

# 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*

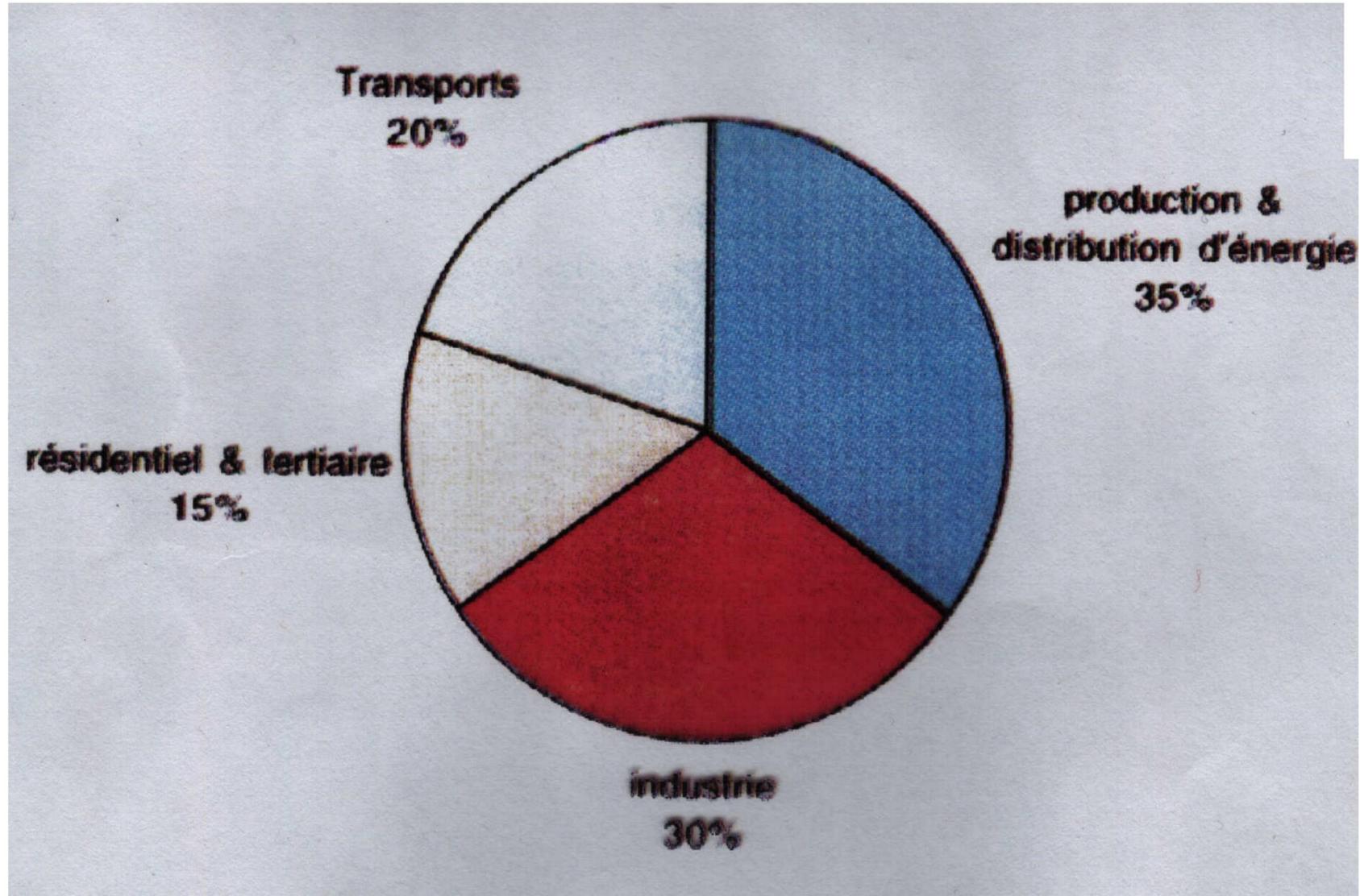
# Serons à nous à court d'énergie?

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

# Autres ressources

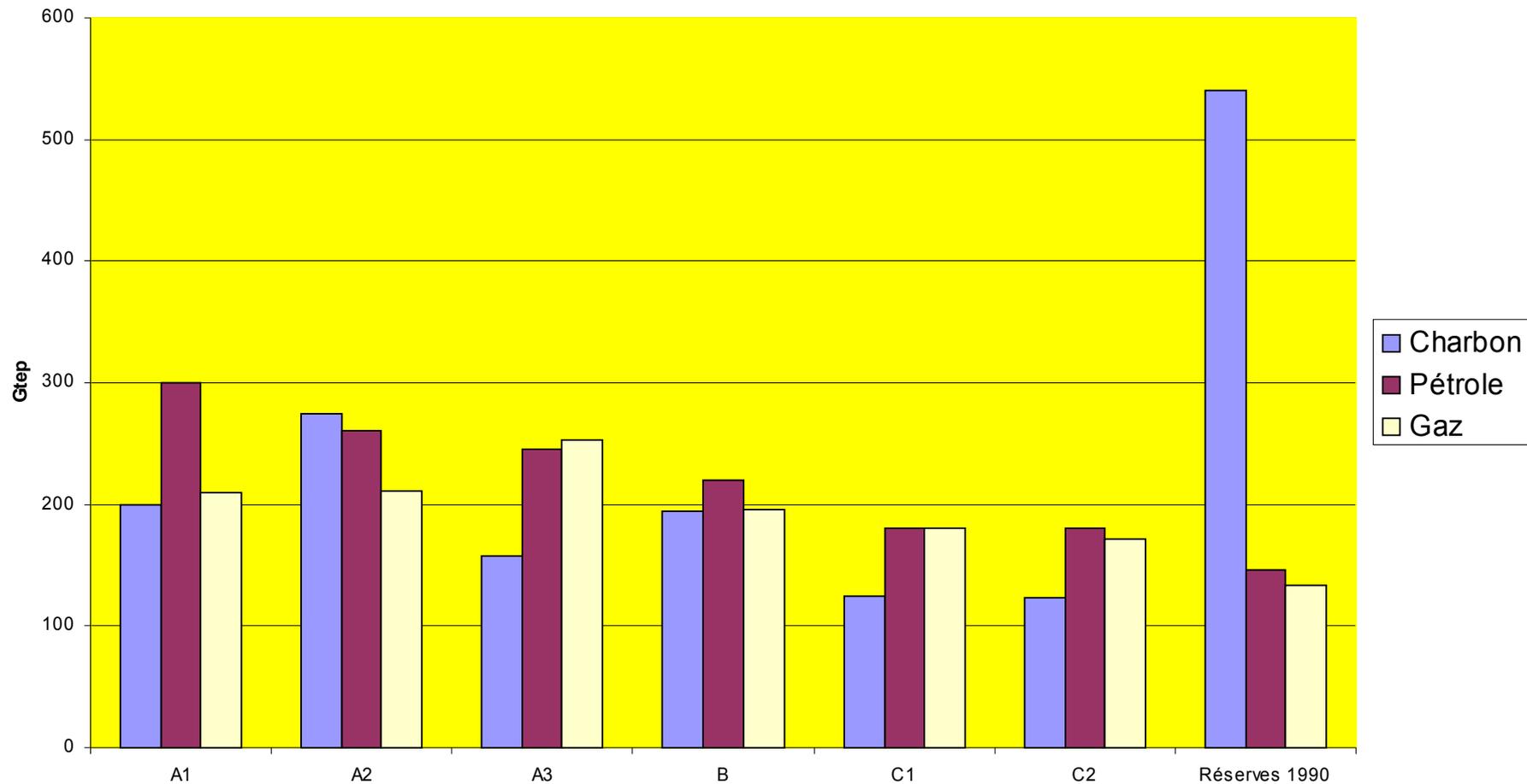
- Vent, hydroélectricité, énergie des océans : énergie solaire+énergie de gravité (Lune)
- Energie géothermique :  $5 \cdot 10^{-5}$  fois plus faible que le flux solaire mais 2000 fois notre consommation.  
Radioactivité Uranium (5 milliards d'années),  
Thorium (12 milliards d'années)
- Energie nucléaire (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)



# Épuisement des réserves fossiles

## Scénarios IASA (CME)



# Réchauffement climatique

# Quel effort?

- Rejets actuels : 7,5 GtC
- Nb Humains: 6,5 Milliards
- Rejet/ha Monde: 1,15 Tonne
- Rejet/ha France: 1.6 Tonne
- Rejet/ha USA: 5,2 Tonnes
- Inde : **0,33 Tonne** Chine : 1,16

Stabilisation de la température: **3GtC**

D'autant plus haute qu'on attend

- Horizon **2050**
- Nb Humains : 9 Milliards
- Rejet/ha Monde: **0.33 Tonne**
- Réduction France >5
- Réduction USA >15

# Les facteurs à contrôler

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

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

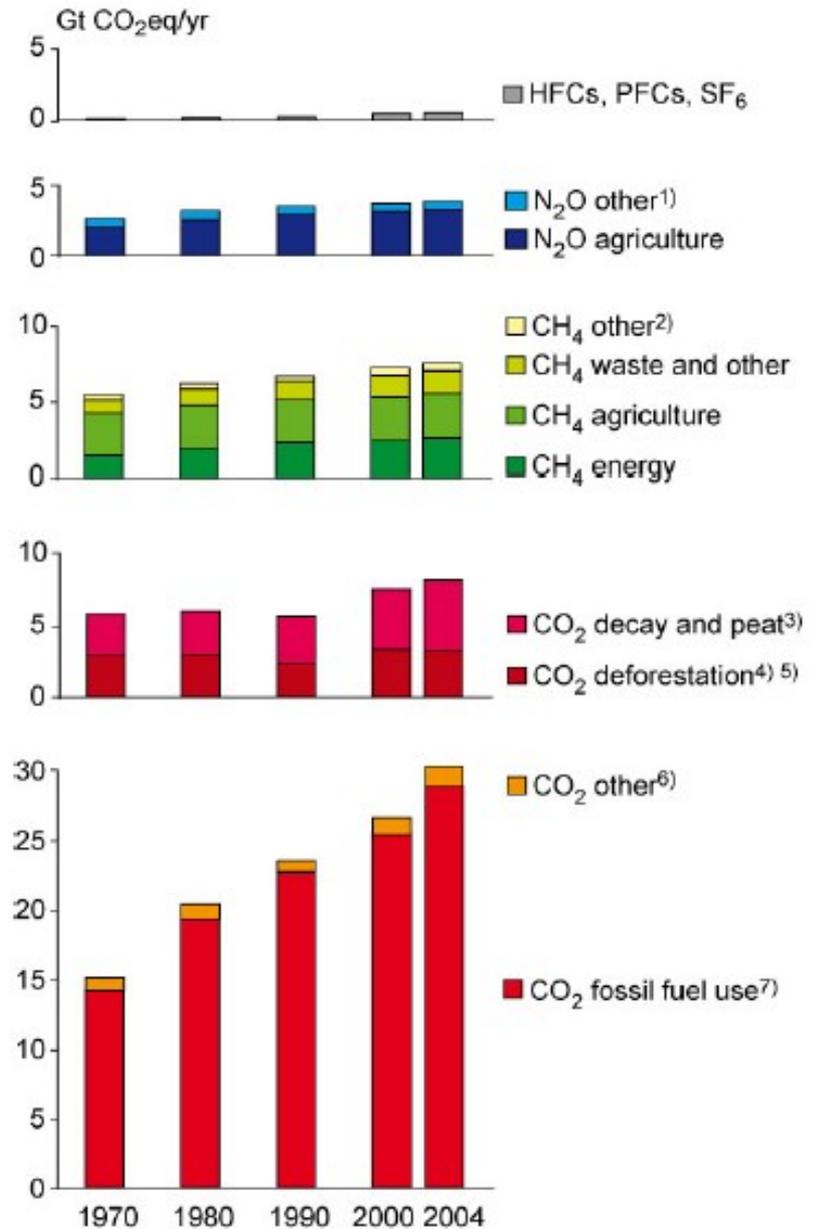
Intensité énergétique

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

Intensité en CO2

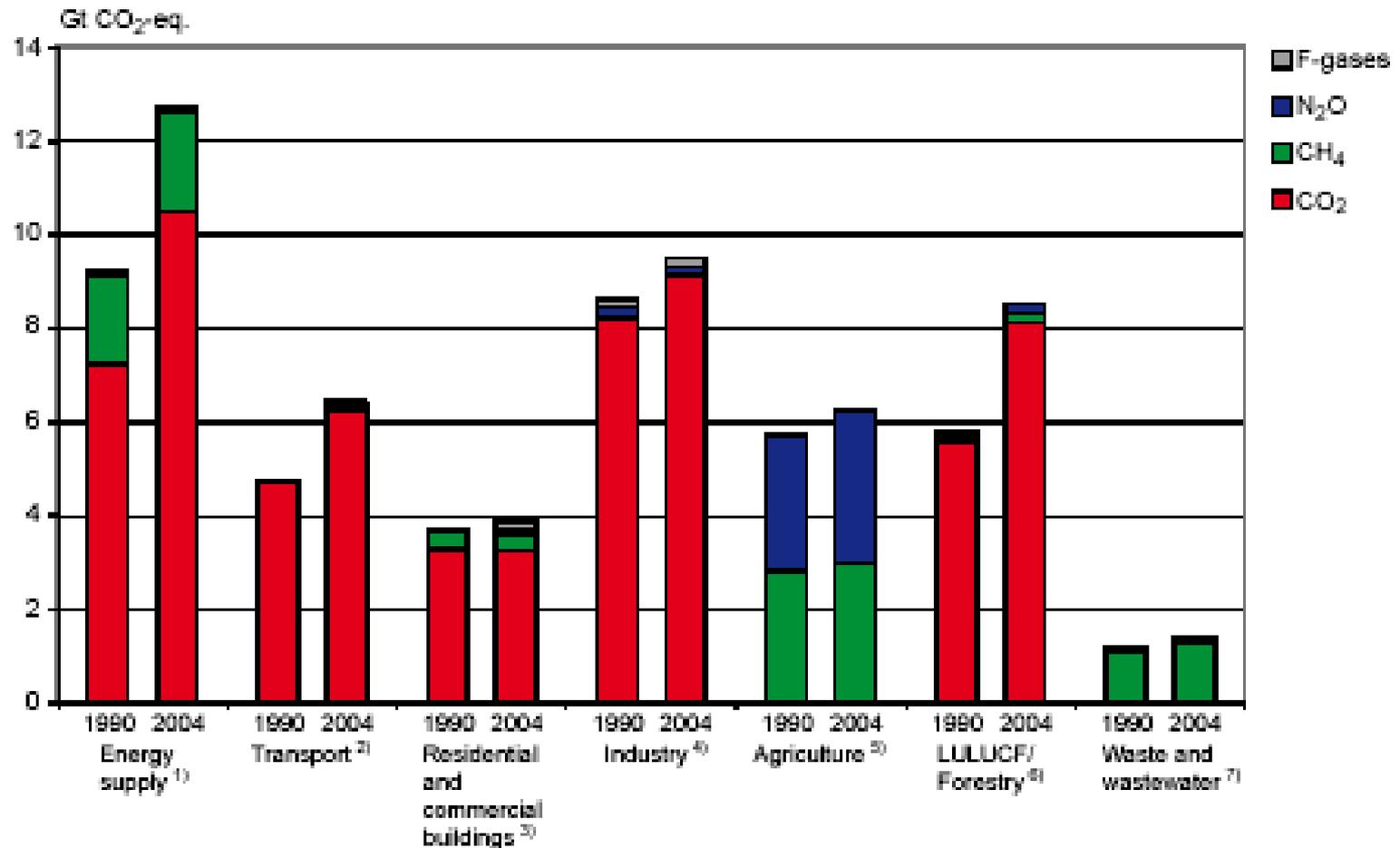
## Evolution des émissions Mondiales de GES

Dominée  
Par le CO<sub>2</sub>

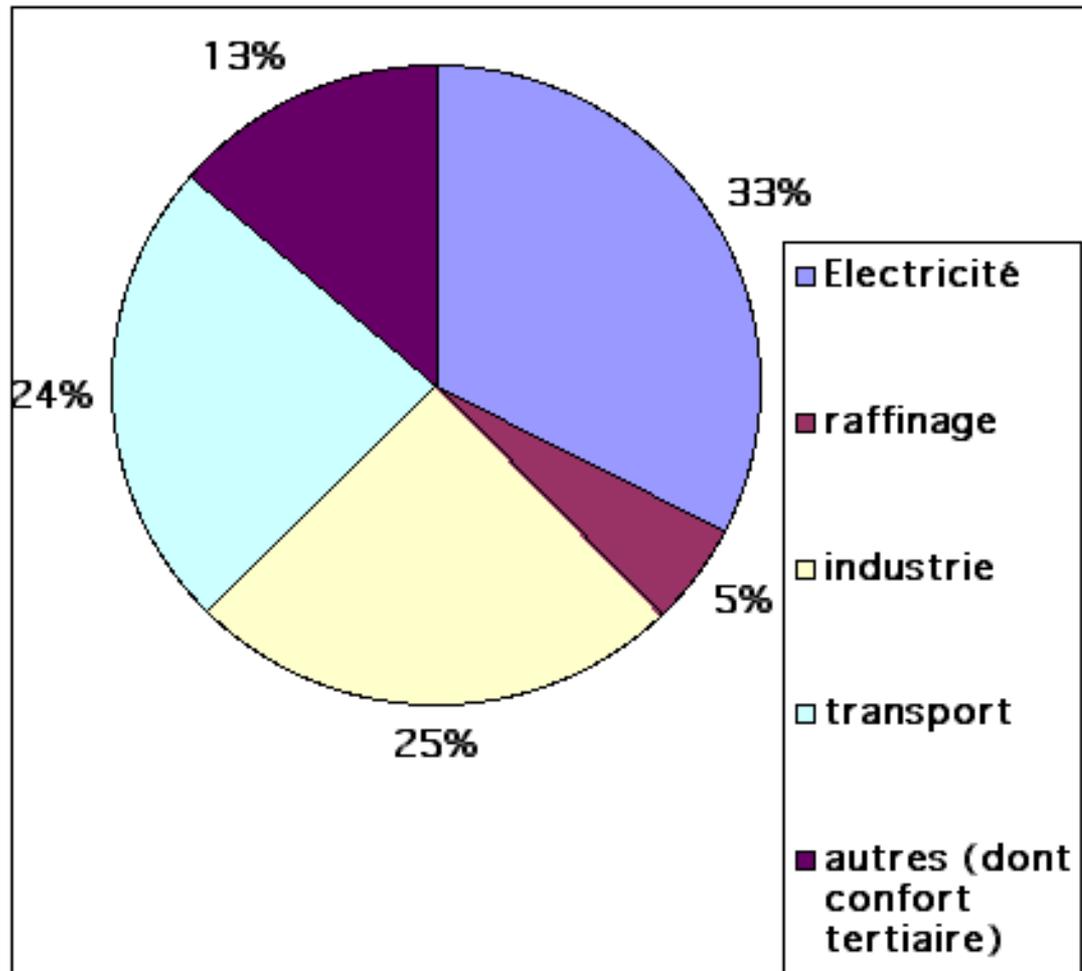


# Emissions de GES par secteur

## Rôle dominant du secteur energie



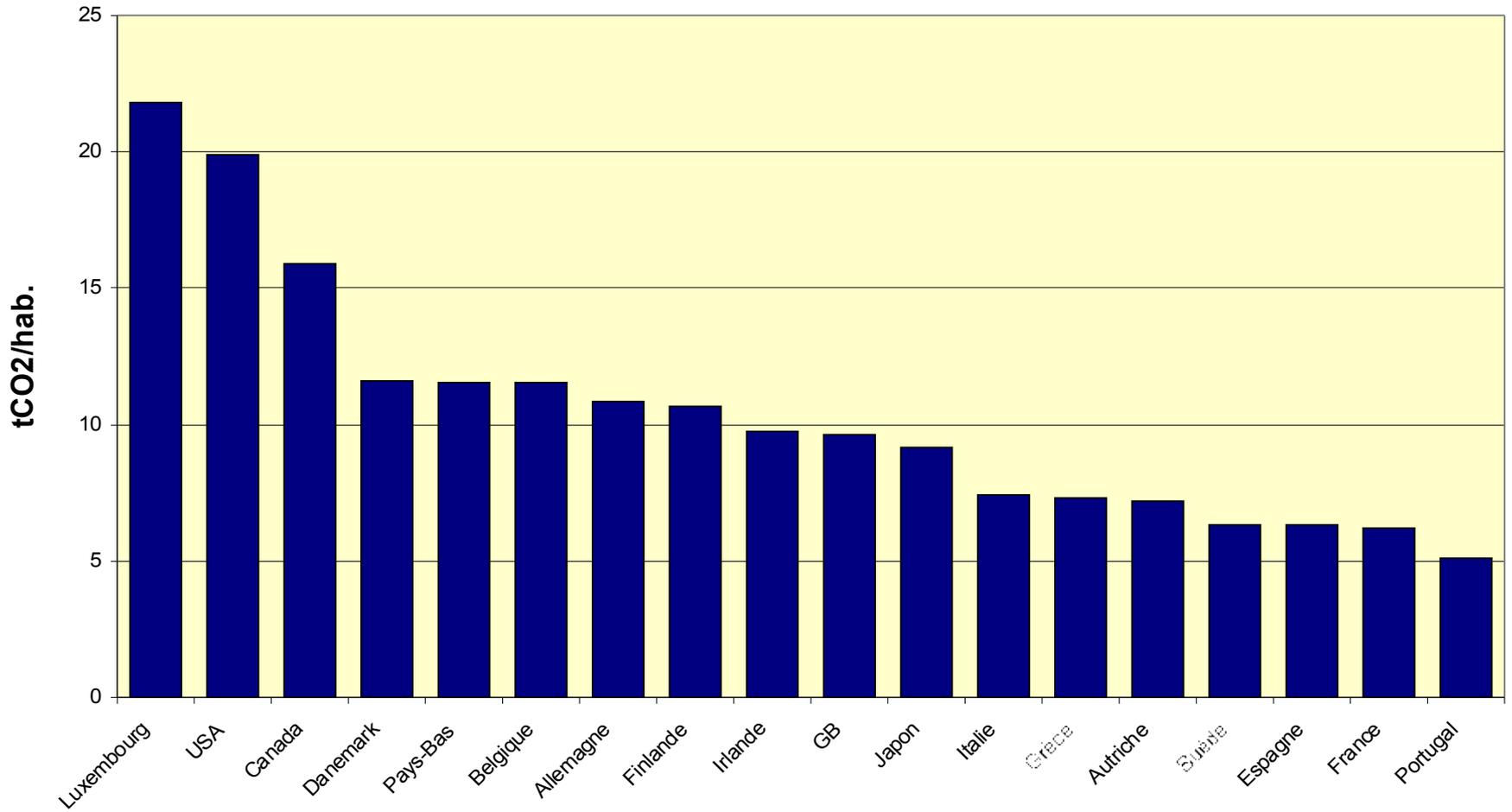
# Origine des émissions de CO2 dans le monde



# Rôle stratégique de l'électricité

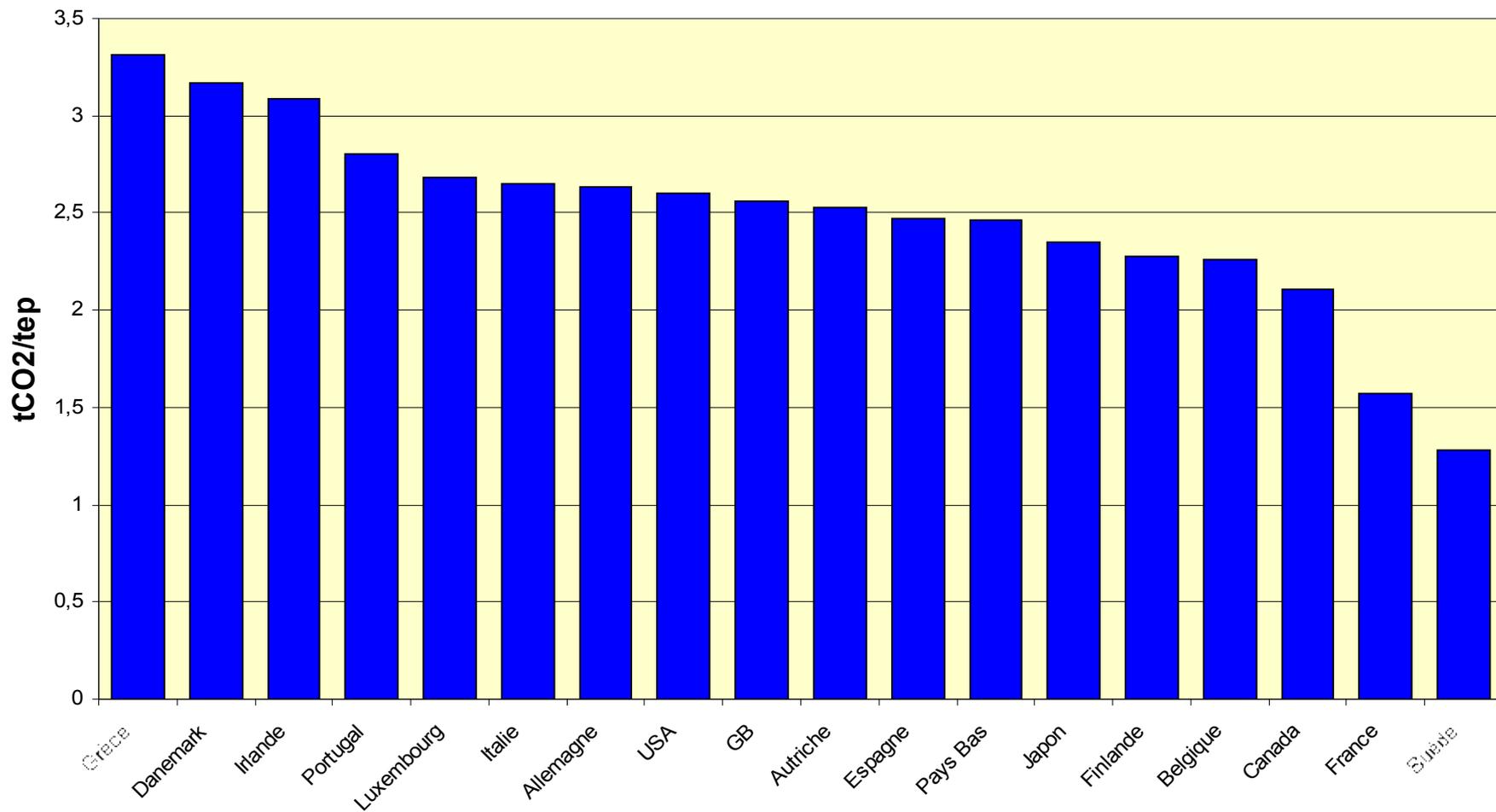
# tCO2/ha

## Emission de CO2 par habitant

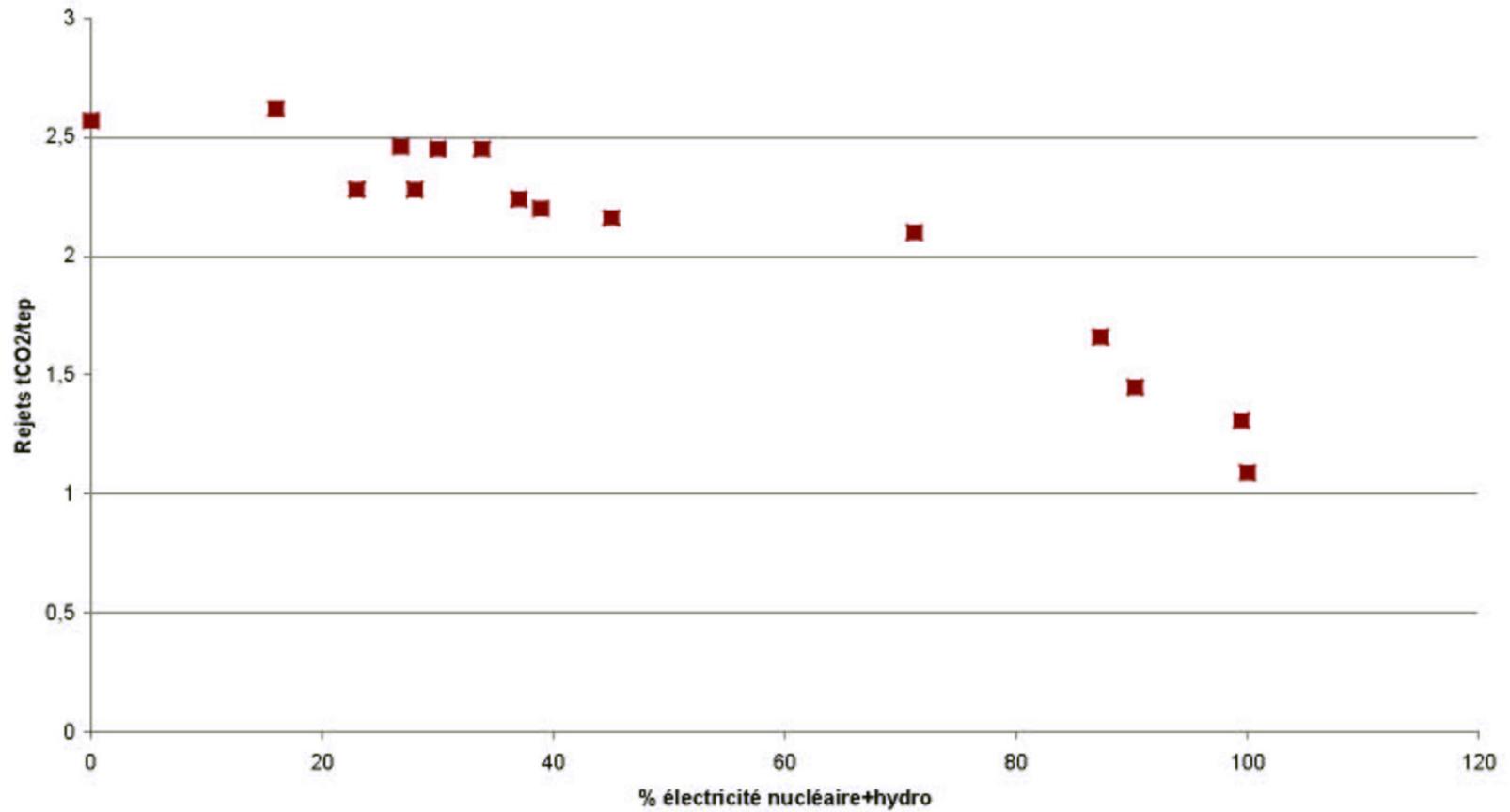


# tCO<sub>2</sub>/tep

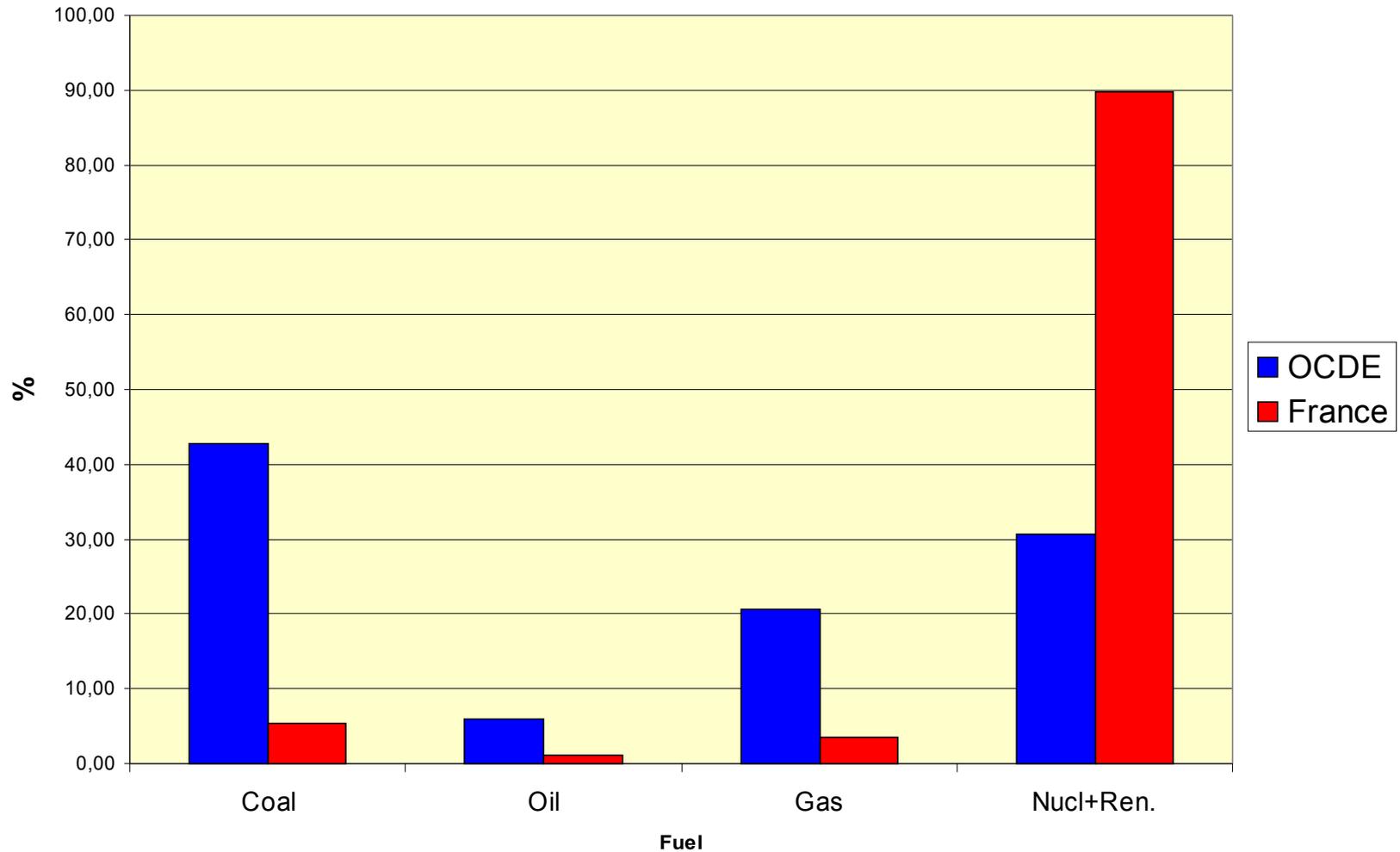
tCO<sub>2</sub>/tep (1995)



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



# Comparaison des mix électriques OCDE vs France

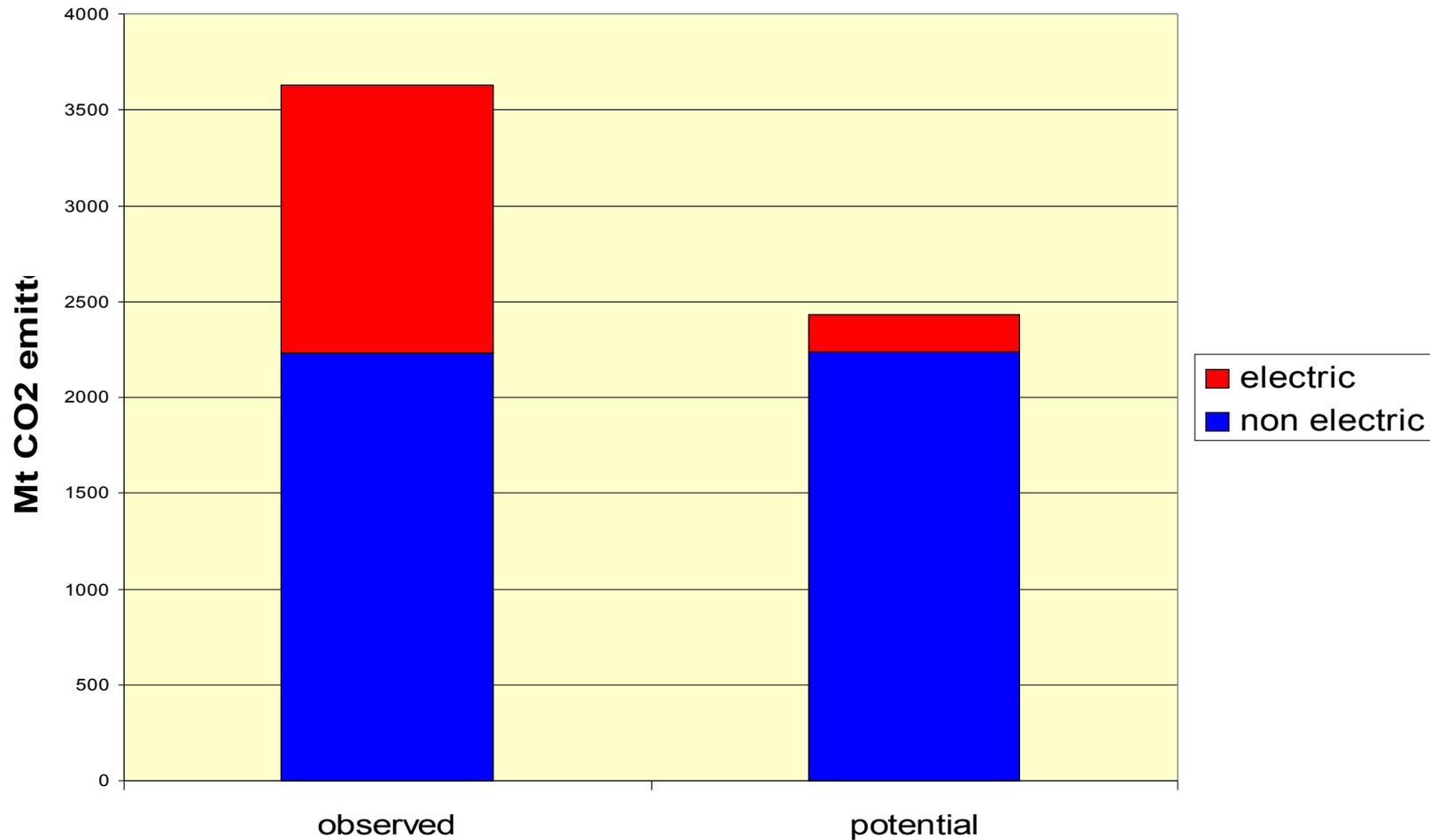


# Première étape: mix électrique

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

# Comparaison des émissions de CO2 pour les mix observés et potentiels

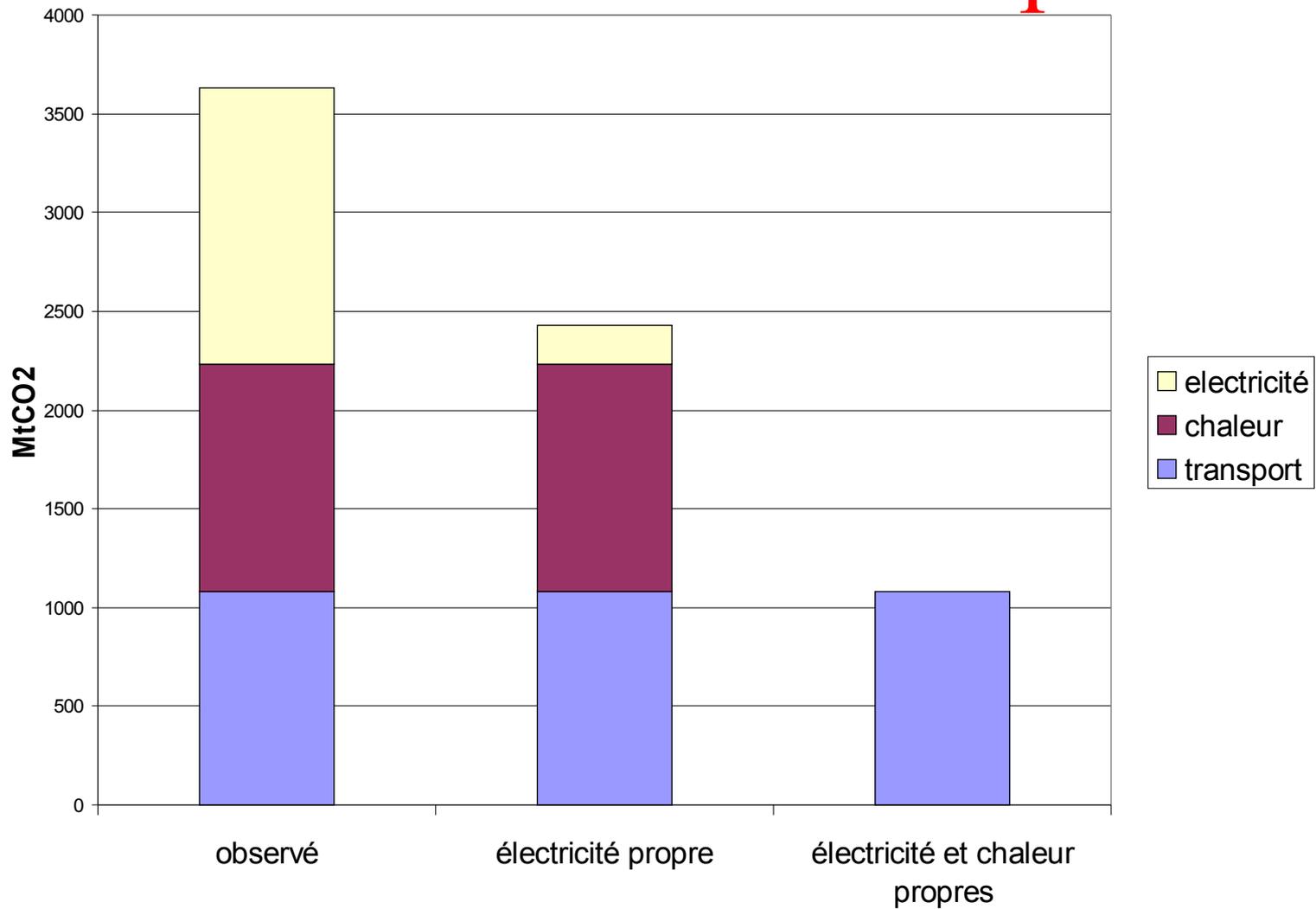
Gain: 0.67



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 (CO<sub>2</sub>))
- Bio-Carburants

## -Chauffage

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

# Economies d'énergie

# Pratiques de vie

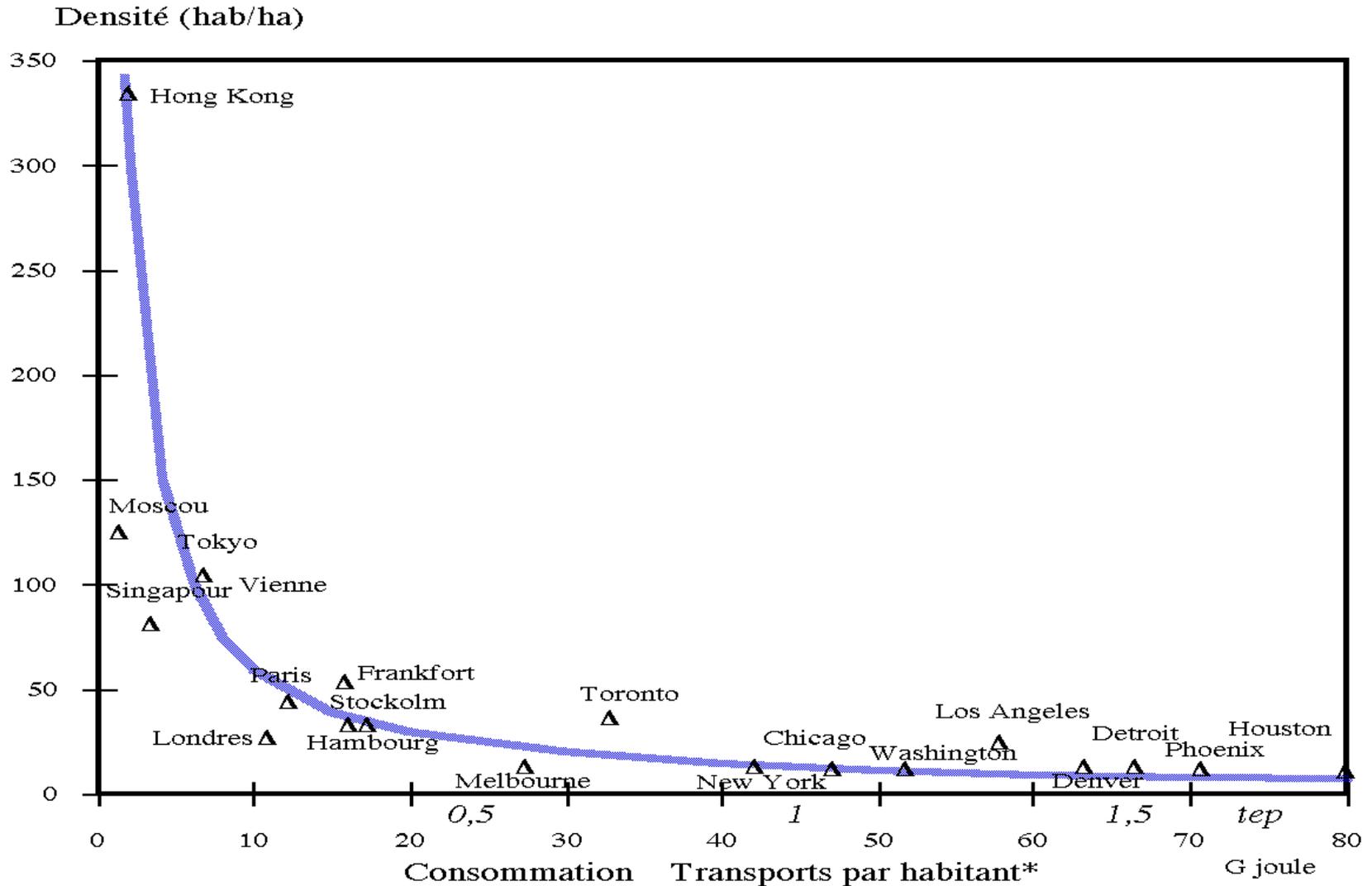
- Modes de déplacement
- Modes de chauffage
- Pratiques agricoles
- Alimentation
- Vacances au loin

Mais:

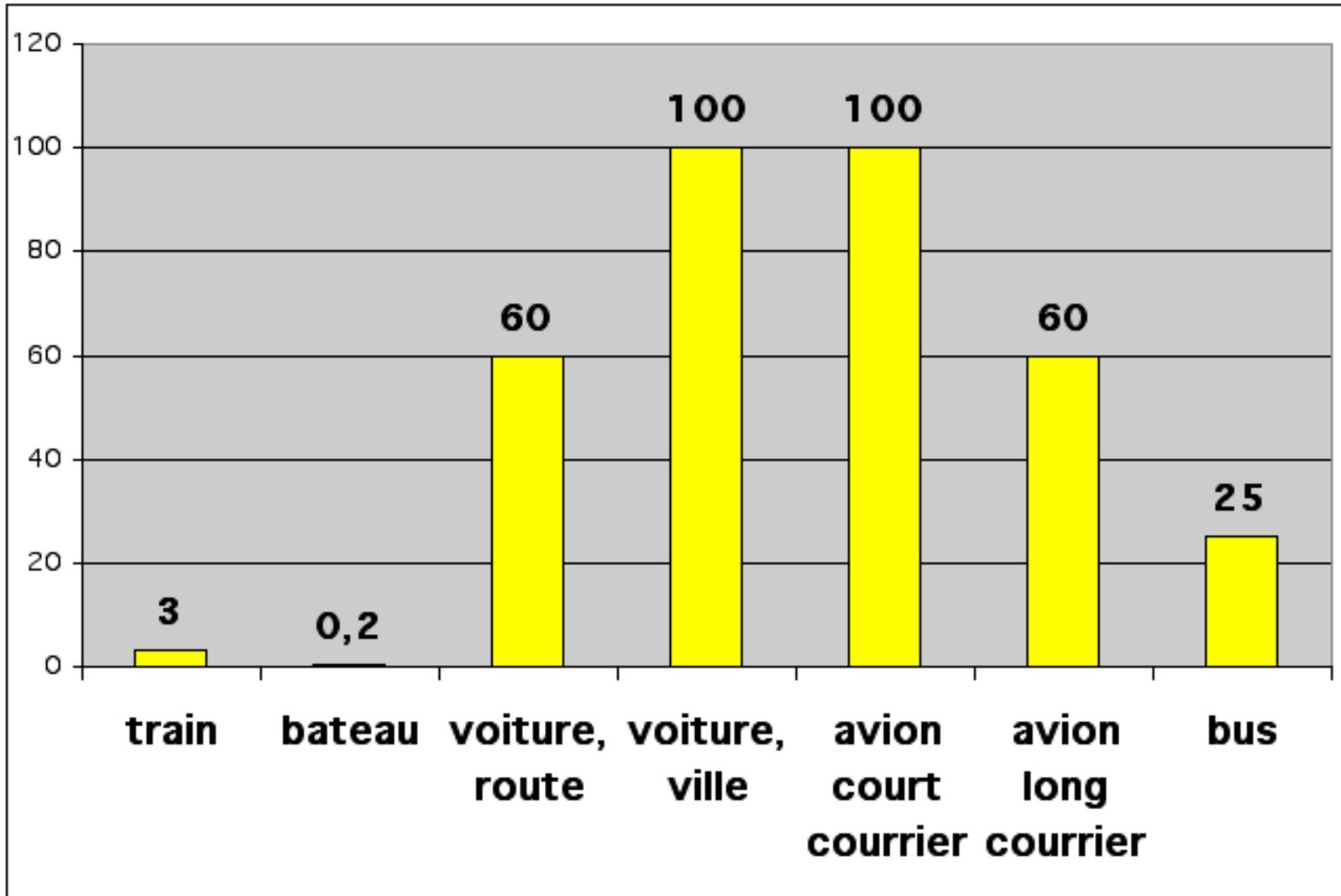
- Comment faire accepter les sacrifices dans un contexte d'inégalité sociale?
- L'avenir énergétique se joue en Chine et en Inde

Importance des technologies

# Densité de population



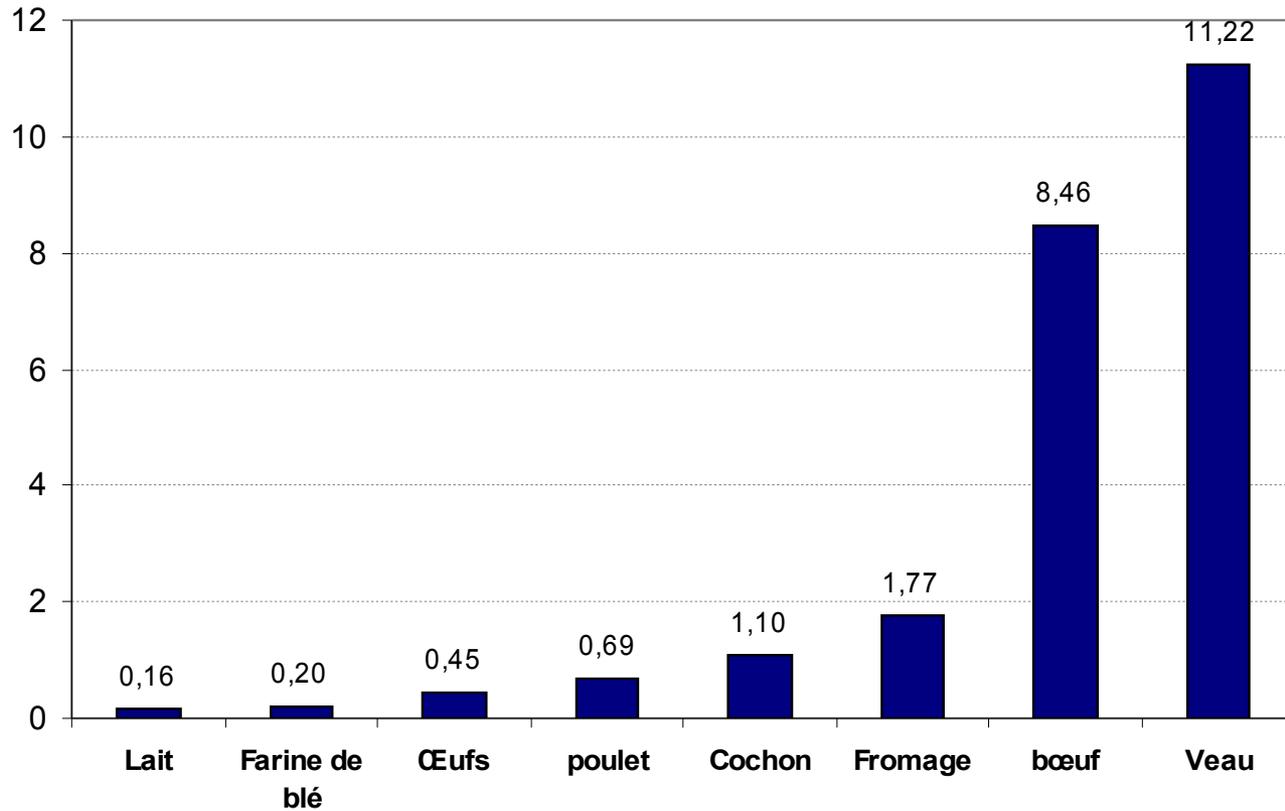
# Emissions de GES en g.e.C par km.passager France



# 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

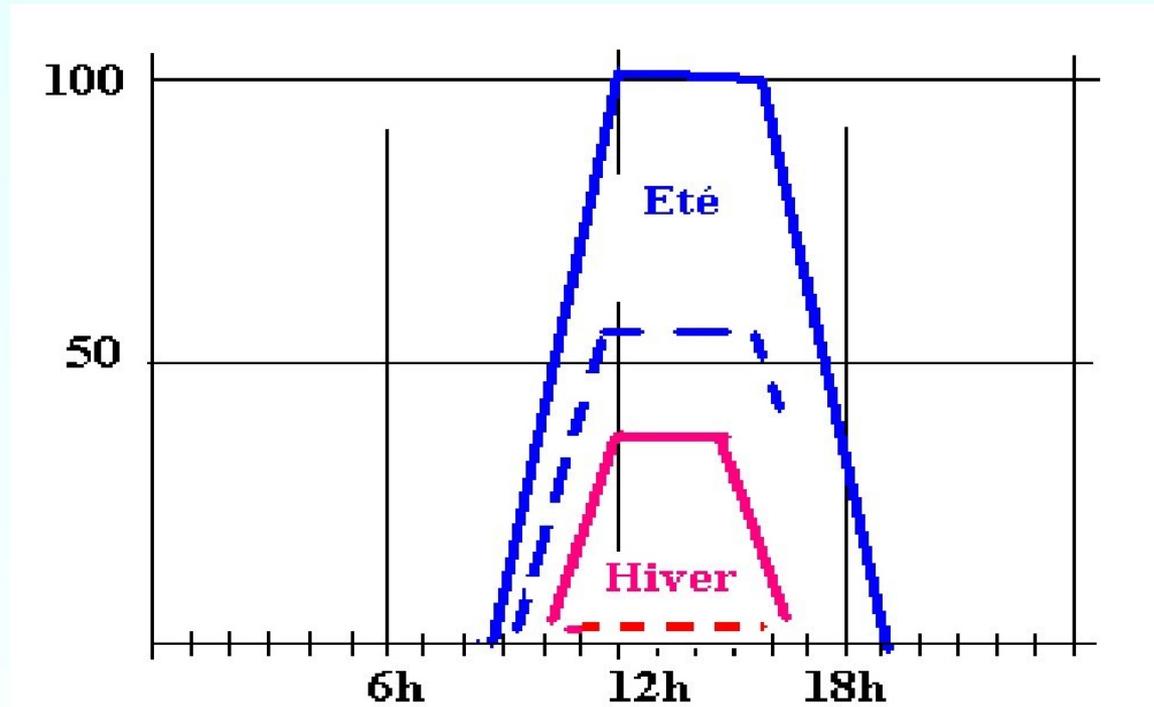
# Energie solaire

# 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 à 100%	Service, Réseau >100%
Prix mini kWh Problème n°1	0,3 Euros Module Intégration	1,5 Euros Stockage $\rho$ 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 ?

# 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/m<sup>2</sup> au sol soit environ 5%
  - Deux fois moins que le PV

# Capteurs cylindriques

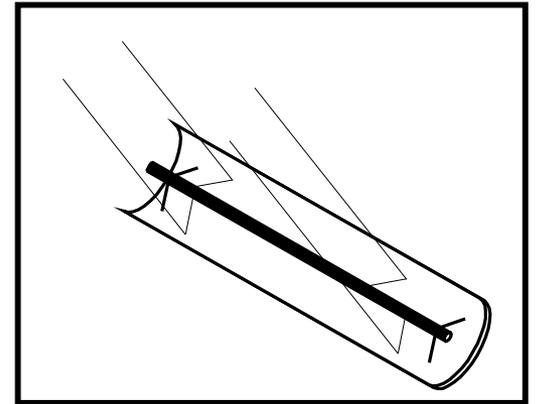
Orientation est-ouest

Mouvements lents et simples

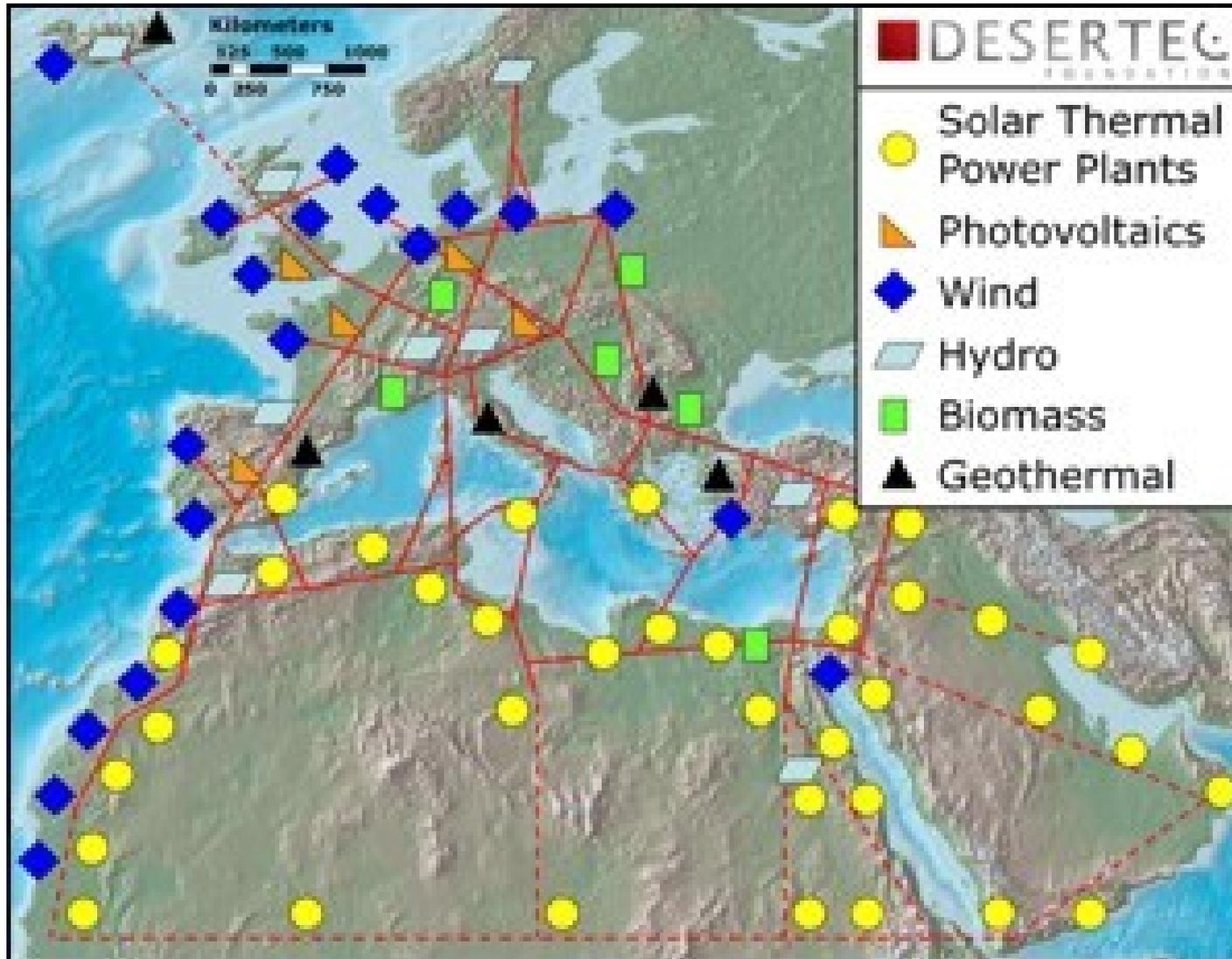
Rendements des miroirs: 8-12%

Caloporteurs organiques

Rendement thermodynamique: 37%



# Desertec

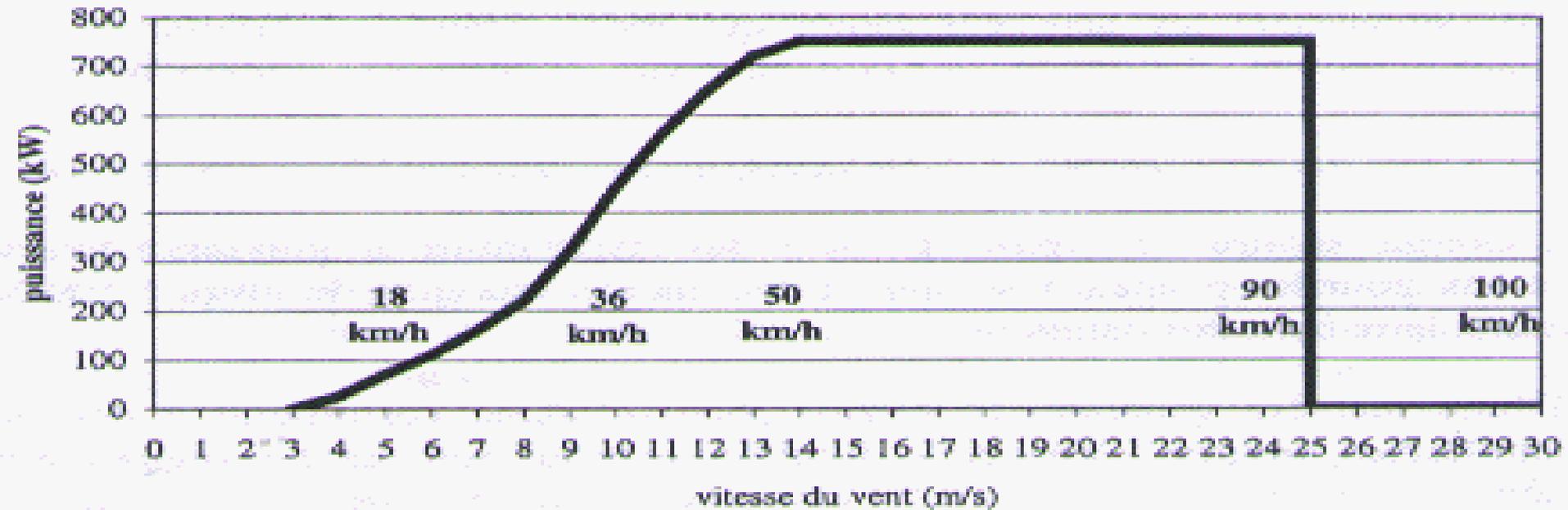


# Hydro-électricité

- 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

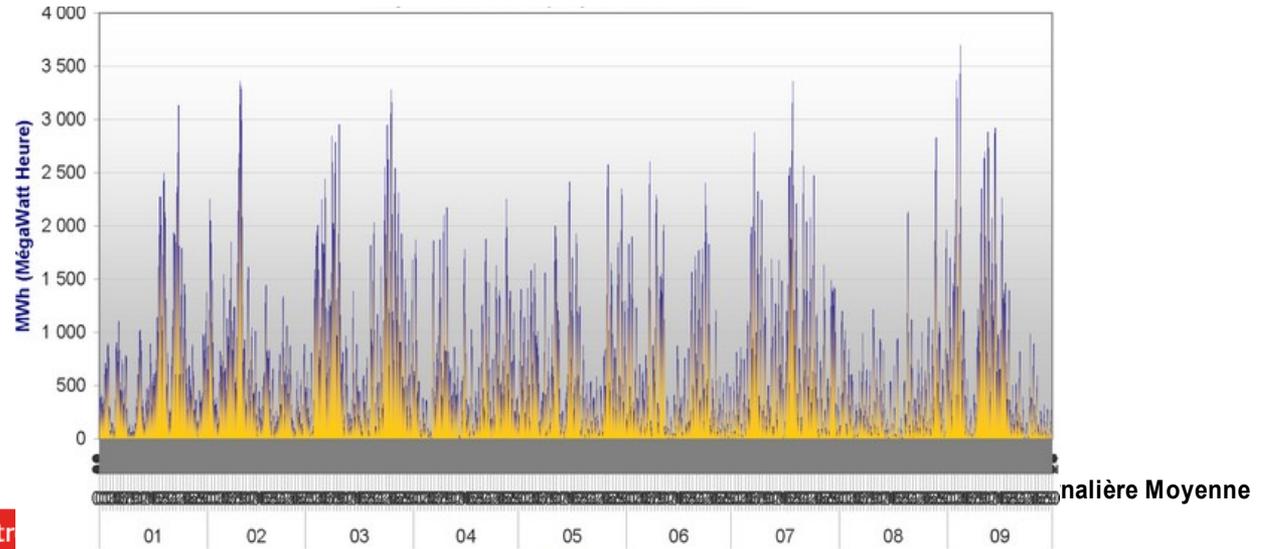
Eolien

# Rendement



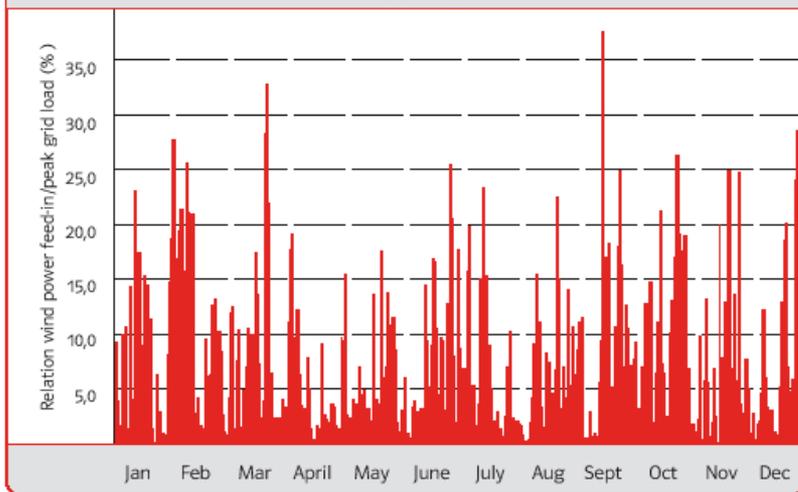
# C'est « presque » pareil partout!

France 2009  
4500 MW  
23%

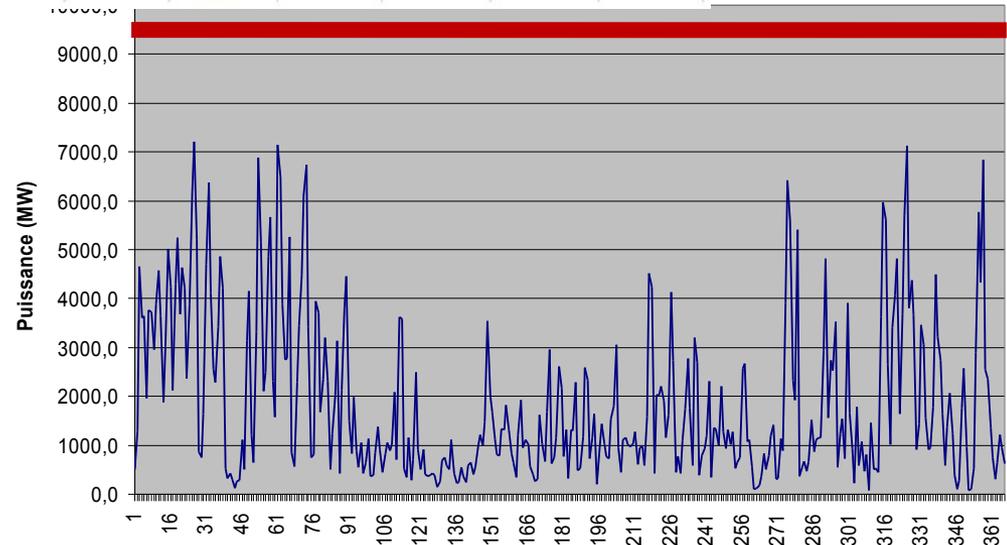


### 3. Wind power feed-in in the E.ON control

2004 between 0.2 and 38% of daily peak grid load

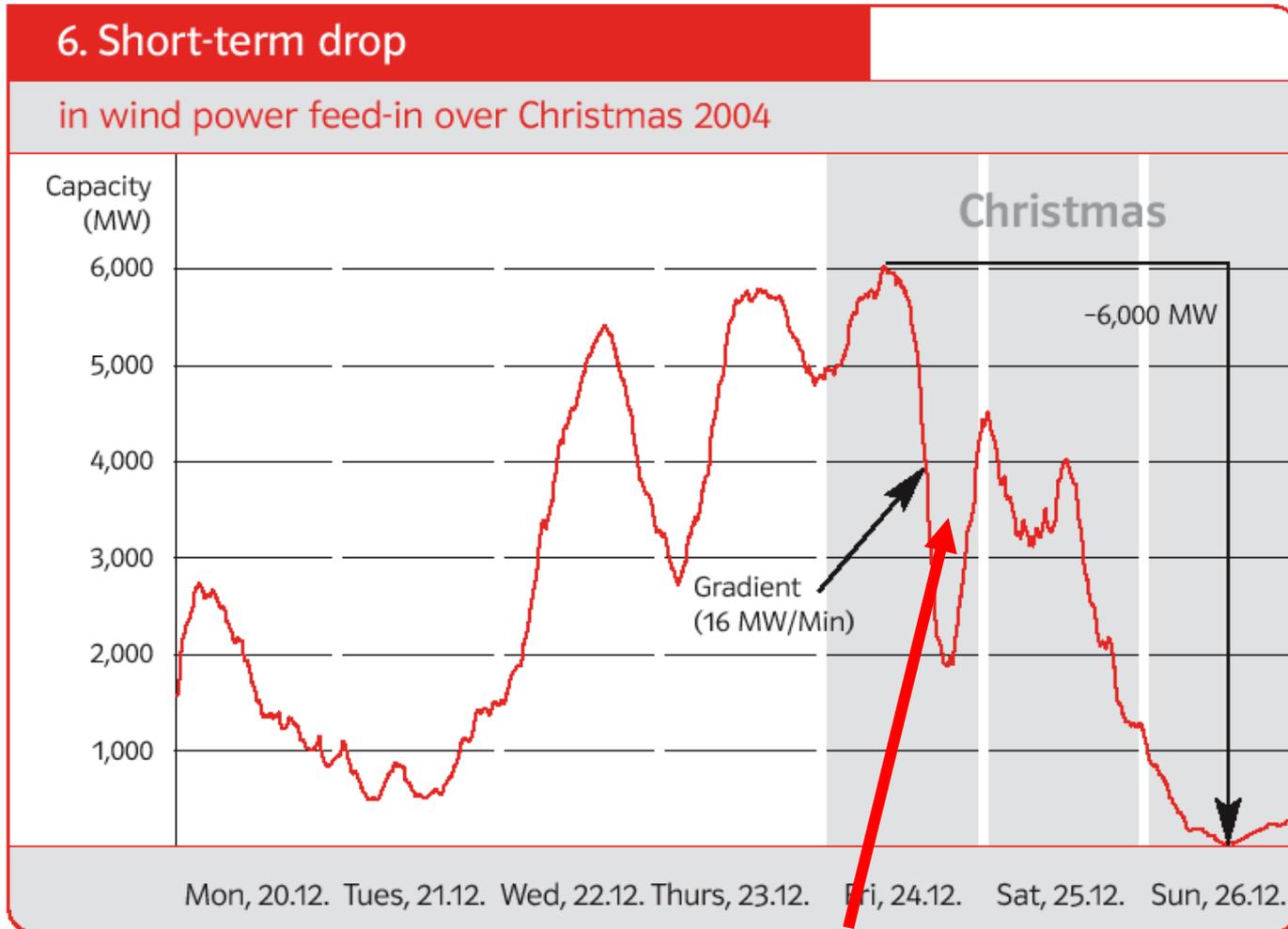


E-ON: 7500 MW, 21%



Vattenfall: 9400 MW, 24%

# Puissance éolienne délivrée: détail

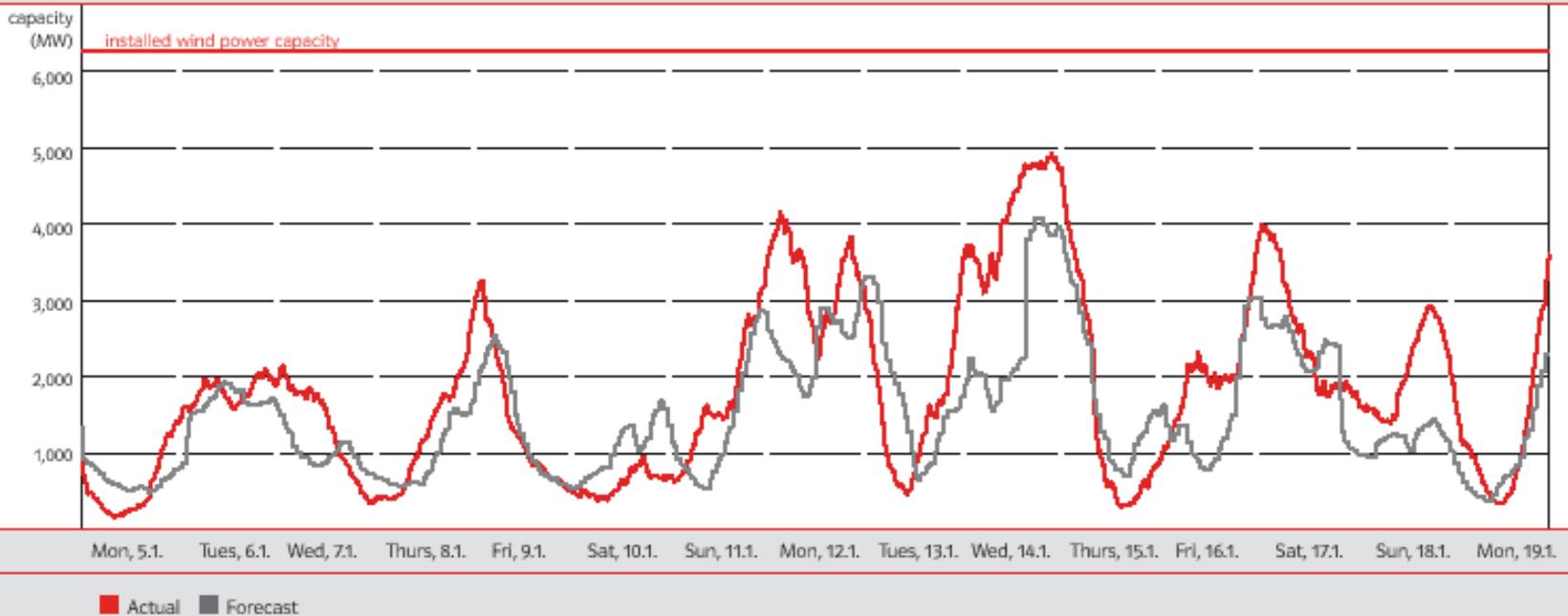


**Pente: 1000 MW/h**

# Fiabilité de prévision de la puissance éolienne

## 8. Limited accuracy of the weather forecast

limits the accuracy of the wind power forecast - example: E.ON control area, 5 to 19 January 2004

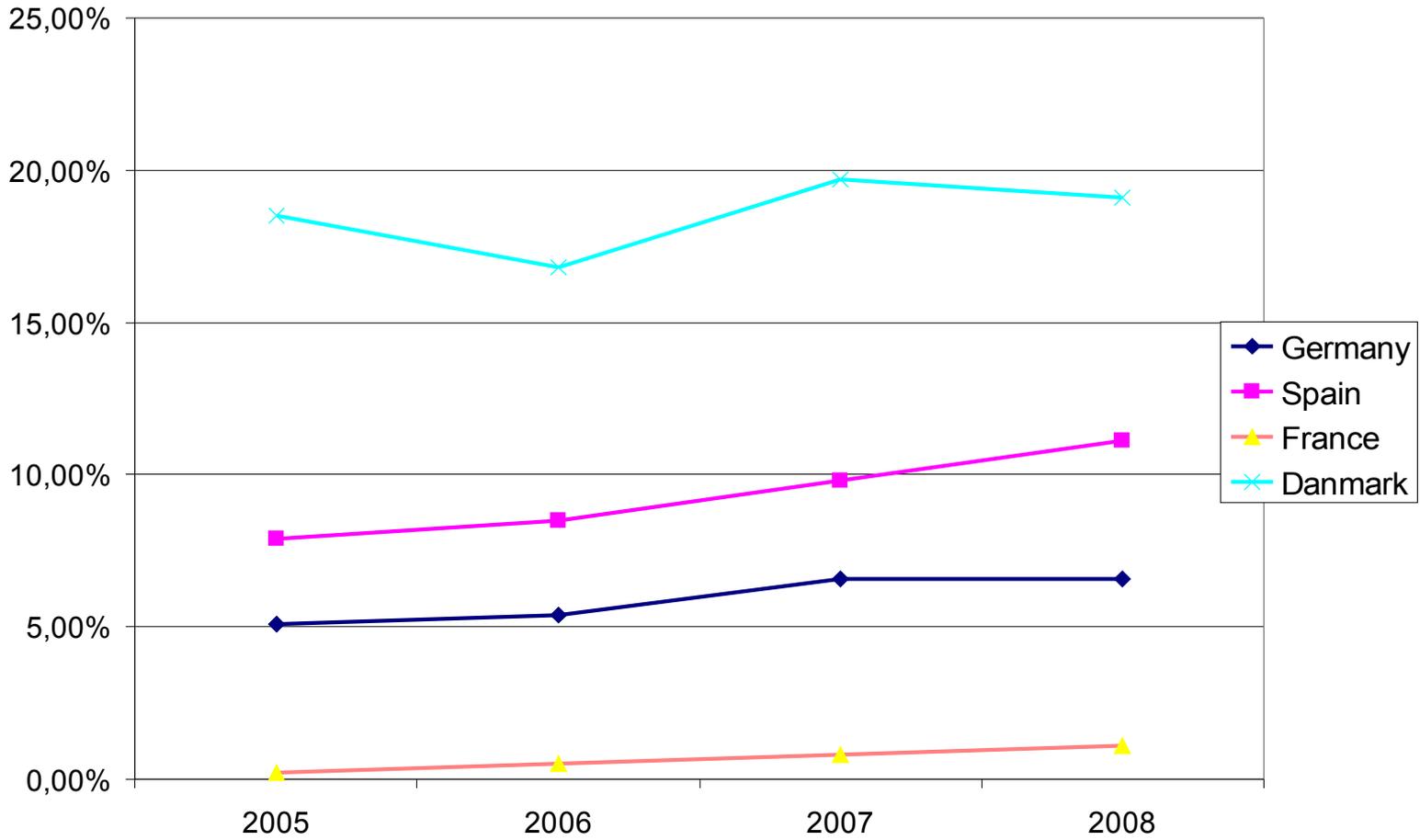


# Europe: rendement des parcs éoliens (2009)

	P fin 2008	P fin 2009	P moyen 2009 MW	Production GWh	Rendement %
Allemagne	23896	25777	24837	37500	17,2
Espagne	16689	19148	17919	36188	23,1
Italie	3736	4850	4293	6087	16,2
France	3542	4521	4032	7800	22,1
UK	3406	4050	3728	9259	28,4
Portugal	2862	3535	3199	6639	23,7
Danemark	3162	3480	3321	6716	23,1
Hollande	2116	2220	2168	4800	25,3
Suede	1048	1560	1304	2519	22,1
Irlande	1027	1260	1144	2957	29,5
Grèce	985	1087	1036	2107	23,2
Belgique	392	563	478	834	19,9
Europe	65172	74800	69986	128504	21,0

Source: EurObserv'Er 2009

# % TPES forts

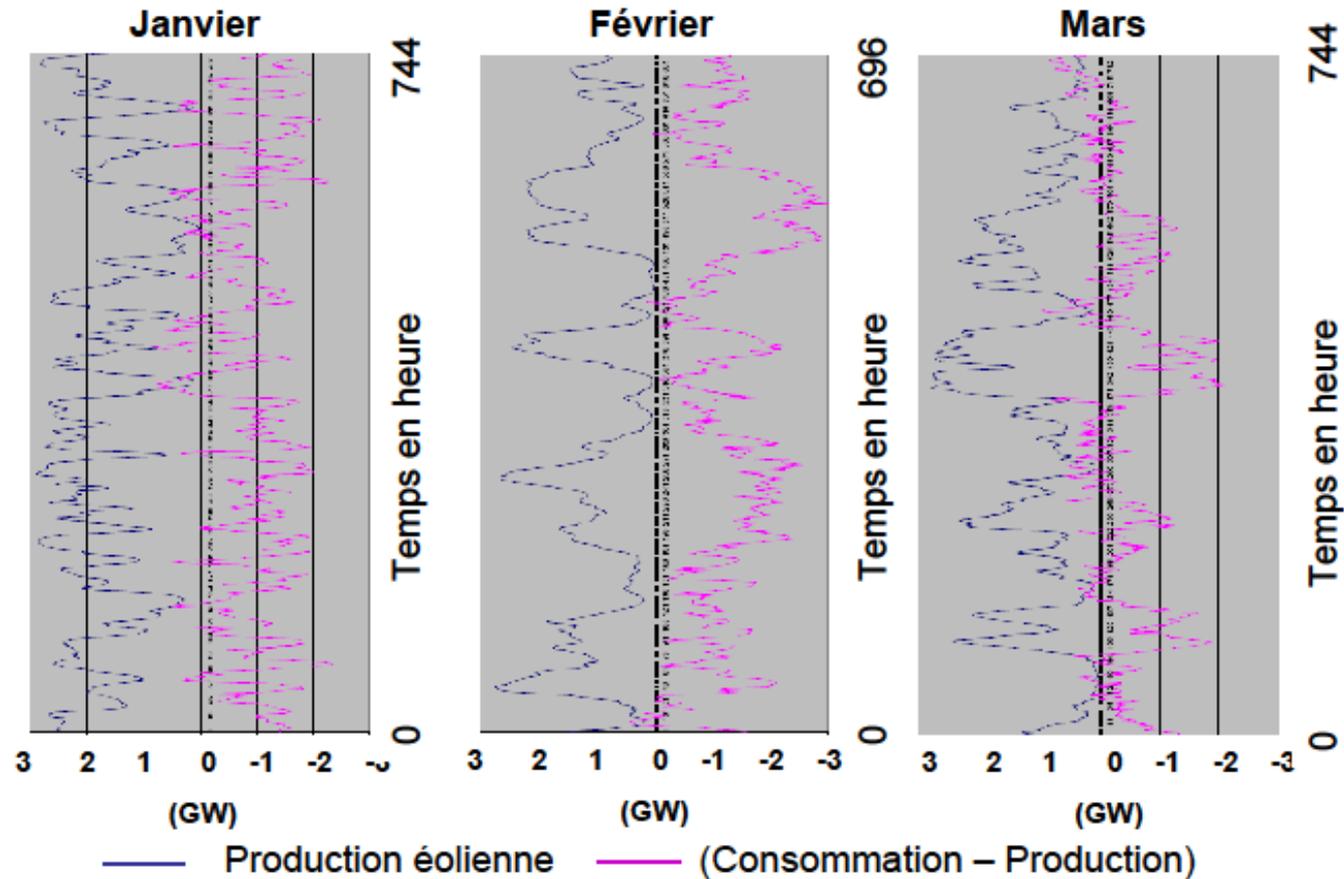


# Export DK

Danemark, Electricité, Année 2007

Comparaison entre la production éolienne et les exportations

$$(\text{Consommation} - \text{Production}) = (\text{Importation} - \text{Exportation})$$



# 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 CO<sub>2</sub>

- Capture du CO<sub>2</sub>

- Post-combustion  $C+O_2 \rightarrow \underline{CO}_2 + \text{Energie}$

- Pré-combustion  $C+H_2O \rightarrow H_2+CO$



- Elimination du N<sub>2</sub> avant (oxy-combustion)

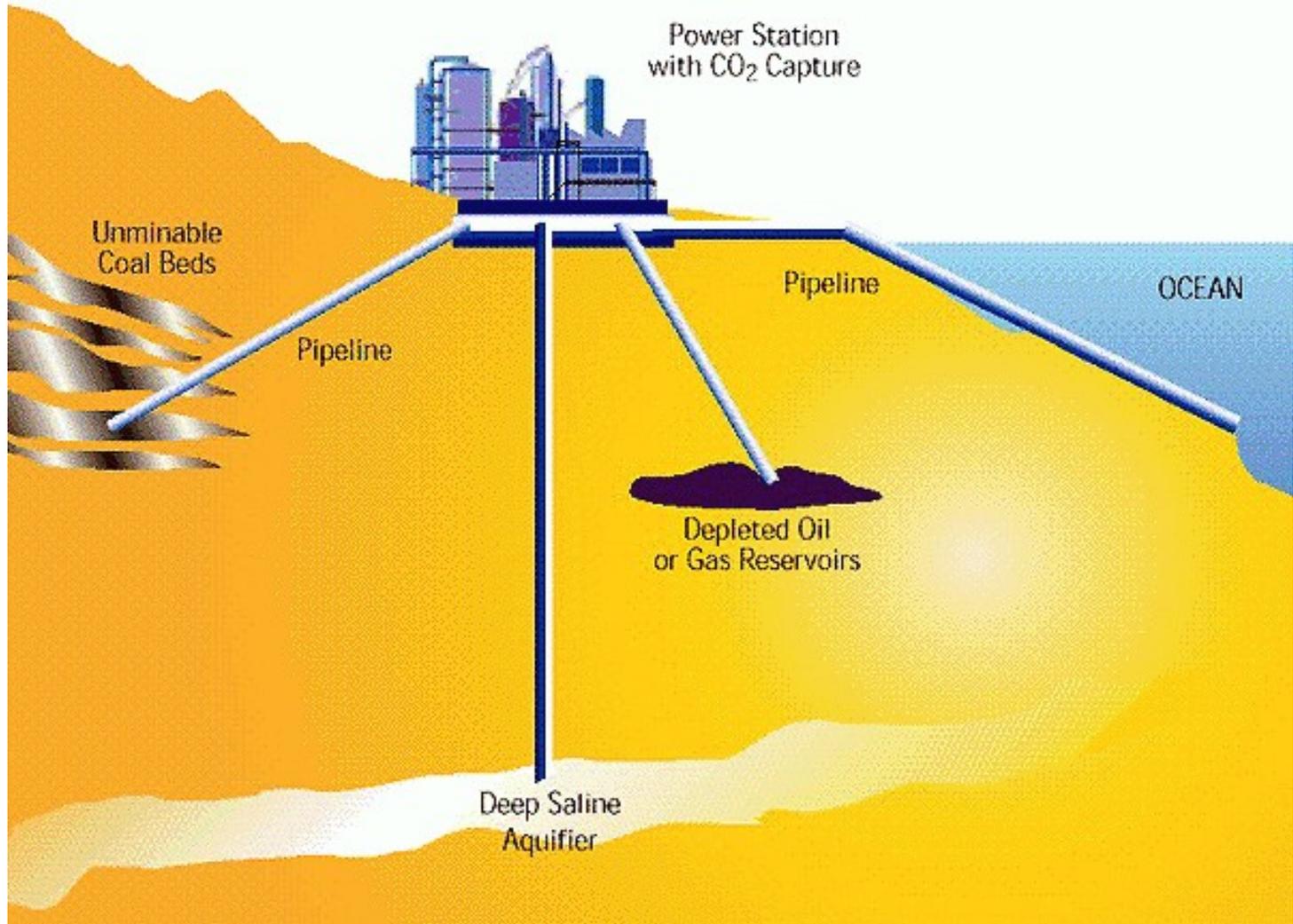
- Séquestration

- Anciens gisements pétroliers et gaziers (250 Gt?)

- Anciennes mines de charbon (5 GtC)

- Nappes salines aquifères (250 GtC? )

# I. Capture et stockage du CO<sub>2</sub>



# 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

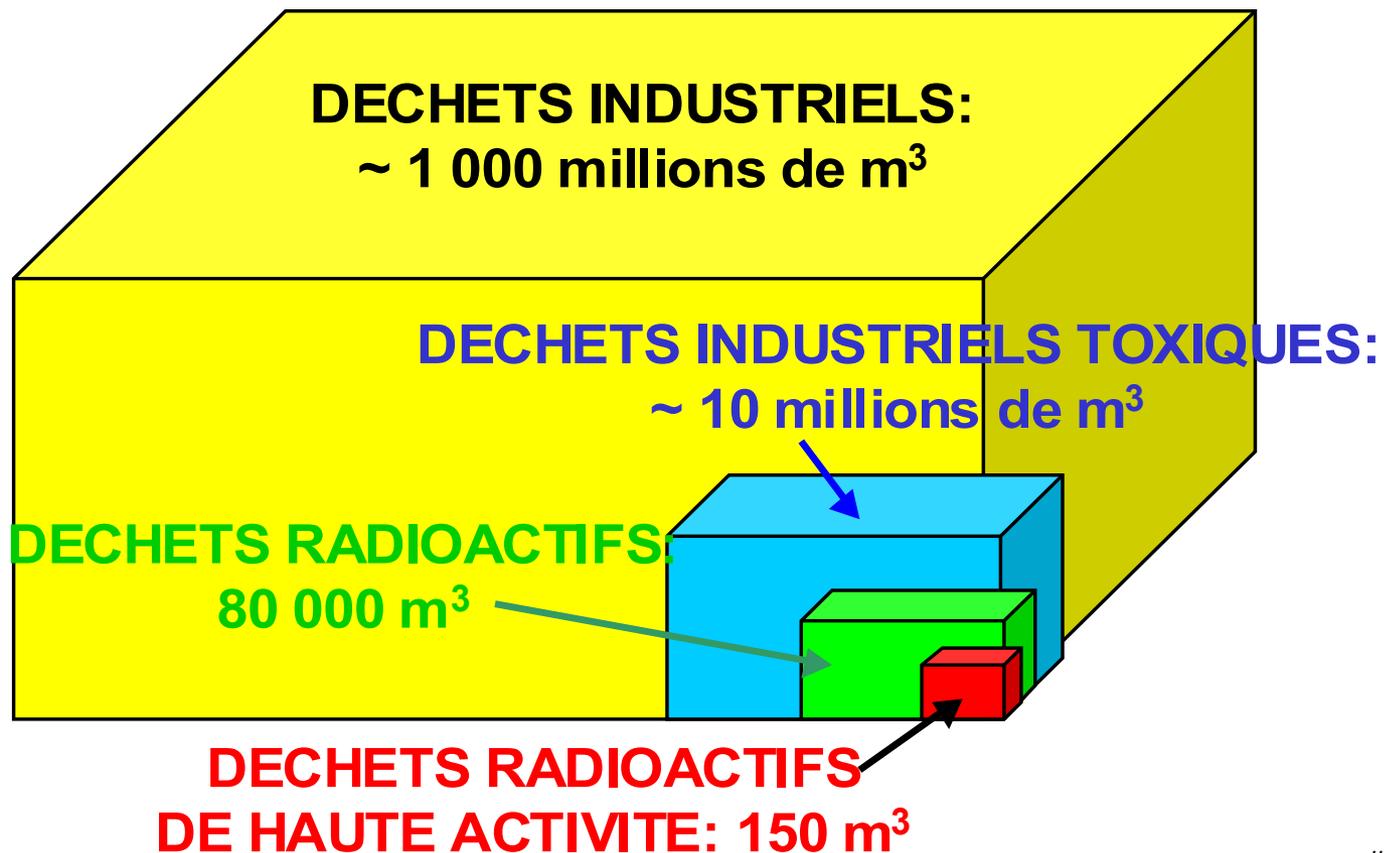
Les fleuves amènent à la mer 10000 à 20000 tonnes d'uranium/an

Division de la masse des déchets par 100

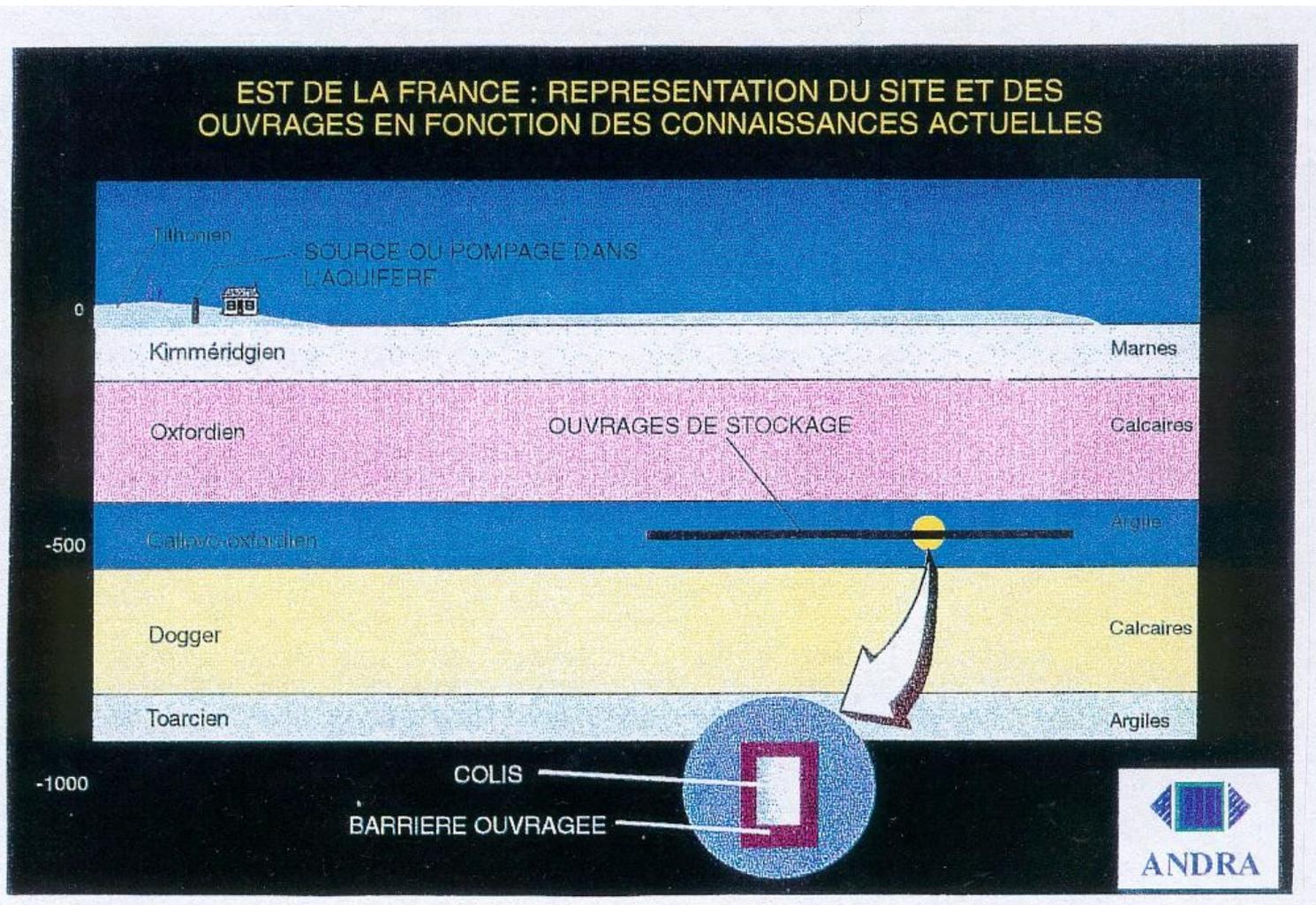
# Volume des déchets

## Production annuelle de déchets dans la communauté européenne

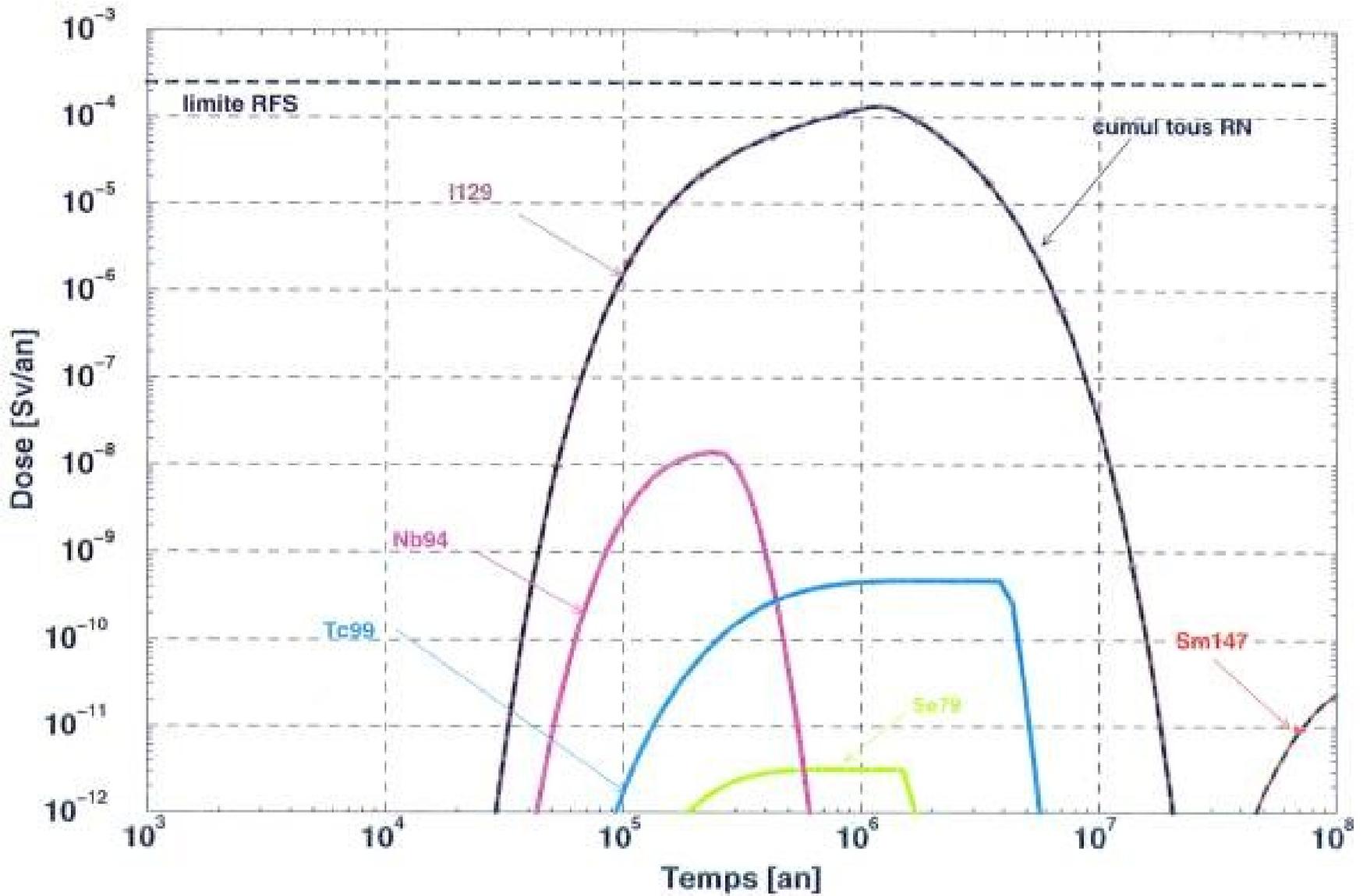
SOURCE: CEE - 1993



# 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

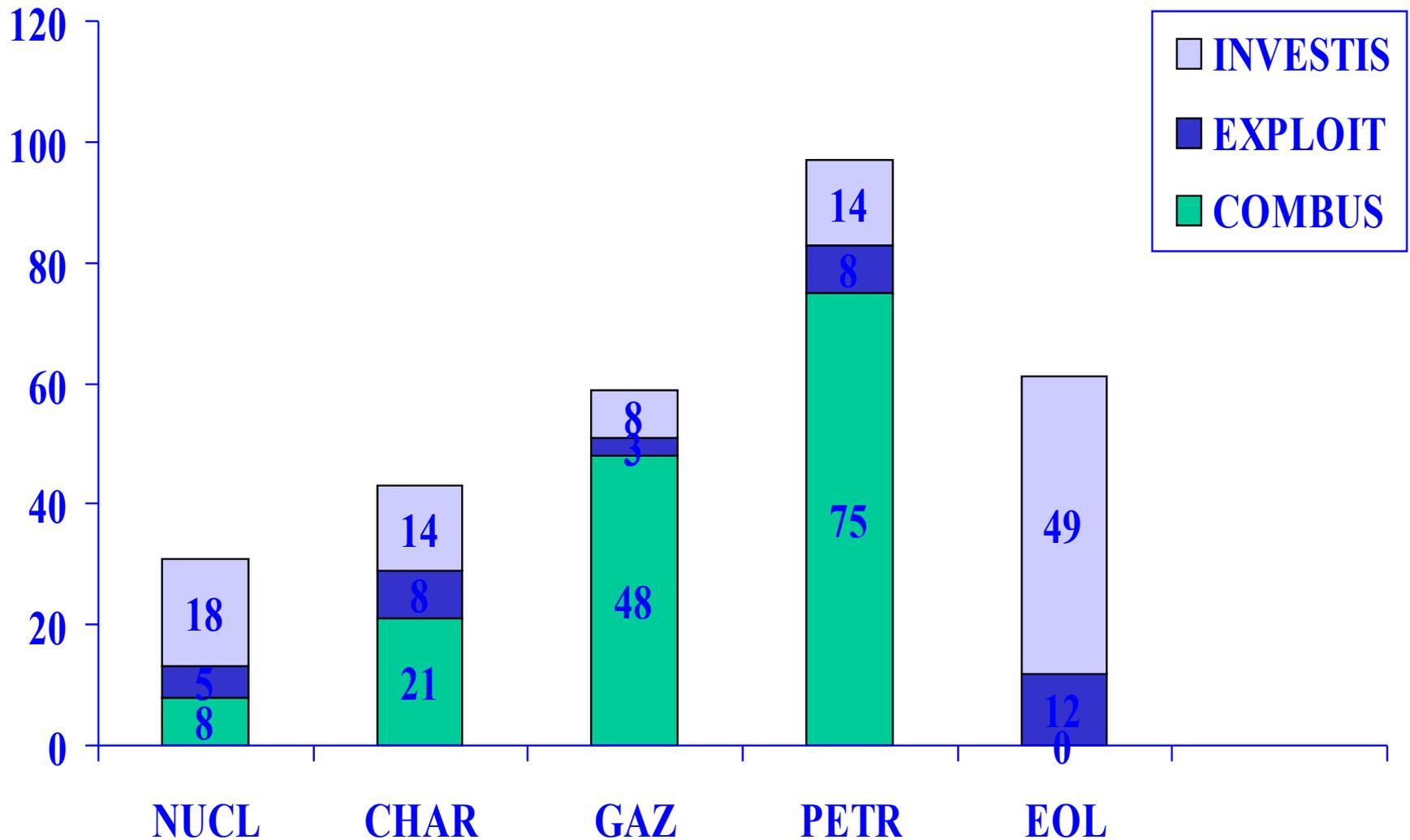
# Coûts

# Investissements

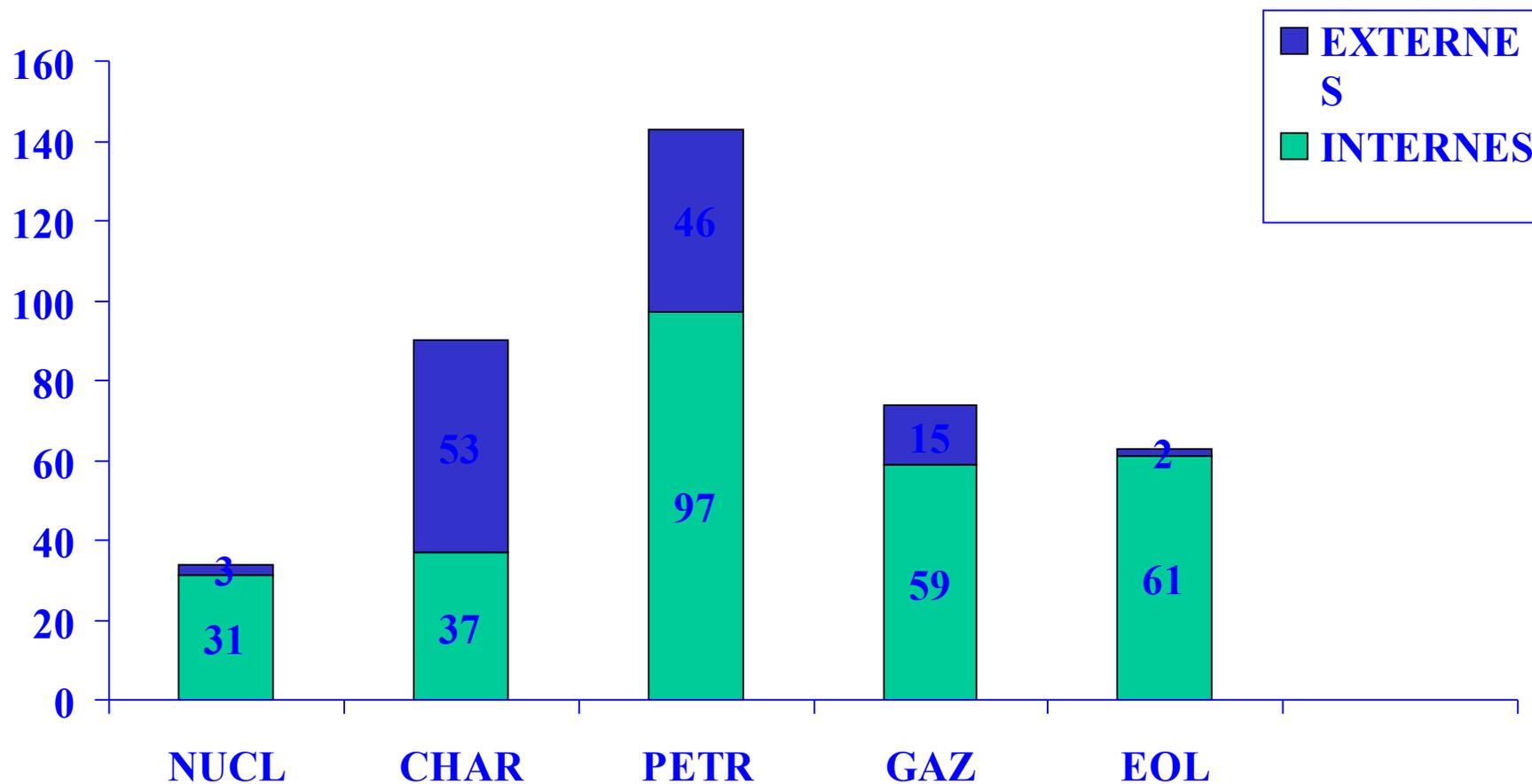
Production de 7 Twh/an (un réacteur de 1 Gwe

- Gaz= 0,5 GEuros
- Nucléaire= 2 GEuros
- Eolien= 3,8 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)

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%)

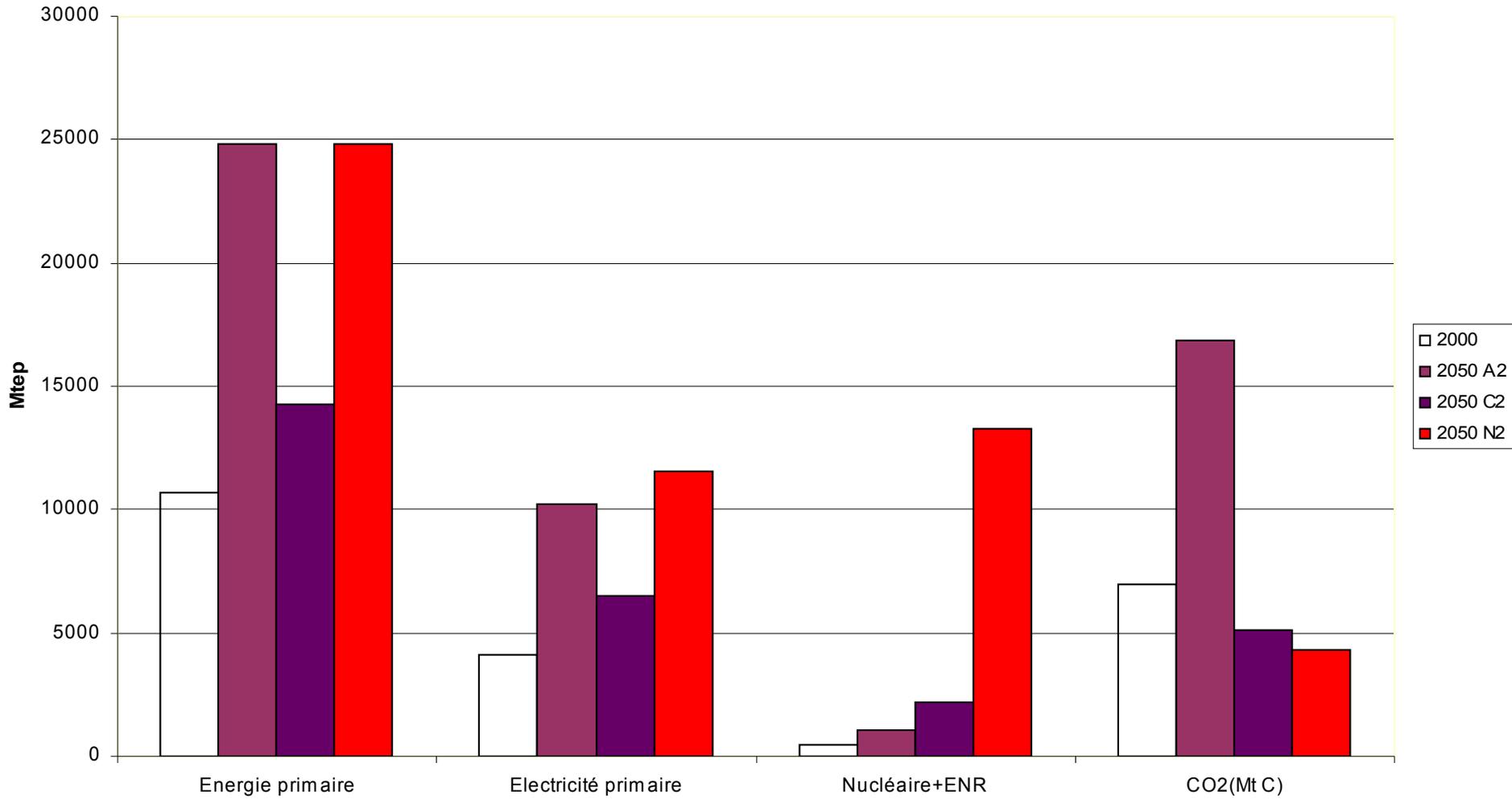
1500 GWe Nucléaire

2060

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

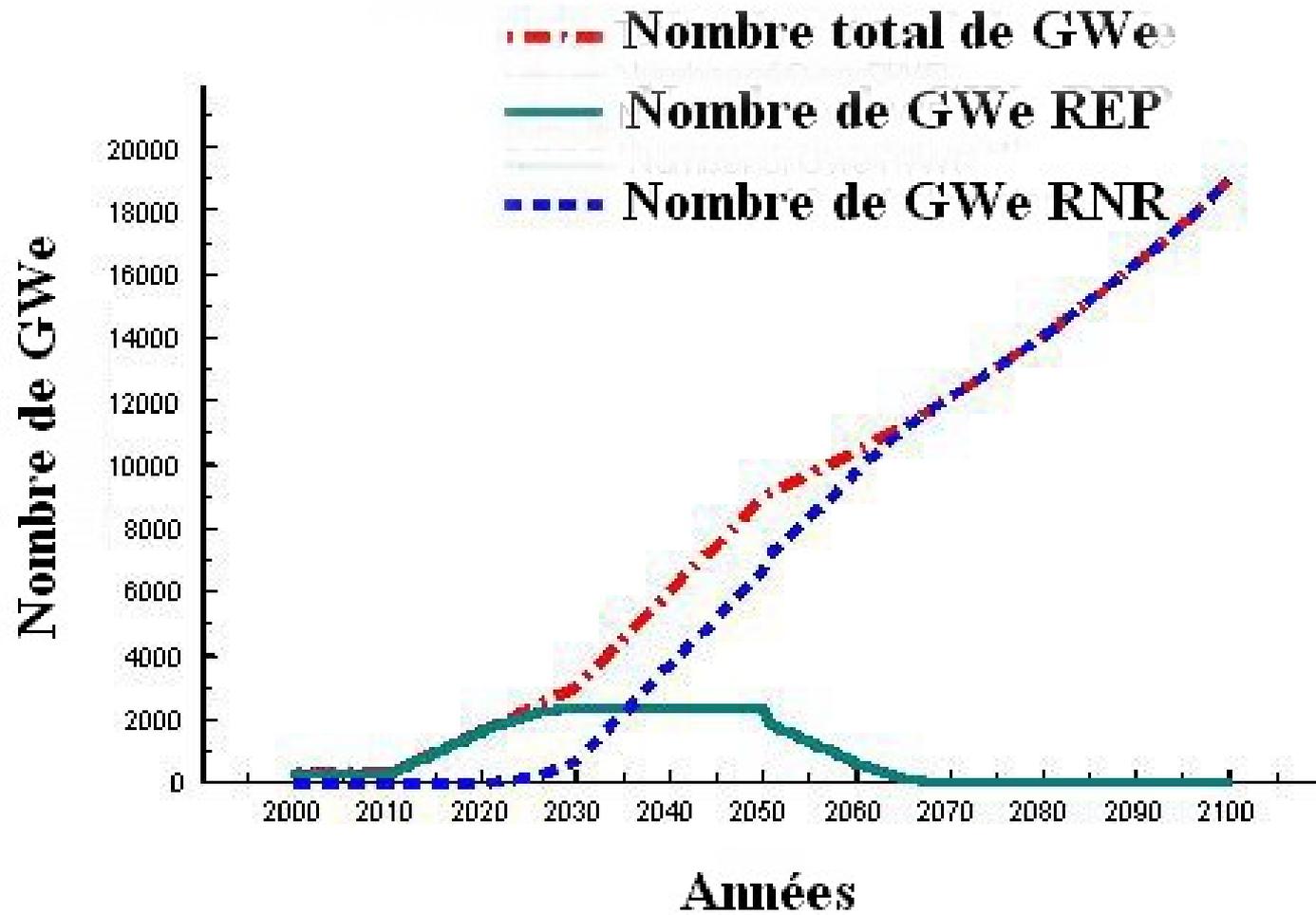
5000 GWe Nucléaire

# Scénario ni charbon ni gaz en 2050



# Cycles Surgénérateurs

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

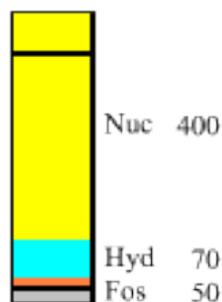


# Le choix français

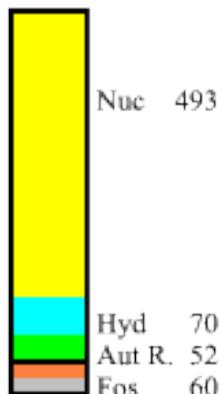
# Scénarios France 2050 (Negatep)

## ÉLECTRICITÉ TWh

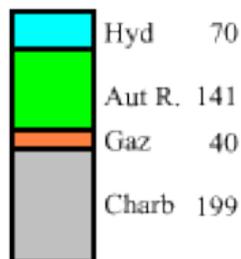
Auj. 525 TWh  
dont export 75



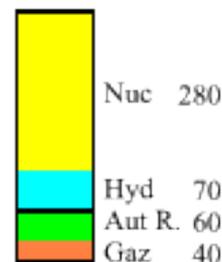
B: 675 TWh



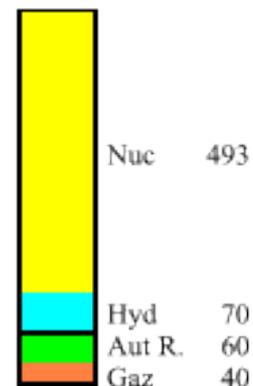
Cs: 450 TWh



Cn: 450 TWh

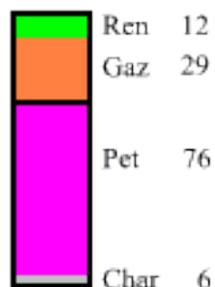


V 1/4: 663 TWh

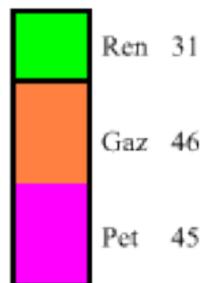


## CHALEUR et MOBILITÉ Mtep (hors électricité)

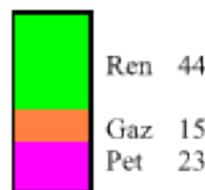
123 Mtep



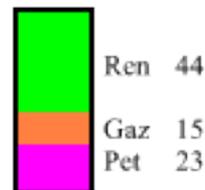
123 Mtep



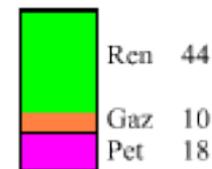
82 Mtep



82 Mtep



72 Mtep



Rej. 115 Mt C/an

85 Mt C/an

90 Mt C/an

38 Mt C/an

30 Mt C/an

# Echange de quotas d'émission de gaz à effet de serre

Réduction 20% CO<sub>2</sub> (2020/1990) →30%?

Pays industrialisés : -60 à 80% en 2050

En 2020 quotas (ETS): -20% /2005

88% des mises aux enchères proportionnelles aux émissions 2005

10% en supplément pour les pays les moins développés

2% aux membres 20% en dessous de Kyoto

50% des revenus pour développer les ENR, Economie, capture-stockage,

CO<sub>2</sub> stocké ou évité ne modifie pas les quotas!

# Enchères

Totalité des quotas mis aux enchères en 2013:

Électricité (exception chaleur et froid par co-génération).

Autres secteurs soumis aux quotas :

80% gratuits en 2013, 30% en 2020, 0% en 2027

100% gratuits si concurrence

# Réductions hors quotas 2020/2005

	%		
Allemagne	-14		
Belgique	-15		
Bulgarie	+20		
Tchéquie	+9		
SP	-10		
UK	-16		
It	-13		
Dk	-20		
S	-17		

# Permis d'émission

## Les permis d'émission

### Avantages

Prédictibilité du résultat

Optimisation économique

Protection pour les industries exposées à la concurrence

Possibilité de mise en œuvre dans un seul pays

### Inconvénients

Difficultés à définir le périmètre

Non universel

Complicé. Possibilités de « Magouilles »

Création d'une bulle? Spéculation

# Taxe carbone 1

## Avantages

Simplicité

Prévisible pour le niveau de la taxe

Universelle

Approche du coût externe

## Inconvénients

Prévisibilité des résultats difficile

Acceptabilité sociale difficile

Suppose un accord international

Sinon taxe à l'entrée sur les produits de pays n'appliquant pas de taxe. (OMC?)

# Taxe carbone 2

Les choix à faire:

Taxe croissante constamment (Jancovici)

*ou*

Taxe amenant les prix des fossiles à un niveau donné  
(Prévoit)

Taxe à la production (importation)(Hansen)

*ou*

Taxe à la consommation (Jancovici)

Chèques de compensation(Hansen, Jancovici)

*ou*

Bons négociables (Nifenecker)

# Propositions pour après Copenhague (Hansen, SLC)

Définition d'une trajectoire pour atteindre la même valeur d'émission/tête en 2050 (?)

Taxe à la production et l'importation

Exportation hors taxe

Libre utilisation de 90%(?) du produit de la taxe par les états (redistribution)

10% (?) du produit versé à la Banque Mondiale (gestion du changement climatique)

Les pays ne respectant pas leur trajectoire sont pénalisés au tarif moyen de la taxe

# Objectifs

Country	Present emissions	Reduction	decrease %
World	1.16	3.51	3.2
Africa	0.25	0.75	0.8 increase
USA	5.18	15.7	7.1
Japan	2.6	7.87	5.3
Germany	2.72	8.24	5.4
France	1.63	4.93	4.1
Sweden	1.45	4.39	3.7
Denmark	2.77	8.39	5.5
Russia	3.27	9.91	5.9
China	1.16	3.51	3.2
India	0.31	0.94	0.2 increase
Arabia	3.91	11.86	6.4
Nigeria	0.01	0.03	8.4 increase
Brasil	0.48	1.45	0.09

# Engagements après Copenhague

Pays	Diminution pour 2020	Référence
Australie	5 à 25%	2000
Belarus	5 à 10%	1990
Canada	17%	2005
Croatie	5%	1990
UE	20 à 30%	1990
Islande	50%	1990
Japon	25%	1990
Kazakstan	15%	1992
Nouvelle Zélande	10 à 20%	1990
Norvège	30 à 40%	1990
Russie	15 à 20%	1990
Suisse	20 à 30%	1990
Ukraine	20%	1990
USA	17%	2005

# 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.

## Bibliographie

« Le Climat est-il devenu fou ? »,

R.Sadourny, Les Petites Pommes du savoir n°5, 2002

« L'avenir climatique. Quel temps ferons-nous? »

J.M.Jancovici, Science ouverte, Le Seuil, 2001

« La Radioactivité est-elle réellement dangereuse ? »

J.M. Cavedon, Les Petites Pommes du savoir n°8, 2002

« L'énergie dans le monde : bilan et perspectives »

J.C.Bobin, H.Nifenecker, C.Stéphan, EDP Sciences 2001

« Les déchets nucléaires »

R.Turlay ed., EDP Sciences, 1997

« L'énergie nucléaire a-t-elle un avenir? »

H.Nifenecker, Les Petites Pommes du savoir n° , 2002

<http://www.sauvonsleclimat.org>

FIN