

La problématique énergétique mondiale

Hervé Nifenecker

Président d'honneur de « Sauvons le Climat

<http://www.sauvonsleclimat.org>

L'énergie dans le monde: EDP Sciences

L'énergie de demain: EDP Sciences

L'énergie nucléaire a-t-elle un avenir: Le Pommier

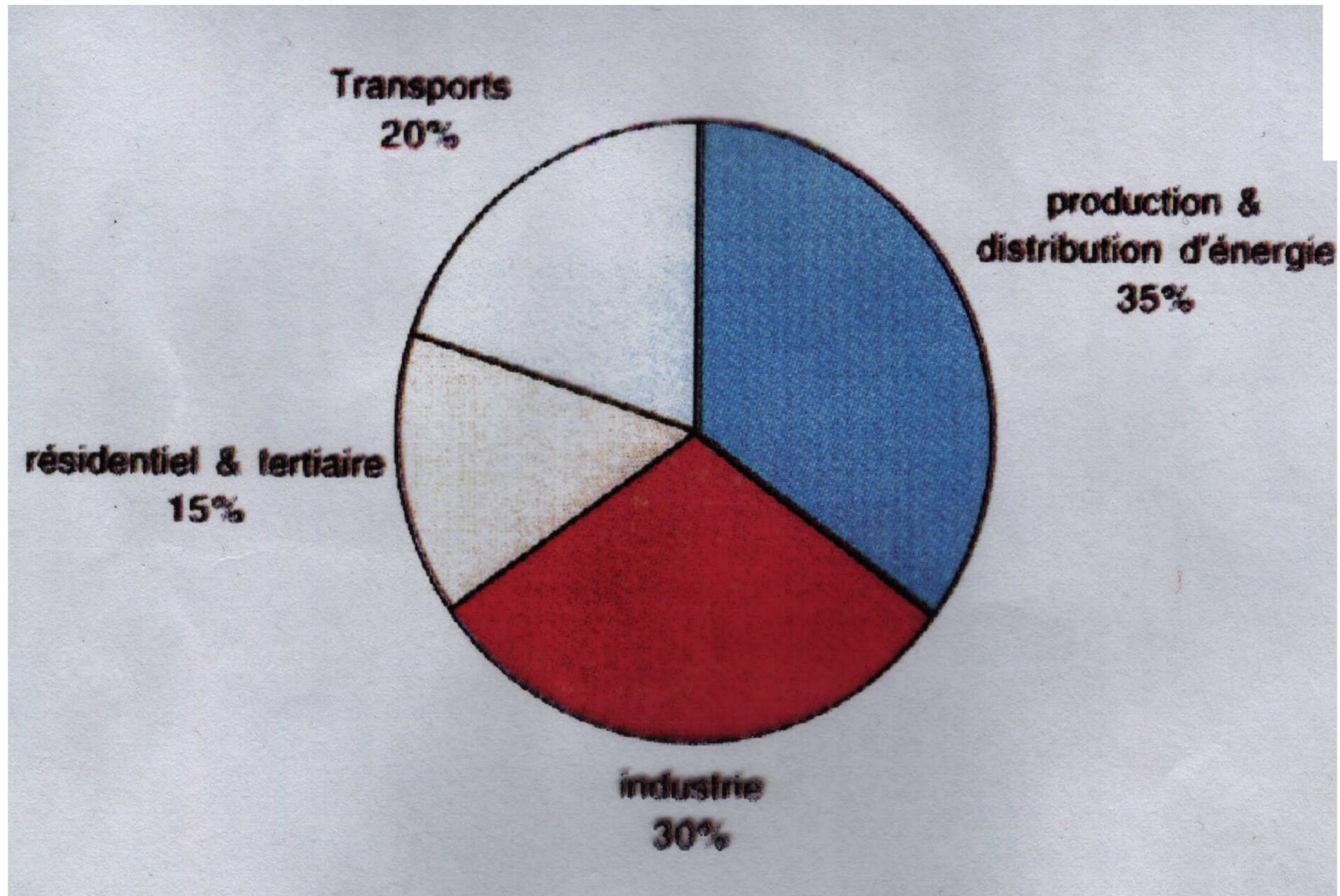
Serons à nous à court d'énergie?

- Notre consommation : 1.2×10^5 TWh=10 Gtep
- Les réserves fossiles (pétrole, gaz, charbon) s'épuisent, c'est vrai
- Mais Flux annuel d'énergie solaire:
 4.38×10^{12} TWh soit 37×10^6 fois consommation.!
Le soleil est un réacteur nucléaire de fusion...
(5 milliards d'années)

Autres ressources

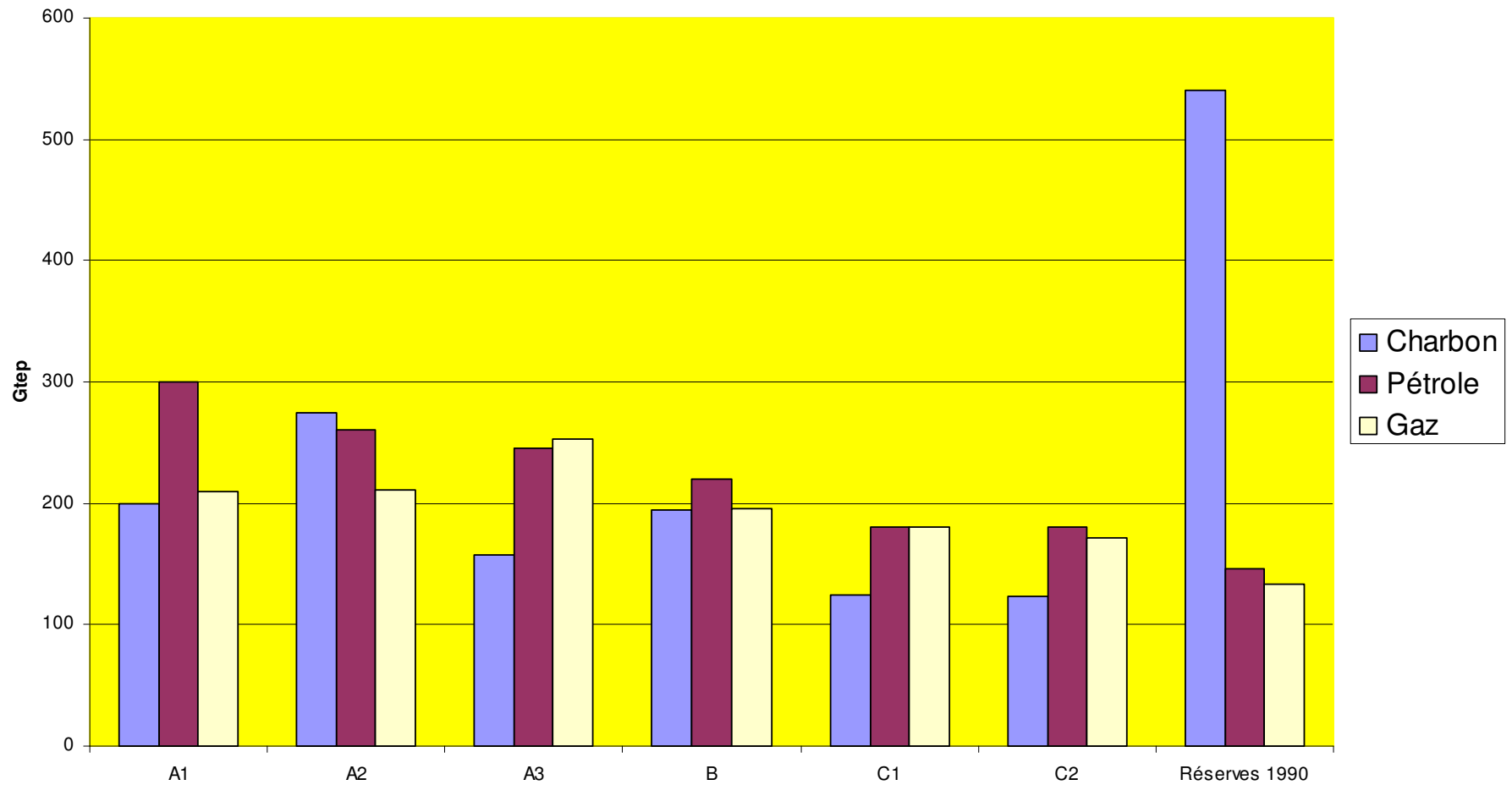
- Vent, hydroélectricité, énergie des océans : énergie solaire+énergie de gravité (Lune)
- Energie géothermique : $5 \cdot 10^{-5}$ fois plus faible que le flux solaire mais 2000 fois notre consommation.
Radioactivité Uranium (5 milliards d'années),
Thorium (12 milliards d'années)
- Energie nucléaire (surgénérateurs) :
3 milliards de tonnes océaniques exploitables et
20000 tonnes provenant chaque année des fleuves
alimentant l'océan : renouvelable pour 10000
réacteurs.

Répartition des consommations d'énergie primaire par secteur d'activité (Monde 1998)



Epuisement des réserves fossiles

Scénarios IASA (CME) 2050

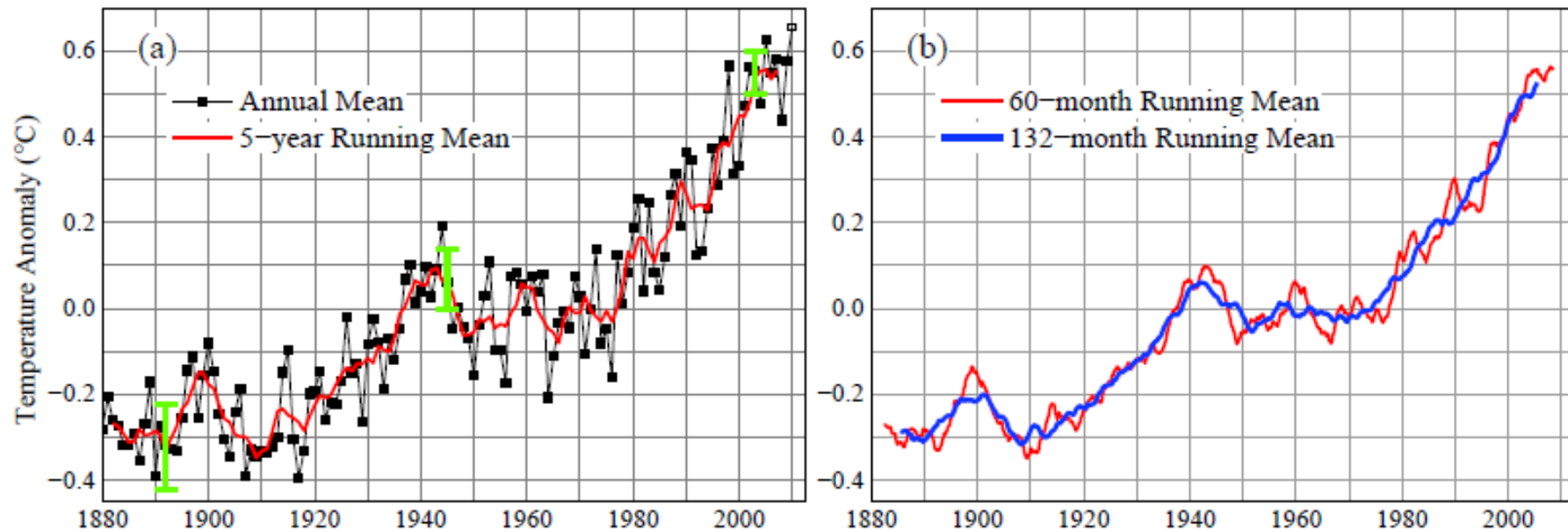


Réchauffement
climatique
Dernières nouvelles

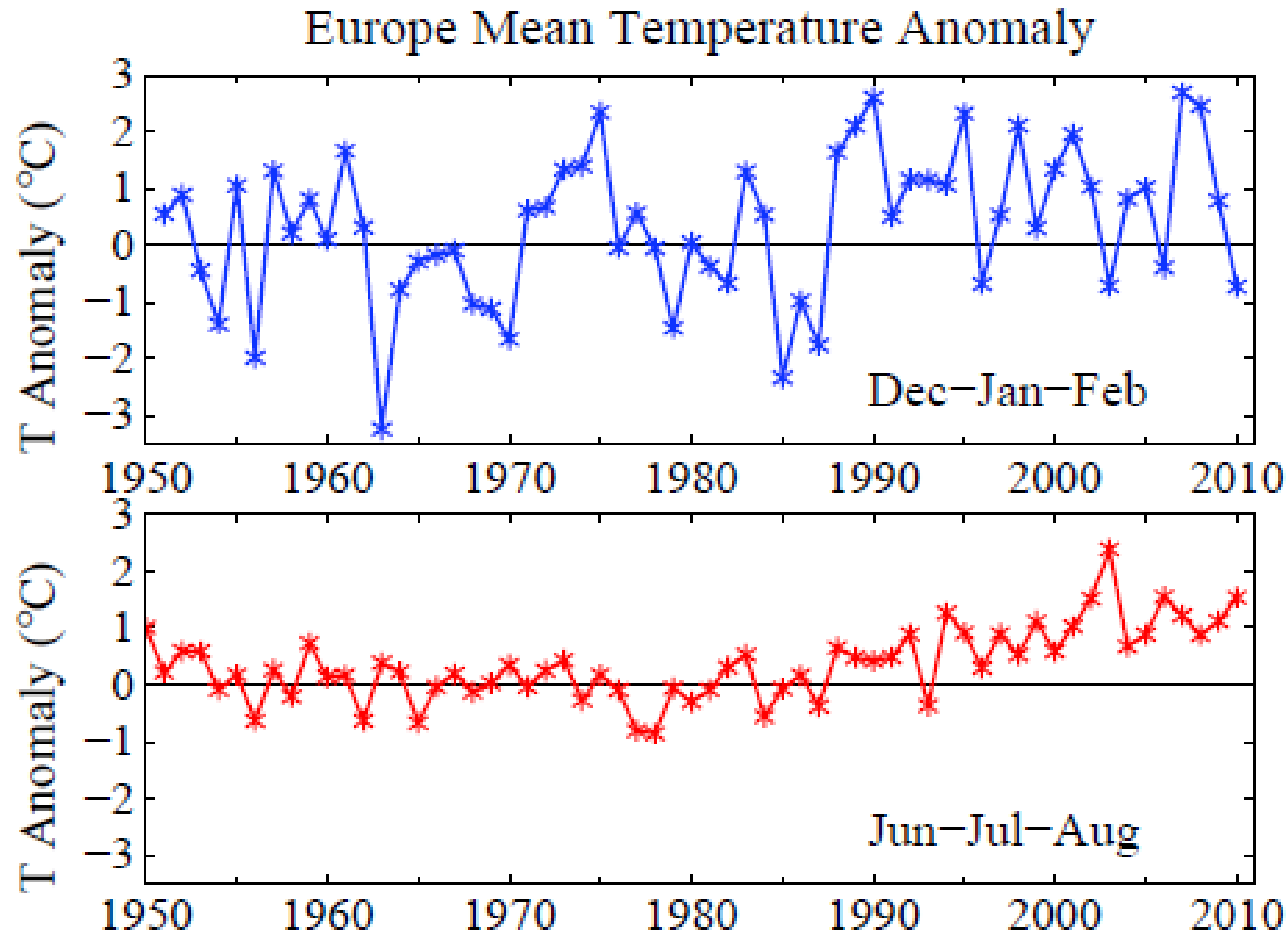
Evolution de la température

Ecart/(1951-1980)

Global Land-Ocean Temperature Index



Eté-Hiver

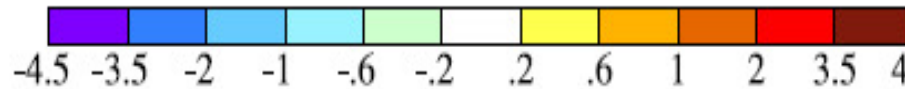
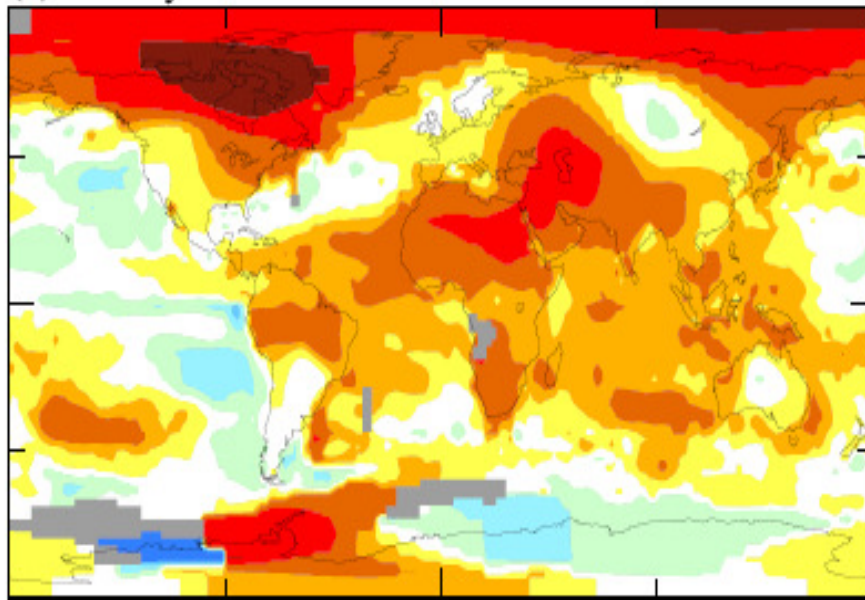


Anomalies régionales

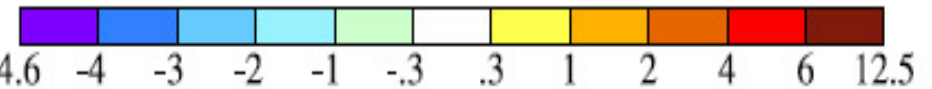
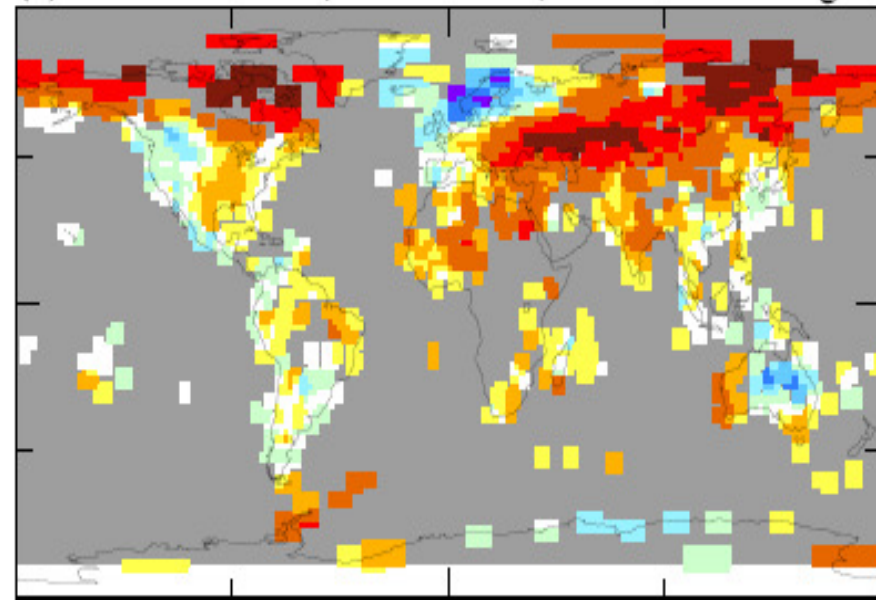
Surface Temperature Anomaly (°C)

(a) January-November 2010

0.66



(b) November 2010; Station Data, 250km smoothing



Quel effort?

- Rejets actuels : 7,5 GtC
- Nb Humains: 6,5 Milliards
- Rejet/ha Monde: 1,15 Tonne

Stabilisation de la température: 3GtC
D'autant plus haute qu'on attend

- Horizon 2050
- Nb Humains : 9 Milliards
- Rejet/ha Monde: 0.33 Tonne

Par pays

	2007 CO₂ émissions/tête	Effort à faire
USA	5.20	15.8
Allemagne	2.65	8.0
UK	2.34	7.1
France	1.58	4.8
Chine	1.24	3.8
Inde	0.32	1
Monde Total	1.19	3

Les facteurs à contrôler

$$Q_{CO_2} = N_{pop} \times \frac{PIB}{N_{pop}} \times \frac{Energie}{PIB} \times \frac{Q_{CO_2}}{Energie}$$

$$\frac{Energie}{PIB}$$

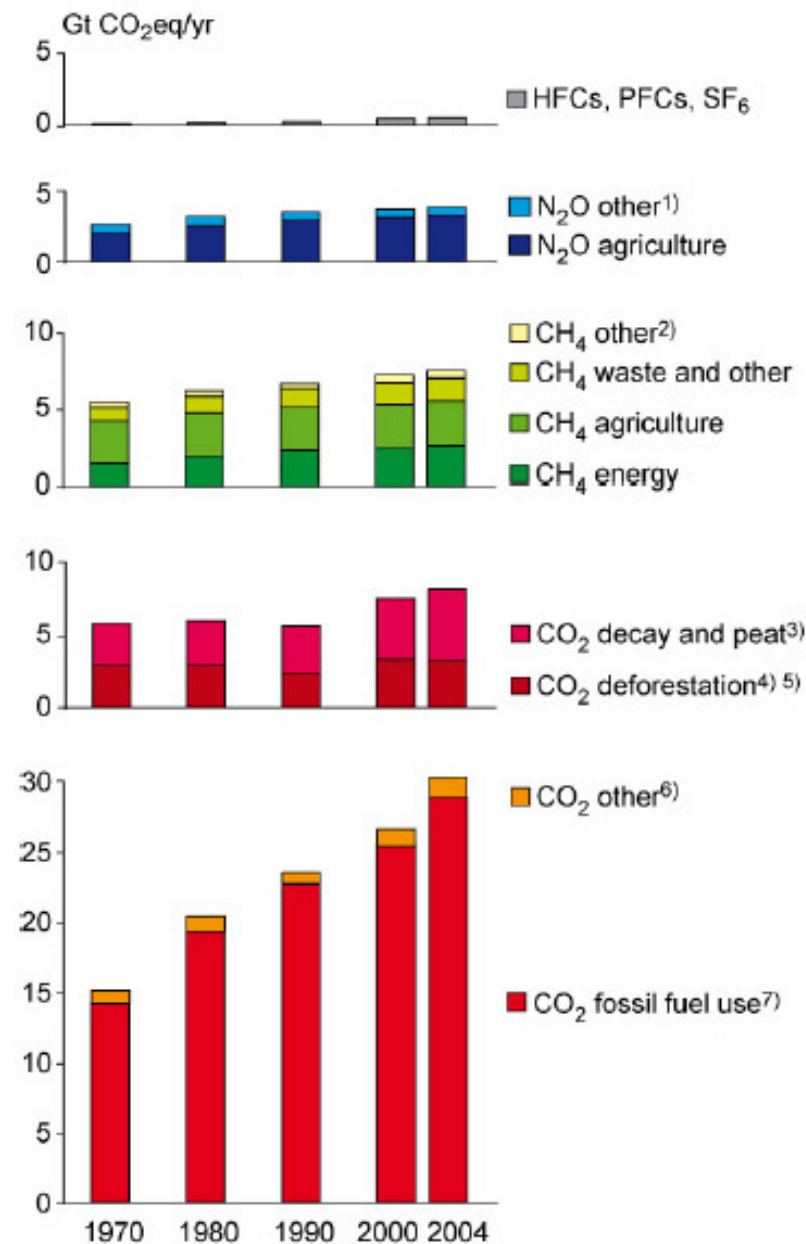
Intensité énergétique

$$\frac{Q_{CO_2}}{Energie}$$

Intensité en CO2

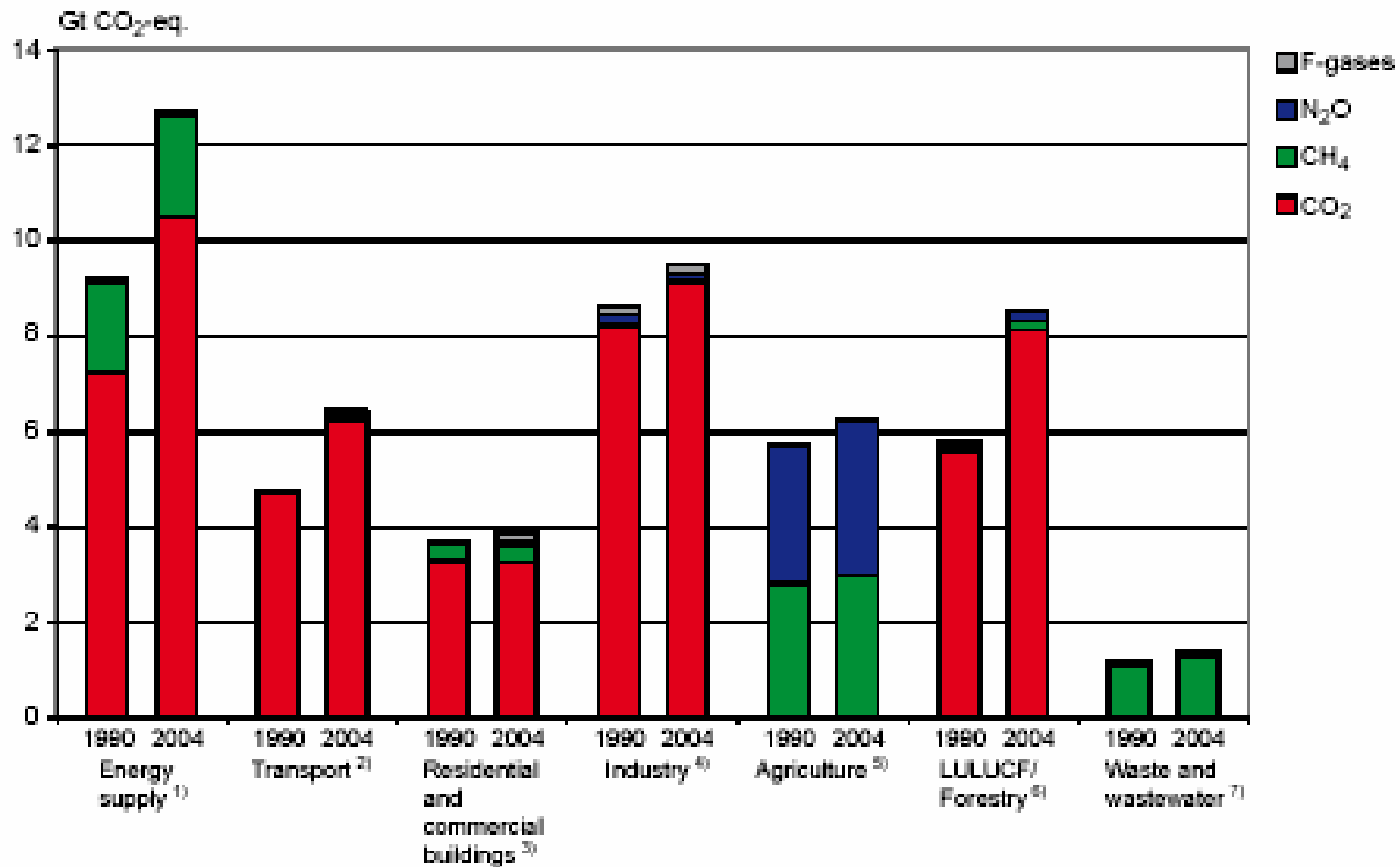
Evolution des émissions Mondiales de GES

Dominée
Par le CO₂

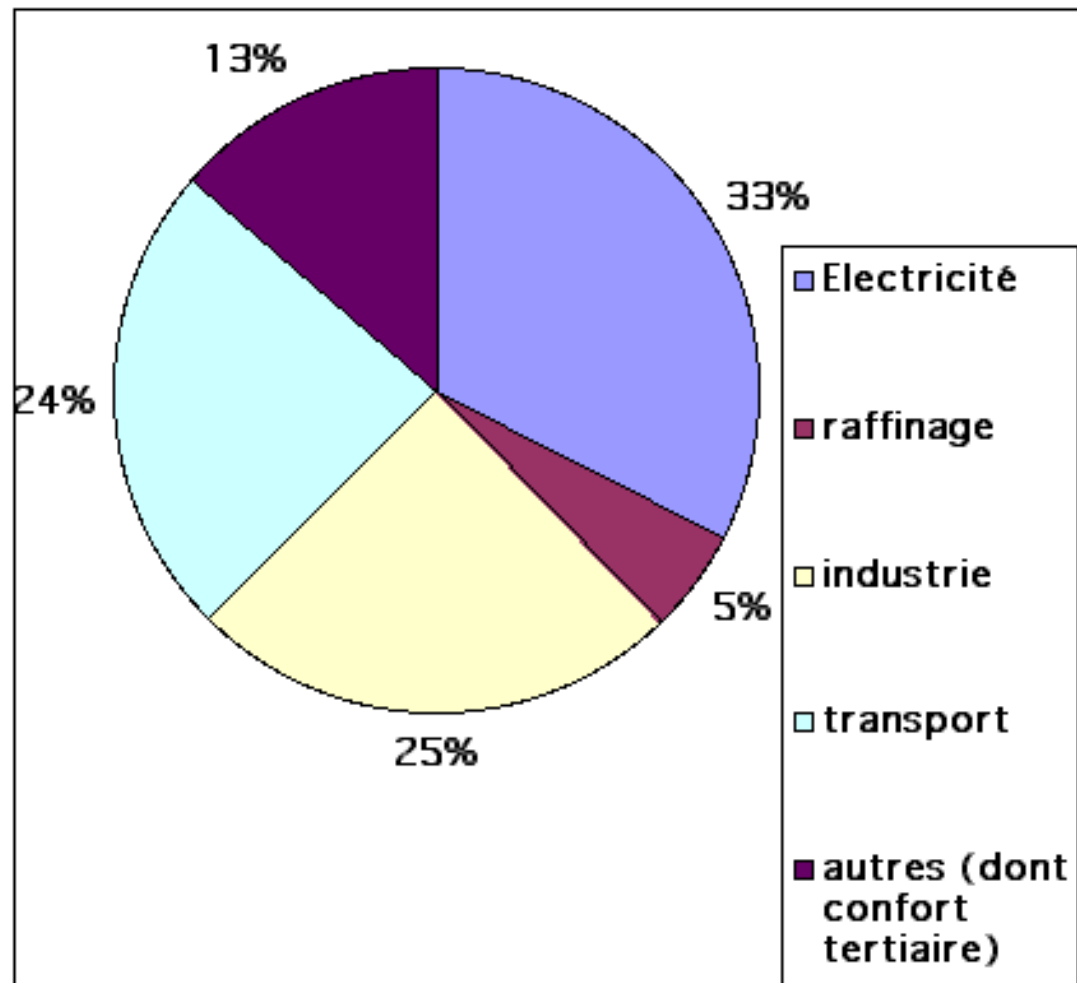


Emissions de GES par secteur

Rôle dominant du secteur energie



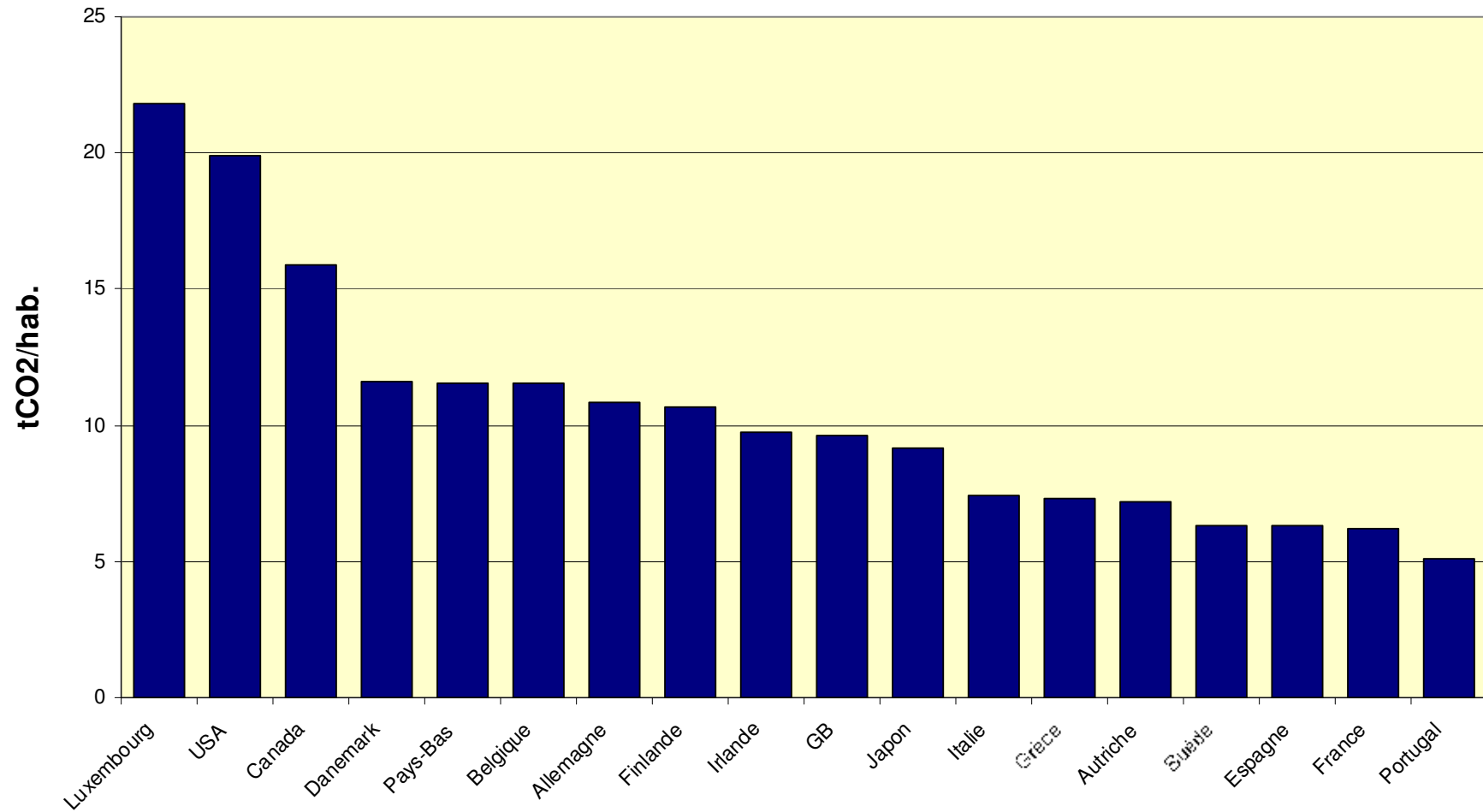
Origine des émissions de CO2 dans le monde



Rôle stratégique de l'électricité

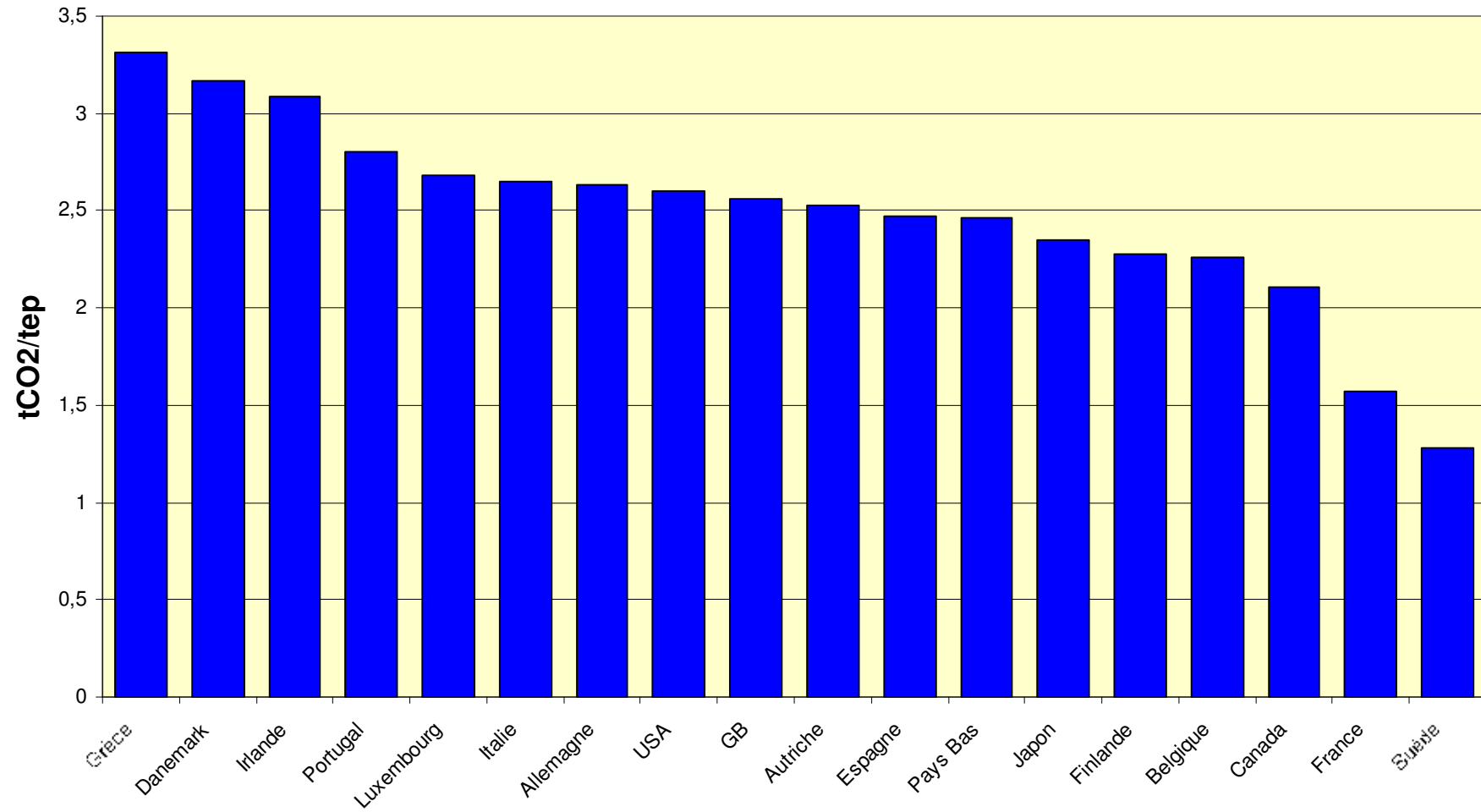
tCO2/ha

Emission de CO2 par habitant

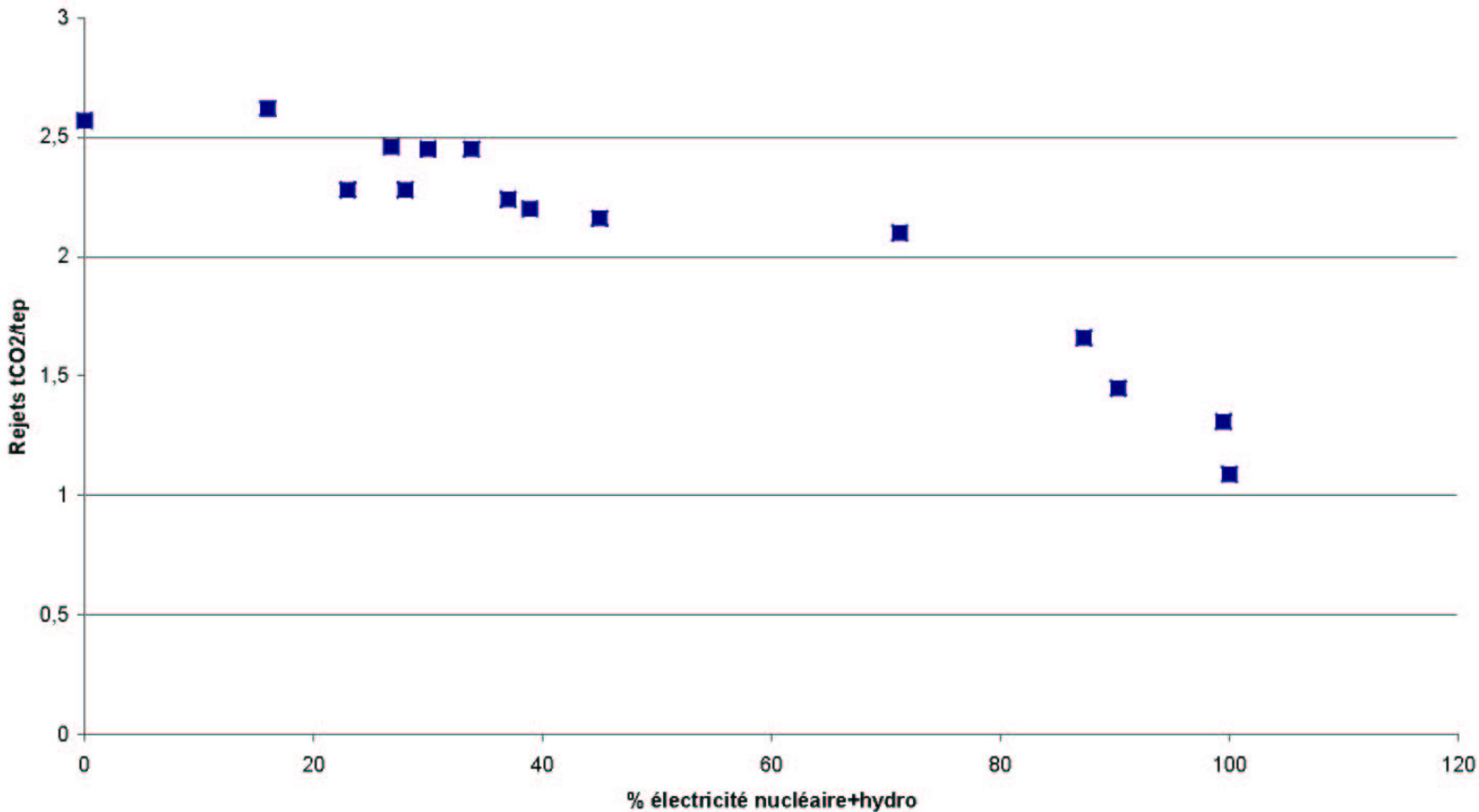


tCO₂/tep

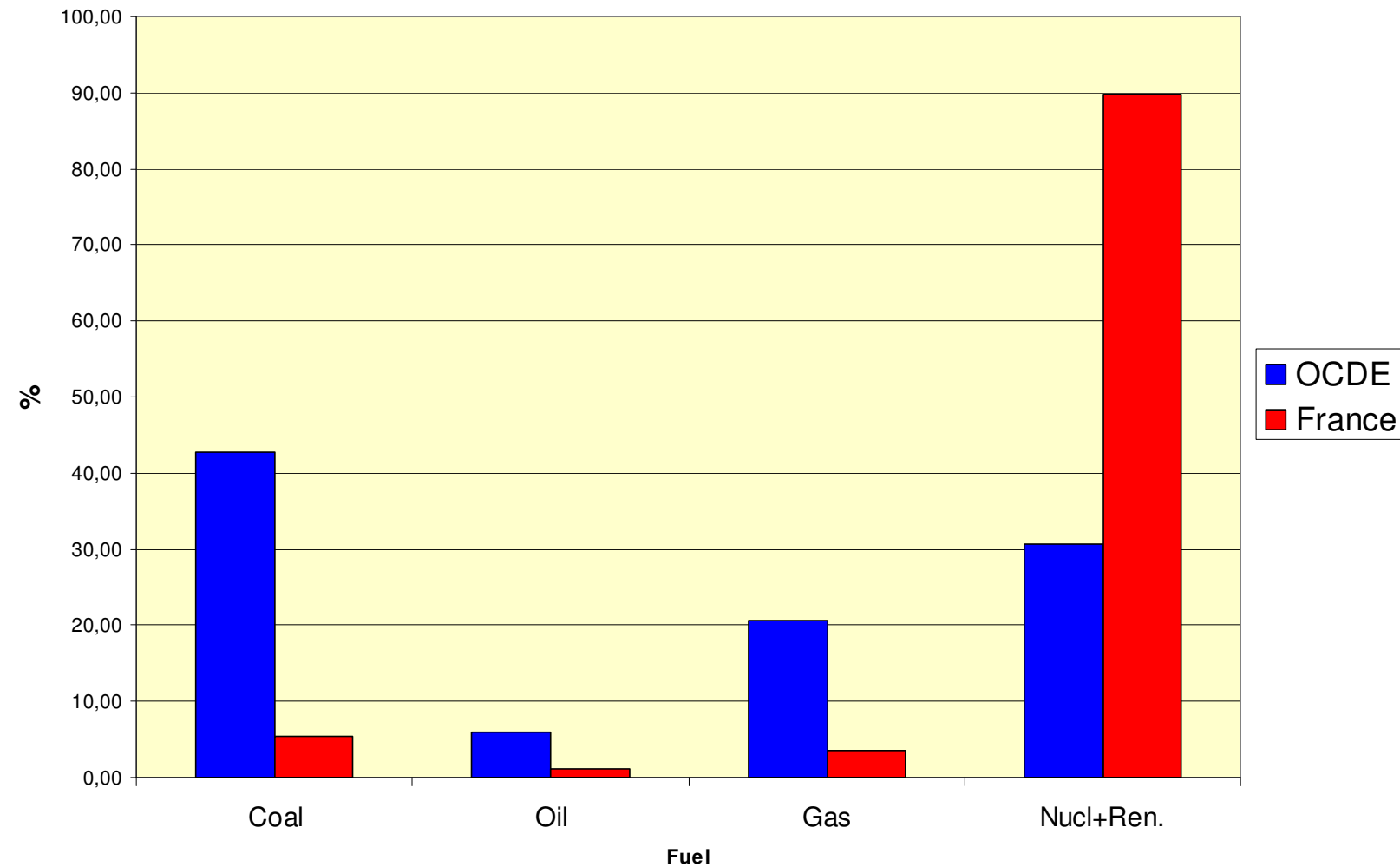
tCO₂/tep (1995)



Influence du mode de production de l'électricité sur les rejets de CO2



Comparaison des mix électriques OCDE vs France

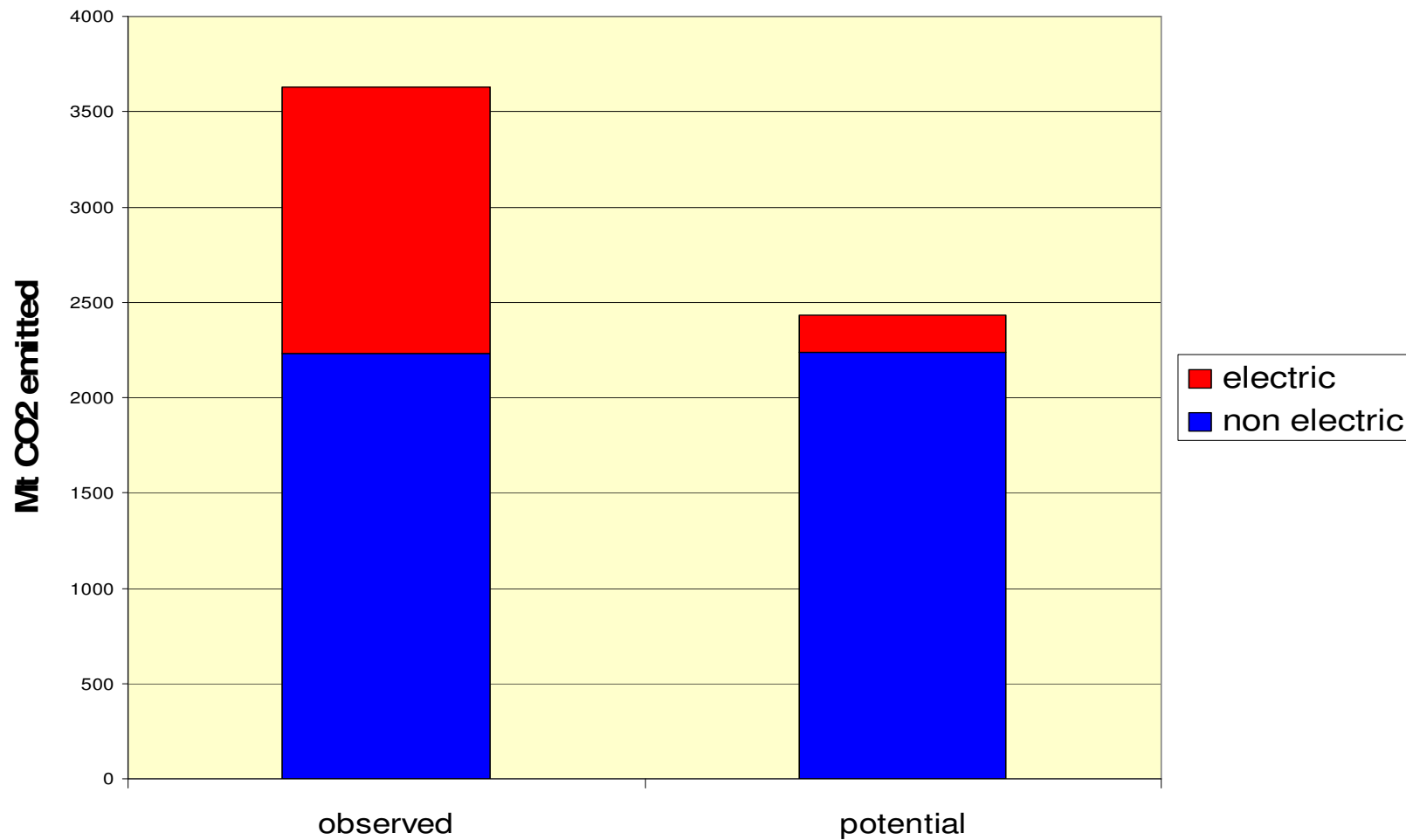


Première étape: mix électrique

On suppose le même mix pour l'OCDE que pour la France

Comparaison des émissions de CO2 pour les mix observés et potentiels

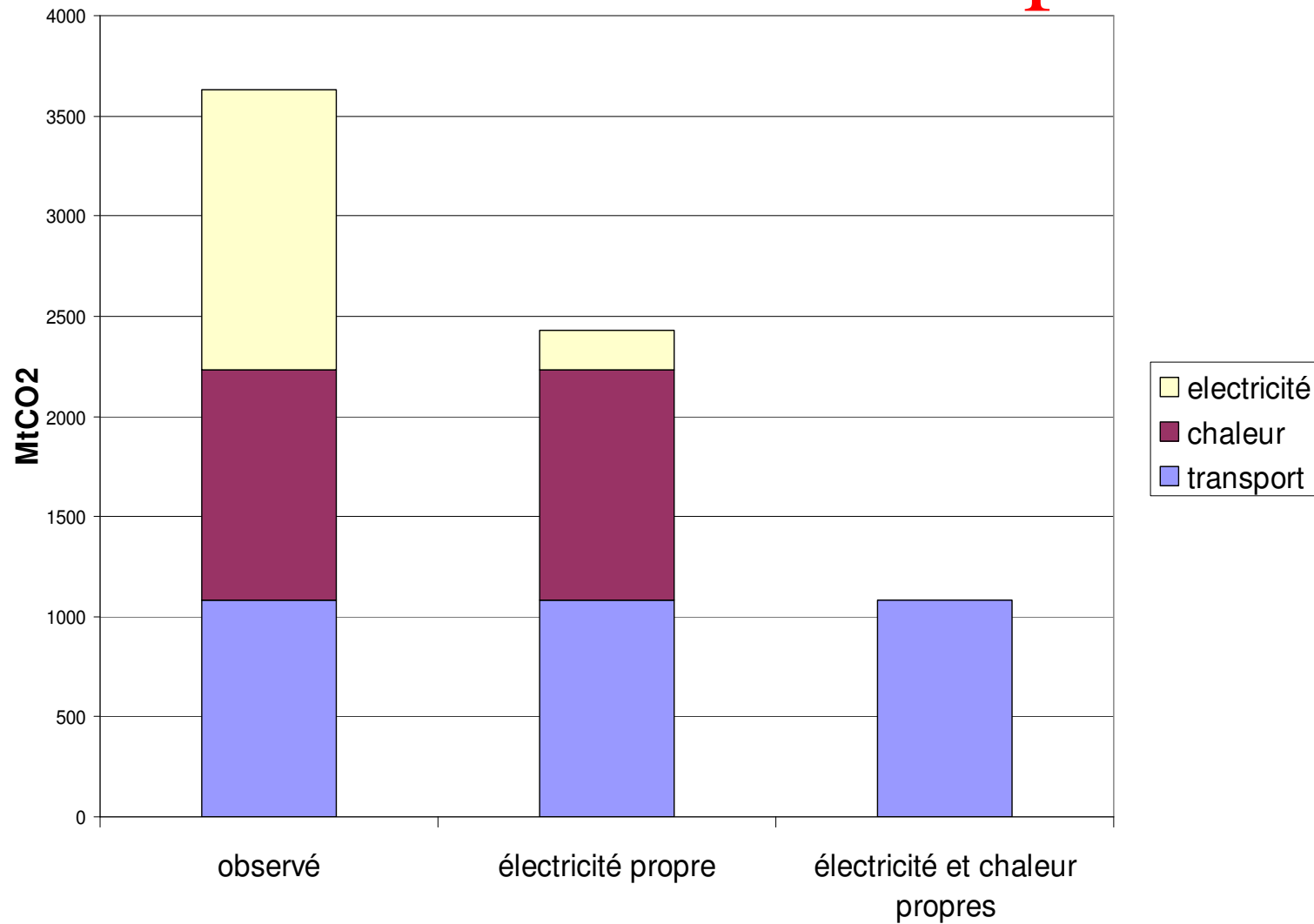
Gain: 0.67



Deuxième étape:
production de chaleur avec
l'électricité

Gain total: facteur 3

CO2 Résiduel: « transport »



Substituts aux combustibles fossiles

-Transports individuels

- Transports collectifs (partiellement électriques)
- Voiture électrique
- Hydrogène (électrolyse ou reformage + CS (CO₂))
- Bio-Carburants

-Chauffage

- Isolation
- Solaire thermique
- Biomasse (bois, déchets, bio-gaz)
- Géothermie
- Pompe à chaleur
- Chauffage électrique

Economies d'énergie

Pratiques de vie

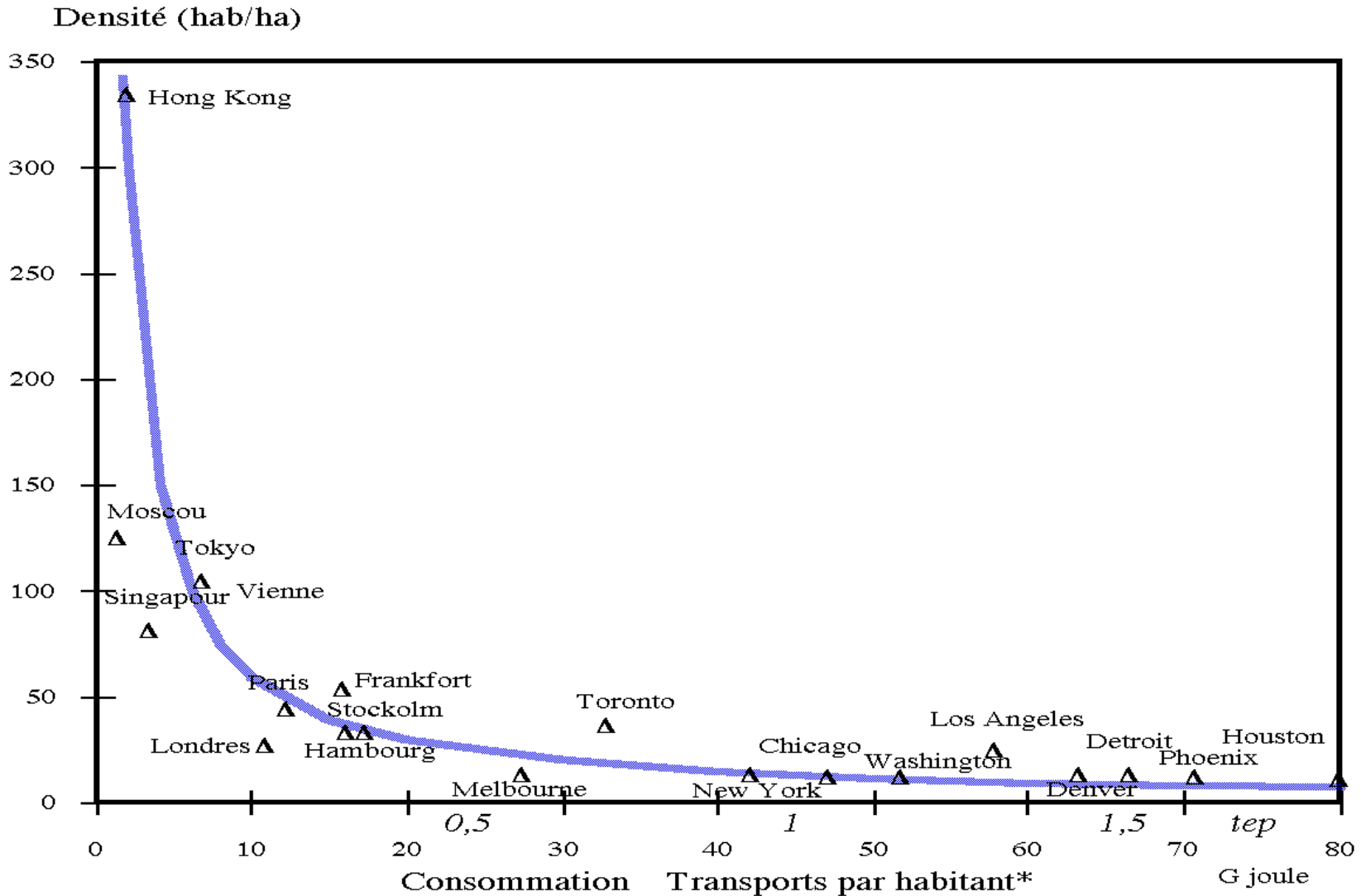
- Modes de déplacement
- Modes de chauffage
- Pratiques agricoles
- Alimentation
- Vacances au loin

Mais:

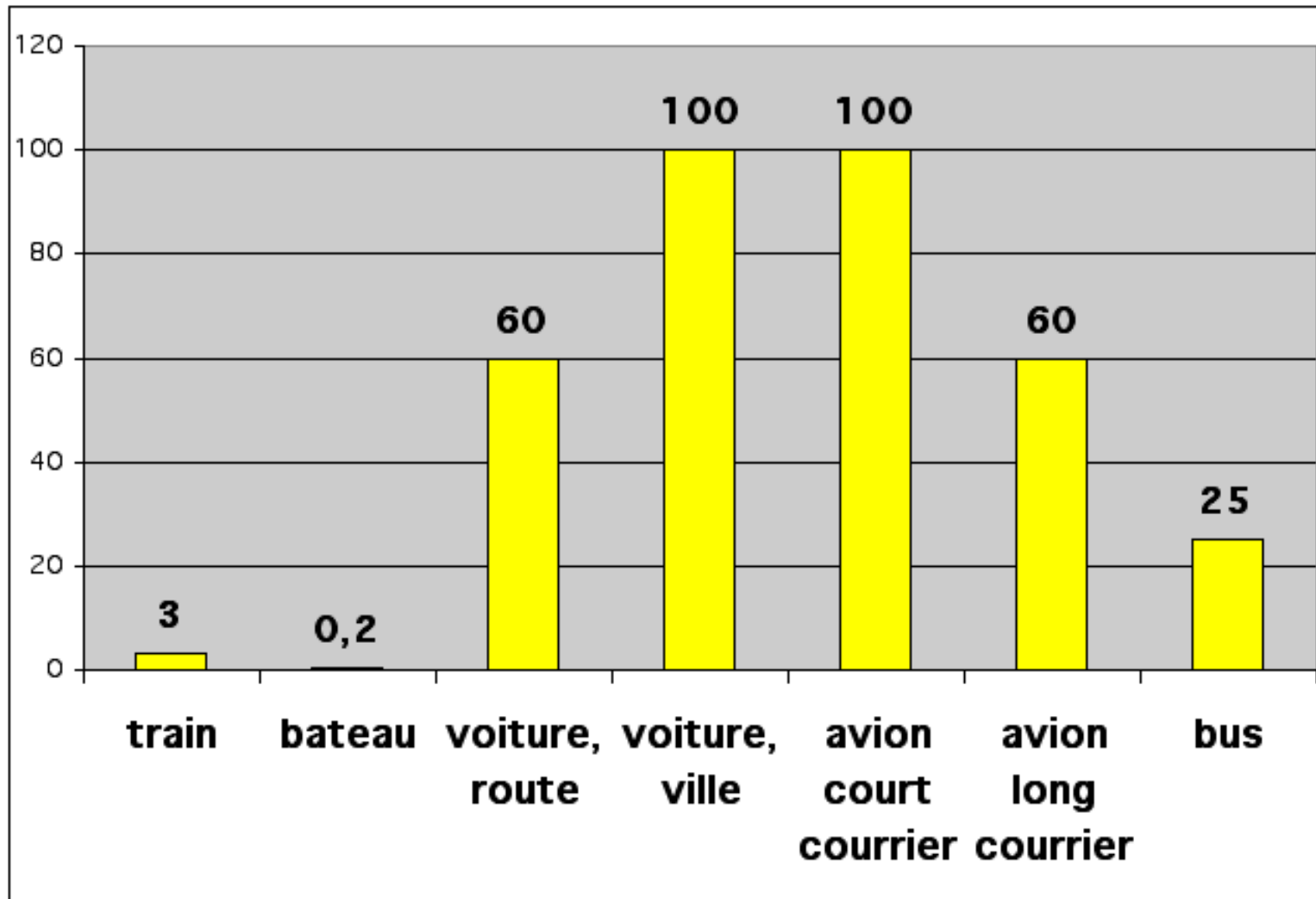
- Comment faire accepter les sacrifices dans un contexte d'inégalité sociale?
- L'avenir énergétique se joue en Chine et en Inde

Importance des technologies

Densité de population



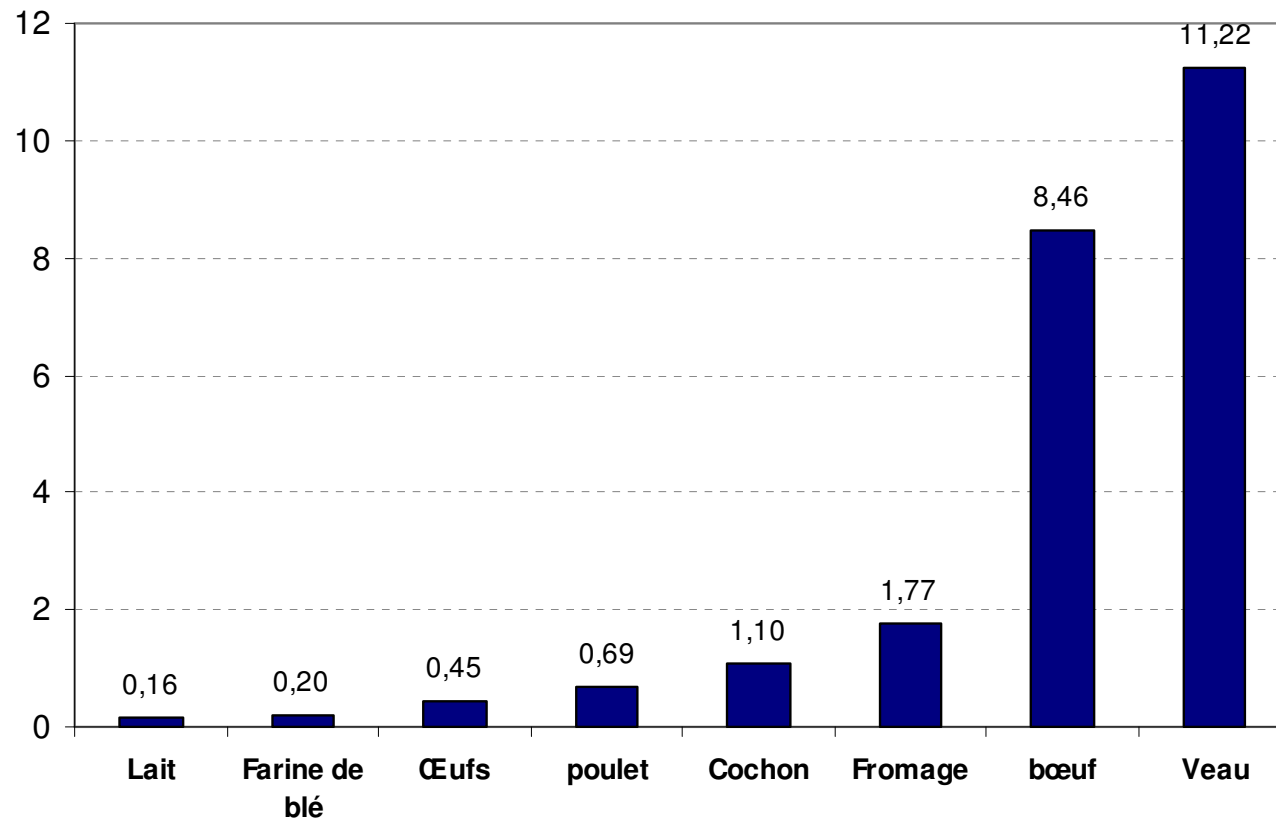
Emissions de GES en g.e.C par km.passager France



Alimentation

Kg équivalent carbone pour la production d'un kg de nourriture

(engrais, énergie pour fabriquer ces engrais, transports, récolte, ..)



➤ **Privilégier un certain type d'alimentation permet de lutter contre l'effet de serre**

Production d'électricité

Energies renouvelables

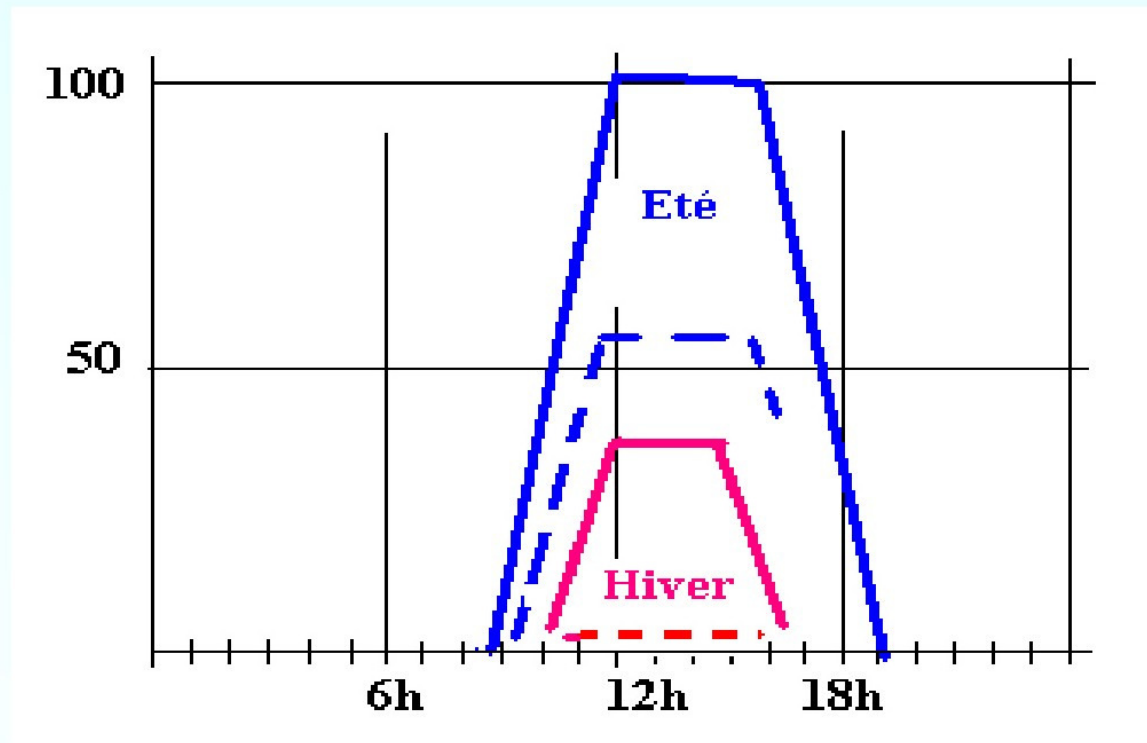
Energie solaire

Limites du Solaire PV

- Effet Jour-Nuit
- Effet saisonnier:
 - 3 fois plus d'énergie en Juillet qu'en Janvier
- Stockage
- Limite de pénétration dans un réseau électrique:
 - 5 à 10%

Intermittence PV

Appel réseau journalier



PhotoVolt sur la journée

Facteurs Technico- économiques

	Raccordé	Autonome
Eléments prix du kWh	Prix module Durée de vie Taux argent Substitution	Idem + Stockage
Substitution Taux :	Toît, façade 10 %	Service, Réseau >100%
Prix mini kWh Problème n°1	0,2 Euros Module Intégration	0,8 Euros Stockage ρ utilisation

Conclusion : Points clés du photovoltaïque

- Imbattable en terrain vierge pour < 2 kW
 - Imbattable pour usagers < 10 kWh/mois
 - Sans concurrence pour 1/3 de l'humanité
 - Cher, mais sans inconvénients ni limites
 - Croissance rapide (30%/an) mais artificielle.
 - Handicap : stockage
- ⇒ Sur réseau : sera un jour le toit standard ?
- ⇒ En PED : sera l'énergie standard ? 2 fois moins cher que groupe électrogène

Solaire thermodynamique

- Nécessité de la présence de soleil
 - (chaleur diffuse inexploitable)
- Nécessité de suivre le soleil
- Transformation de la chaleur en électricité
- Encombrement au sol:
 - miroirs+structures+espaces inter-miroirs
 - 70 (France) à 110 kWh/m² au sol soit environ 5%
 - Deux fois moins que le PV

Capteurs cylindriques

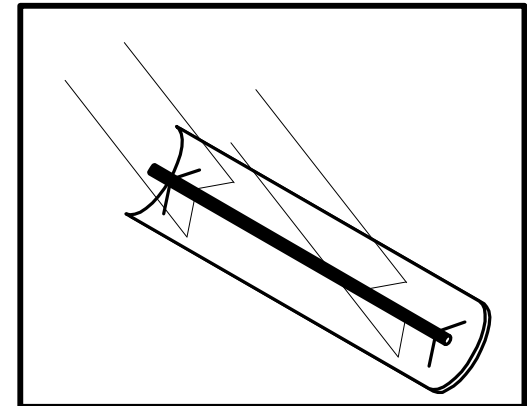
Orientation est-ouest

Mouvements lents et simples

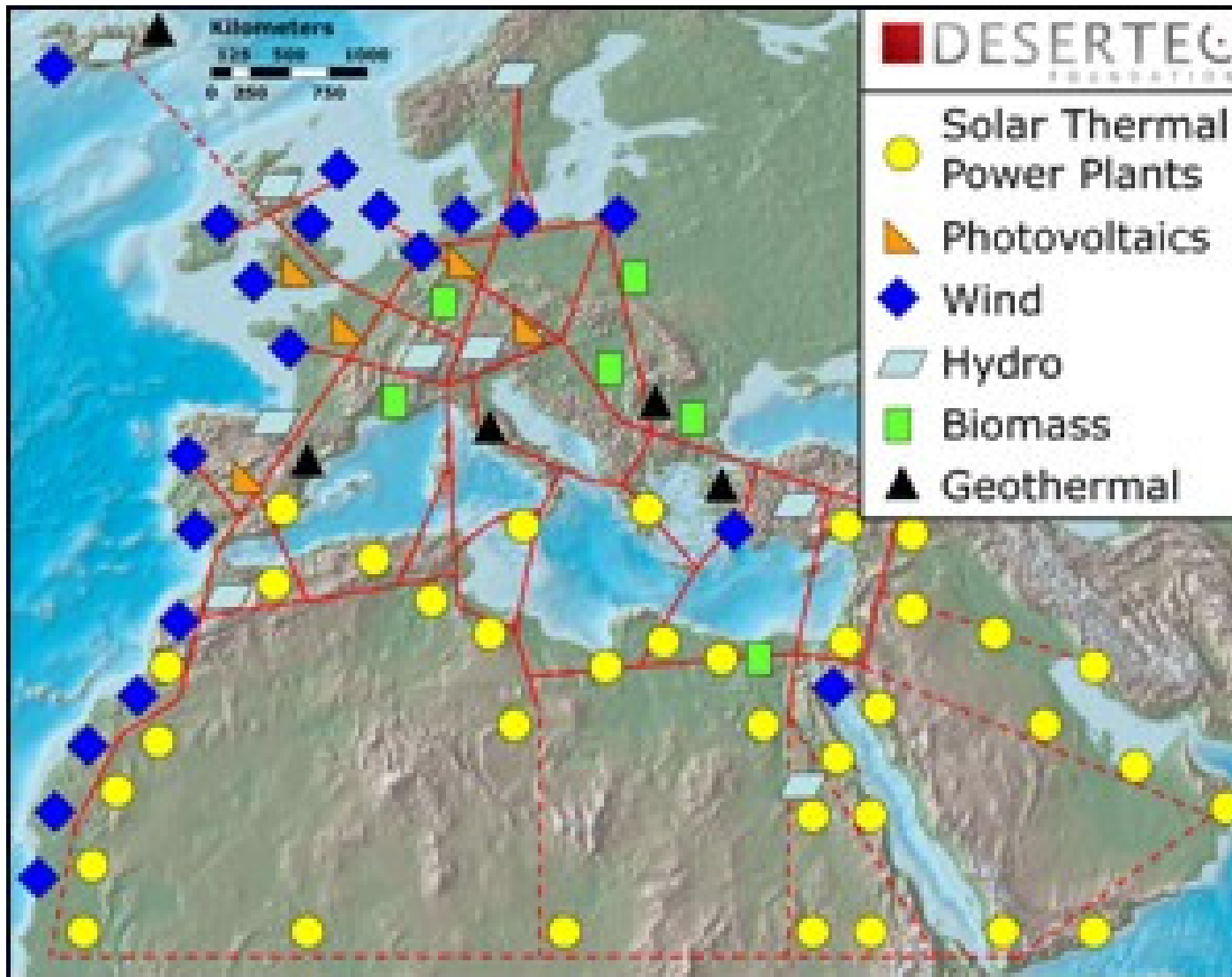
Rendements des miroirs: 8-12%

Caloporteurs organiques

Rendement thermodynamique: 37%



Desertec

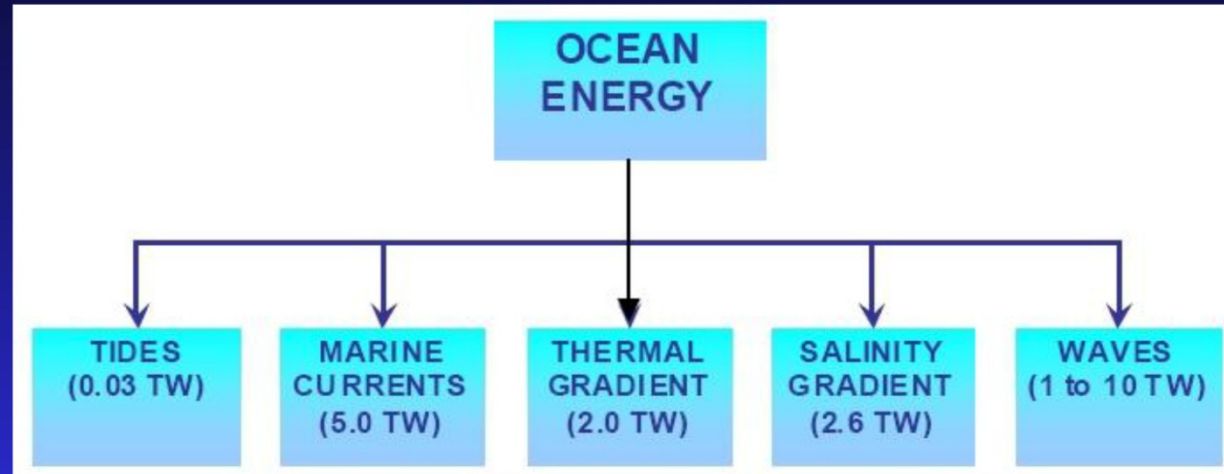


Hydro-électricité

- Ressource mondiale: 12000 TWh
- Production hydro : 2000 TWh
- Production mondiale électrique: 14000 TWh
- Localisation:
 - Asie: 27%
 - Amérique du Sud: 24%
 - CEI: 24%
- Environnement
- Ruptures de barrage:
 - ex Morvi(Inde,1979) 15000 morts

La ressource globale

Ressource vagues



source: OREG (Canada 2004)

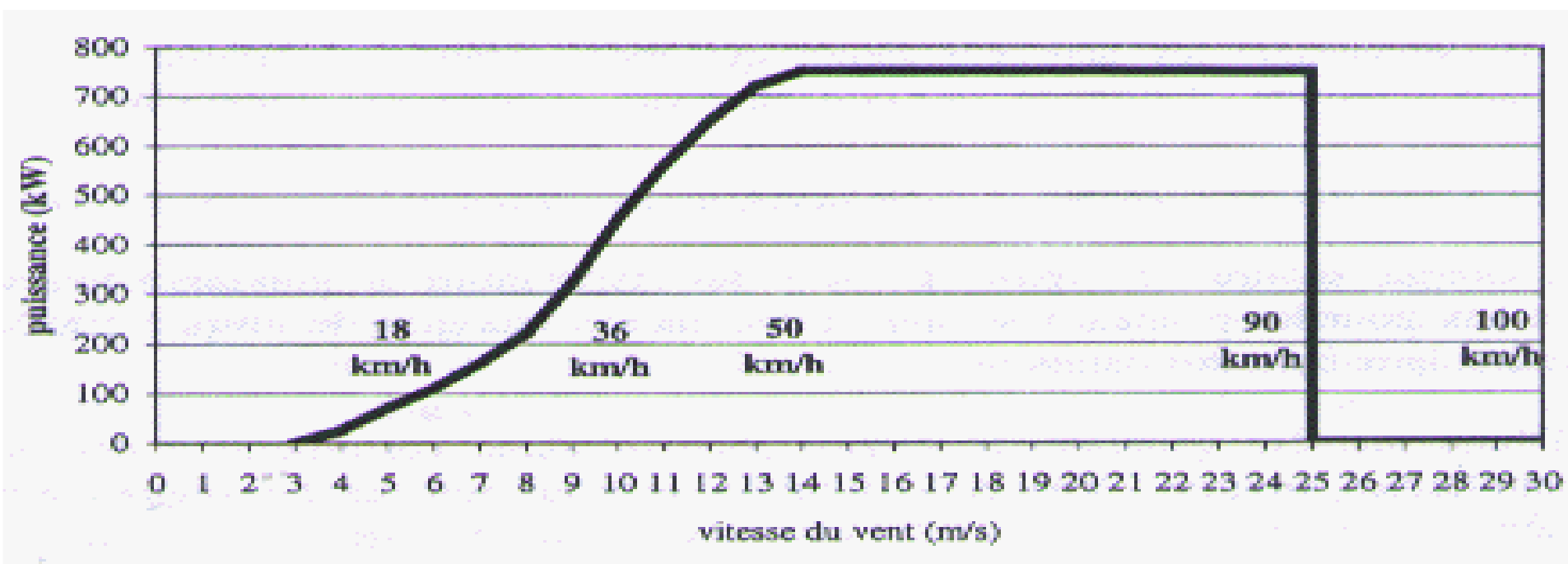
Vagues (global) : 1,3 à 2 TW (World Energy Council)

Techniquement exploitable : 150 à 750 TWh (WAVENET report 2003) (~200 GW)

Parc mondial électrique installé : 1,3 TW

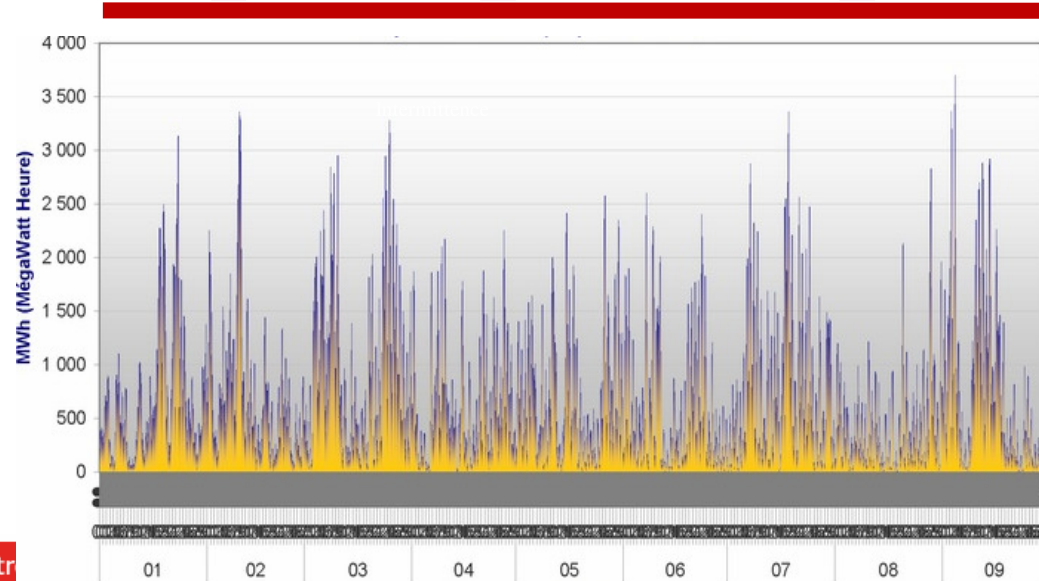
Eolien

Rendement



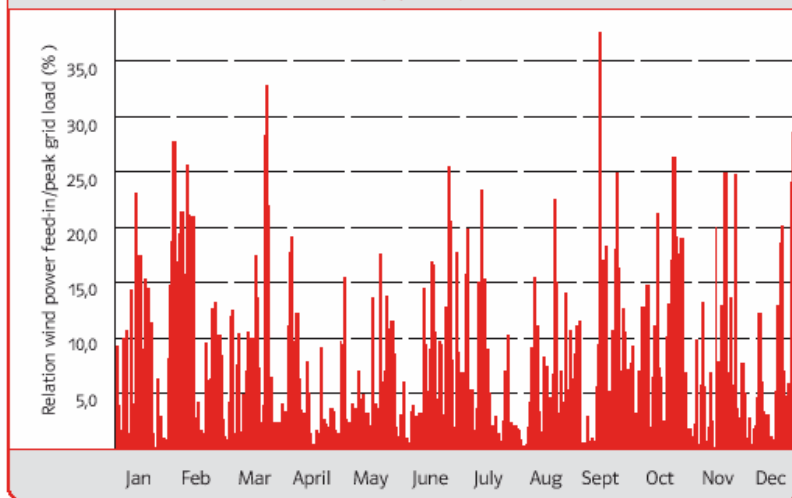
C'est « presque » pareil partout!

France 2009
4500 MW
23%

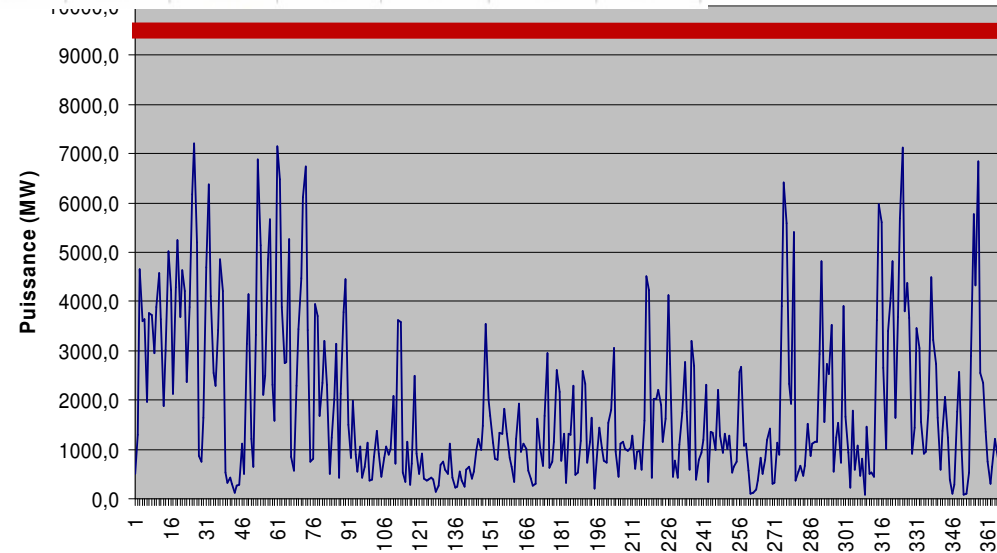


3. Wind power feed-in in the E.ON contr

2004 between 0.2 and 38% of daily peak grid load



E-ON: 7500 MW, 21%



Vattenfall: 9400 MW, 24%

Limites de l'éolien

- Disponibilité environ $1/3$ du temps
- Caractère stochastique: Puissance max. inférieure à $1/3$ de la puissance du réseau
- Limite $0.33 \times 0.33 \approx 0.1$

Biomasse

Utilisations préférentielles:

- Production de chaleur
- Biocarburants

Potentiel réaliste mobilisable

Monde

2,23 Gtep dont 1,6 forestier (Monde)

Total possible (énergie): 3,53 Gtep (15%)

Combustible, Carburant, Electricité

Europe (15):

- Forestier: 63 Mtep
- Herbacé: 20 Mtep
- Plantes énergétiques: 52 Mtep

Production actuelle: 37 Mtep

Total: 172 Mtep (12% consommation)

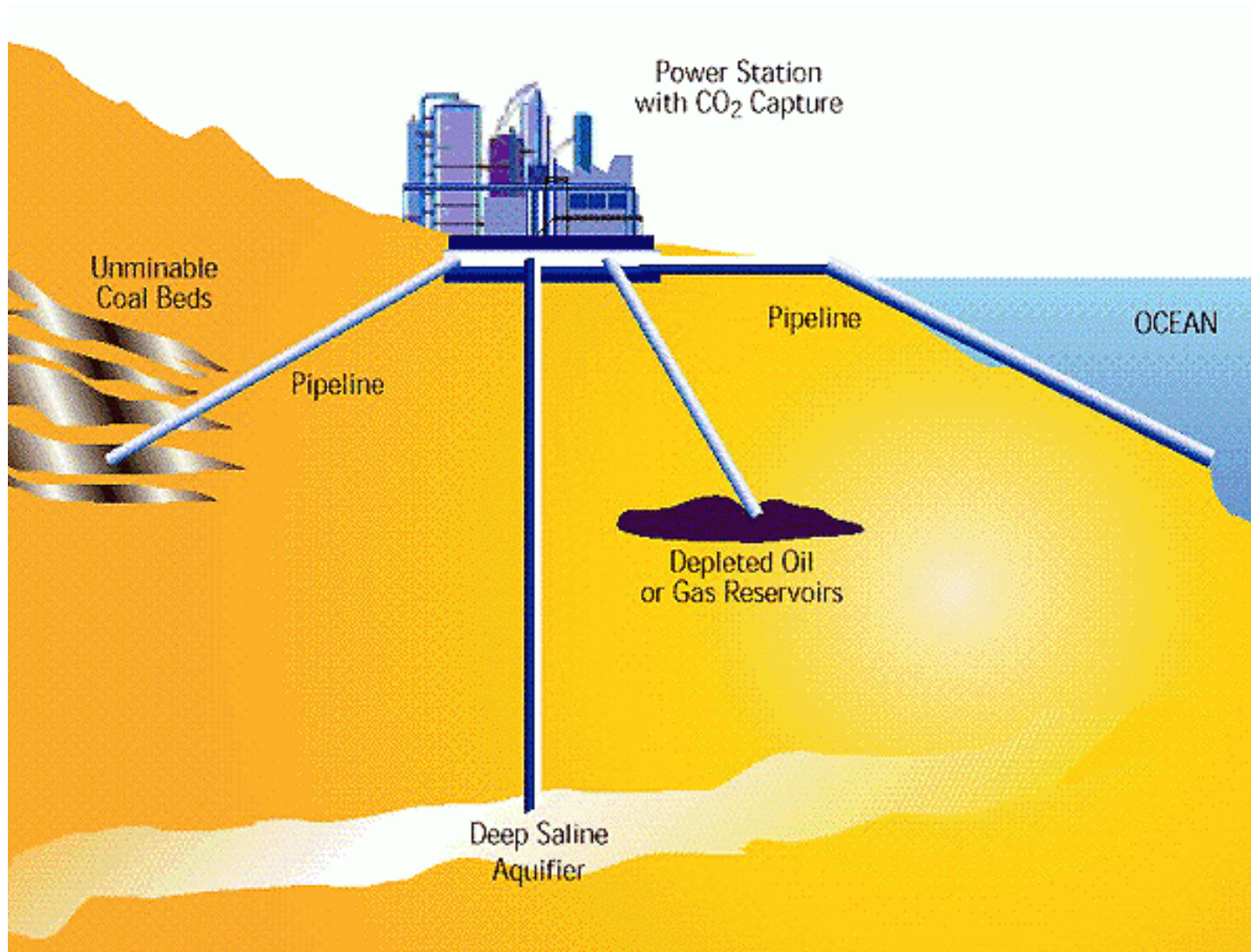
Apport des renouvelables pour l'électricité d'ici 2050

- Hydro électricité : 20%
- Eolien : 10%
- Solaire : 5 à 10%
- Biomasse : 5 à 10%
- 40-50%
- Reste?

Fossiles sans CO₂

- Capture du CO₂
 - Post-combustion $C+O_2 \rightarrow \underline{CO_2} + \text{Energie}$
 - Pré-combustion $C+H_2O \rightarrow H_2+CO$
 - $H_2+1/2O_2 \rightarrow H_2O + \text{Energie}$
 - $CO+1/2O_2 \rightarrow \underline{CO_2} + \text{Energie}$
 - Elimination du N₂ avant (oxy-combustion)
- Séquestration
 - Anciens gisements pétroliers et gaziers (250 Gt?)
 - Anciennes mines de charbon (5 GtC)
 - Nappes salines aquifères (250-2000 GtC?)

I. Capture et stockage du CO₂



Réalisations

- Deux expériences: **Sleipner, Weyburn**
- Surconsommation énergétique: 8 à 15% (MEDD)
- Surcoût kWh: 50 à 100% (Charbon pulvérisé), 35 à 50% (gaz)
- Surcoût investissement: 80% (Charbon pulvérisé), 100% (gaz)

Le Nucléaire

- Ressources limitées avec les REP (Réacteurs à Eau Pressurisés) actuels
- Nécessité de la (sur)régénération: amélioration d'un facteur 100 de l'utilisation de l'uranium
- Que faire des déchets?
- Les accidents

Régénération-Surgénération

- Si $r < 0$ le nombre de fissiles décroît.
- Tous les noyaux du fertile deviennent fissiles
- Pour 1 tonne d'uranium d'uranium 235
143 tonnes d'uranium naturel
Production de 0,27 Gtep, soit
76 fois plus que dans le cas des REP

Réévaluation des réserves

Consommation actuelle 60000 tonnes uranium naturel

Pour 300 GWe/an. On peut multiplier par 10 soit 3000 GWe/an

Amélioration de l'utilisation pour les REP: 300000/an Unat

Réserves prouvées : 6 Mt soit 20 ans

Réserves probables+prouvées : 18 Mt soit 60 ans

Pour les CANDU 240 ans

Pour Régénérateurs : 4000 ans

Le nucléaire renouvelable

Pour les CANDU 240 ans

Pour Régénérateurs : 4000 ans

Mais on peut accepter un facteur 80 sur le coût de l'extraction

3 milliards de tonnes dans l'océan

On suppose 10000 GWe soit 10000 tonnes/an 100000 ans

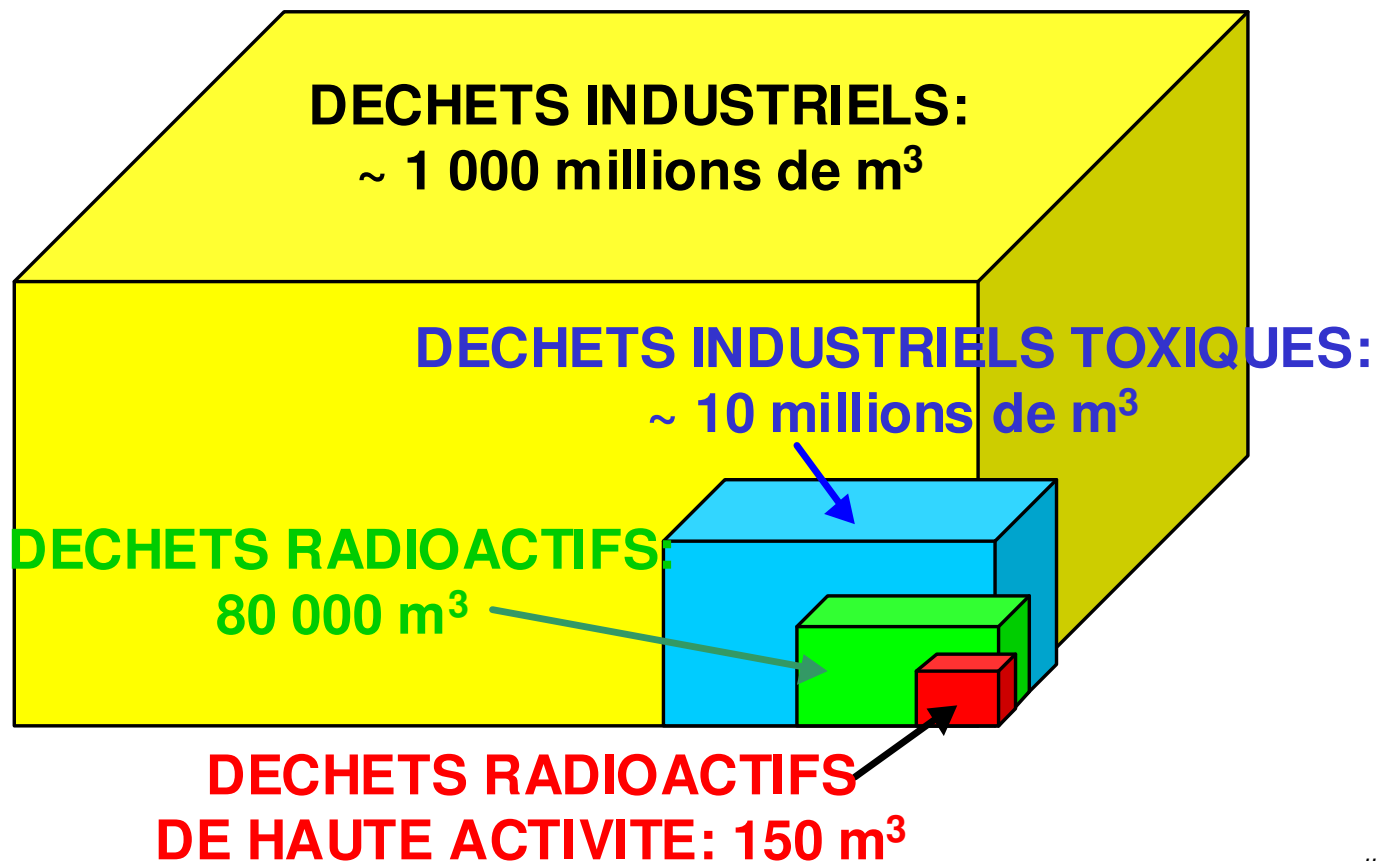
Les fleuves amènent à la mer 10000 à 20000 tonnes d'uranium/an

Division de la masse des déchets par 100

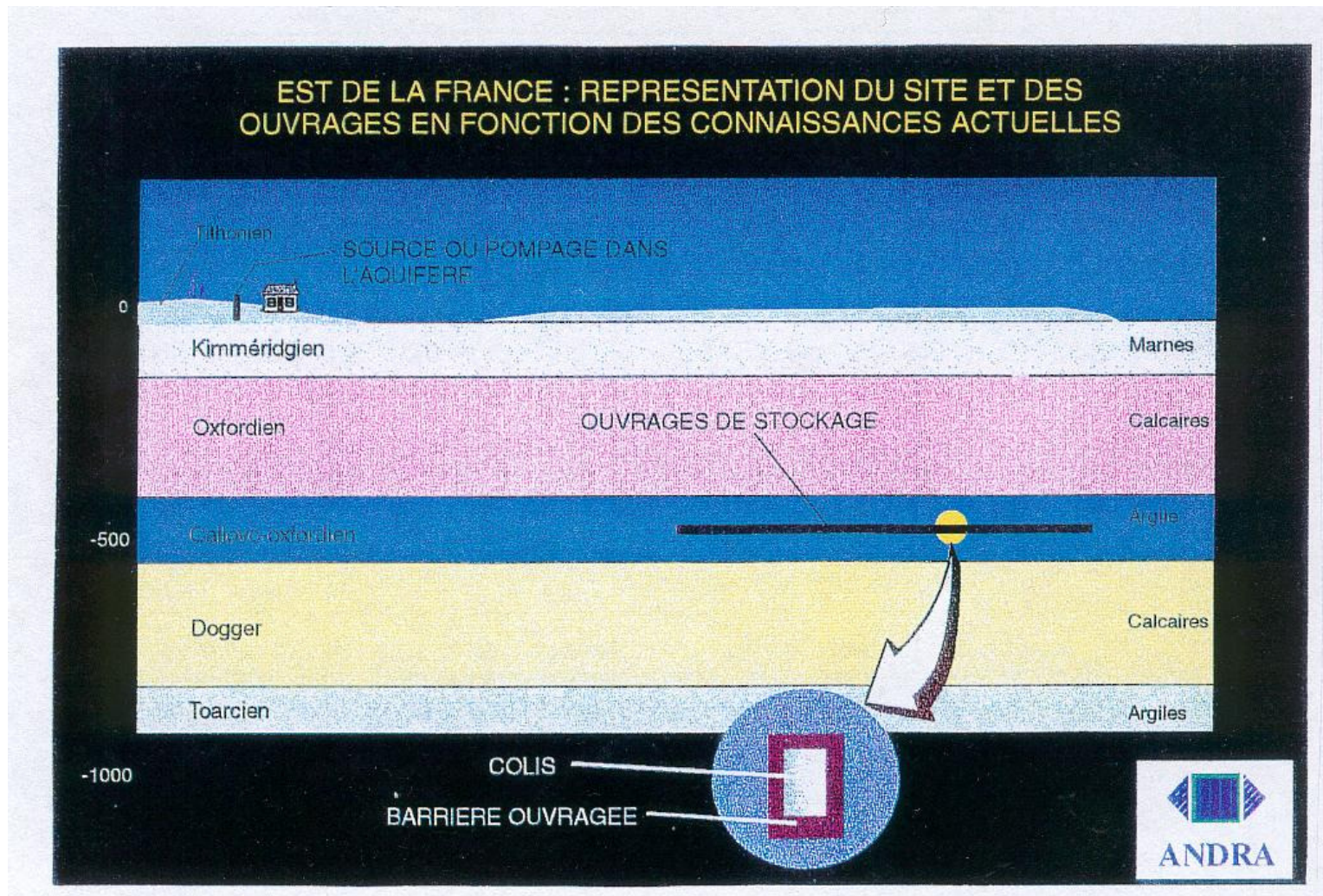
Volume des déchets

Production annuelle de déchets
dans la communauté européenne

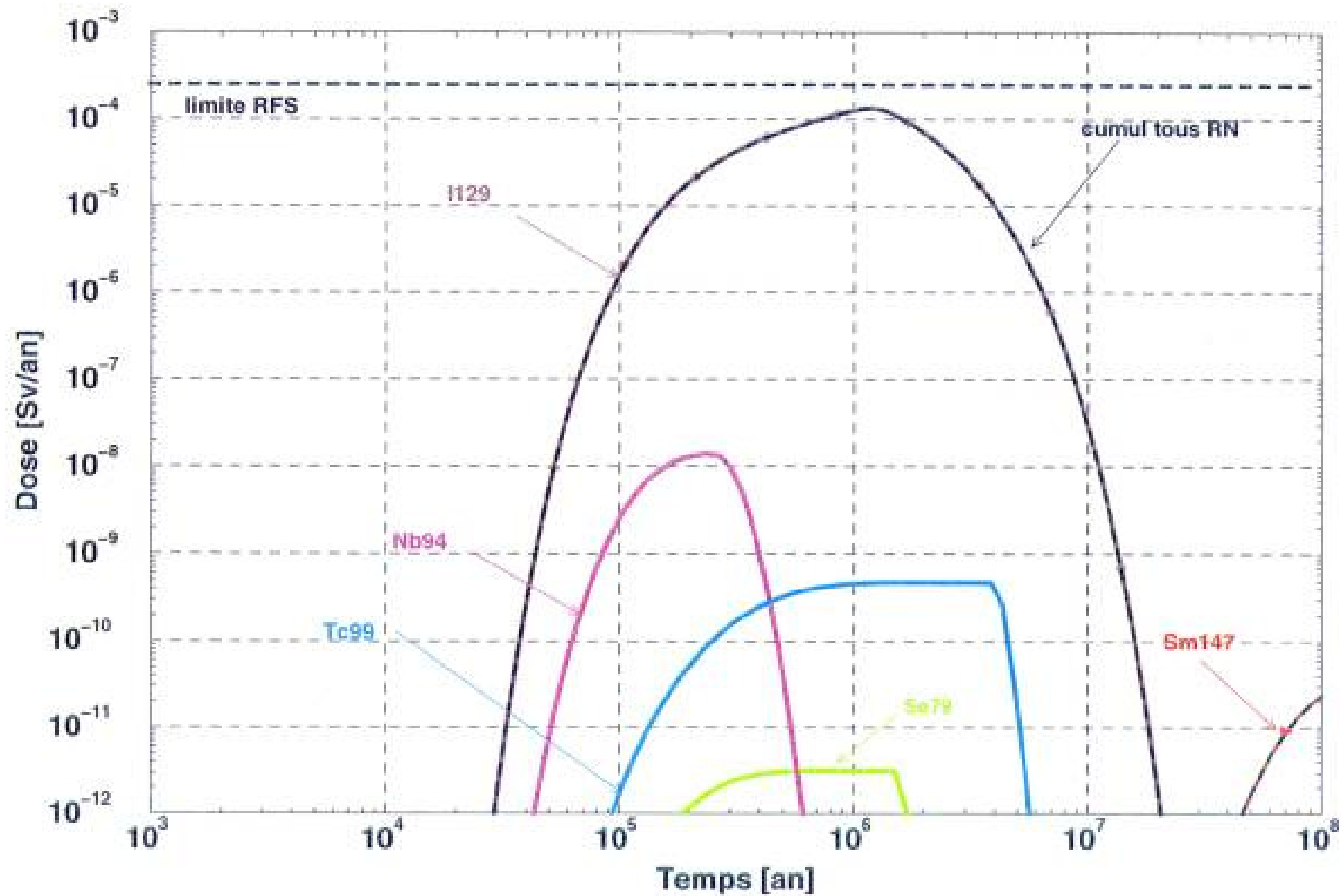
SOURCE: CEE - 1993



Stockage



Rejets calculés



Accidents nucléaires

• Tchernobyl (type RBMK)

- Instable à faible puissance
- Insertion des barres de contrôle défectueuse
- Fusion du cœur
- Explosion hydrogène
- Pas de confinement

❖ Bilan ONU(UNDP,UNICEF... ,Forum Tchernobyl 2006):

➤ Attribuables à l'irradiation:

50 morts, 4000 cancers de la thyroïde

4000 cancers supplémentaires attendus statistiquement

➤ Nombreuses victimes psycho-socio-économiques

• TMI (type REP):

- Fusion du cœur
- Confinement assuré

❖ Bilan:

– 2 irradiés dans le personnel, 0 morts

– Panique

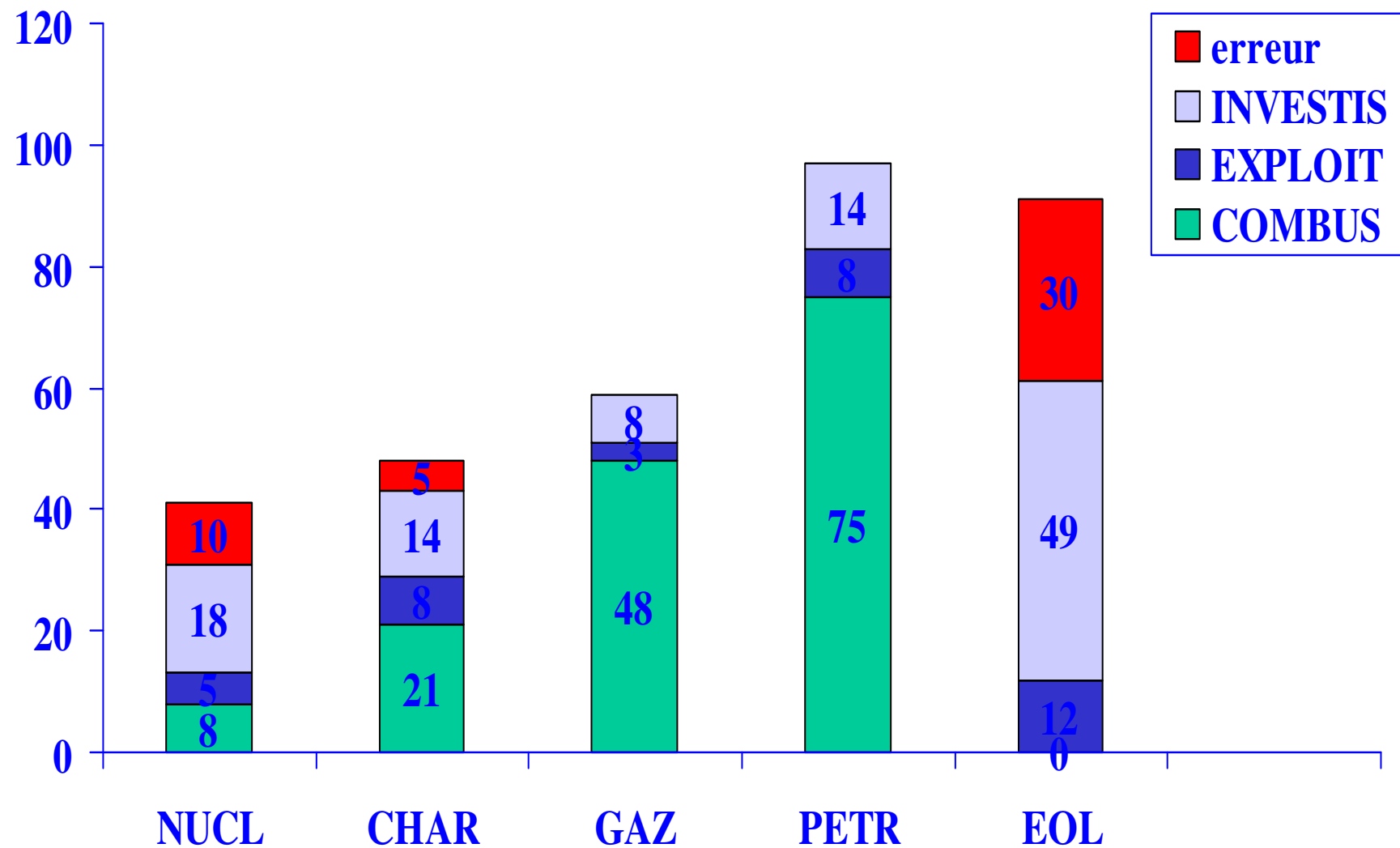
Coûts

Investissements

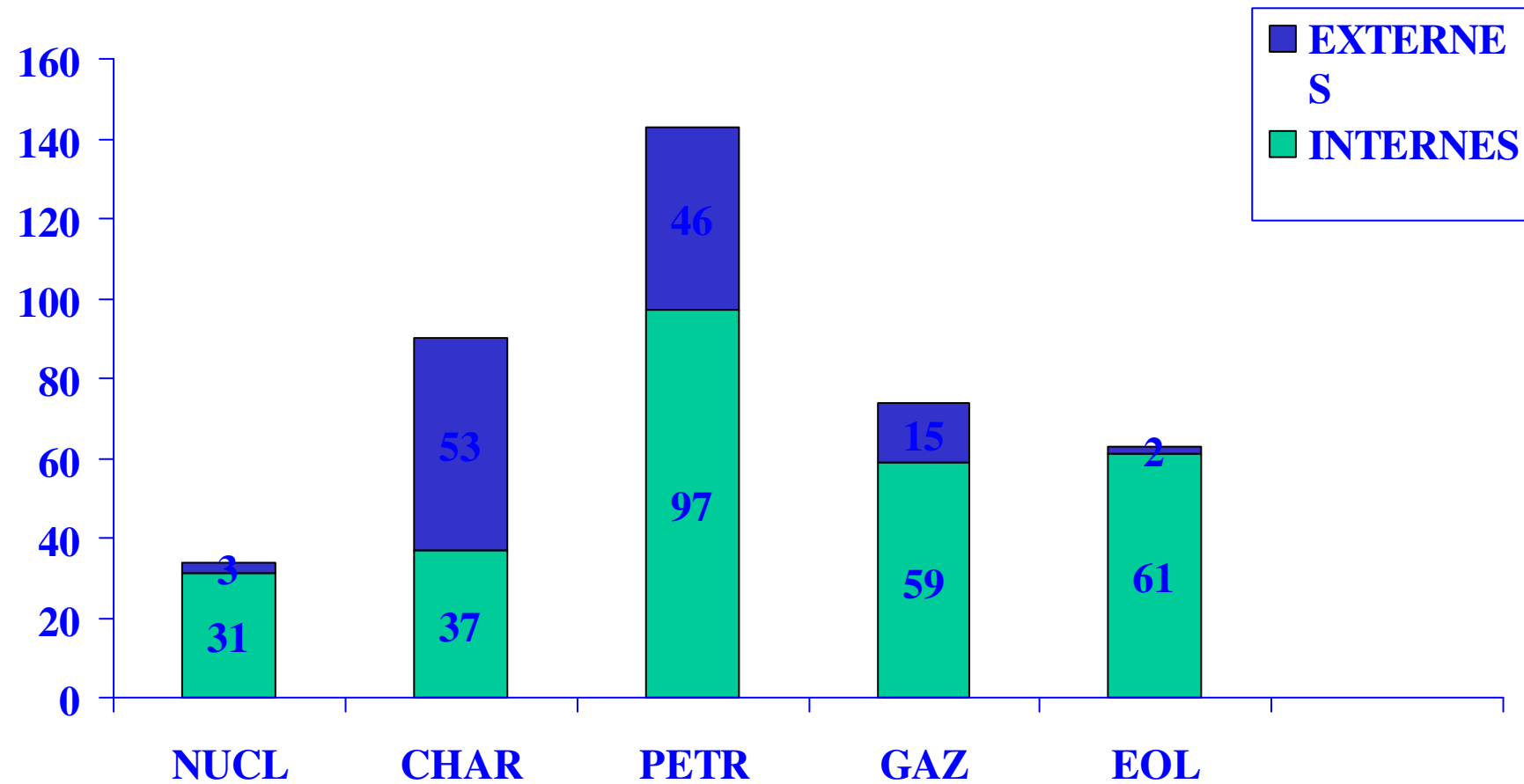
Production de 7 Twh/an (un réacteur de 1 Gwe

- Gaz= 0,5 GEuros
- Nucléaire= 2 à 3 GEuros
- Eolien= 3 à 6 GEuros
- Solaire= 15 GEuros

Coûts totaux internes



Coûts totaux (externes+internes)



Le potentiel du nucléaire

- A l'échelle mondiale:
Modification des scénarios IASA(CME)
- A l'échelle française:
Scénario facteur 4 SLC Negatep
(C.Acket, P.Bacher)

Hypothèses

2040

- Minimiser l'utilisation des fossiles pour l'**Electricité**
- Développement « Raisonable » du **Nucléaire + ENR**
 - OECD: 85% (Nucléaire 42%)
 - Transition: 50% (Nucléaire 25%)
 - Chine, Inde, Am. Latine: 30% (Nucléaire 15%)

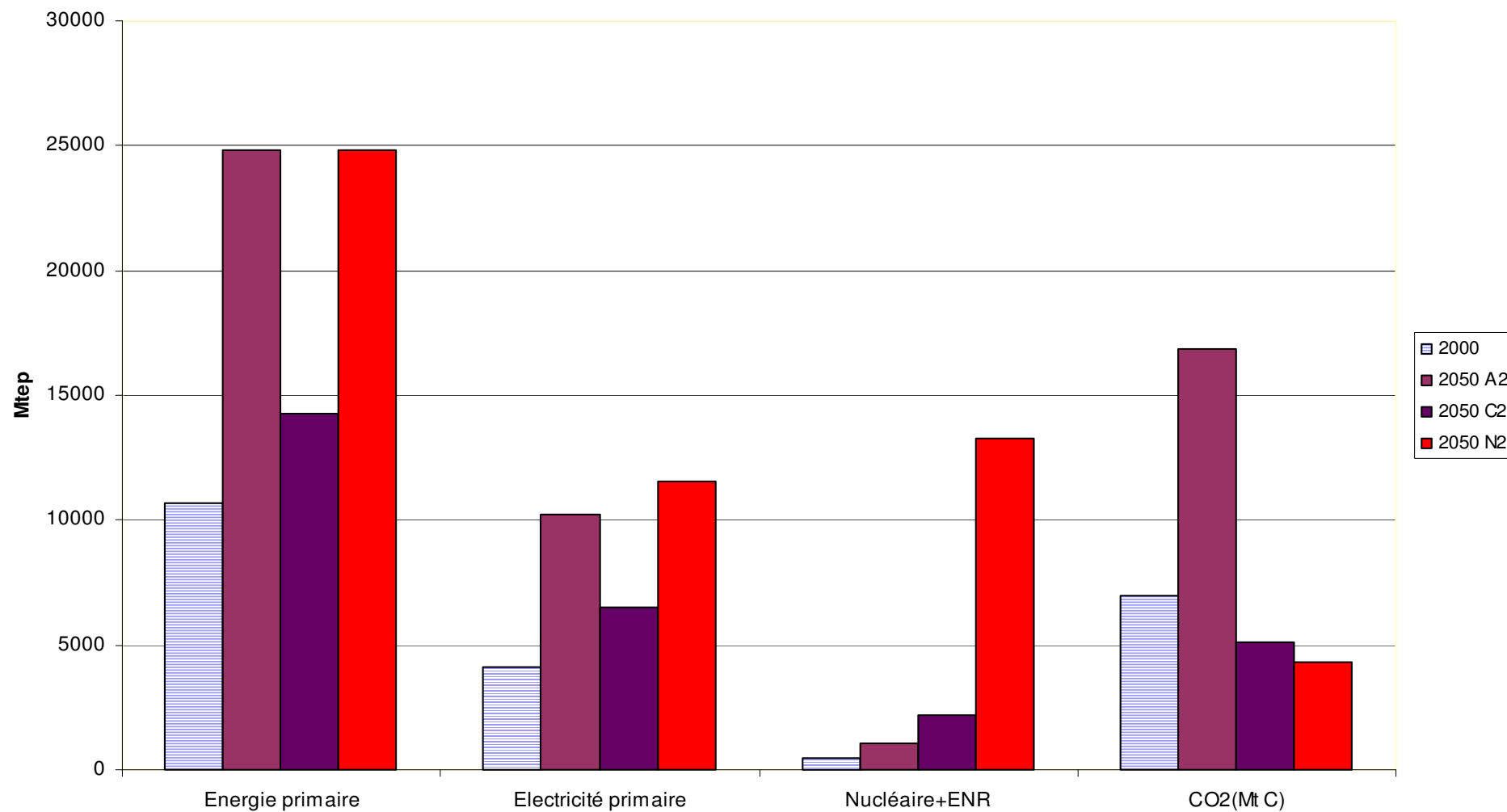
1500 GWe Nucléaire

2060

- Minimiser l'utilisation du charbon et du gaz
- 30% charbon Chine, Inde; 30% gaz Russie; 100% Afrique

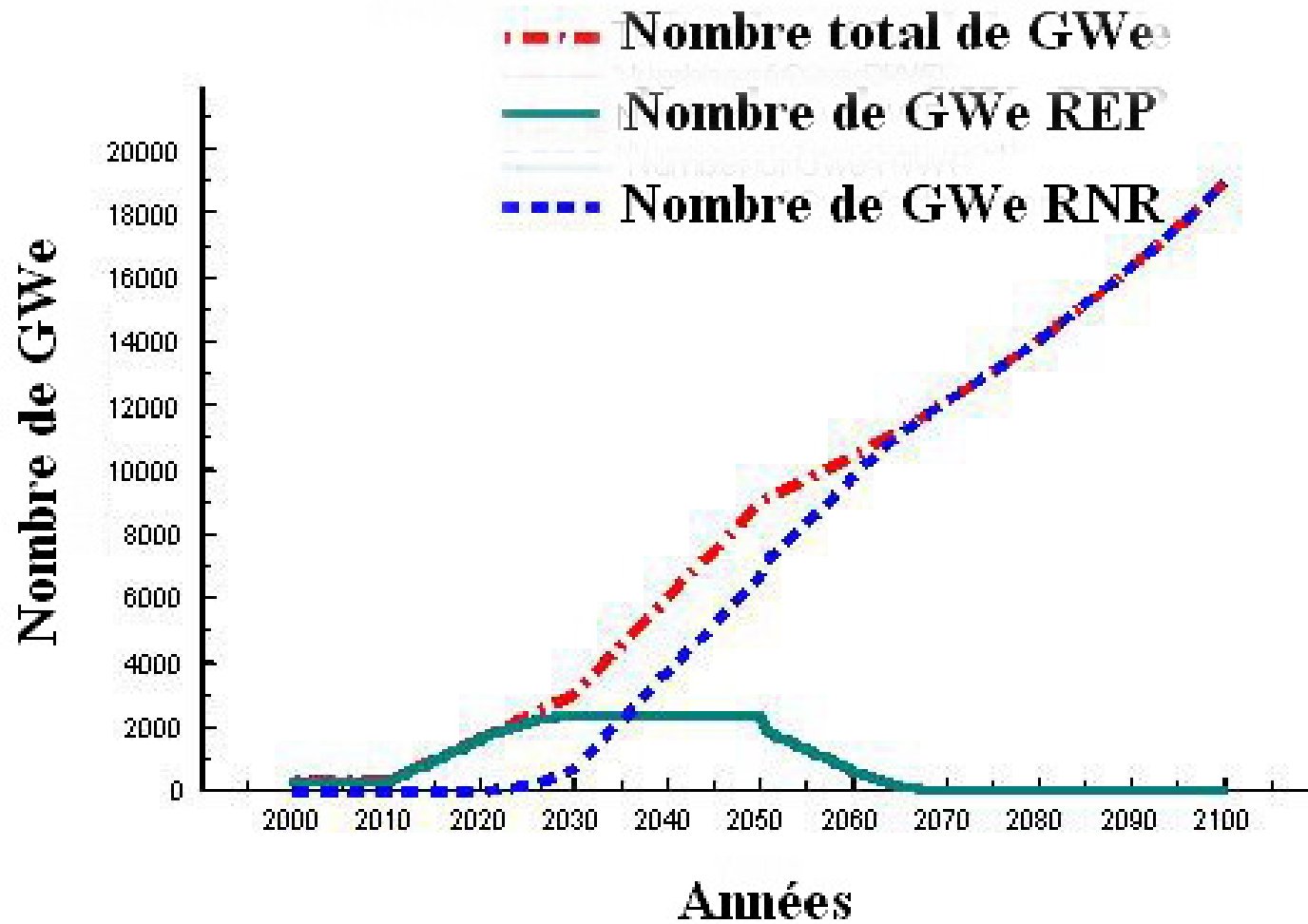
5000 GWe Nucléaire

Scénario ni charbon ni gaz en 2050



Cycles Surgénérateurs

Nombre de GWe (REP+RNR) en fonction du temps



Conclusions

- Au niveau mondial il sera impossible de stabiliser la température au 21ème siècle sans un recours massif au nucléaire.
(Lovelock, Patrick Moore, Lord Smith of Finsbury, Mark Lynas, Chris Goodal, et Stephen Tindale). Obama (Chu):nucléaire+ENR
- On aura besoin de surgénérateurs.
- On aura besoin d'un important parc de **réacteurs « classiques »** pour fournir le combustible des surgénérateurs
- En France le premier objectif devrait être de ne plus utiliser de fuel ou de gaz pour le chauffage. C'est dans ce domaine que les **ER** devraient être utilisées en priorité. Le chauffage électrique n'est pas diabolique; tout dépend de la source d'électricité!
- Le solaire (PV) est l'énergie d'avenir pour les PVD en absence de réseau.
- L'avenir climatique se jouera aux USA, en Chine et en Inde.
Nous pouvons encore fournir un exemple de développement à faible émission de GES.

FIN