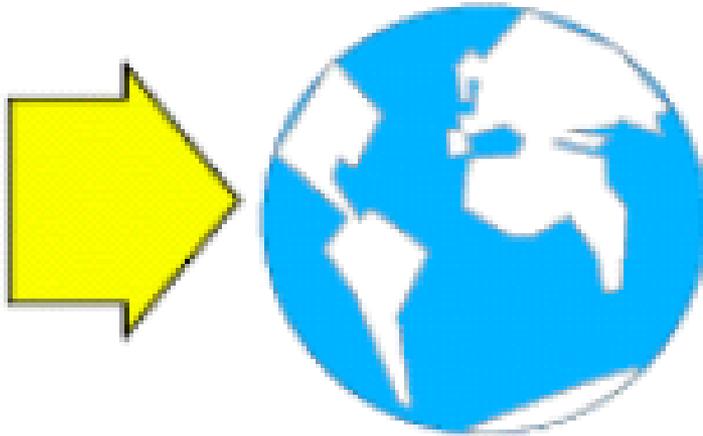
- **Consommations implicites** : l'énergie solaire pour la pousse des plantes, celle ingérée par un herbivore, les diverses formes de séchage « naturel »,...
- **Des difficultés de métrologie pour toutes les deux**

Evolution de la consommation mondiale, en Gtep/an

Consommations explicites



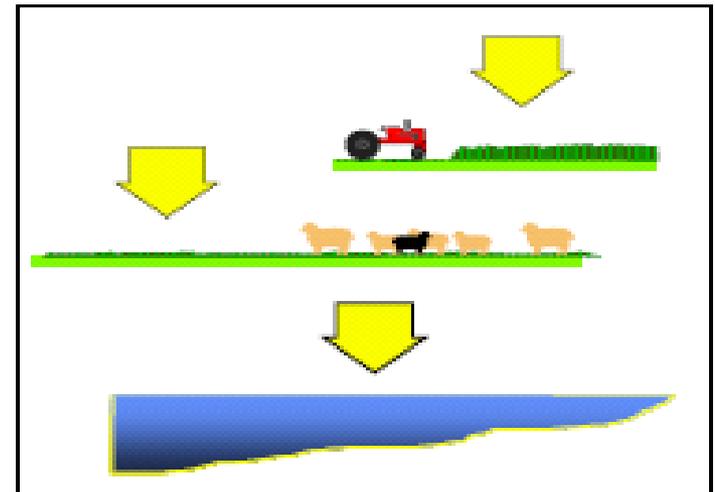
Base Juin 2009 : 6,8 Ghab



Consommations explicites (2008) :

12,4 Gtep/an
(sans biomasses, hors bois)

soit, environ 2500 W/hab

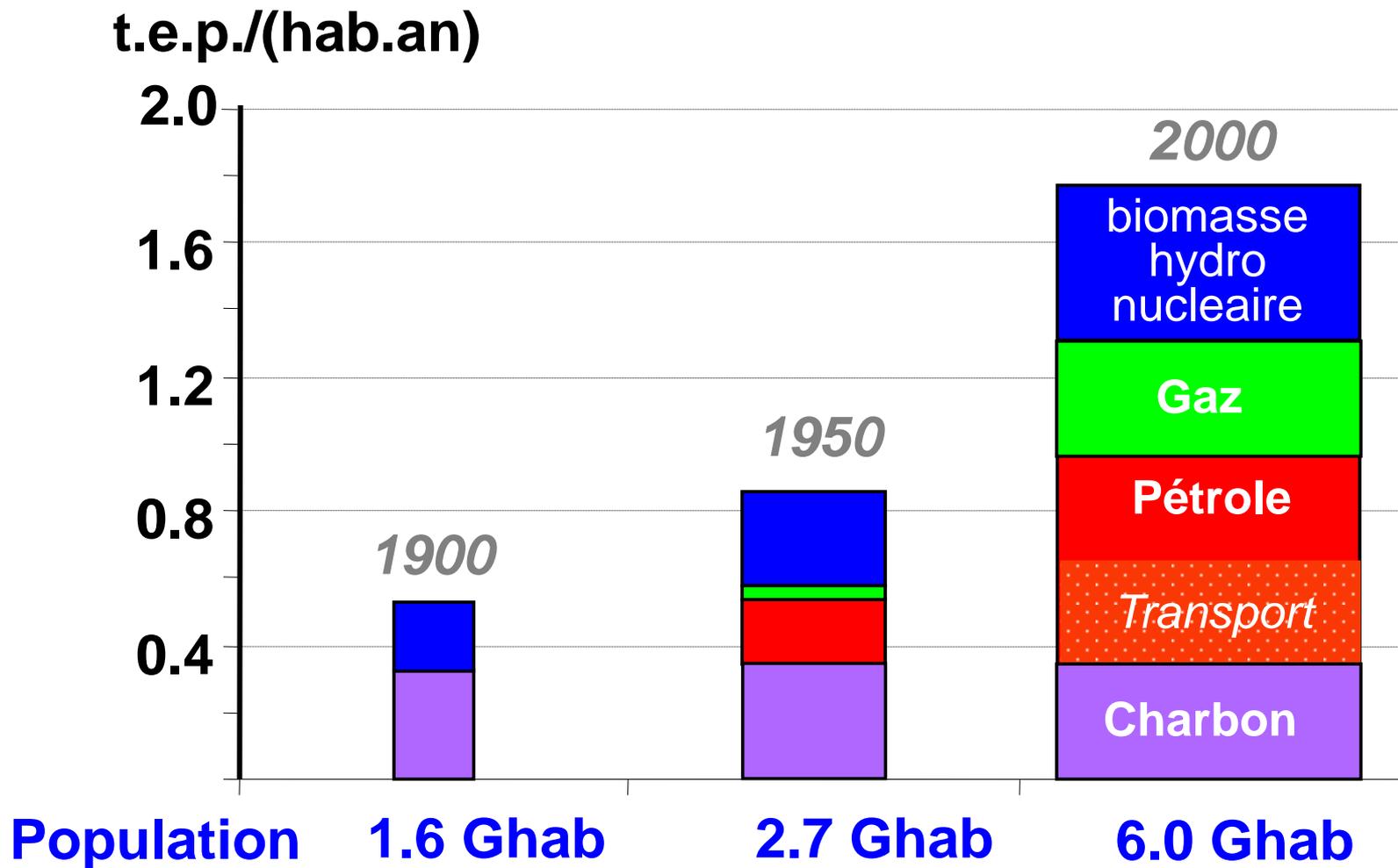


Consommations Implicites

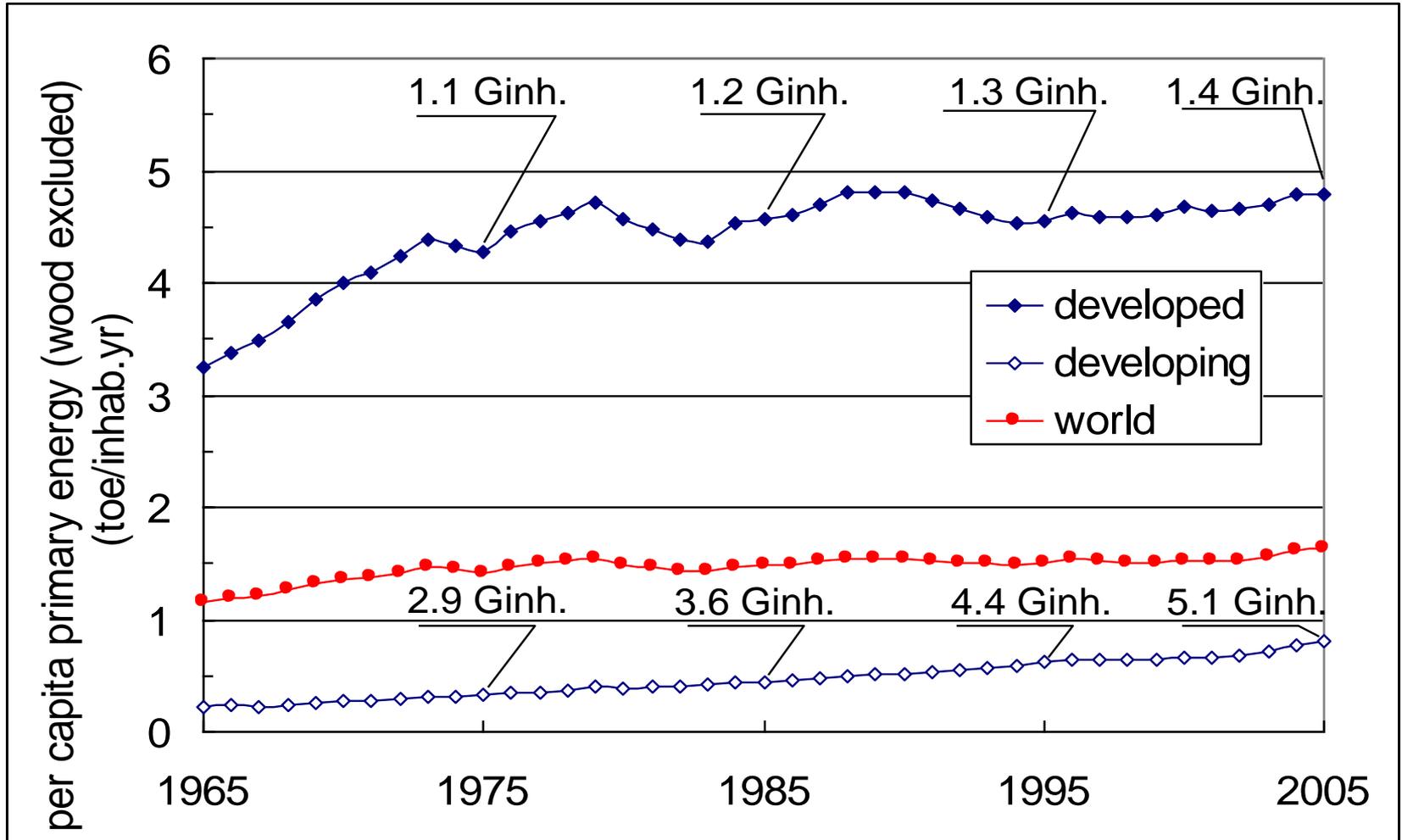
Alimentaire (ingestion)
130 W/hab

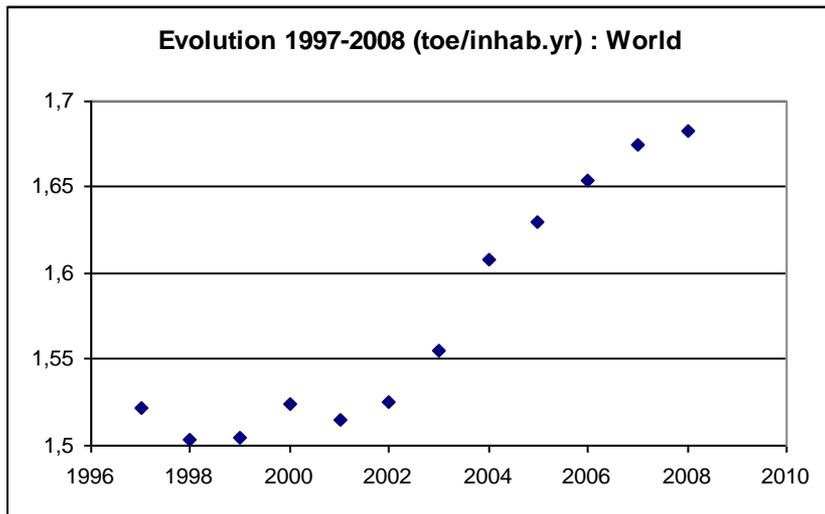
Energie explicite
2 500 W/hab

1900 - 2000 : une croissance forte, par habitant



Depuis 1973, une stabilisation, par habitant

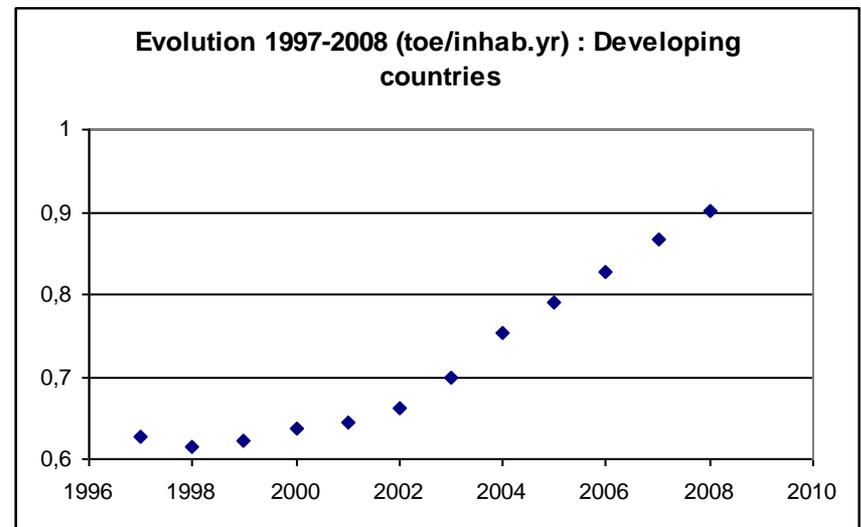
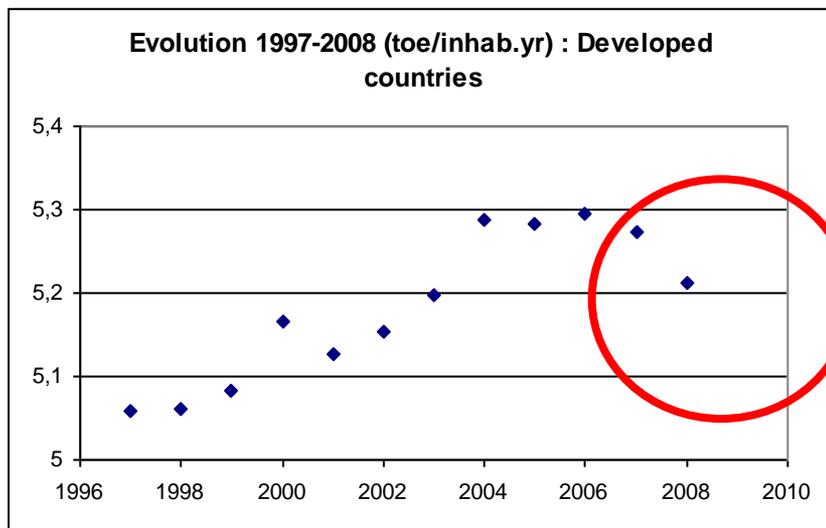




Attention !

**Une légère reprise
de la Consommation
Individuelle moyenne,
depuis 2002...**

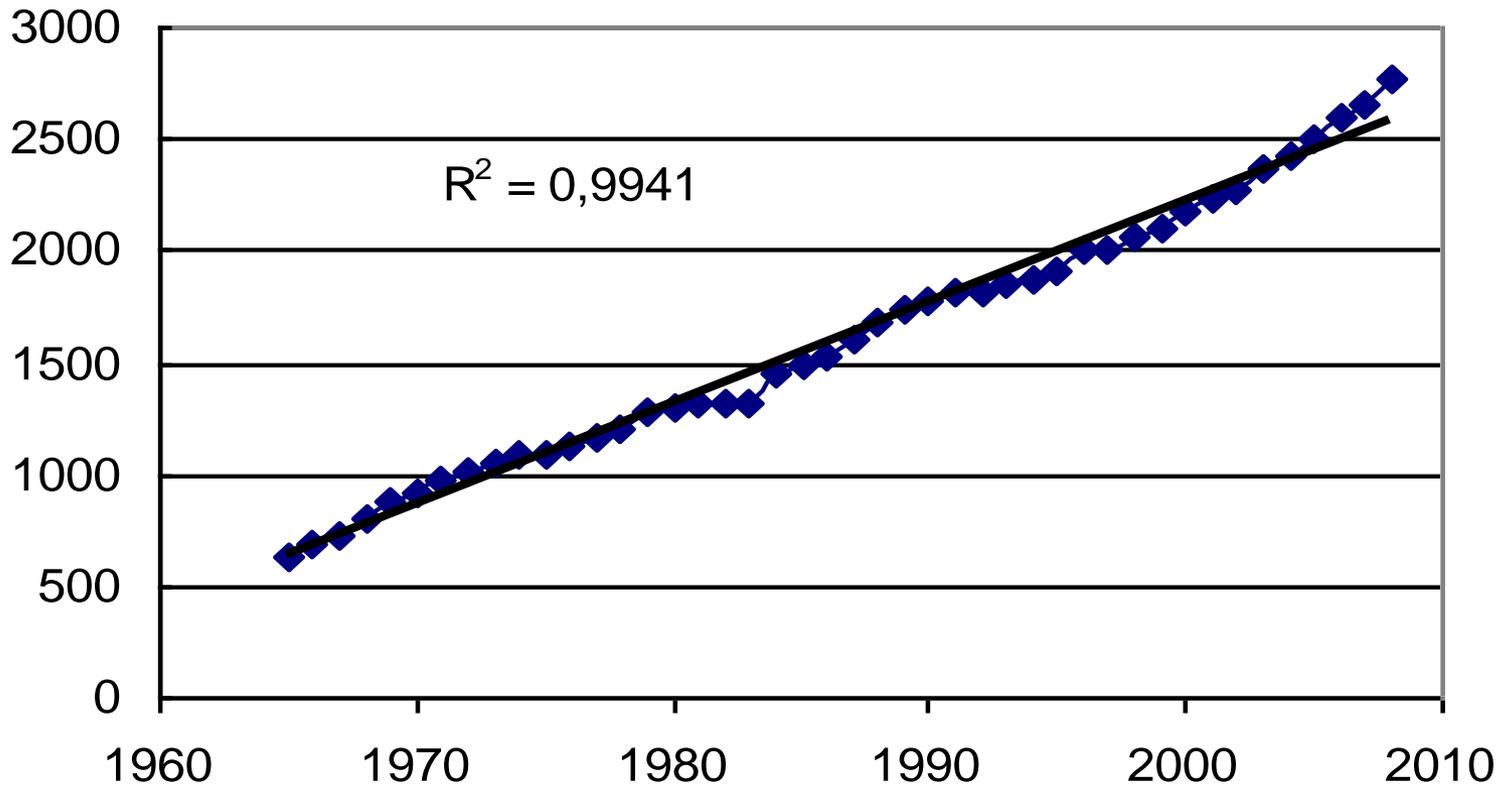
(et la Crise ?)



Une grande stabilité globale, en proportions relatives....

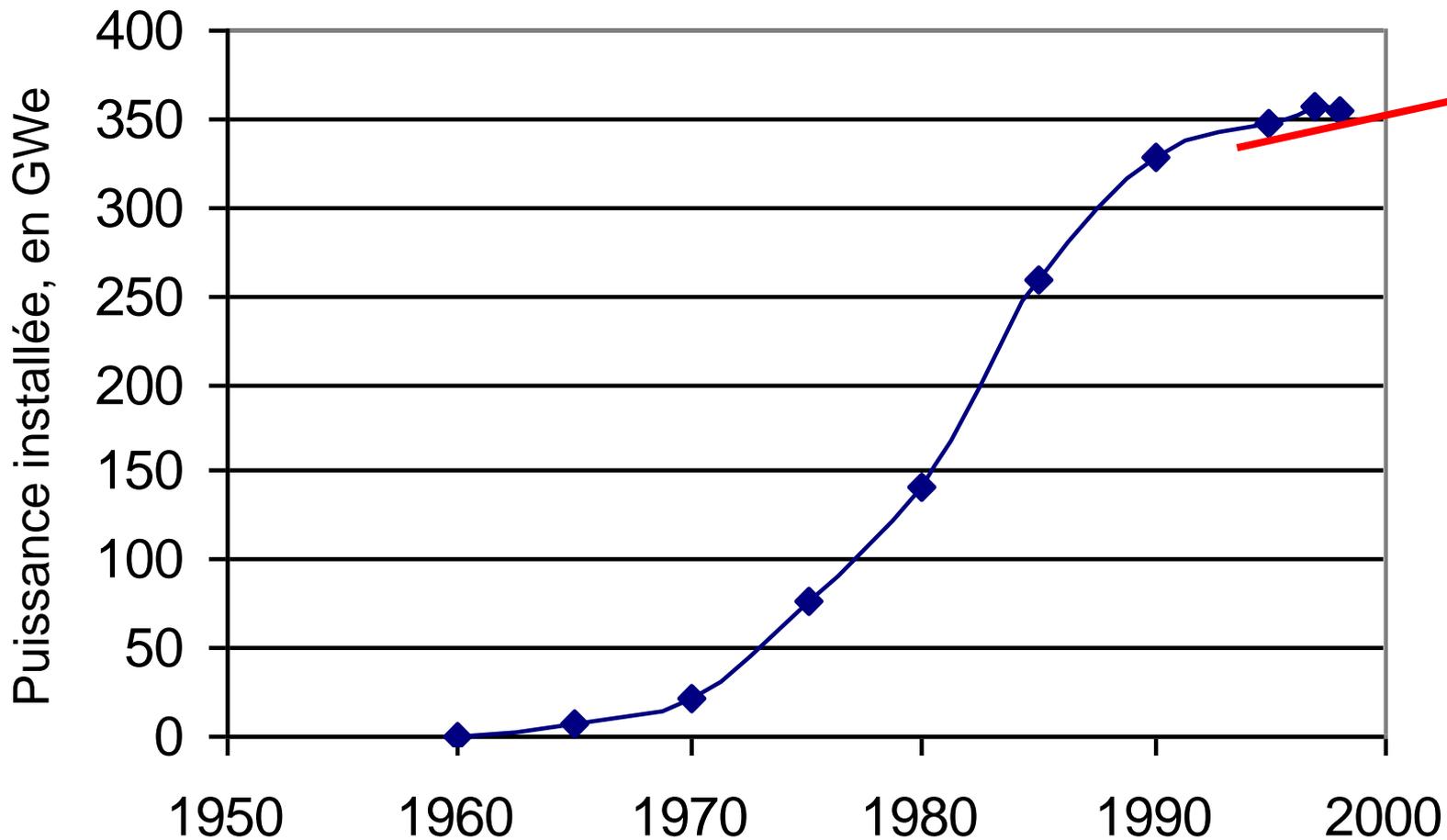
- Les **combustibles carbonés** : charbon, pétrole, gaz
 $C(+H_x)$ $-CH_2-$ CH_4
(combustion complète CO_2 et H_2O)
- **Charbon** : plusieurs siècles de réserves,
- **Pétrole** : réserves sensiblement comparables au gaz (une cinquantaine d'années ; non compris sables bitumineux, extraction gisements très complexes, schistes bitumineux...),
- Montée régulière, en proportion du **gaz naturel**, « le moins carboné des carbonés » (environ 50 ans de réserves ; réserves ultimes 4 à 5 fois plus environ). A voir, **les gaz de schistes**,
- Rôle privilégié du pétrole pour les **TRANSPORTS**,
- *Stabilisation du **nucléaire***, à environ 600 Mtep/an (500 unités dans le monde ; montée en puissance de 1960 - 1000 MW - , à 1995 - 350000 MWe -).

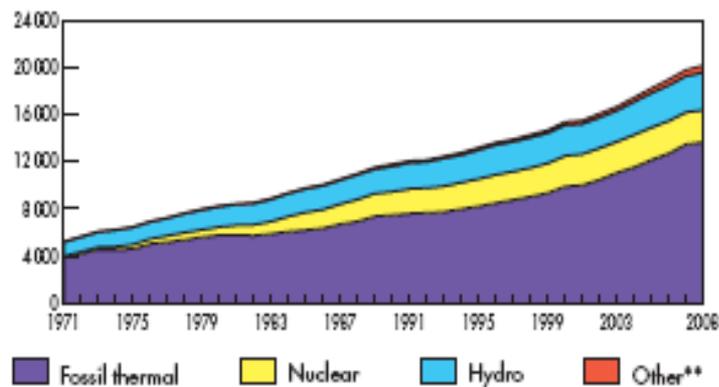
Consommation mondiale de gaz naturel (Mtep/an)



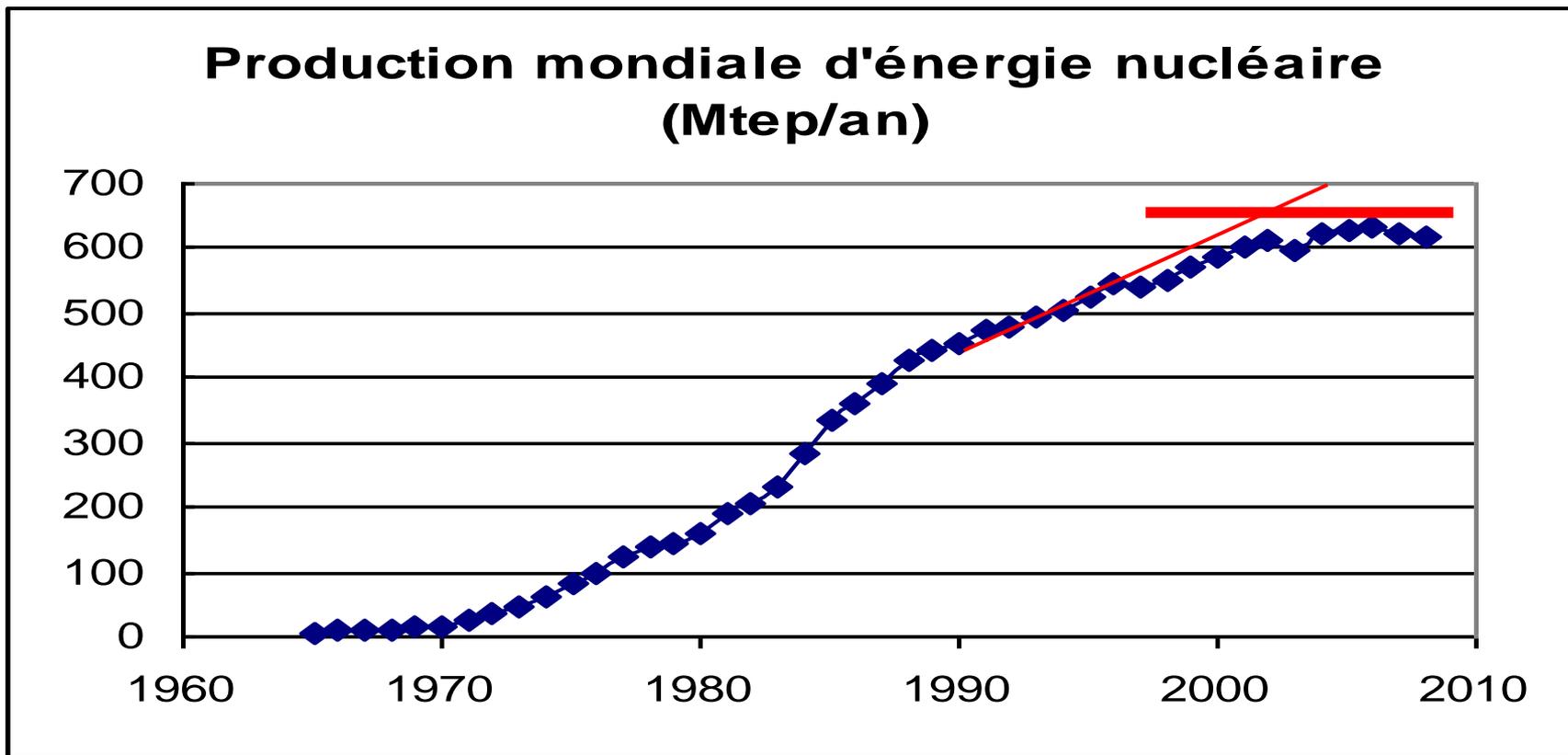
1965 - 2008

Le nucléaire dans le monde





Avant Fukushima !
 et après : un « nuclear peak »
 comme le « peak oil » ?



[Rendement conversion électricité/tep : 38 %]

- Quelles populations demain ?
- Quel « bouquet énergétique » ?
 - Les besoins en énergie, implicites et explicites
 - L'actuel bouquet énergétique
- **Quelles actions à court et long termes ?**
 - Le court terme, un enjeu essentiel**
 - Une démarche complémentaire « nouvelle »
 - L'énergie solaire, quelques chiffres
 - Les renouvelables : quelles voies ?
- Quels environnements ?
 - Des contraintes, ou « il n'y a pas que l'énergie »
- En guise de conclusion....
 - 2200 : le bouquet des renouvelables
 - Et tout le reste....

Puissance supplémentaire à installer, chaque jour !

$\cong 200000 \cdot 1,5 \cdot 1400$ soit > 400 MW **en continu**, soit presque

**600 à 1000 MW de puissance nominale réelle
supplémentaire à installer chaque jour**

pour plus de 20000 « tranches virtuelles », en continu, déjà en place

**D'où le rôle important, dans l'urgence,
des combustibles carbonés**
(malgré les problèmes de réserves et d'effet de serre,....),
mais aussi « faire feu de tout bois »,
avec, au premier rang de tout, les **économies d'énergie**

- Démarche née dans le **Nord de l'Europe** (Danemark, Norvège,...)
- Les activités humaines diverses doivent être considérées comme des éléments d'un **systeme vivant** (d'où le nom « écologie »)
- L'application à des activités industrielles met l'accent sur tous les **flux échangés**, entre entreprises, lorsque, sur le point étudié, il n'y a pas de problème de concurrence (ex : sur une zone industrielle)
- On fait alors une **« optimisation globale »** (dans le cas, par exemple, des réseaux d'électricité)

Approches intégrées

Analyses des cycles de vie

- Analyser de la manière **la plus exhaustive** l'histoire d'un composé chimique, d'un élément particulier, d'un système, depuis sa «**naissance**», jusqu'à sa «**mort**» (?)
(recyclage, combustion,..)
Exemple : en nucléaire, stockage des déchets, mais aussi démantèlement !!!
- Ne pas perdre de vue tous les autres éléments matériels, énergétiques, mobilisés par le procédé et leur poids dans les produits
- Faire aussi des **analyses de vie comparatives**
(e.g. cultures vs forêts) en multicritères !

Approches Intégrées

« feu de tout bois »

un challenge, le développement de la **géothermie** :

☺ les projets en balnéothérapie

(l'hôtel Oktor, à Korbous, 2009-2010)

☺ le refroidissement d'eau chaude géothermique à

El Hamma

(près Tozeur),

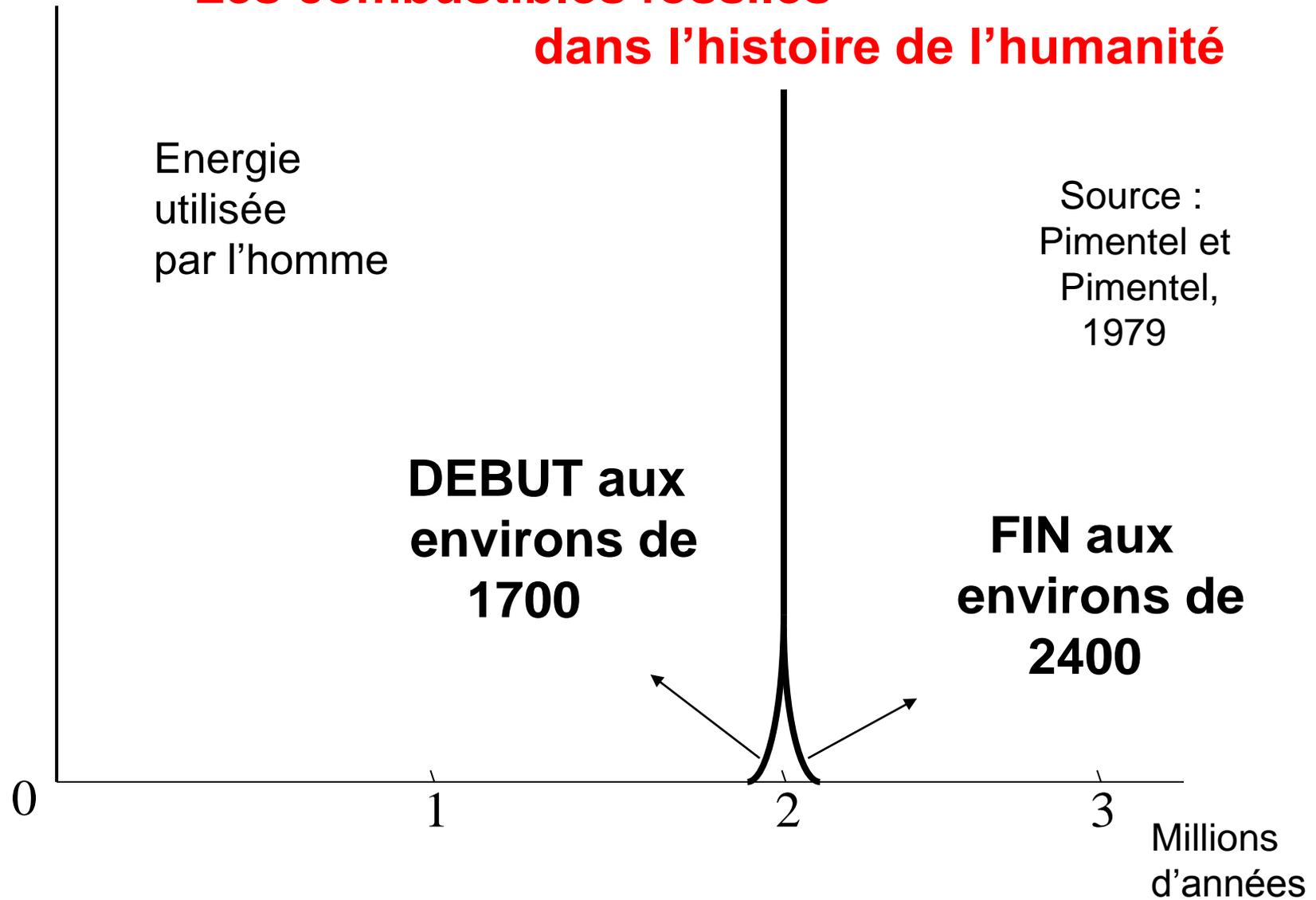
quel usage

pour ces

« calories » ??

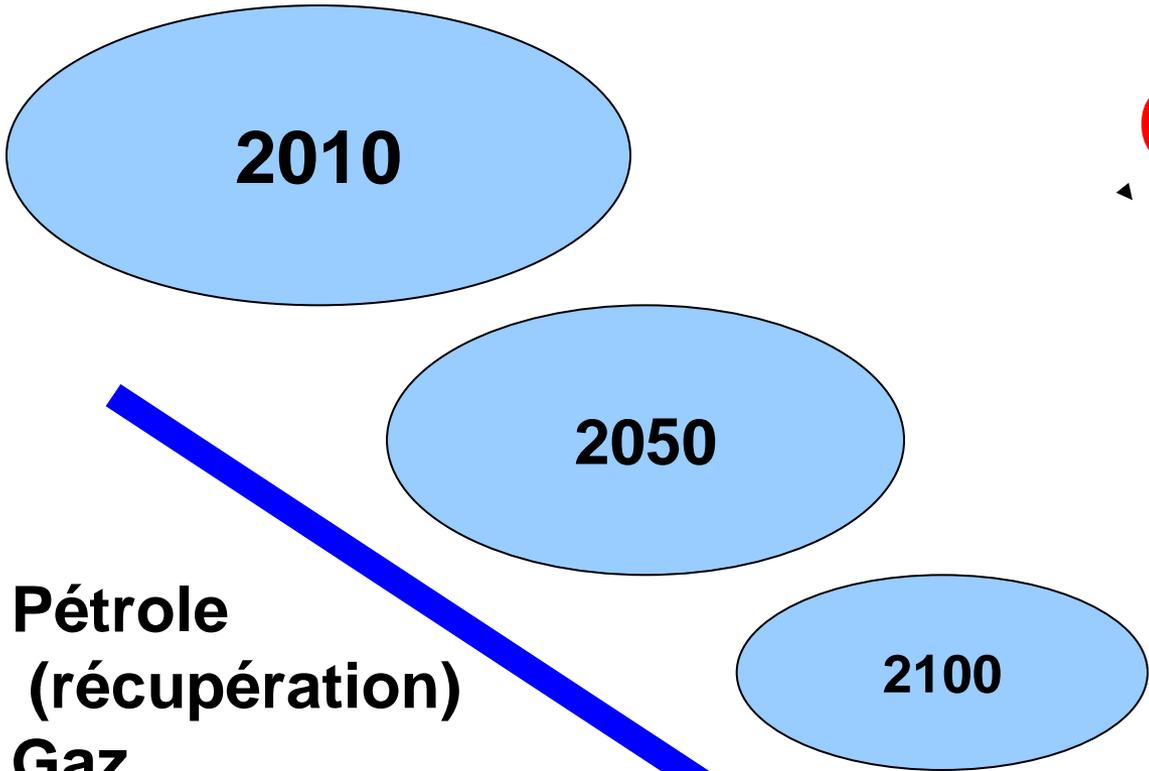


Les combustibles fossiles dans l'histoire de l'humanité



- Quelles populations demain ?
- Quel « bouquet énergétique » ?
 - Les besoins en énergie, implicites et explicites
 - L'actuel bouquet énergétique
- **Quelles actions à court et long termes ?**
 - Le court terme, un enjeu essentiel
 - Une démarche complémentaire « nouvelle »**
 - L'énergie solaire, quelques chiffres**
 - Les renouvelables : quelles voies ?
- Quels environnements ?
 - Des contraintes, ou « il n'y a pas que l'énergie »
- En guise de conclusion....
 - 2200 : le bouquet des renouvelables
 - Et tout le reste....

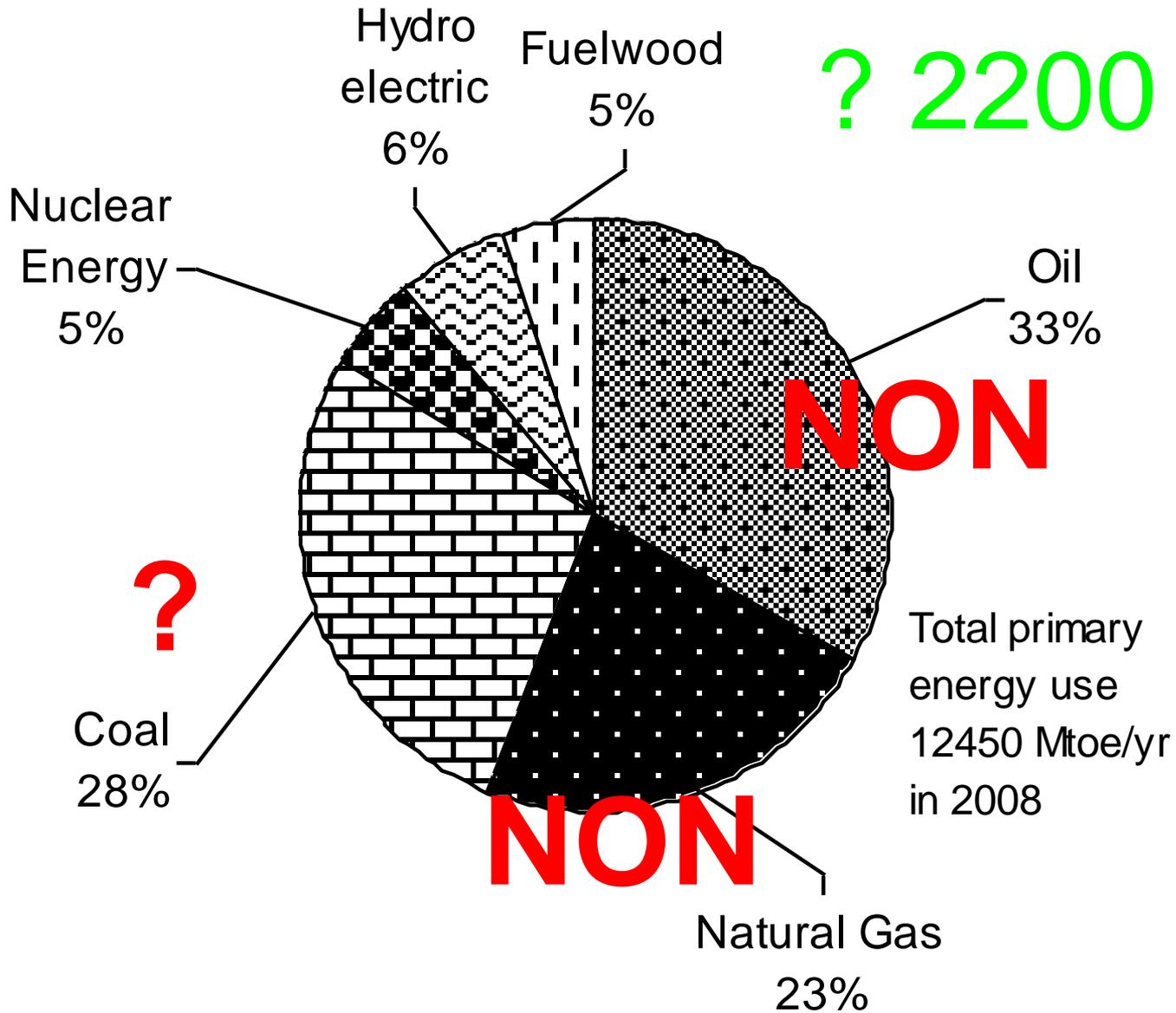
Quel futur ?



- Pétrole (récupération)**
- Gaz**
- Nucléaire fission**
- Biocarburants**
- Hydrogène par nucléaire.....**
- Nucléaire fusion**

?





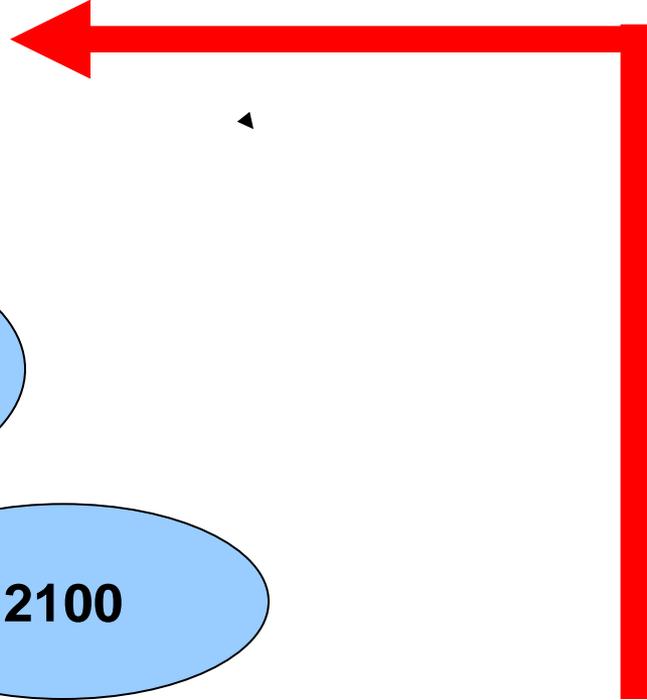
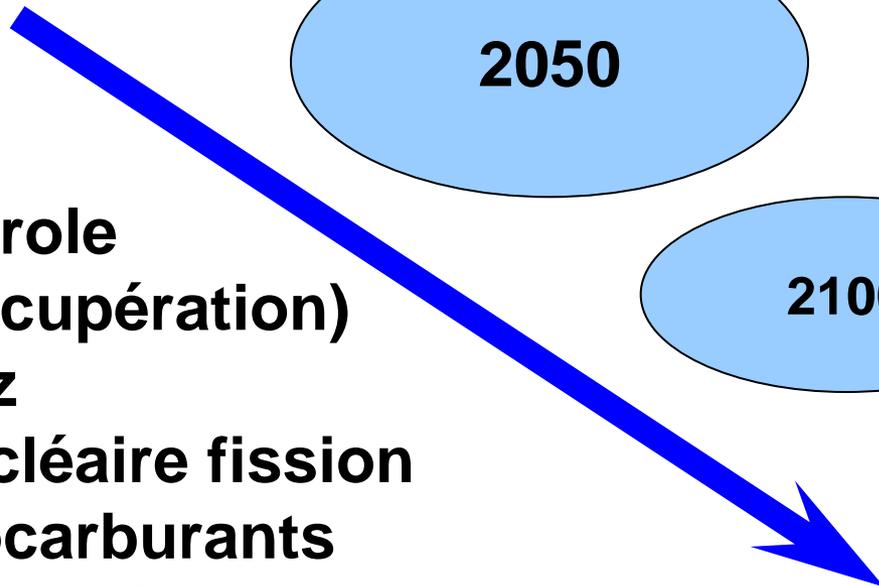
2010

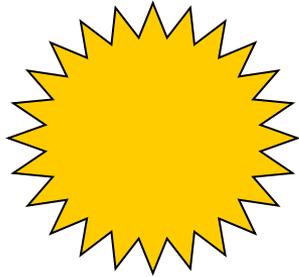
2050

2100

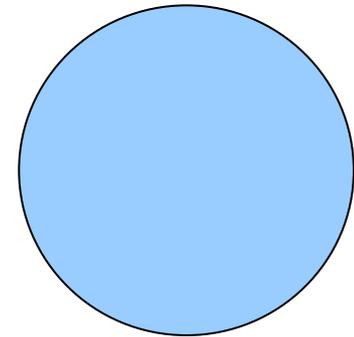
? 2200 ?

- Pétrole (récupération)**
- Gaz**
- Nucléaire fission**
- Biocarburants**
- Hydrogène par nucléaire.....**
- Nucléaire fusion**





Constante solaire
1370 W/m²



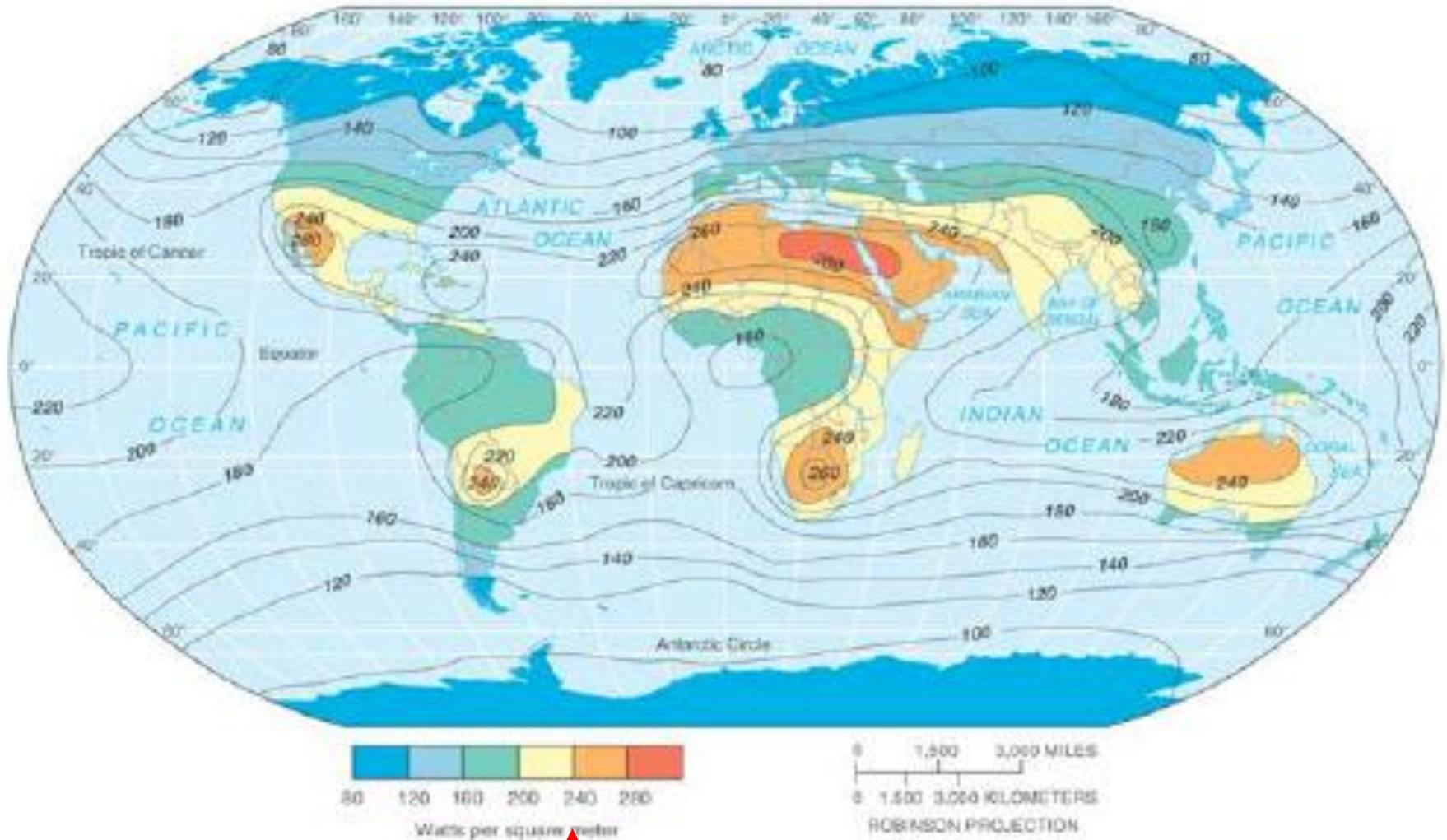
Rayonnement solaire diffusé vers l'extérieur de la Terre
(réflexion « optique » et diffusions diverses)
Le reste « absorbé » par le système « S.T.A. »
(Surface Terrestre Atmosphère)

Variations de la constante solaire :

- Annuelles, dues à l'orbite terrestre, de 1320 W/m² l'été (Hémi. Nord, 152 Mkm) à 1420 l'hiver (147 Mkm) soit 3,3 % vs la moyenne,
- Période de 11 ans, variations d'environ 0,1 % de la constante solaire,
-

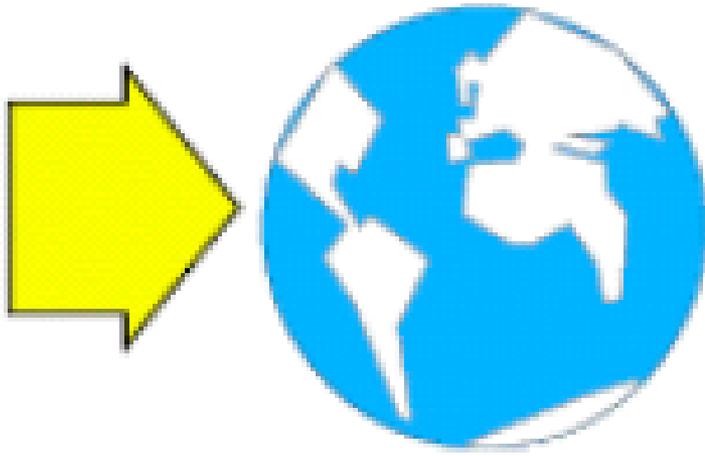
Rayon de la Terre : **6370 km**

Ensoleillement au sol (moyenne sur 24 heures)



↑ **240 W/m²**

[au sol : ~ 2000 kWh/m².an]



Base Juin 2009 : 6,8 Ghab

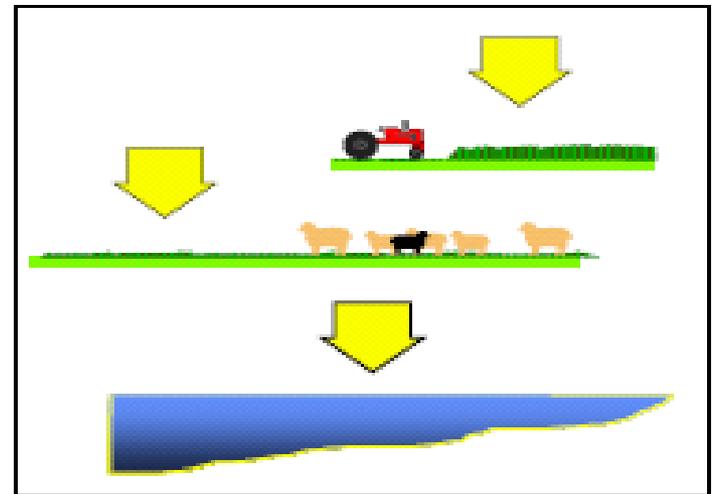


Consommations explicites (2008) :
12,4 Gtep/an (sans biomasses)
Soit, environ 2500 W/hab

Alimentaire (ingestion)
130 W/hab

Energie explicite
2 500 W/hab

Du Soleil (albédo déduit)
18 000 000 W/hab



Consommations Implicites

- Quelles populations demain ?
- Quel « bouquet énergétique » ?
 - Les besoins en énergie, implicites et explicites
 - L'actuel bouquet énergétique
- **Quelles actions à court et long termes ?**
 - Le court terme, un enjeu essentiel
 - Une démarche complémentaire « nouvelle »
 - L'énergie solaire, quelques chiffres
 - Les renouvelables : quelles voies ?**
- Quels environnements ?
 - Des contraintes, ou « il n'y a pas que l'énergie »
- En guise de conclusion....
 - 2200 : le bouquet des renouvelables
 - Et tout le reste....

Le bouquet des « énergies renouvelables »

- (en général d'origine solaire, parfois indirecte) :

- ☺ **Solaire thermique** (diffus et concentré),

- ☺ **Photovoltaïque**,

- ☺ **Solaire thermodynamique** (concentré),

Hydraulique (500 Mtep/an, en 2005),

Courants (hydroliennes), Houle,

Eoliennes (>> 100 Mtep/an, 2010),

Biomasses végétales (et donc animales) :

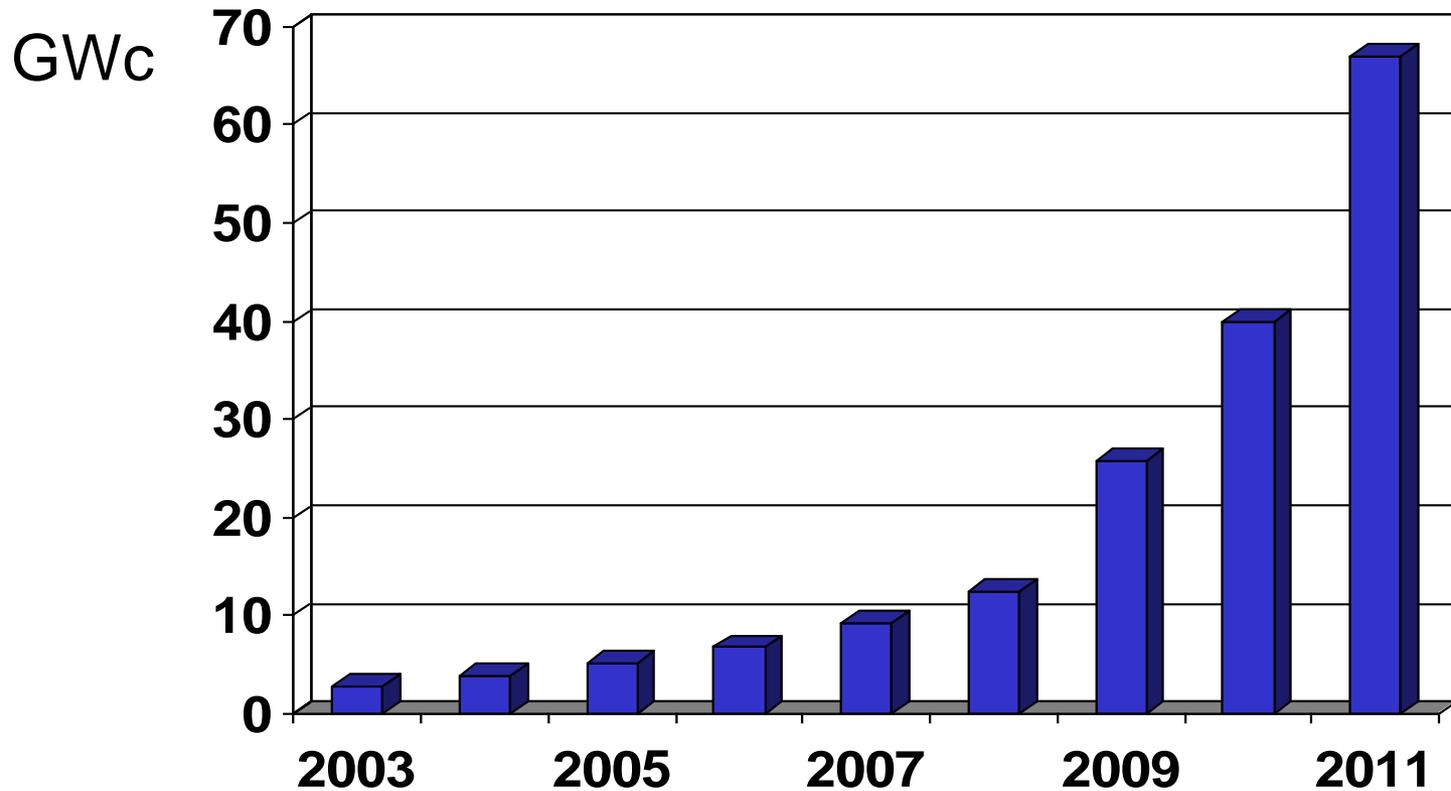
bois et charbon de bois (400 Mtep/an, 2005),

déchets de biomasses, biocarburants

- De plus : Marées - **Géothermie** (thermique, électrique)

Puissance photovoltaïque installée dans le monde

La plus forte croissance relative
des différentes formes d'énergie

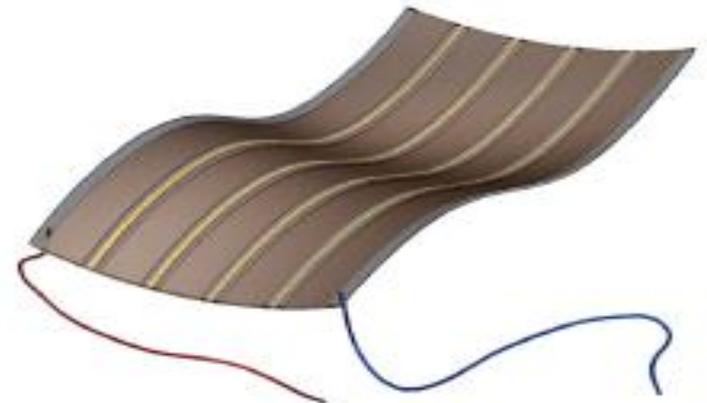


Source : AIE

Dans le monde, des projets nombreux, souvent de plus de 100 MW
(la plus importante en 2011, Samia au Canada, 80 MW, 365 ha)



Panneau flexible
– substrat de polymère –
Kornarka Inc., USA, Dubrovnik 2006





Toit avec une très grande
surface recouverte,
Projet du CSIRO
Australie
(Sustainable
Technologies
International Ltd,
Dubrovnik 2006)

- **Le 8 septembre 2009, la Chine a signé, avec First Solar, pour un projet de centrale, en Mongolie Intérieure, au Nord de la Chine, de 2 GW (2000 MW)**
- **Le 30 janvier 2010, annonce d'un projet japonais avec le Maroc pour une centrale 1 MW, la plus grande en Afrique, à Assa-Zag (5000 foyers).**

Le solaire « en direct » : thermique, thermodynamique...

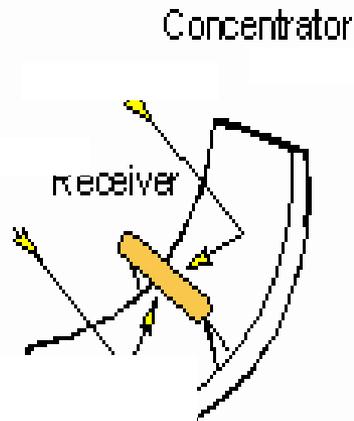
« Captation » du rayonnement solaire :

- **Thermique**, tel quel pour des **serres** de types variés, soit par des **capteurs plans**,
- **Thermodynamique**, par des **systèmes à concentration** :
 - ☺ systèmes paraboliques, cylindro-paraboliques, avec chauffage de fluide caloporteur, pour utilisation directe ou **production d'électricité**,
 - ☺ **tours** à concentration (Odeillo en F,..)

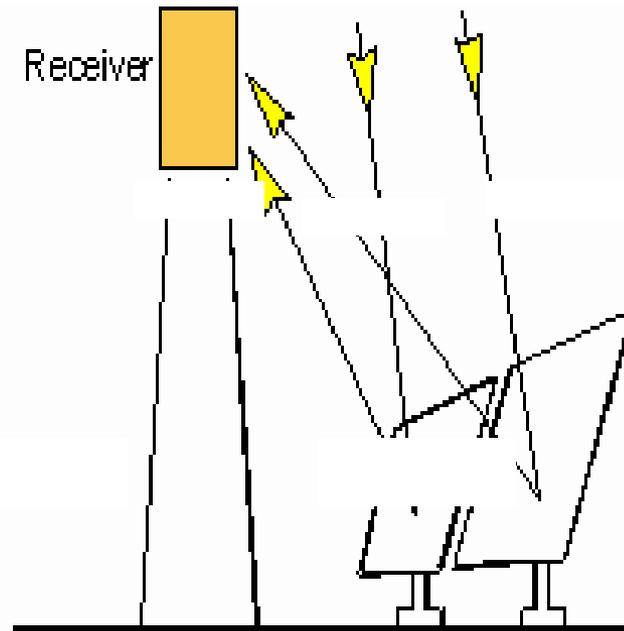
Le solaire « en direct », **avec concentration** :

Les trois types principaux de systèmes

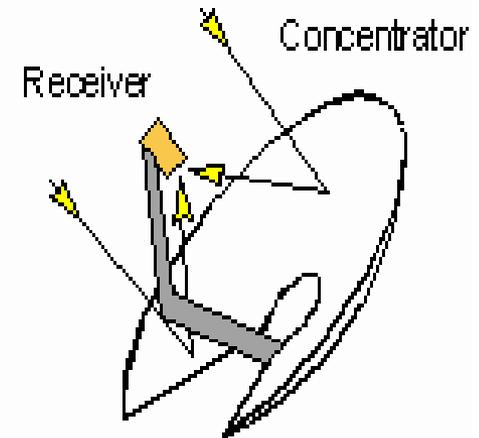
(on peut y ajouter les réflecteurs de Fresnel)



Parabolic Trough
Concentrator



Central Receiver
Concentrator



Parabolic Dish
Concentrator

Odeillo, France
Séville (2), Espagne

Capteur cylindro-parabolique



Kramer Junction (Californie)

- 5 SEGS (Solar Electric Generating System)
chacun de 30 MW
- Concentration de 30 à 100 fois
- Dans l'axe des miroirs : tubes métalliques avec une enveloppe de verre (vide entre les deux)
- Le fluide chauffé ($\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) : une huile synthétique
- **Stockage qui permet une production continue (24 h.)**
- Un système d'échangeurs pour la production de vapeur
- De nombreux projets existent, souvent plus puissants (Etats-Unis, Maghreb, Israël,...)

Centrale solaire de Kramer Junction, en Californie (150 MWe)



Gemasolar (Andalousie)

- 2650 miroirs héliostats, orientables, de 120 m² chacun
- Au sommet de la tour, chauffage du fluide de travail (8500 tonnes d'un mélange nitrate de potassium et nitrate de sodium), de 290°C à 565°C
- **Stockage du sel fondu qui permet une production continue (24 h.) – 15 heures de restitution -**
- Un système d'échangeurs classique pour production de vapeur en amont du couple turbine/alternateur
- 40% Masdar (Abou Dhabi) et 60% Sener (Espagne)
- Inaugurée le 4 octobre 2011

Puissance : 19,9 MW



Surface totale : 195 hectares (environ 2 km²)



La tour a une hauteur de 140 m



From Dubrovnik 23-25 sept.
2006
(G. van Kuik, Delft University)

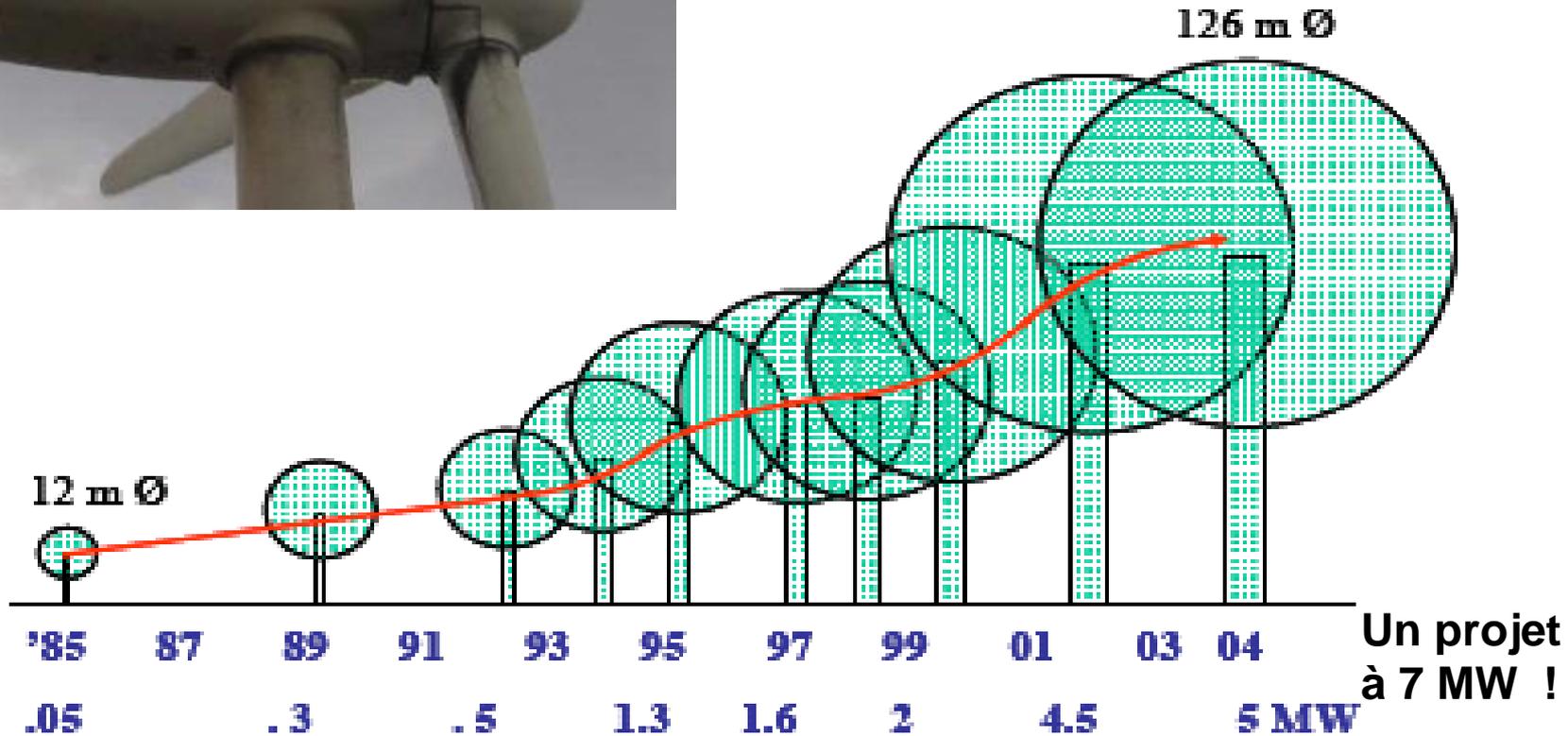
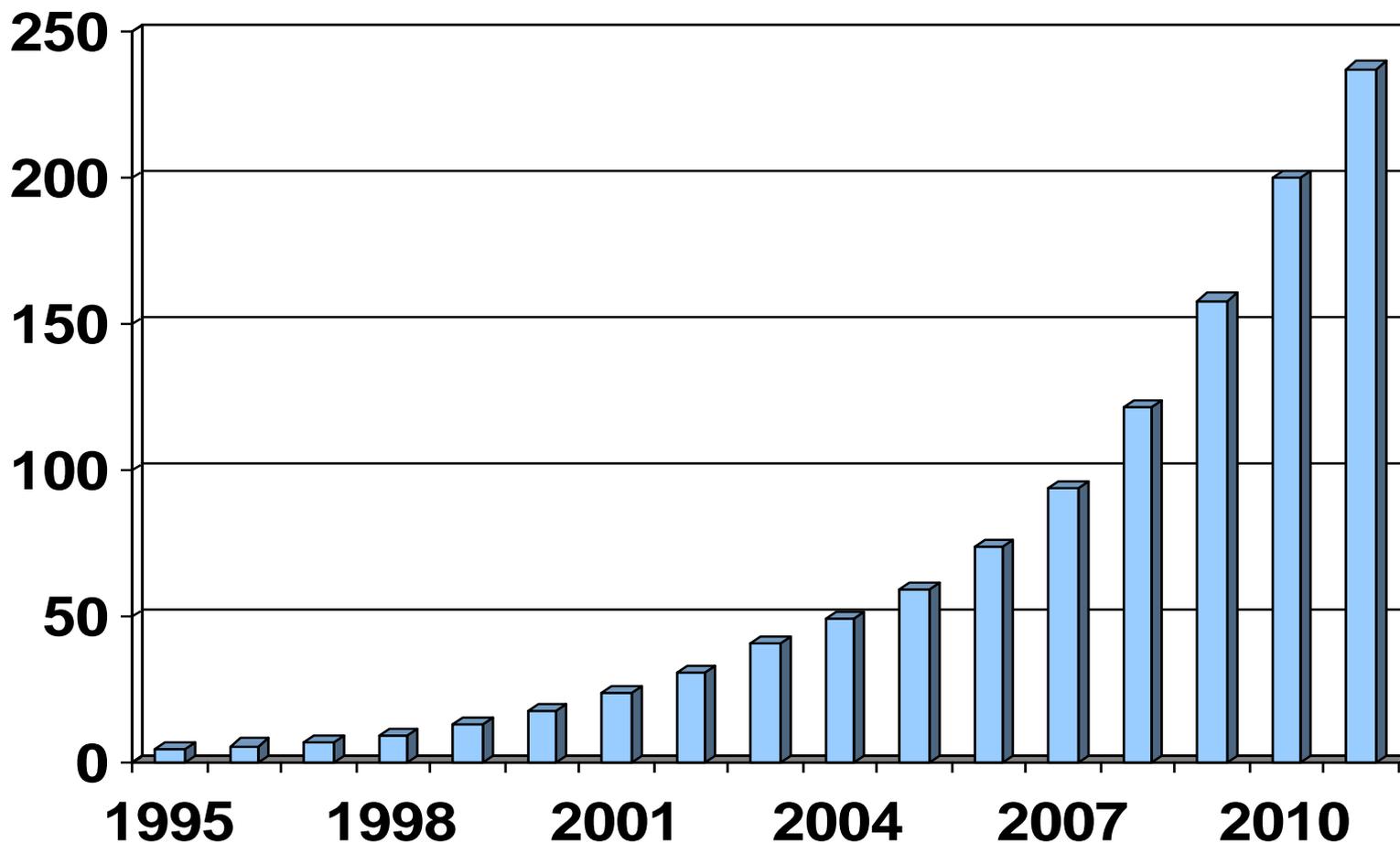


Figure 2: the development of wind turbine size

Plus de 30 compagnies dans le monde fabriquent ce type d'éoliennes

Energie éolienne : Puissance installée dans le monde Evolution de 1995 à 2011, en GW



Prévisions : 420 en 2014

(environ 140 réacteurs nucléaires !)

Source : www.thewindpower.net

Sidi Daoud (Tunisie)



32 AE 32, 10 AE 46, 1 AE 52 et 1 AE 61 [« AE n » : n Ø en m]

- L'avenir,
l'éolien en mer :**
- **vents plus réguliers**
 - **contraintes différentes**



Production d'électricité par géothermie



Kenya
(Olkaria)

Photo
AFD

Inauguration
23 juillet 2012

Au Nord-Ouest de Nairobi, des sources d'eau chaude à 300°C, à 2000 m de profondeur. Deux phases en cours d'un projet de production électrique de 280 MW (Olkaria 1 et 4). A plus long terme objectif de 1700 W par géothermie (dans 10 ans, la consommation du Kenya, actuellement de 1000 MW, pourrait atteindre 2000 MW).

NB. En Italie Larderello (Toscane), dès 1904 (!) : actuellement 550 MW

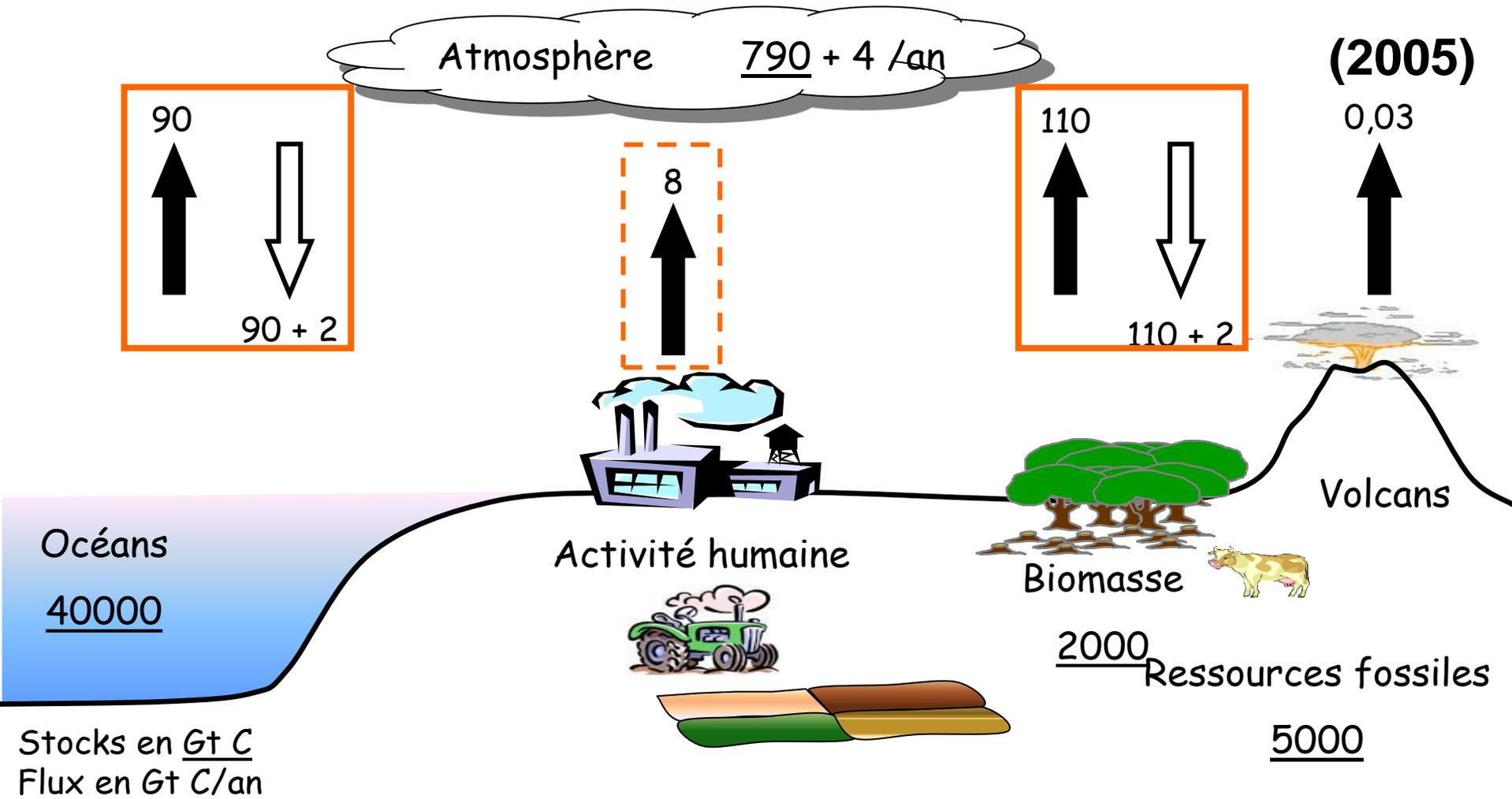
- Quelles populations demain ?
- Quel « bouquet énergétique » ?
 - Les besoins en énergie, implicites et explicites**
 - L'actuel bouquet énergétique**
- Quelles actions à court et long termes ?
 - Le court terme, un enjeu essentiel**
 - Une démarche complémentaire « nouvelle »**
 - L'énergie solaire, quelques chiffres**
 - Les renouvelables : quelles voies ?**
- **Quels environnements ?**
 - Des contraintes, ou « il n'y a pas que l'énergie »**
- En guise de conclusion....
 - 2200 : le bouquet des renouvelables**
 - Et tout le reste....**

Et l'eau dans tout cela ...



Environs de Chenini (sud tunisien)

Cycle du carbone dans le système STA

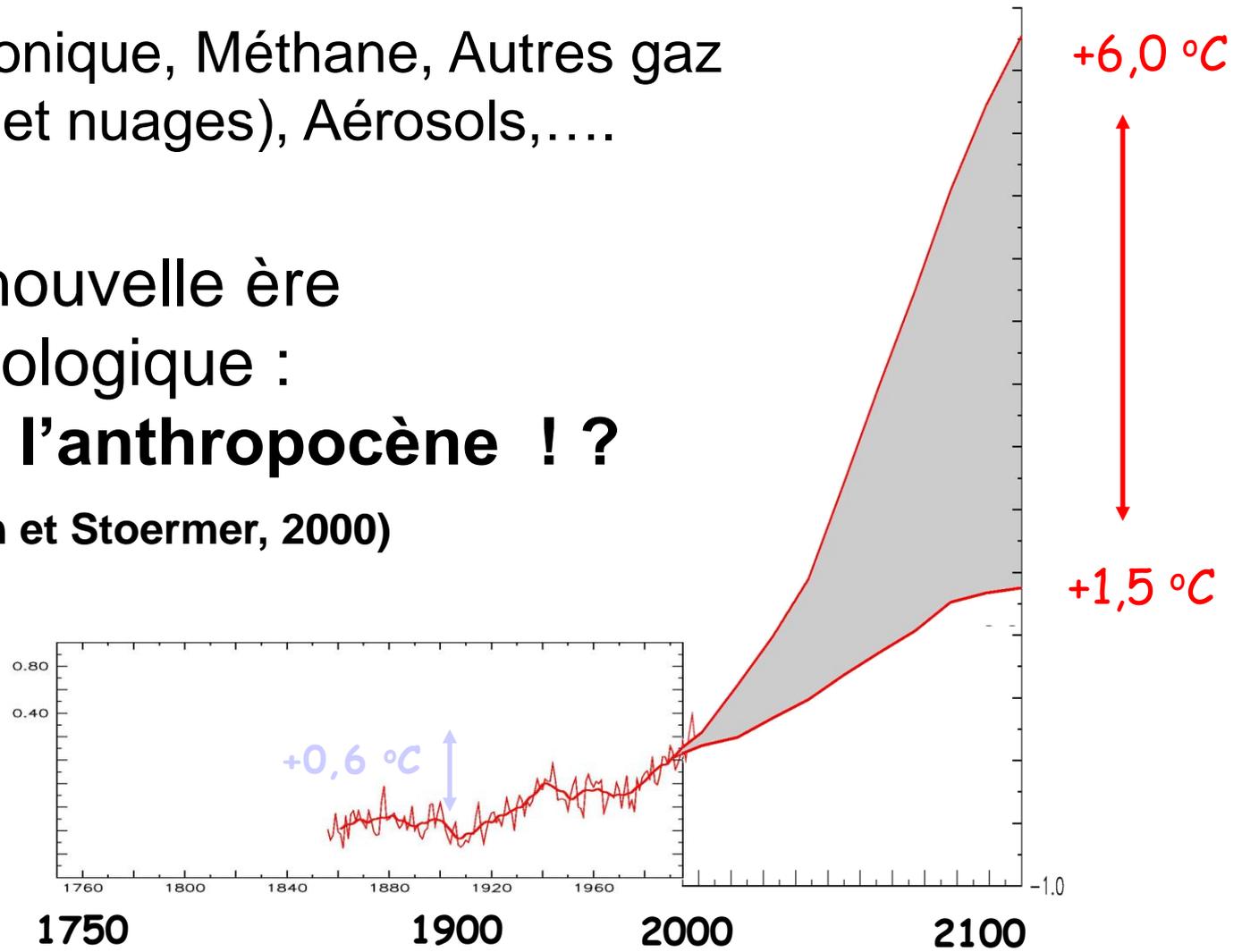


Température de surface (°C)

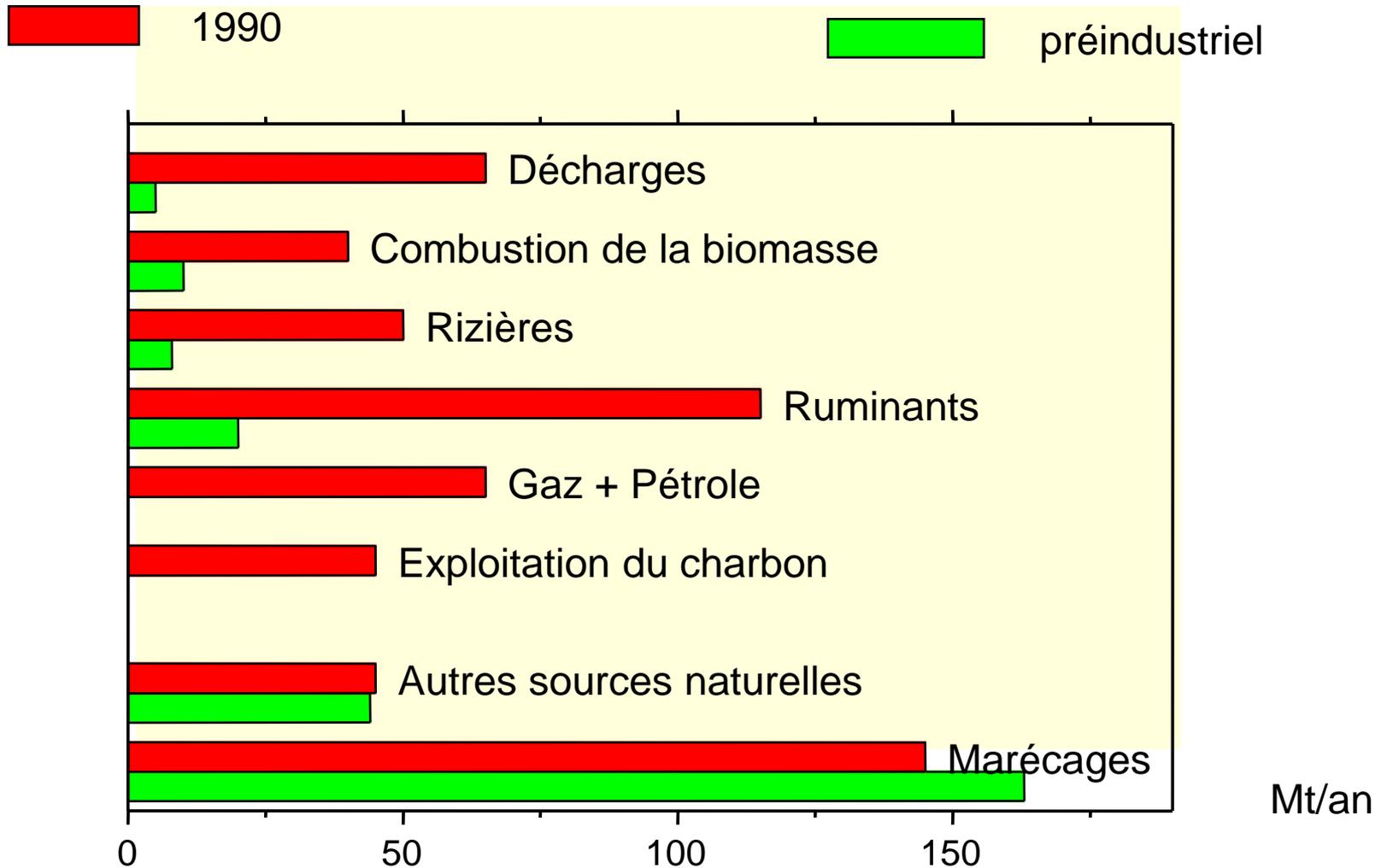
Gaz carbonique, Méthane, Autres gaz
Eau (gaz et nuages), Aérosols,....

Une nouvelle ère
géologique :
l'anthropocène ! ?

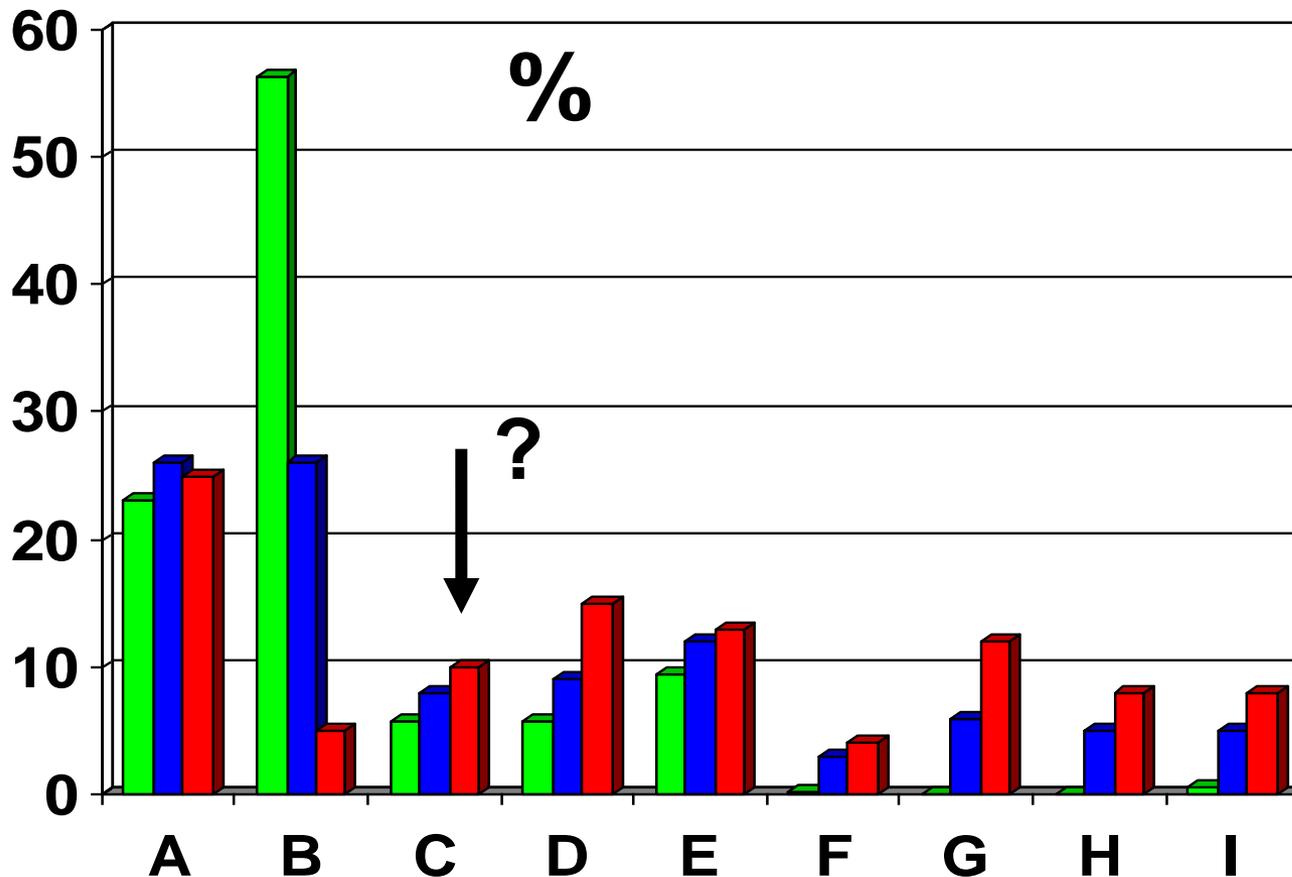
(Crutzen et Stoermer, 2000)



Sources de méthane : 250 Mt/an à 590 Mt/an



- Quelles populations demain ?
- Quel « bouquet énergétique » ?
 - Les besoins en énergie, implicites et explicites
 - L'actuel bouquet énergétique
- Quelles actions à court et long termes ?
 - Le court terme, un enjeu essentiel
 - Une démarche complémentaire « nouvelle »
 - L'énergie solaire, quelques chiffres
 - Les renouvelables : quelles voies ?
- Quels environnements ?
 - Des contraintes, ou « il n'y a pas que l'énergie »
- **En guise de conclusion....**
 - 2200 : le bouquet des renouvelables**
 - Et tout le reste....**



A – Charbon, B – Pétrole, Gaz, C – Nucléaire (fission, fusion ?),
 D – Hydraulique, **Courants**,... E – Biomasses,..., F – Géothermie,
 G – **Solaires** Thermique et **Thermodynamique**,
 H – **Photovoltaïque**, I - **Eolien**

Le bouquet des « énergies renouvelables »

Solaire thermique (diffus et concentré) @

Photovoltaïque @@@

Solaire thermodynamique (concentré) @@

Hydraulique (500 Mtep/an, en 2005)

Courants (hydroliennes), Houle, @

Eoliennes (>> 100 Mtep/an, 2010), @@@

Biomasses végétales (et donc animales) :

bois et charbon de bois (400 Mtep/an, 2005),

déchets de biomasses, biocarburants @

Géothermie (thermique, électrique) @

Marées

Des actions à court terme, pour le long terme...

- Ne pas revenir sur l'évident : e.g.
les économies d'énergie
- Thèmes de «recherche-développement»
[« les bons et les mauvais chevaux »]
- **Electricité «solaire»** (matériaux, systèmes)
- Pour les renouvelables « soft » : avancer à marches forcées (ex : géothermie, ...).

**Principe d'économie,
principe de précaution**

Parmi les clés...

- Ne pas déplacer les problèmes, e.g. :
 - biocarburants vs alimentation humaine,
 - les stocks limités de matières premières (uranium, platine,...),
 - les perturbations de cycles naturels
- Analyses systémiques, exhaustives et comparatives, du type « cycle de vie »
- L'énergie, un aspect, pas le seul : alimentation, eau, matières premières
- Un ardent impératif : la réduction des inégalités

8,5 milliards sur Terre demain (2030-2050)
eau, santé, alimentation, éducation

michel.combarnous@laposte.net



<http://www.academie-sciences.fr>

Four solaire d'Odeillo (France) – à droite un parabolique –

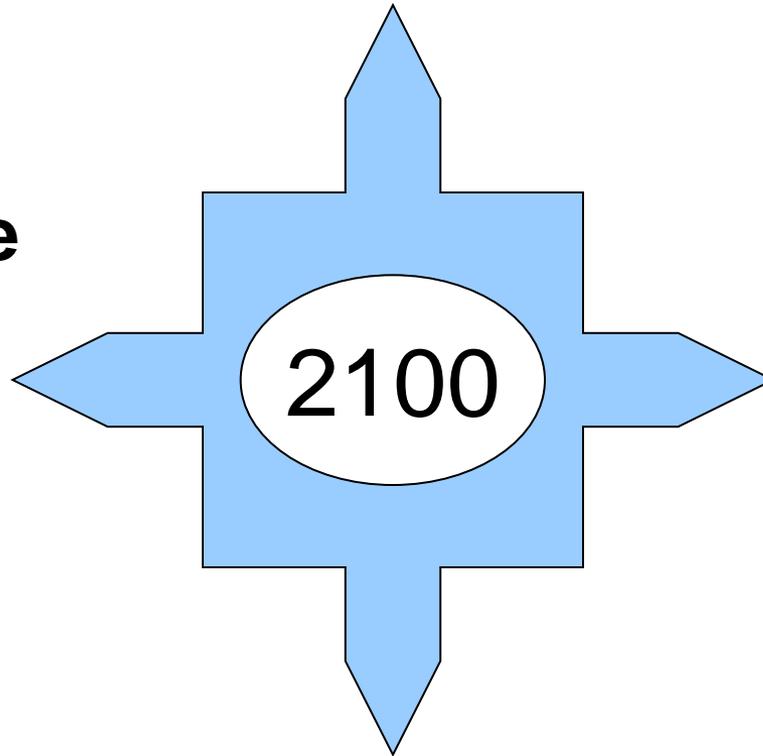


Solaire thermique Solaire photovoltaïque Solaire thermodynamique

Hydraulique

Courants

Eolien



**Bois,
biomasses**

Géothermie

Sources

Charbon

Nucléaire

Gaz (pétrole)

**Solaire
thermique**

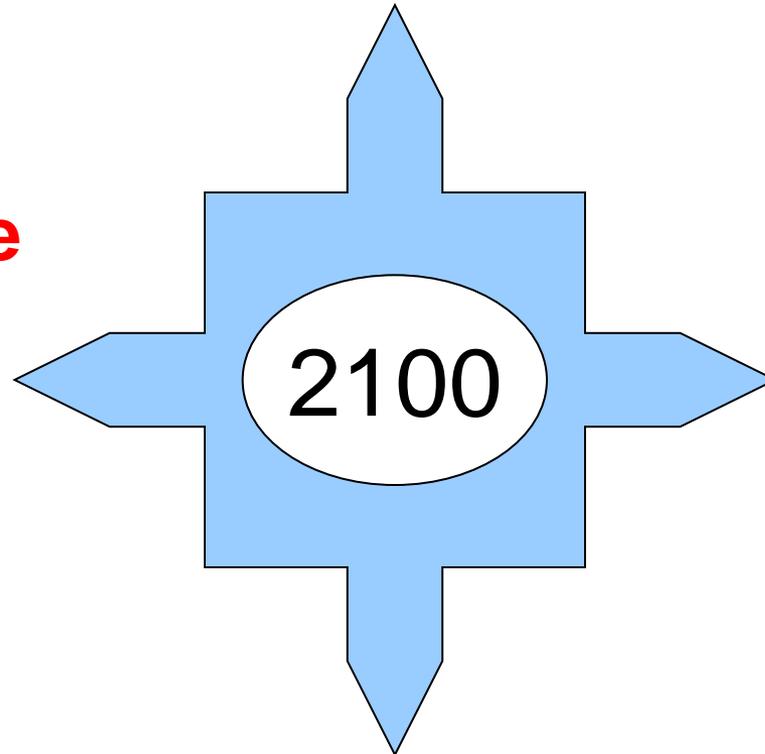
**Solaire
photovoltaïque**

**Solaire
thermodynamique**

Hydraulique

Courants

Eolien



**Bois,
biomasses**

Géothermie

**Vecteur
« électricité »**

Charbon

Nucléaire

Gaz (pétrole)

Les sources et les vecteurs, Oui ! mais pas seulement...

- Toujours, une **longue chaîne**
de la source à l'usage
- D'où l'intérêt d'**approches intégrées** :
 - * « feu de tout bois »
 - * écologie industrielle
 - * analyse des cycles de vie,.....
- L'énergétique un domaine à **forte inertie**
et grands investissements. Donc : « partir tôt » !