

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

Hervé Nifenecker
Sauvons le Climat

Ressources Énergétiques Mondiales

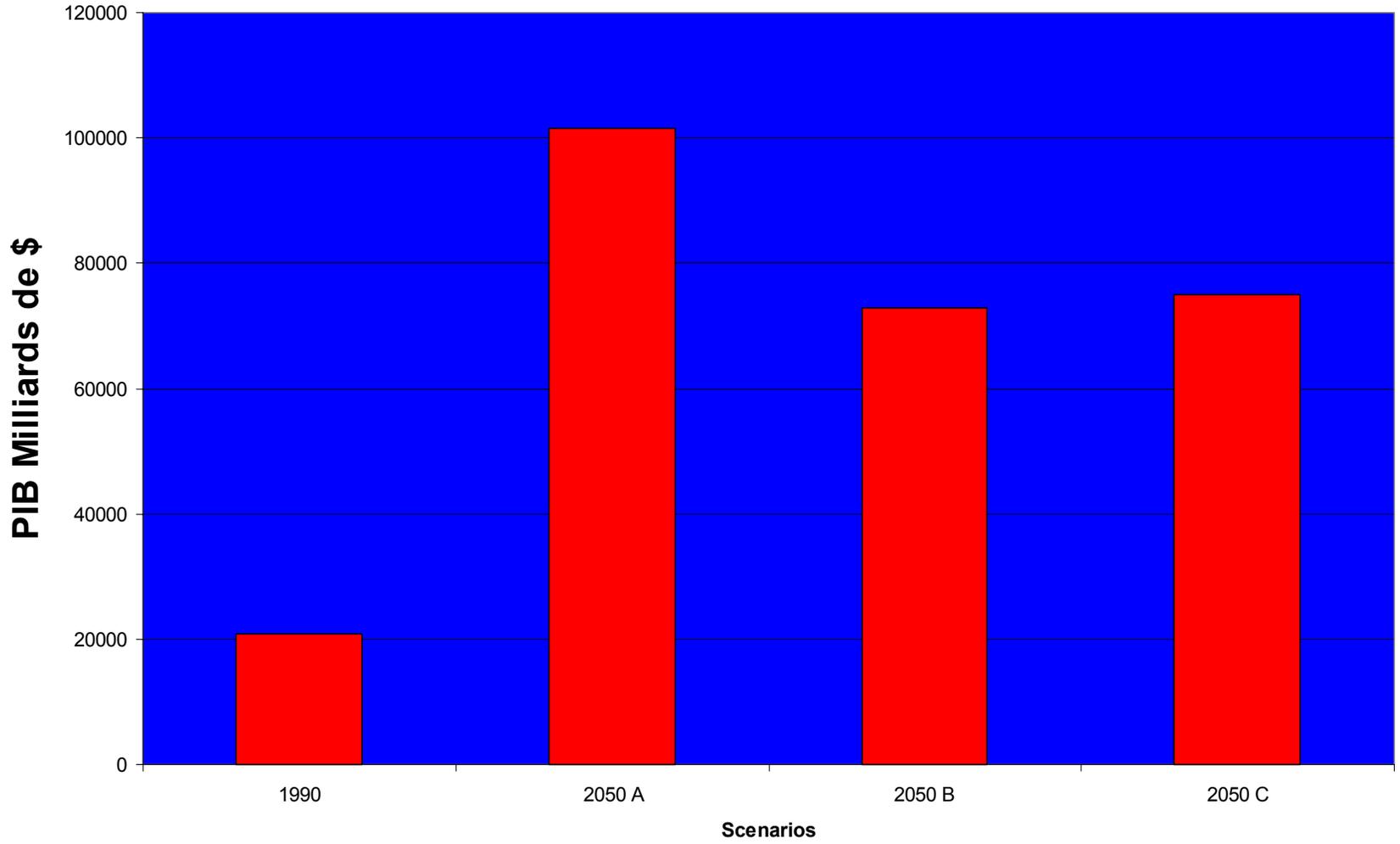
Scénarios mondiaux

- GIEC
- Conseil Mondial de l'Energie
- International Institute for Analysis of Applied Systems
- POLE (P.Criqui)

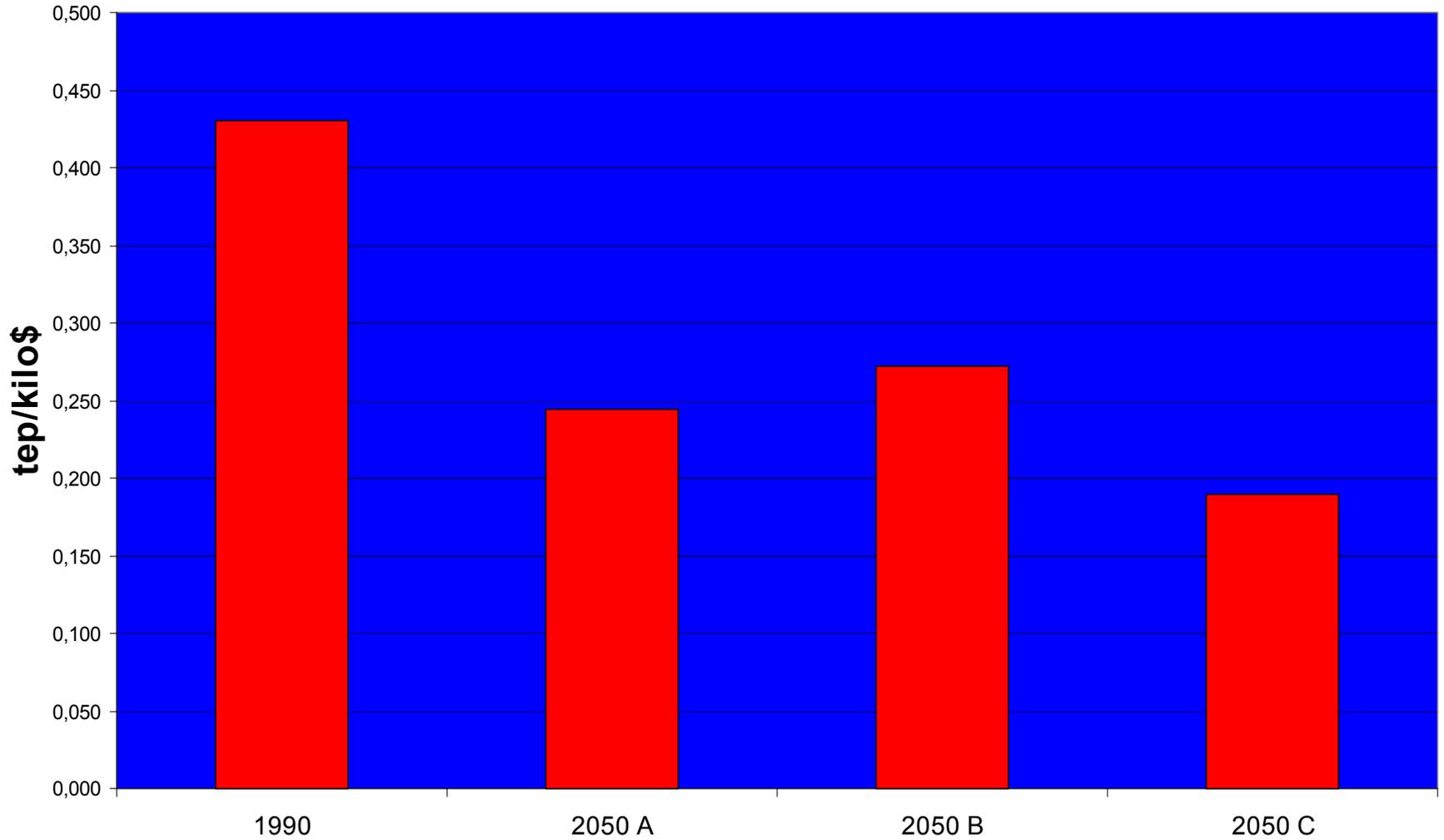
IIASA-WEC Scenarios

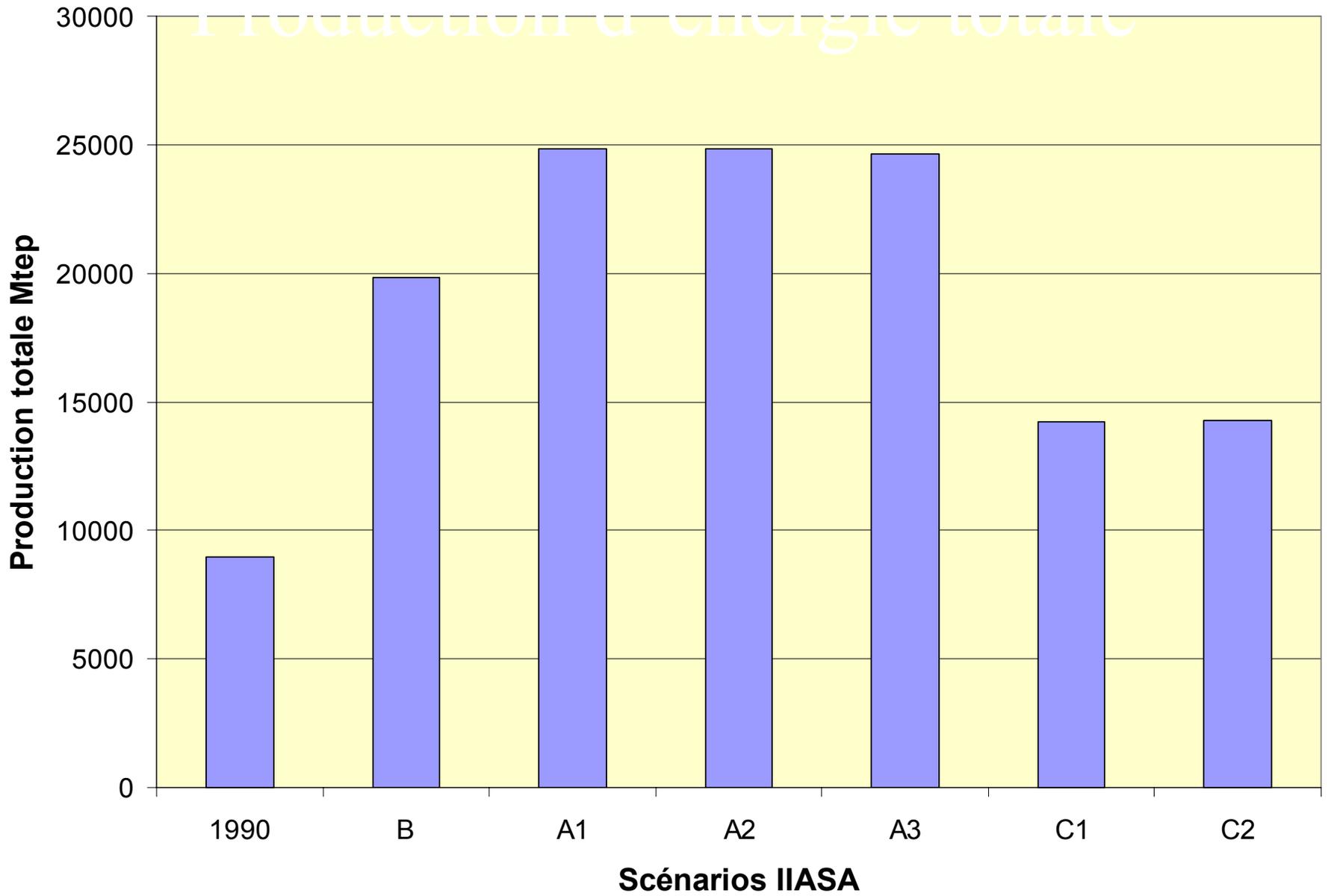
- A: croissance rapide
 - A1: Pétrole
 - A2: Charbon
 - A3:Gaz
- B: Intermédiaire
- C: Faible intensité énergétique. Forte électricité
 - C1: Ren.+Gaz
 - C2: Ren.+Nucléaire

PIB Mondial

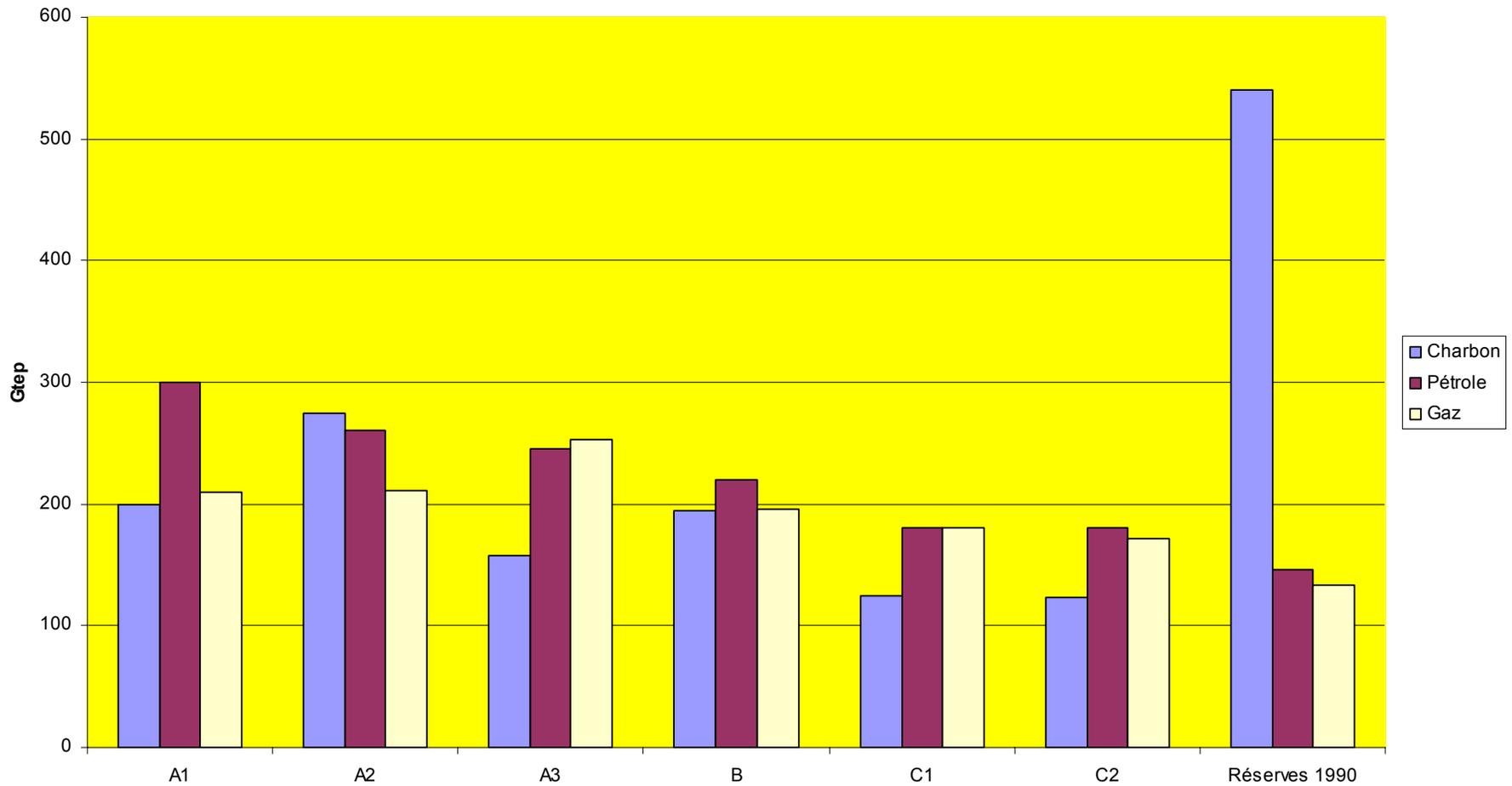


Intensités énergétiques

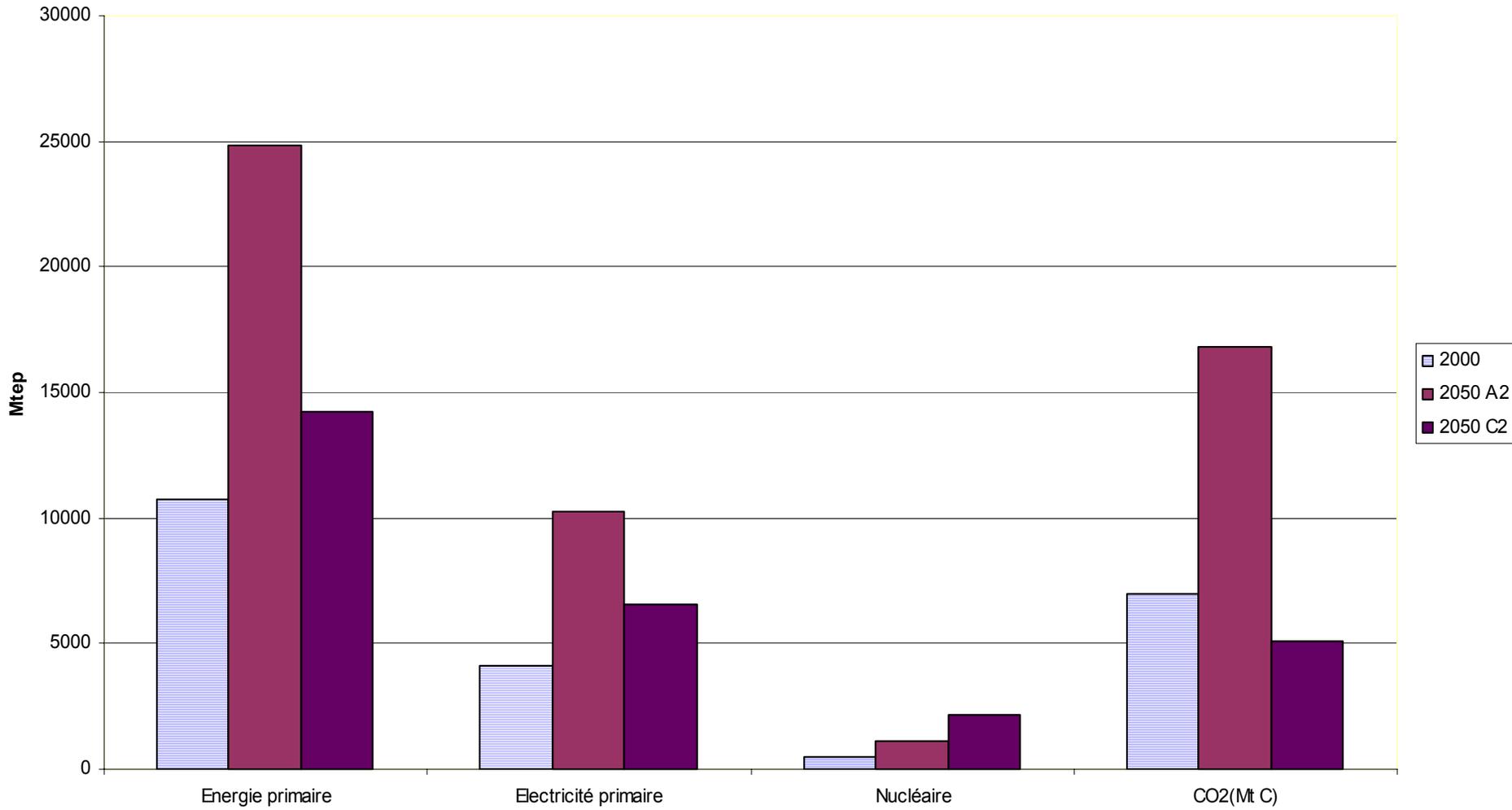




Epuisement des réserves fossiles

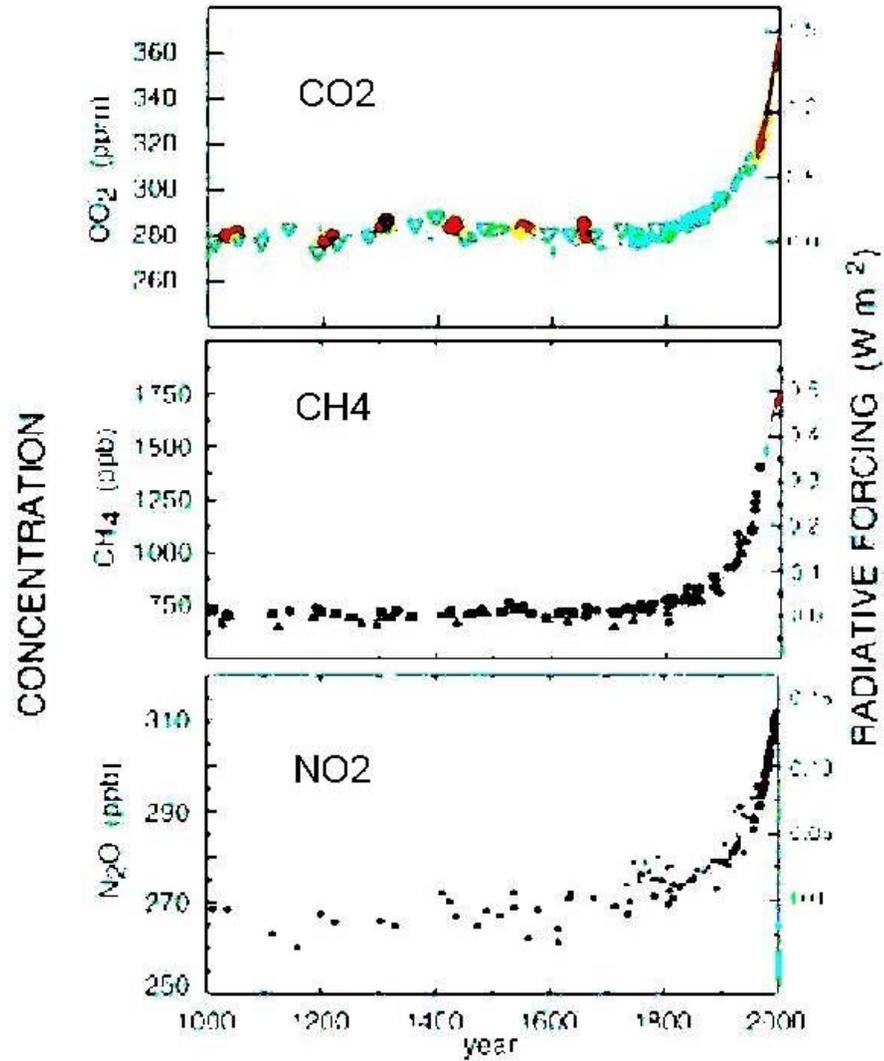


Emissions de CO2

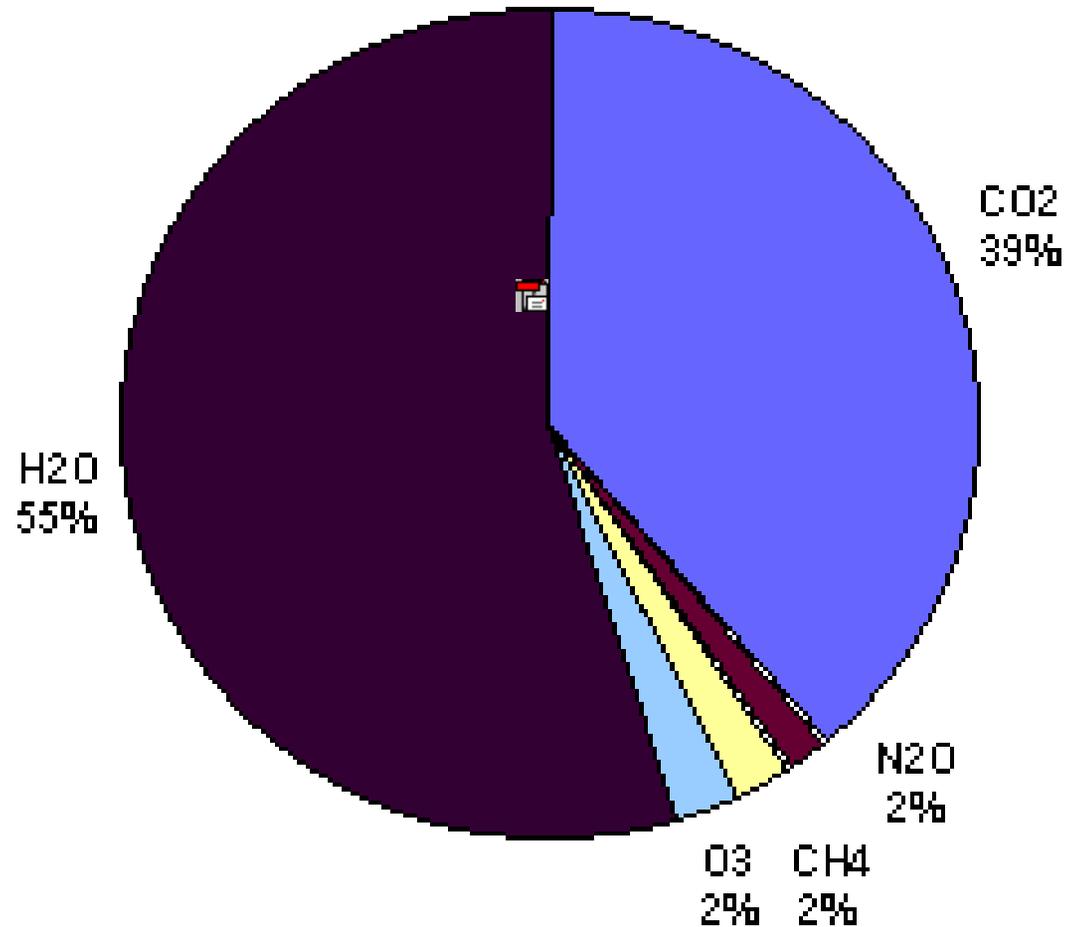


Réchauffement climatique

Evolution des concentrations de GES

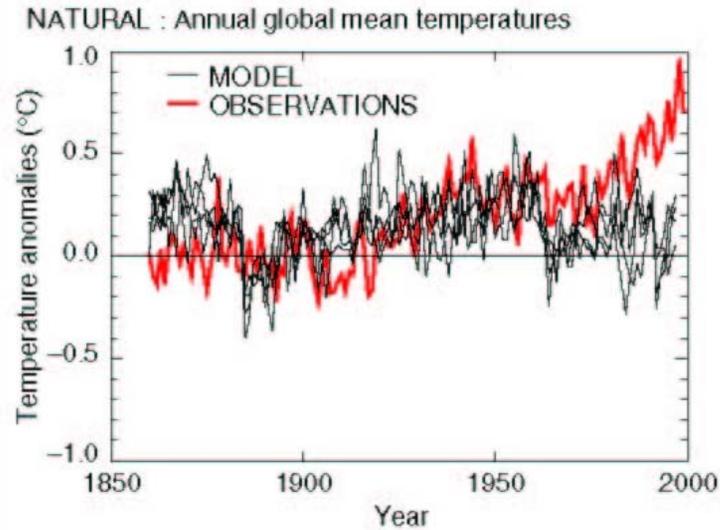


Contribution des gaz à l'effet de serre (GES)

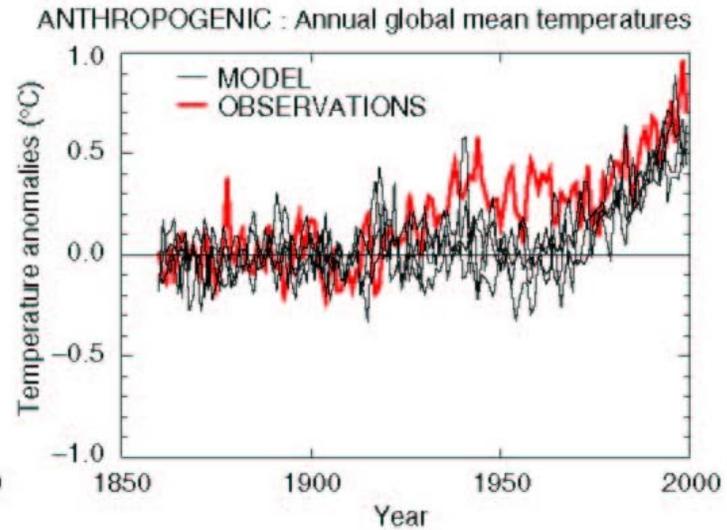


Variation de la température

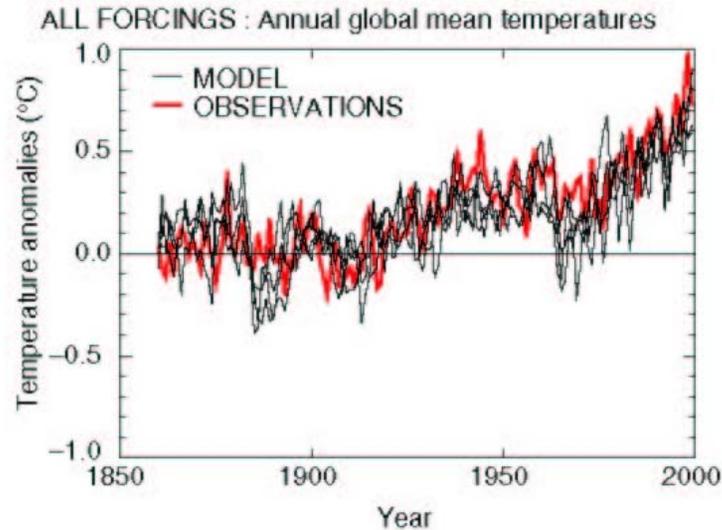
(a)



(b)



(c)



Conséquences certaines

- Maladies tropicales (paludisme, dengue..)
- Parasites (termites..)
- Vents plus forts
- Précipitations plus grandes:
Zones tropicales, tempérées
- Sécheresses:
Zones sub-tropicales
- Montée des eaux (îles): 0,5 à 1 m
- Disparition des glaciers alpins
- Diminution des périodes d'enneigement

Tout le monde ne se plaindra pas

- Accroissement du couvert végétal en Sibérie et Canada
- Plus de production de blé aux USA
- Hivers plus cléments

Evolution irréversible possible

- Diminution de la biomasse:
 - rejetant davantage de GES
- Ralentissement du Gulf Stream:
 - Europe=Canada
- Libération des hydrates de méthane
 - Accélération du réchauffement
- Fonte des calottes antarctique et Groenlandaise:
 - hausse du niveau de la mer de 50 m

Quel effort?

- Rejets actuels(2000) : 6GtC
- Nb Humains: 6 Milliards
- Rejet/ha Monde: 1 Tonne
- Rejet/ha France: 1.7 Tonne
- Rejet/ha USA: 6 Tonnes

Stabilisation de la température: 3GtC

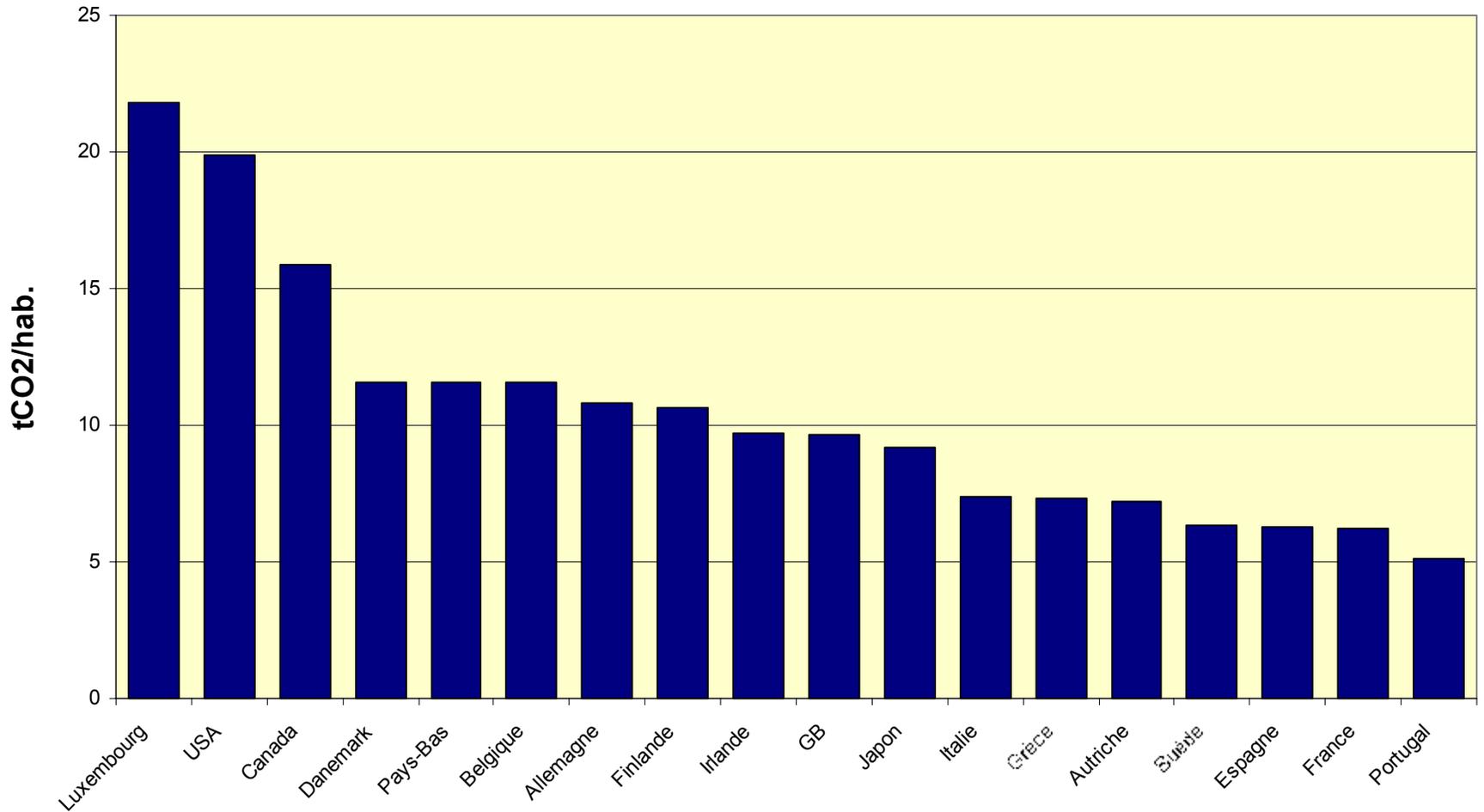
D'autant plus haute qu'on attend

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

Les solutions?

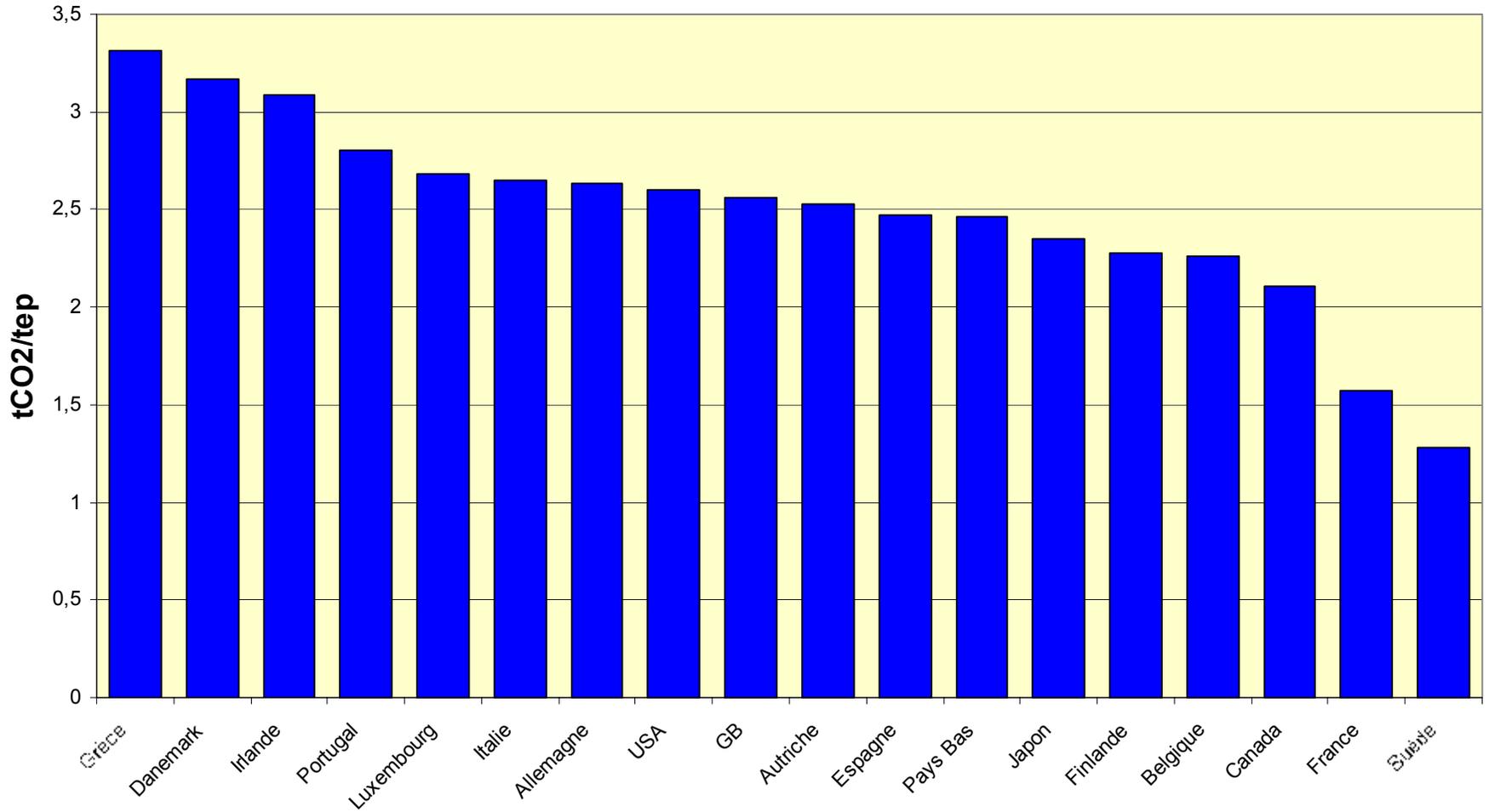
tCO₂/ha

Emission de CO₂ par habitant

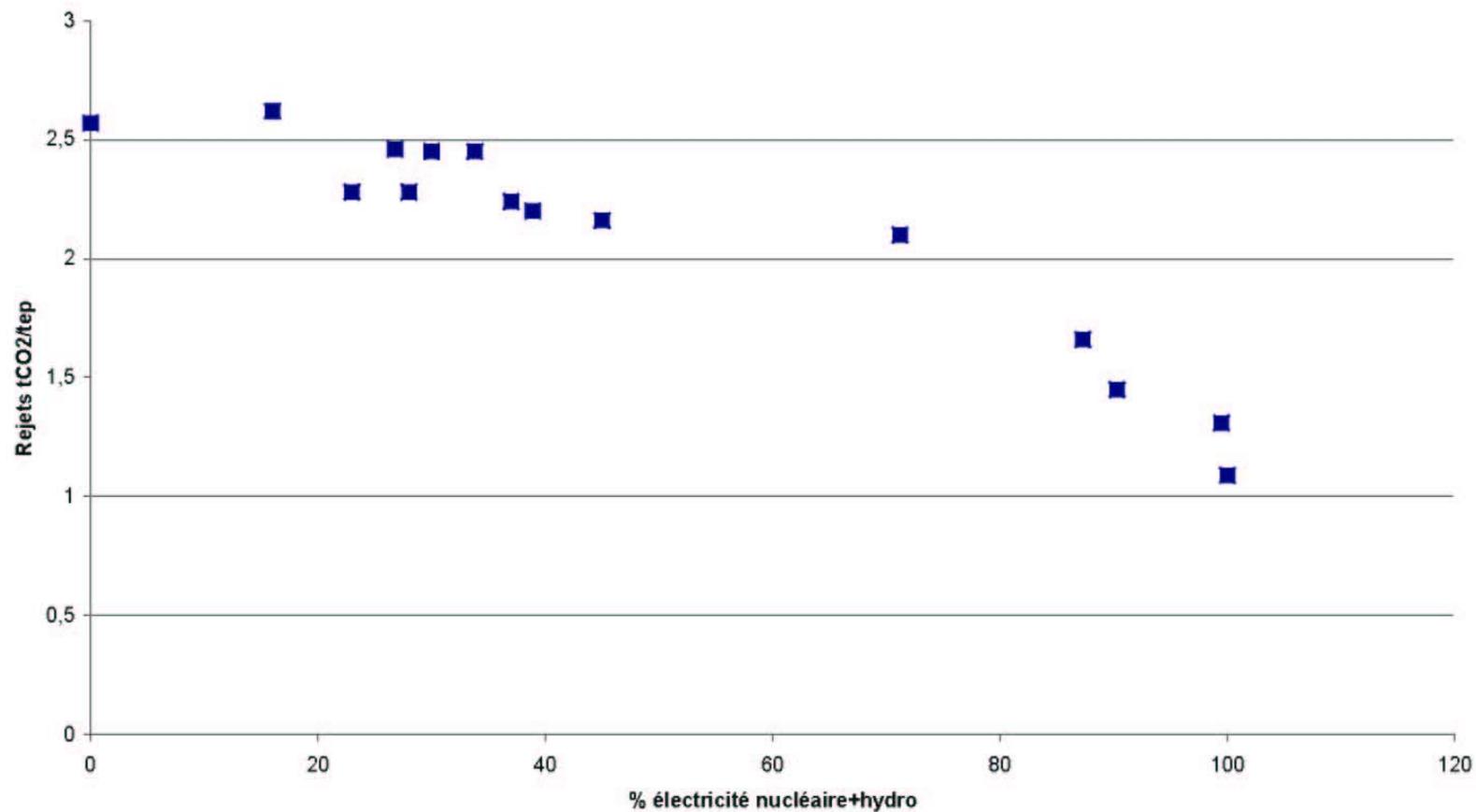


tCO₂/tep

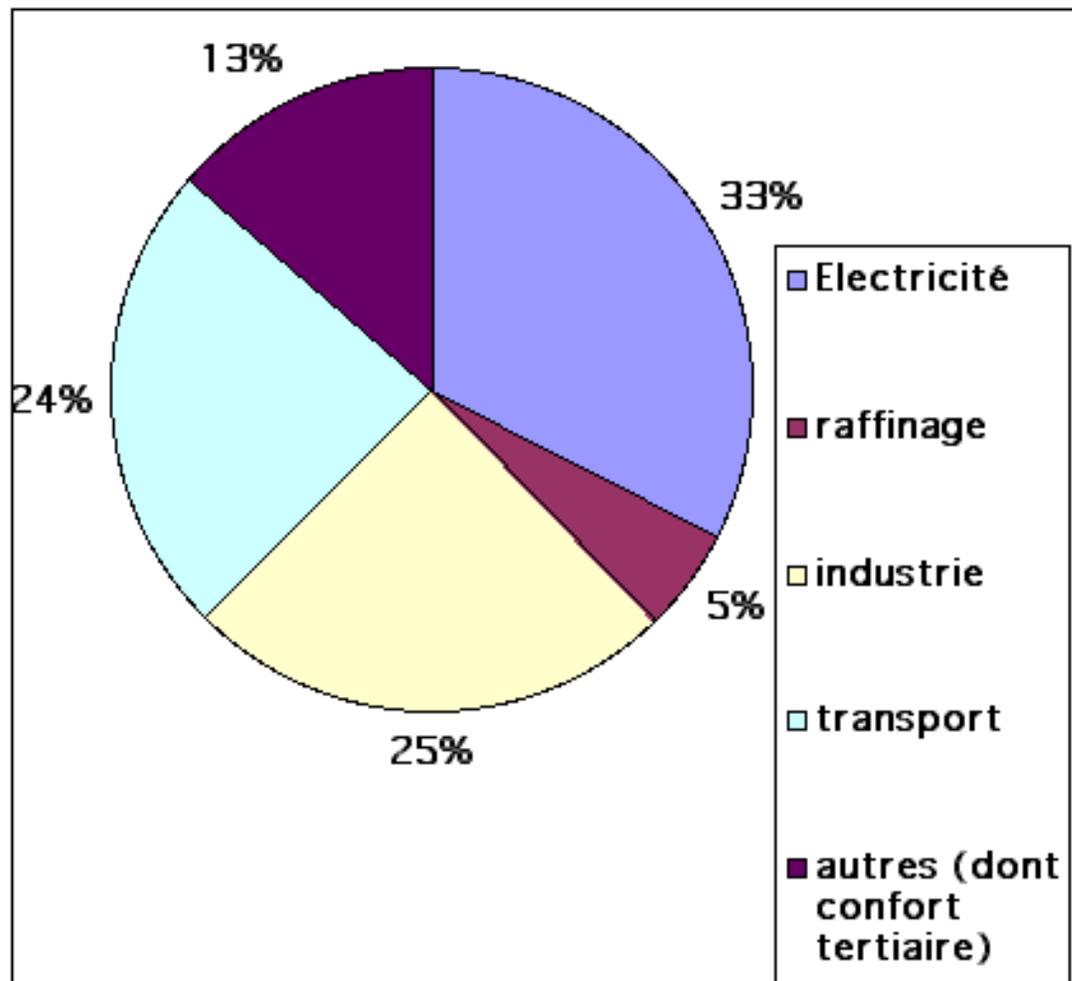
tCO₂/tep (1995)



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



Origine des émissions de CO2 dans le monde

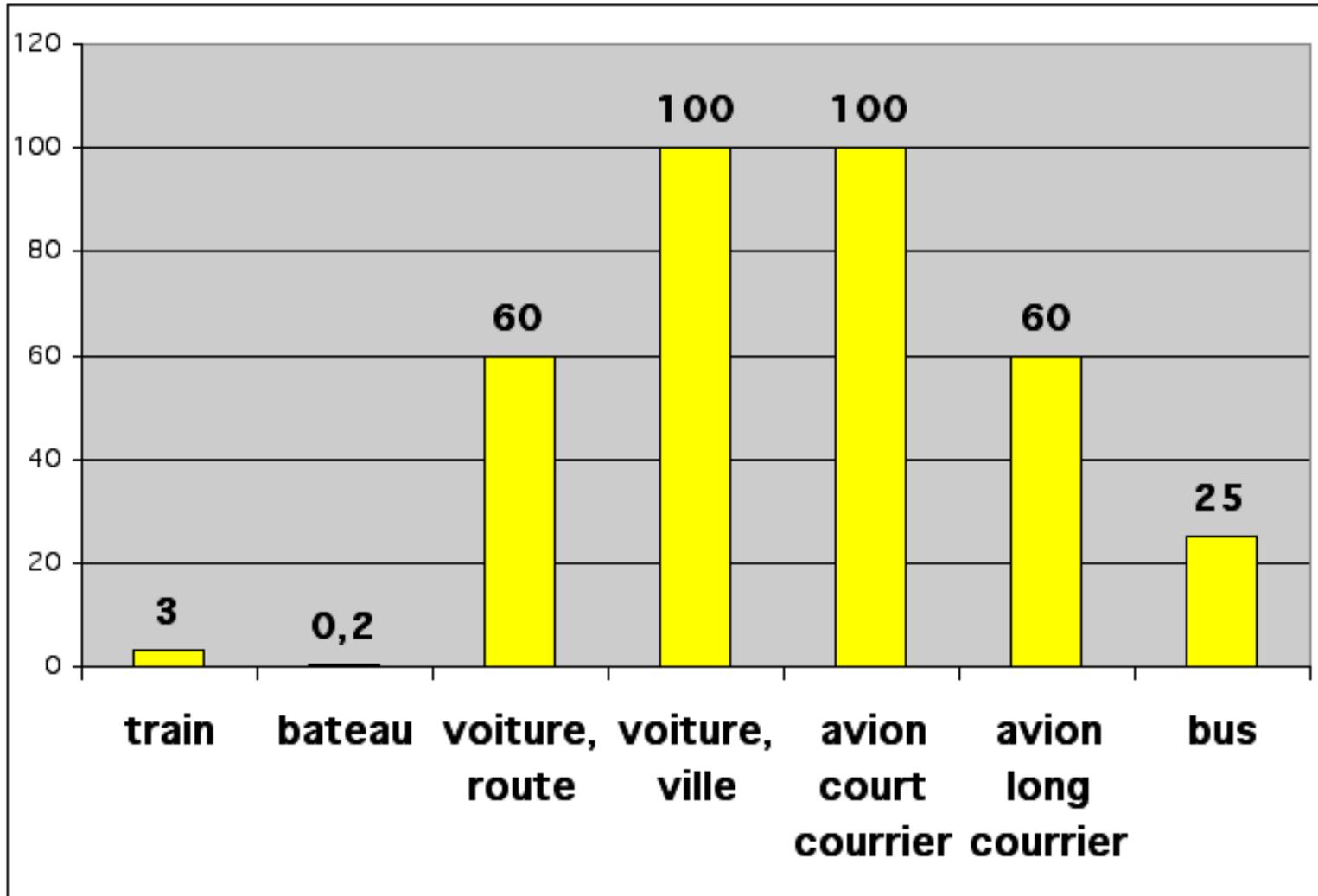


Economies d'énergie

Pratiques de vie

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

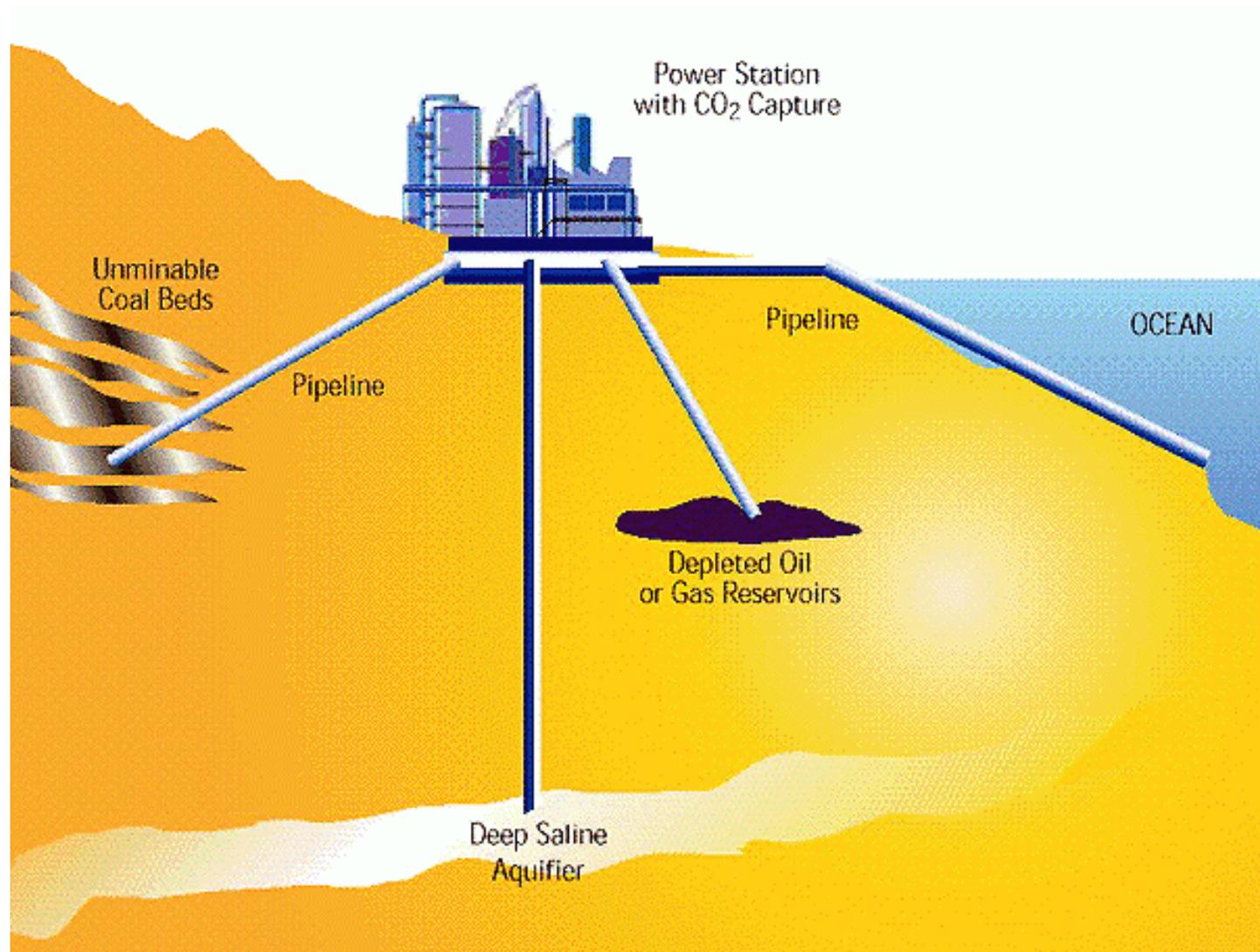
Emissions de GES en g.e.C par km.passager France



Production d'électricité

- Actuellement 20000 TWh
 - Augmentation annuelle: 750 TWh
 - France 500 TWh
 - Augmentation annuelle en Chine: 500 TWh
- En 2050 environ 40000 à 50000 TWh

I. Capture et stockage du CO₂



Fossiles sans CO₂

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

Fossiles sans CO2

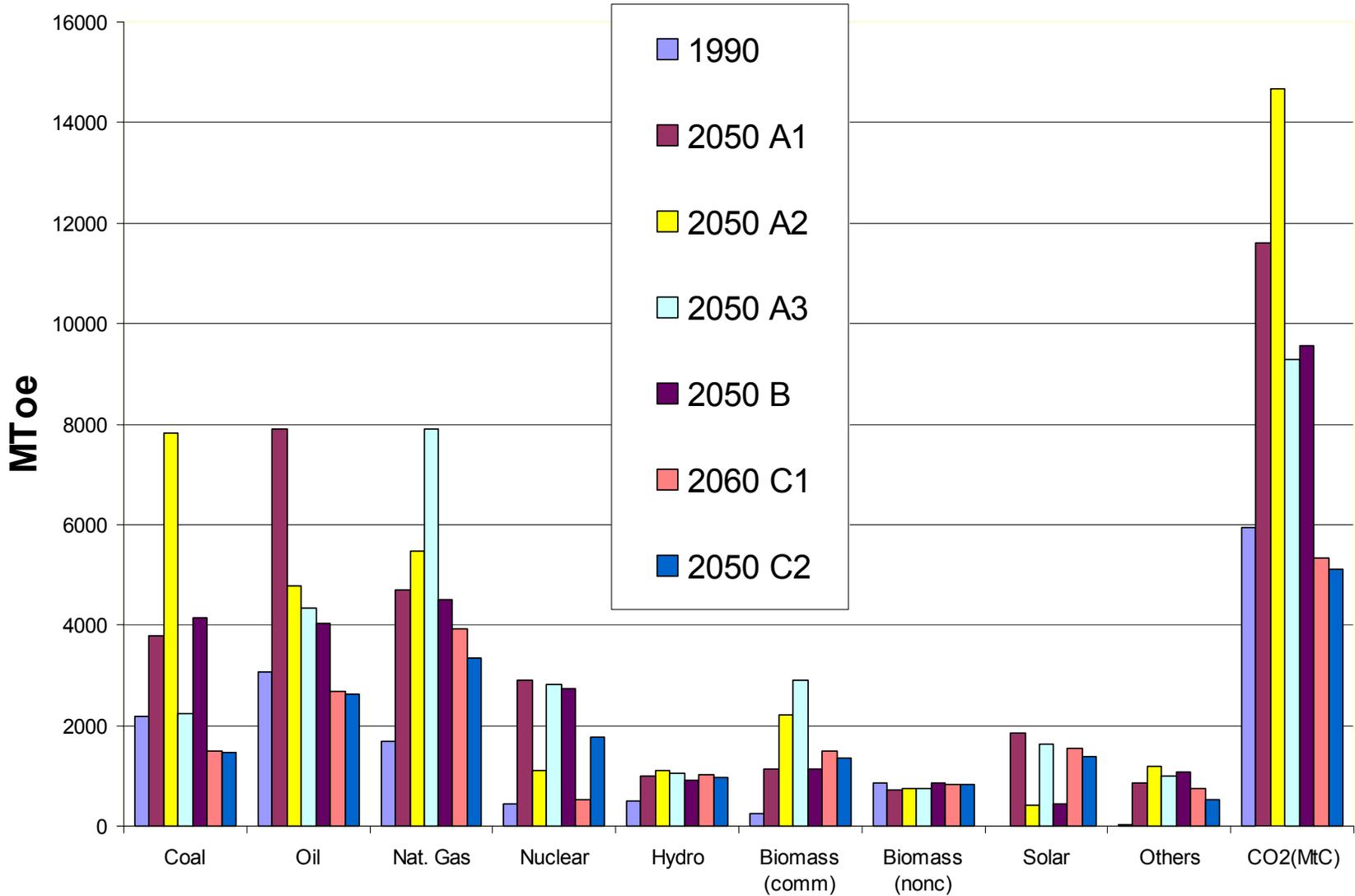
- Deux expériences: **Sleipner, Weyburn**
- Surconsommation énergétique: **8 à 15%** (MEDD)
- Surcoût kWh: **50 à 100%** (Charbon pulvérisé), **35 à 50%**(gaz)
- Surcoût investissement: **80 %** (Charbon pulvérisé), **100%**(gaz)

Energies renouvelables

Le potentiel annuel mondial des énergies
renouvelables raisonnablement mobilisable
actuellement (en MTEP)

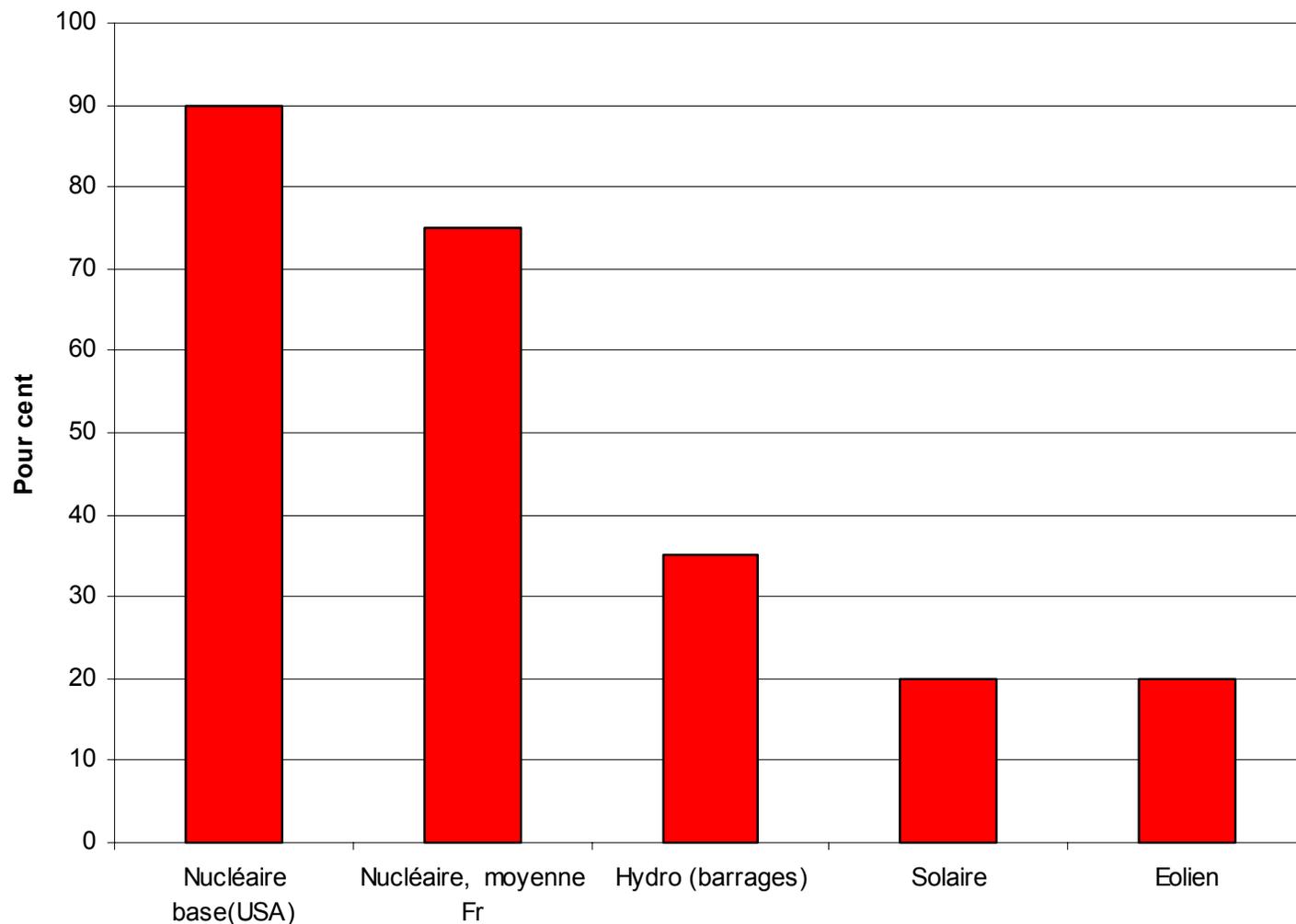
POTENTIEL ANNUEL	HYDRO	SOLAIRE	EOLIEN	BIOMASSE	TOTAL
PAYS DU NORD	555	38	42	740	1375
PAYS DU SUD	320	162	18	1490	1990
TOTAL	875	200	60	2230	3365

Primary energy per fuel MToe



Disponibilité de la ressource

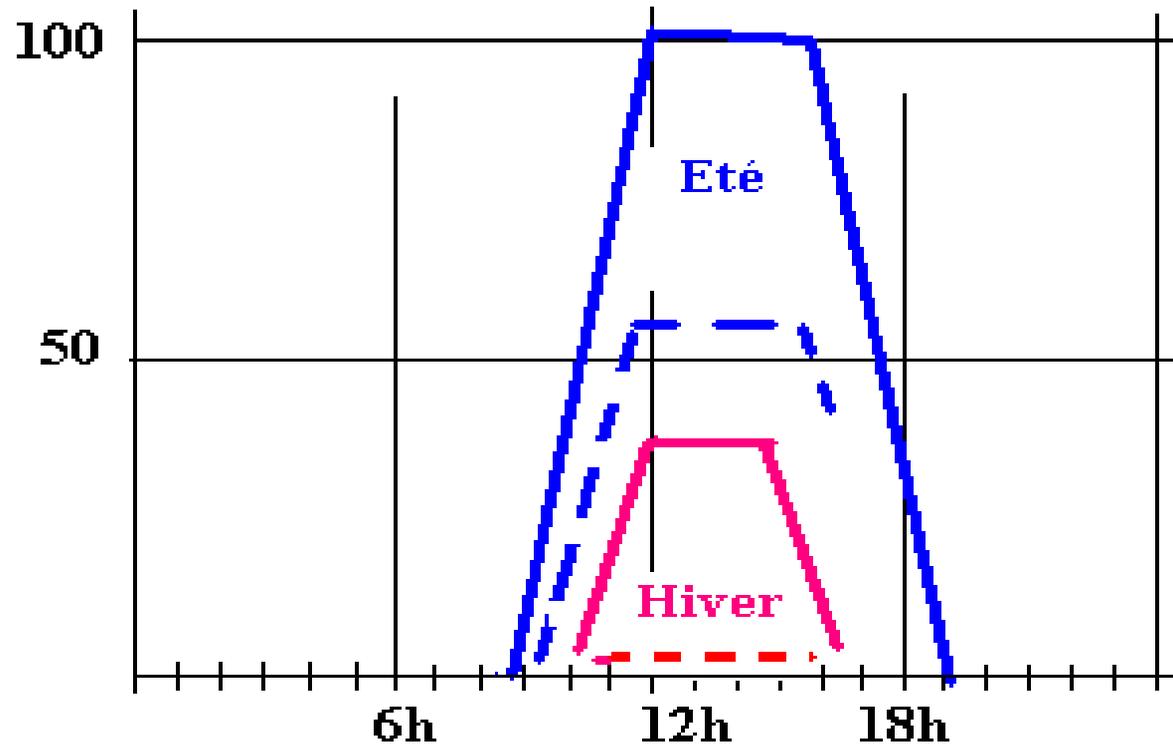
Taux d'utilisation pour la production d'électricité



Energie solaire

- Puissance du rayonnement solaire perpendiculaire aux rayons :
1 kW/ m².
- Utilisable (Var) :
1800 kwh/m²/an
- rendement photovoltaïque de 15% :
270 kwh/m²
- Chauffage solaire:
500 Kwh/m²

Effets jour-nuit, été-hiver, nuages



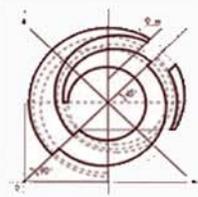
- Une centrale :
7 Twh/an (4 Gwe crête)
26 km²
- Coût des cellules :
550 Euro/m²
- Coût de la centrale :
15 GEuros.
- Energie intermittente
- 0,3 Euro/kWh (sans stockage) (cf:0,03)
- 1,5 Euro/kWh (avec stockage)

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
- ⇒ En PED : sera l'énergie standard ?

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(1979) 30000 morts



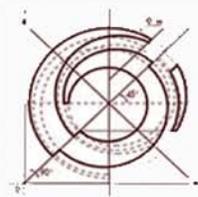
L'hydraulique: principale energie renouvelable

Les avantages et les inconvenients

Les avantages

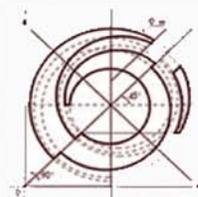
- **Energie renouvelable:**
 - Pas de cout de “combustible”
 - Pas de limitation dans le temps
 - Faible cout de maintenance et d'exploitation
 - Pas/ Peu d'emission de C02
- **Capacité de stokage de l'energie**
- **Grande flexibilité de regulation des reseaux:**
 - Mise en route en quelque secondes
- **Complement à d'autres energies : nucléaire, eolien**
 - Turbine Pompe
- **L'eau peut etre utilisé pour d'autres besoins:**
 - Irrigation, stokage
 - Tourisme

- “Fuel is free”-



Les difficultés

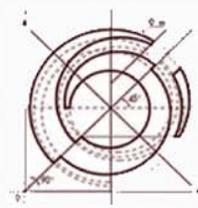
- **Implantations des barrages:**
 - Modification locale (changement, migration des poissons...)
 - Déplacement de population
- **Financements:**
 - Le cout initial est important
 - Temps d'implatation très long
- **Pas de standard implantation totalement dependante du site et de l'hydrologie**



Puissance installée

	Puissance installée MW	% d'énergie hydraulique	Capacité en construction MW	Capacité prévu MW
France	25 475	12%	0	5
Europe	170 000		2 717	12 500
Turquie	12 618	25%	3 219	20 423
Brésil	69 087	78%	9 750	34 200
US	78 200	7%		
Canada	69 500	59%	1 500	8 000
Inde	30 135	13%	9 222	52 000
Chine	92 000	15%	50 000	80 000
Monde	741 121		118 803	400 000

Source Hydropower & Dams World Atlas 2005



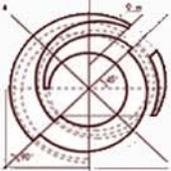
Hydraulique : principale énergie renouvelable

Le potentiel

ALSTOM

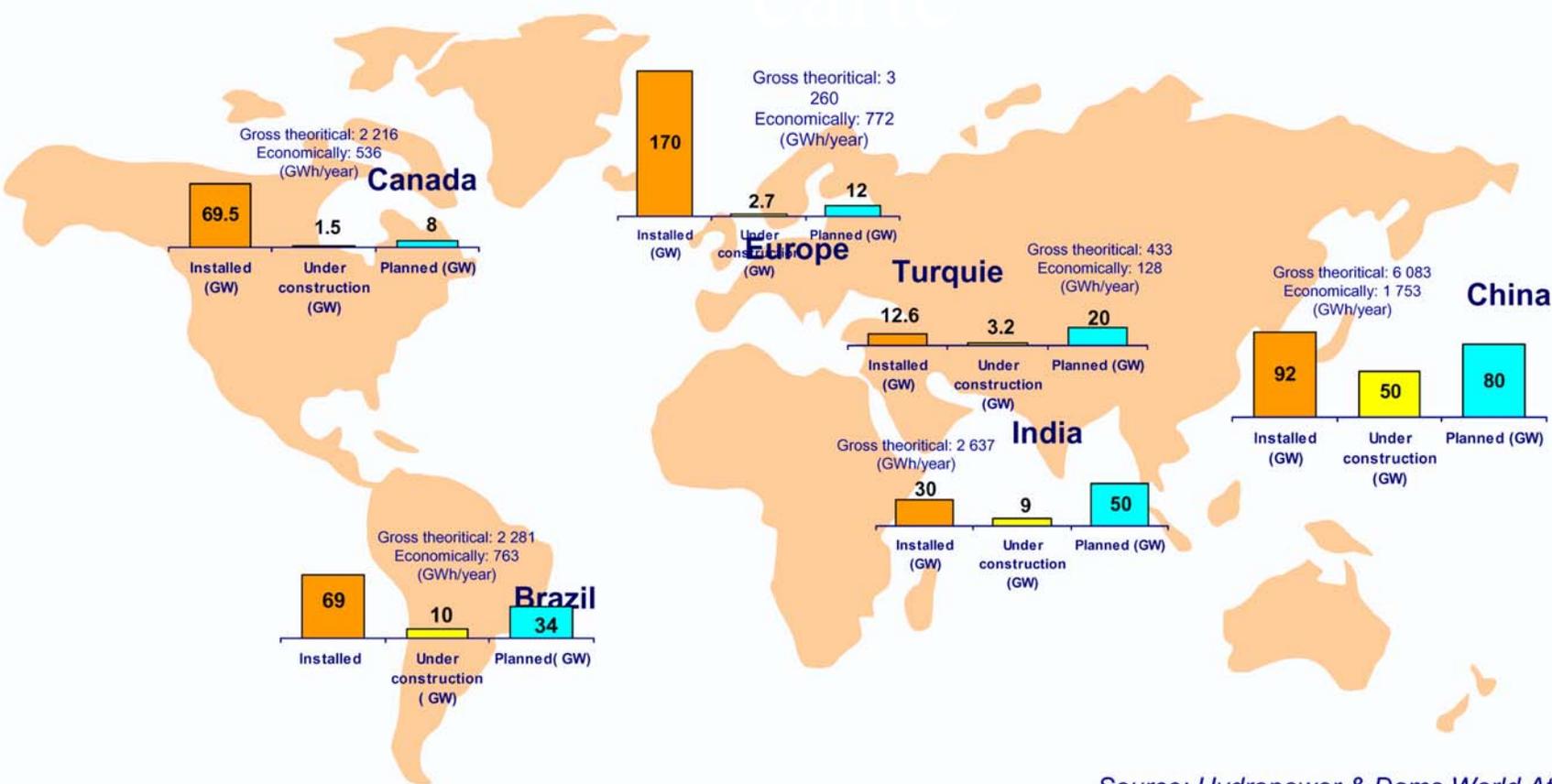
	Potentiel Theorique Millions GWh/an	Potentiel faisable Millions GWh/an	Potentiel économiquement faisable Millions GWh/an	Production 2003/2004 Millions GWh/an
France	0.200	0.072	0.072	0.070
Europe	3.260	1.140	0.772	0.507
Turquie	0.433	0.216	0.128	0.044
Brésil	2.281	1.300	0.763	0.336
US	4.485	0.528	0.376	0.300
Canada	2.216	0.981	0.536	0.353
Inde	2.637	0.660	0.148	0.074
Chine	6.083	2.474	1.753	0.310
Monde	40.000	14.368	8.562	2.793

Source Hydropower & Dams World Atlas 2005



Hydraulique : principale énergie renouvelable

Le potentiel



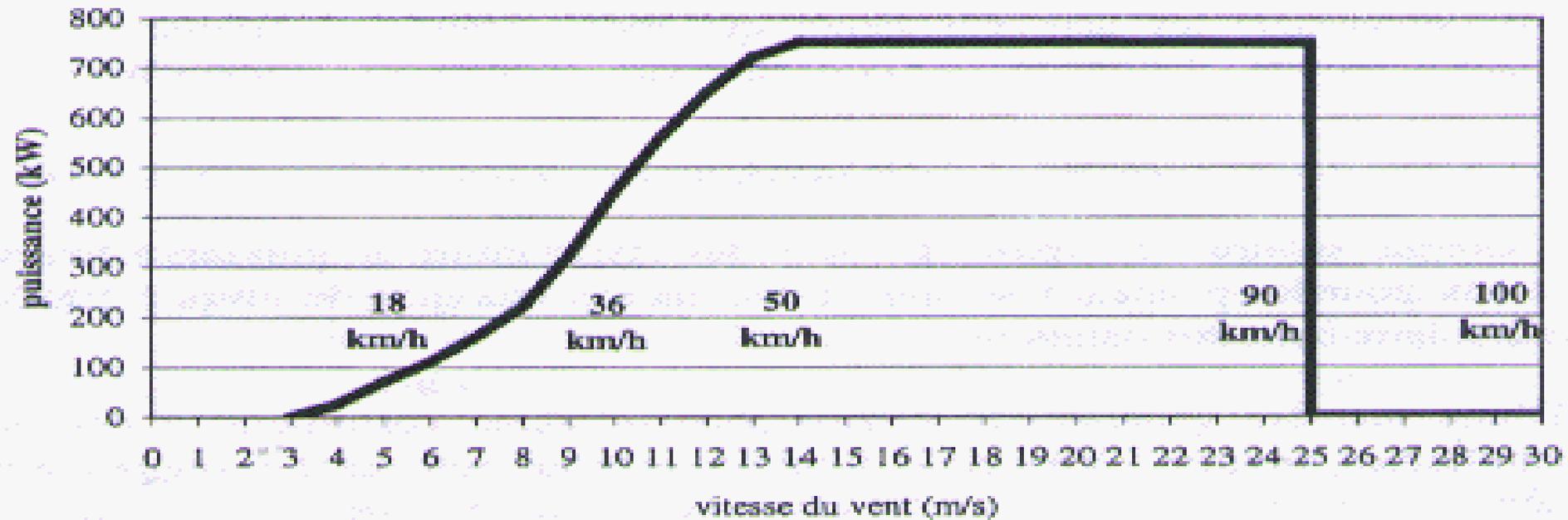
Source: Hydropower & Dams World Atlas 2005

- Le potentiel existe -

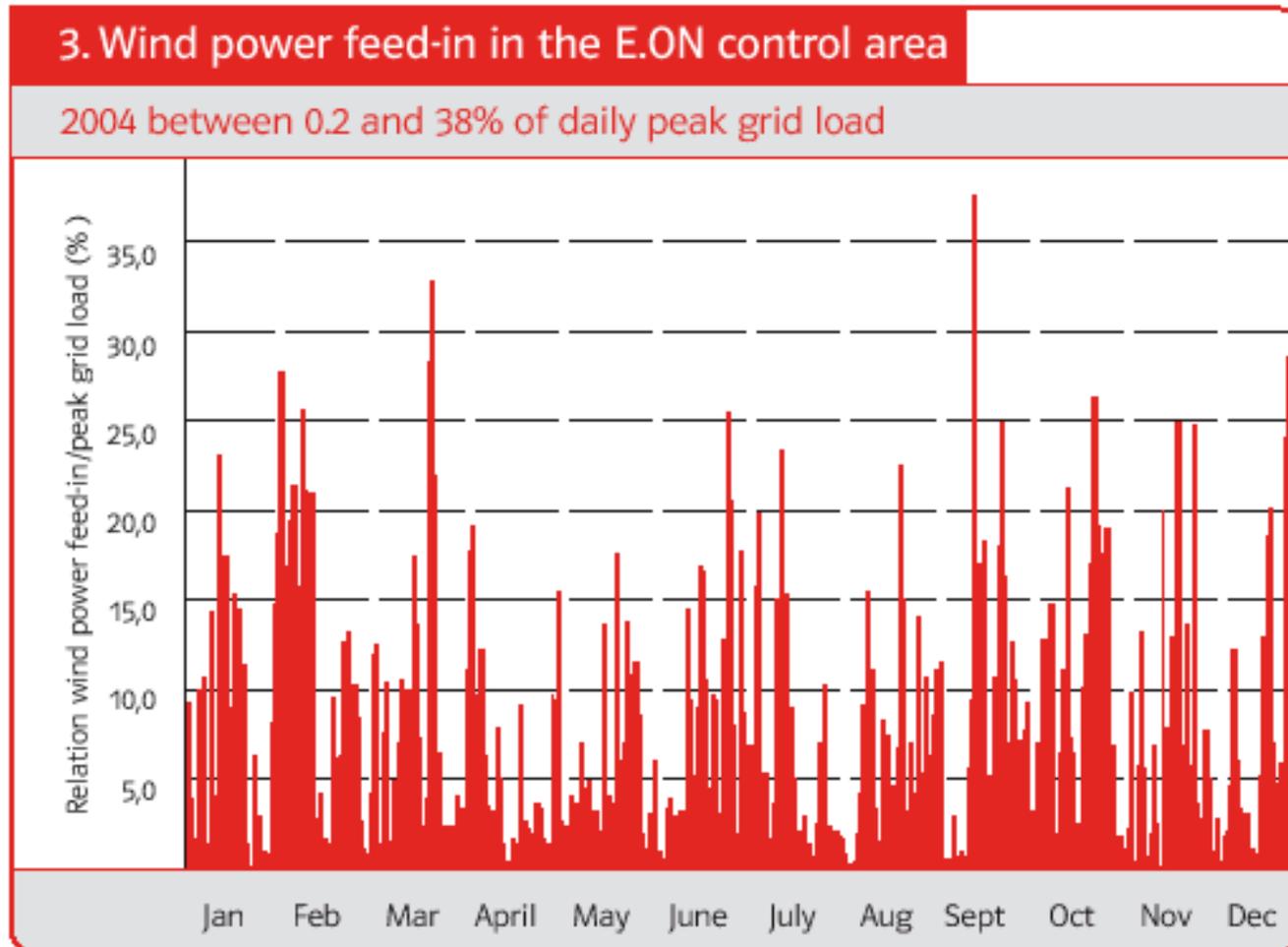
Eolien

- Une éolienne de 1000 m² de surface balayée :
- Puissance : 1 Mw crête
Production : 2-3 Gwh/an.
- Empiètement au sol : 8 ha/MW,
- Production: 60 kwh/m²/an.
Photovoltaïque : 300 kwh/m² /an.

Rendement



Puissance éolienne E-ON sur un an (max théorique: 7.558 MW)



Puissance installée: 33.200MW dont éolien 7.558 MW (23%)

Production: 271.300 MWh dont éolien 11.300 MWh (4,16%)

Contribution maximum de l'éolien

- Limite puissance totale: 30% de la puissance réseau
- Rendement maxi: 30%
- Energie Max délivrée: 10% de la production électrique
- Restera marginal sans moyens de stockage révolutionnaires

Biomasse
(végétaux+animaux)

Stock

1 800 Gigatonnes

Le flux de matière :

- 570 Gt/an (humide)
- 170 Gt/an (sec)
- 100 Gtep/an .

prélèvements humains:

alimentation : 2,1 Gtep

matériaux : 0,4 Gtep

énergie : 1,3 Gtep

(1,1 Gtep dans les PVD sous forme de bois de feu).

total : 3,8 Gtep, 6 p. 100.

Potentiel réaliste mobilisable

Monde

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

Total possible (énergie): 3,53 Gtep

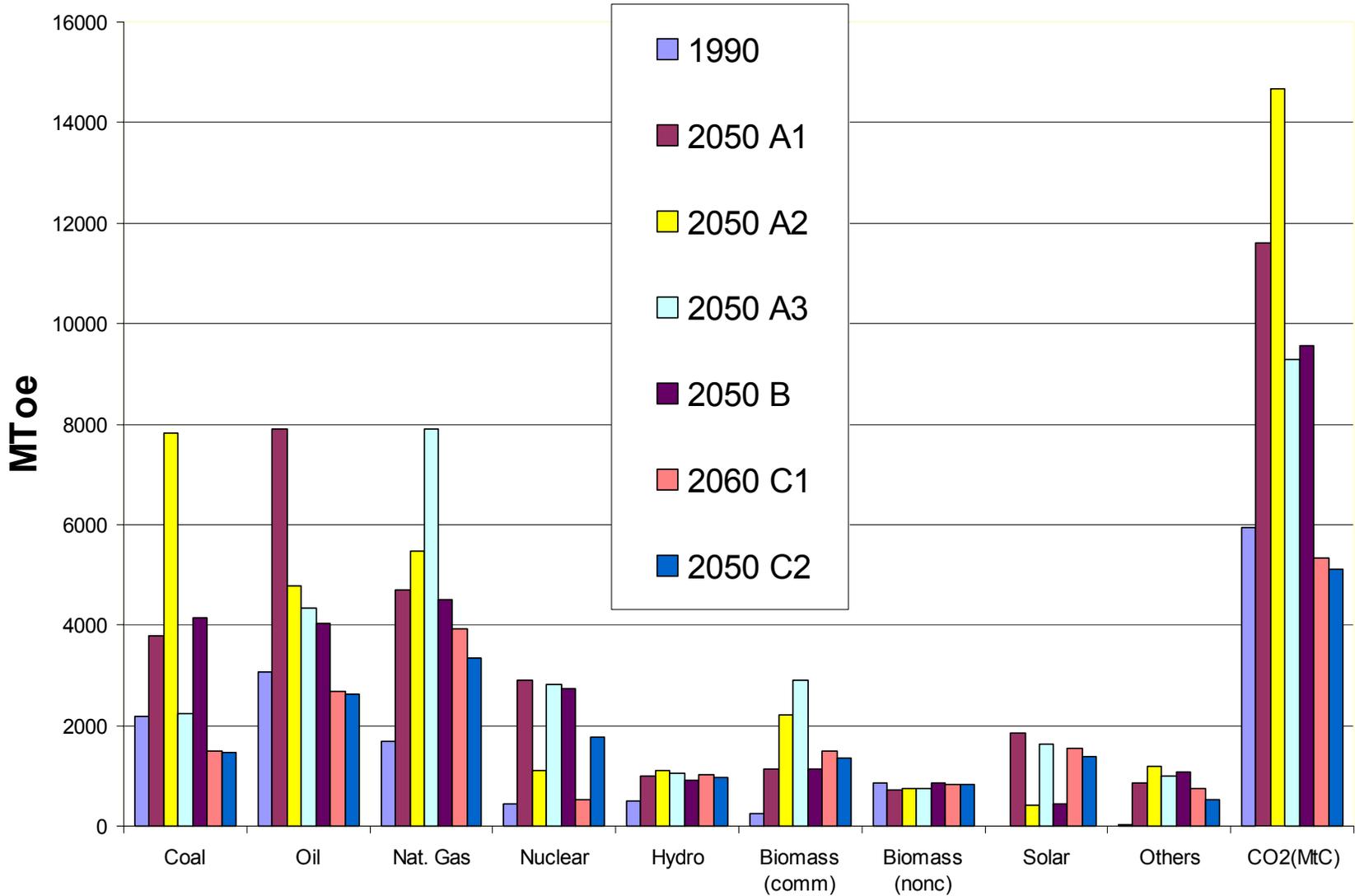
Europe (15):

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

Production actuelle: 37 Mtep

Total: 172 Mtep (12% consommation)

Primary energy per fuel MToe



Le Nucléaire

- Que faire des déchets?

- Stockage profond
- Stockage en surface ou subsurface
- Transmutation

- Les accidents

- Tchernobyl
- Effets des faibles doses

- Ressources limitées avec les REP (Réacteurs à Eau Pressurisés)
actuels

- Nécessité de la (sur)régénération:

Quels remplaçants pour les RNR (Réacteurs à Neutrons Rapides)
Sodium?

Combustibles irradiés

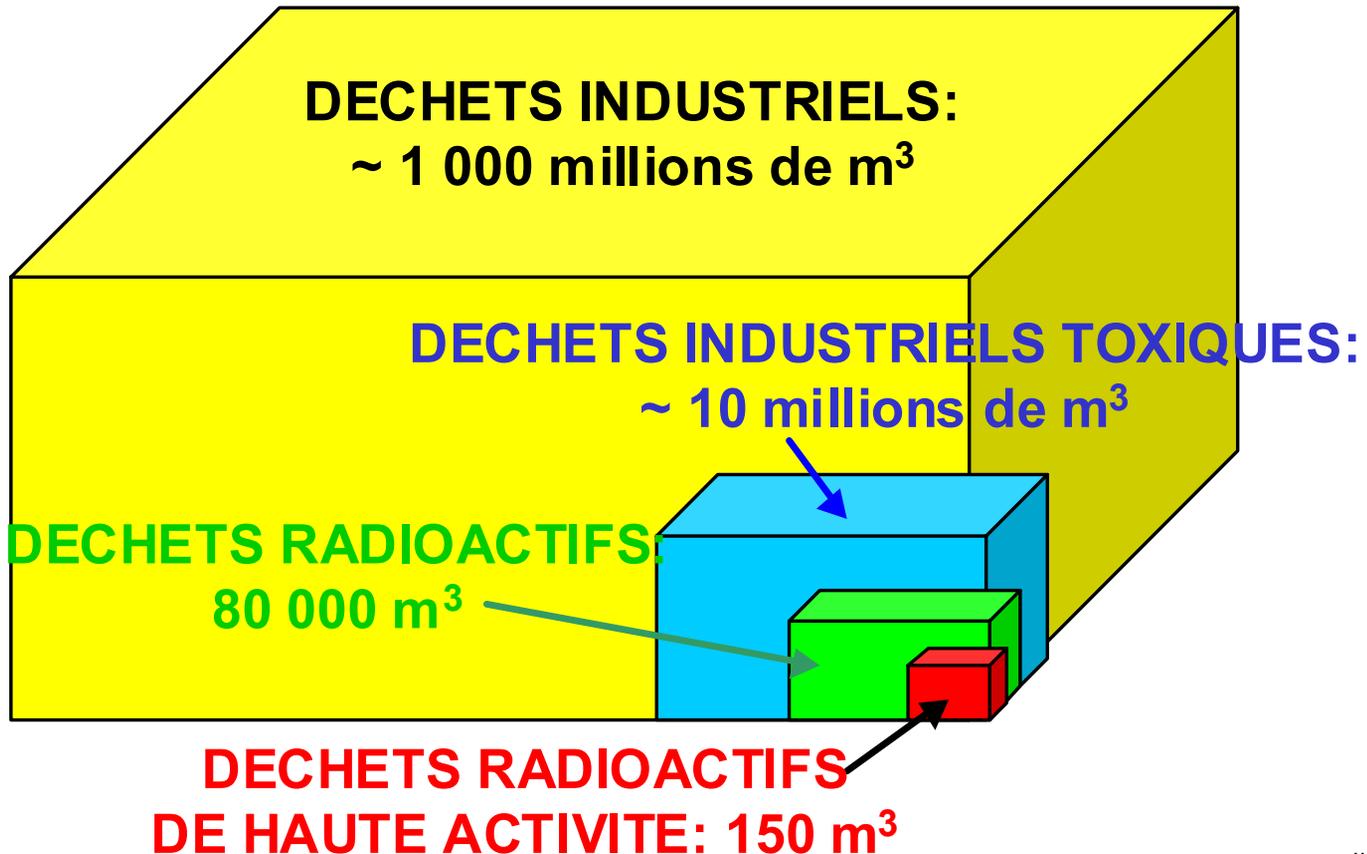
Production annuelle d'un réacteur de 1 REP 1Gwe

- Uranium : 30 tonnes
- Plutonium: 0,3 tonnes
- $^{90}\text{Sr} + ^{137}\text{Cs}$: 50 kg
- PFVL (^{129}I , ^{99}Tc , $^{90}\text{Zr} \dots$) 60 kg

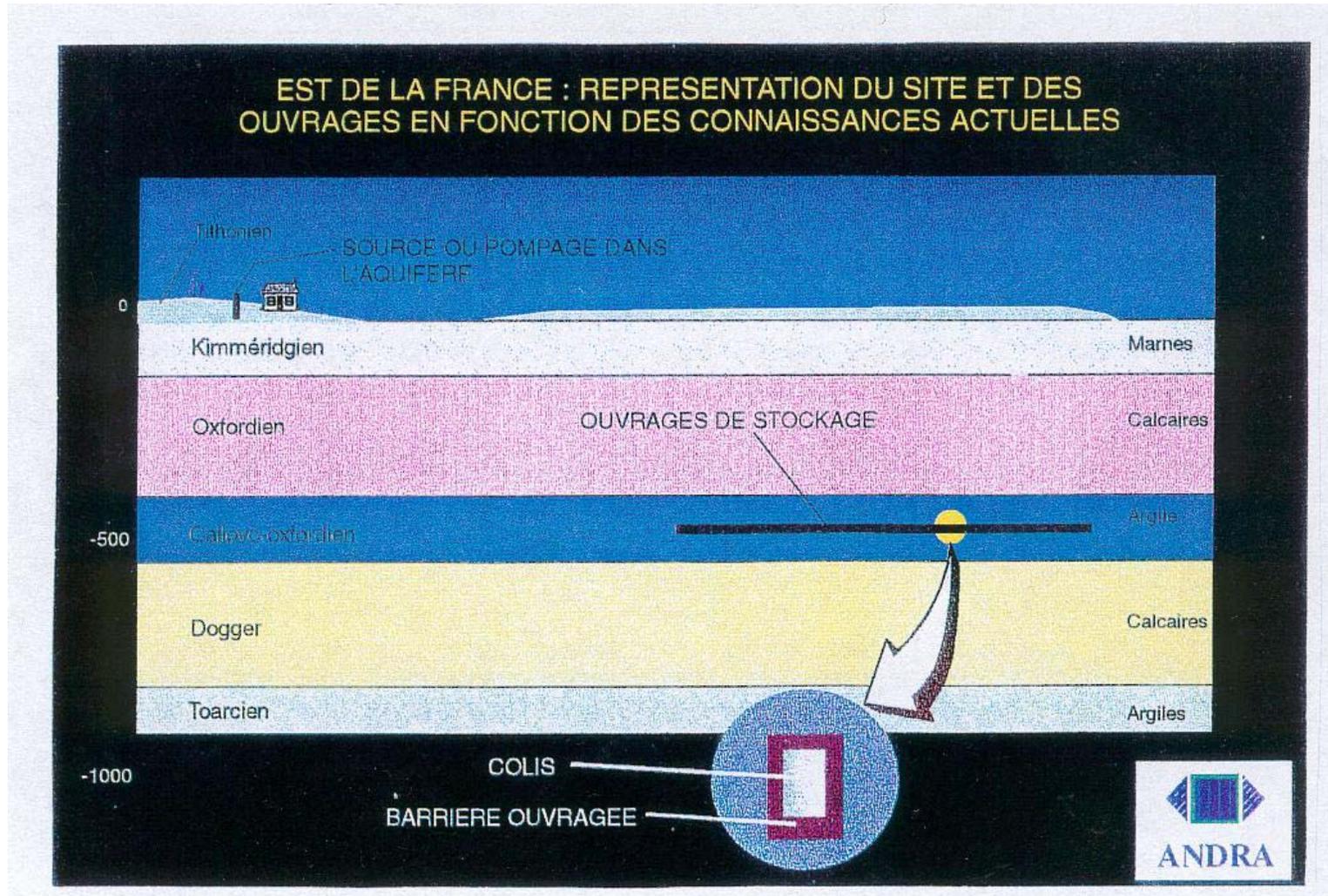
Volume des déchets

Production annuelle de déchets dans la communauté européenne

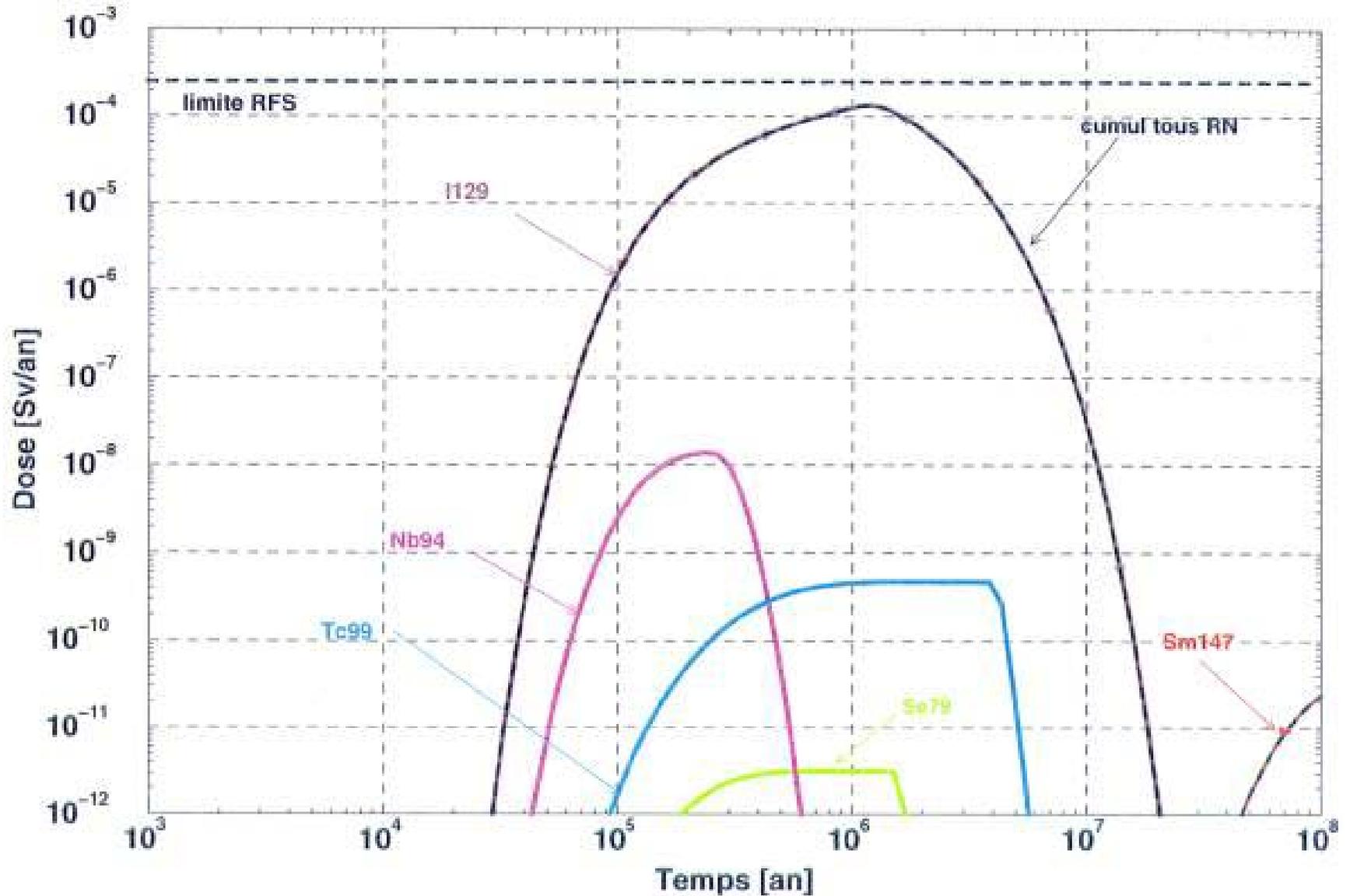
SOURCE: CEE - 1993



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, OCHA, OMS)

(Final report 240102, 25/1/2002):

➤ Attribuables à l'irradiation:

41 morts, 2000 cancers de la thyroïde

➤ Nombreuses victimes psycho-socio-économiques

• TMI (type REP):

- Fusion du cœur
- Confinement assuré

❖ Bilan:

- 2 irradiés dans le personnel, 0 morts
- Panique

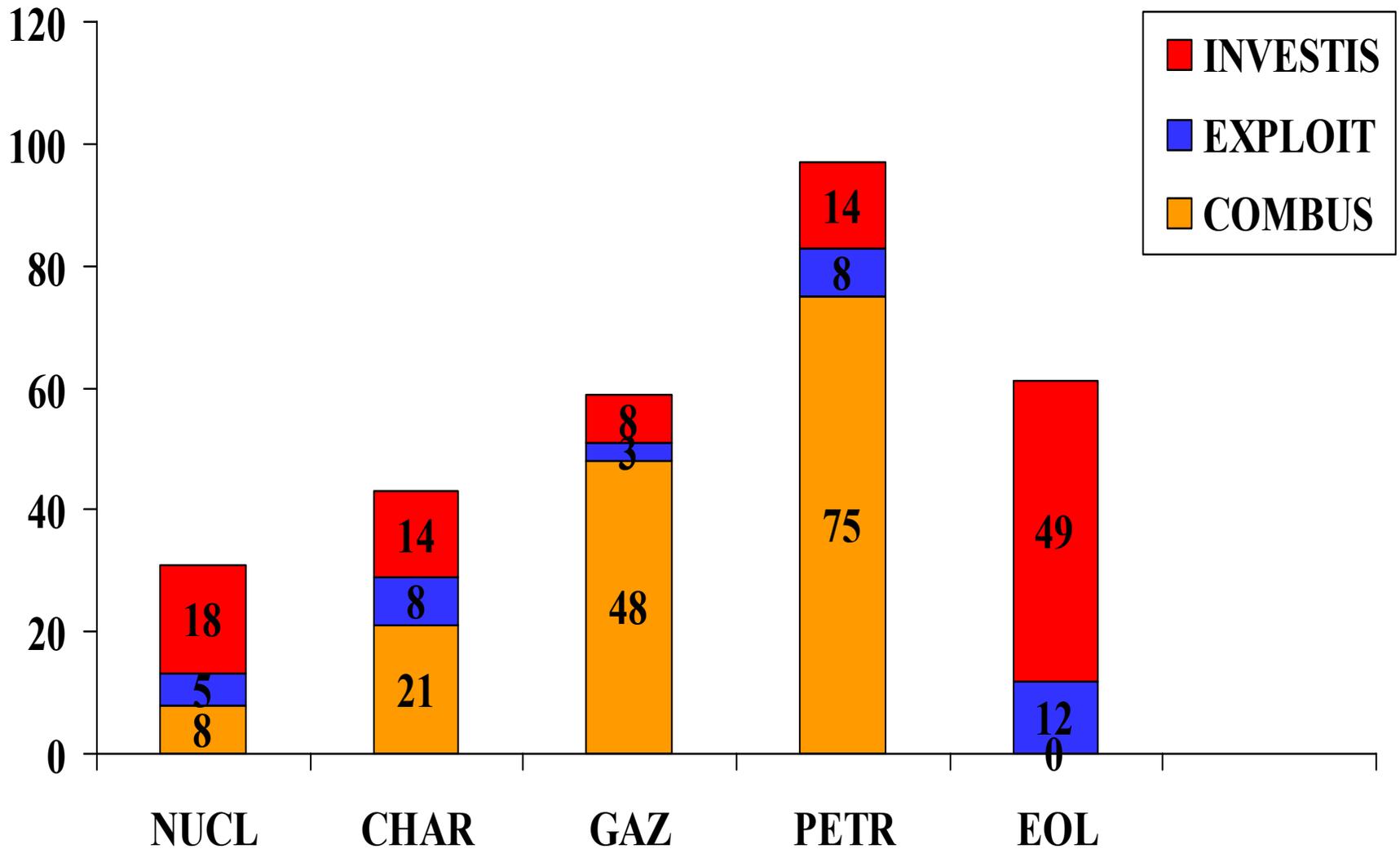
Coûts

Investissements

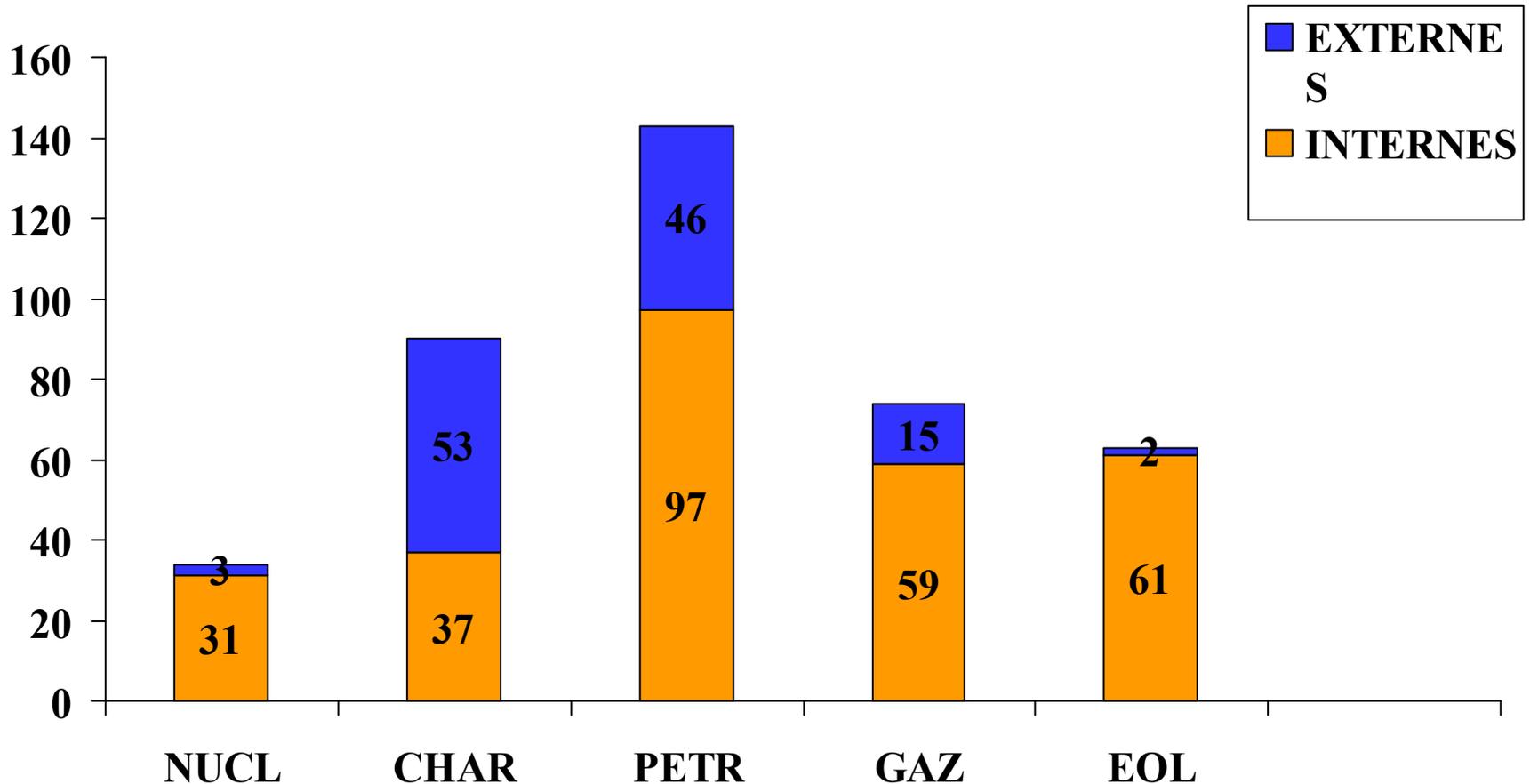
Production de 7 Twh/an (un réacteur de 1 Gwe

- Gaz= 0,5 GEuros
- Nucléaire= 1,5 GEuros
- Eolien= 3,8 GEuros
- Solaire= 15 GEuros

Coûts totaux internes



Coûts totaux (externes+internes)



Scénarios riches en nucléaire

Différentes approches

1. Minimisation de l'utilisation des fossiles:

➤ Electricité

➤ Chaleur

Nifenecker et al.

2. Méthode par différence Besoins-(Non nucléaire)

Bauquis, (Heuer, Merle et al.)

Nucléaire ou fossile?

2030

- Minimiser l'utilisation des fossiles pour l'Electricité
- Développement « Raisonable » du Nucléaire
 - OECD: 85%
 - Transition: 50%
 - Chine, Inde, Am. Latine: 30%

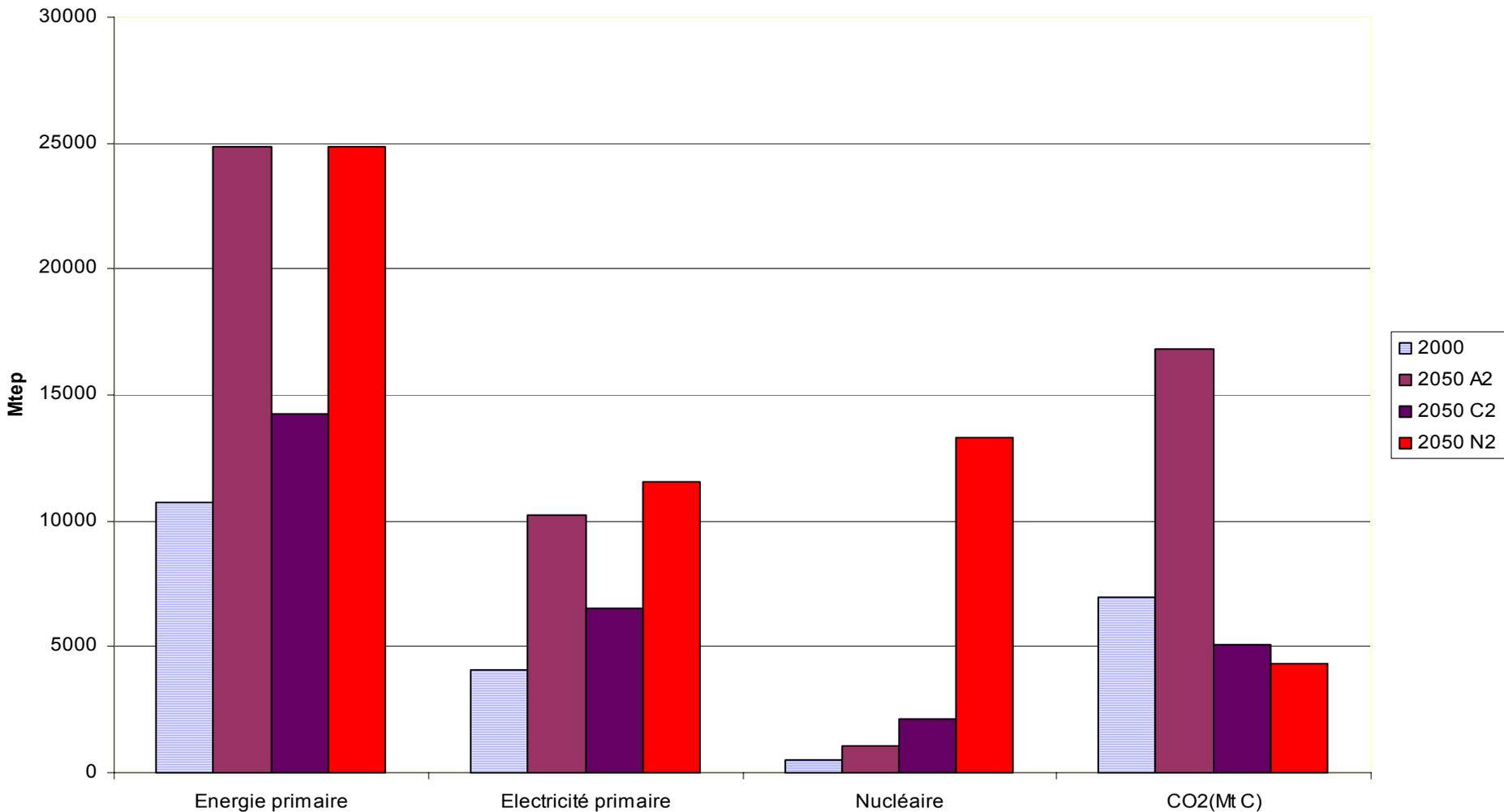
3000 GWe Nucléaire

2050

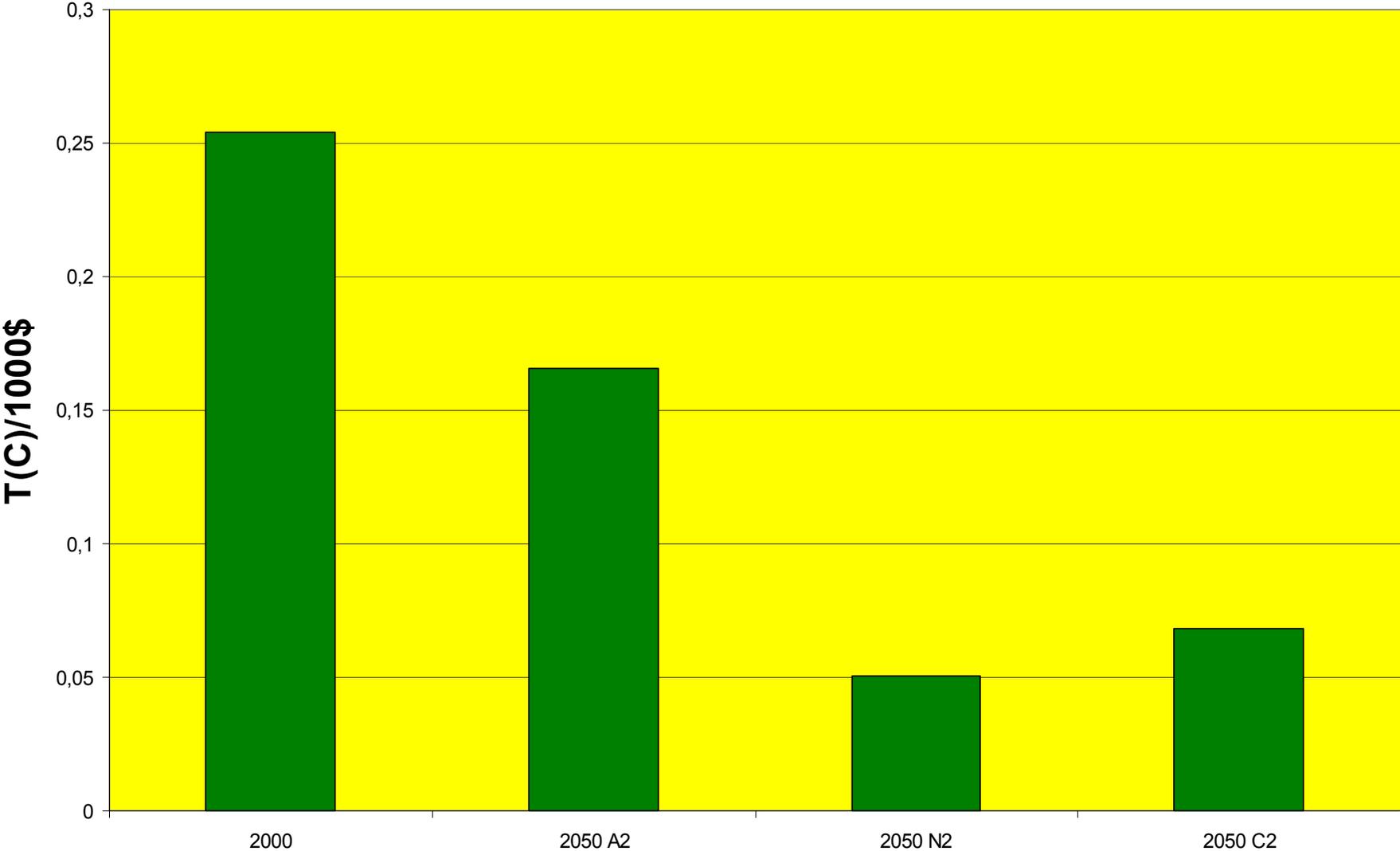
- Minimiser l'utilisation du charbon et du gaz
- 30% charbon Chine, Inde; 30% gaz Russie; 100% Afrique

7500 GWe Nucléaire

Scénario ni charbon ni gaz en 2050



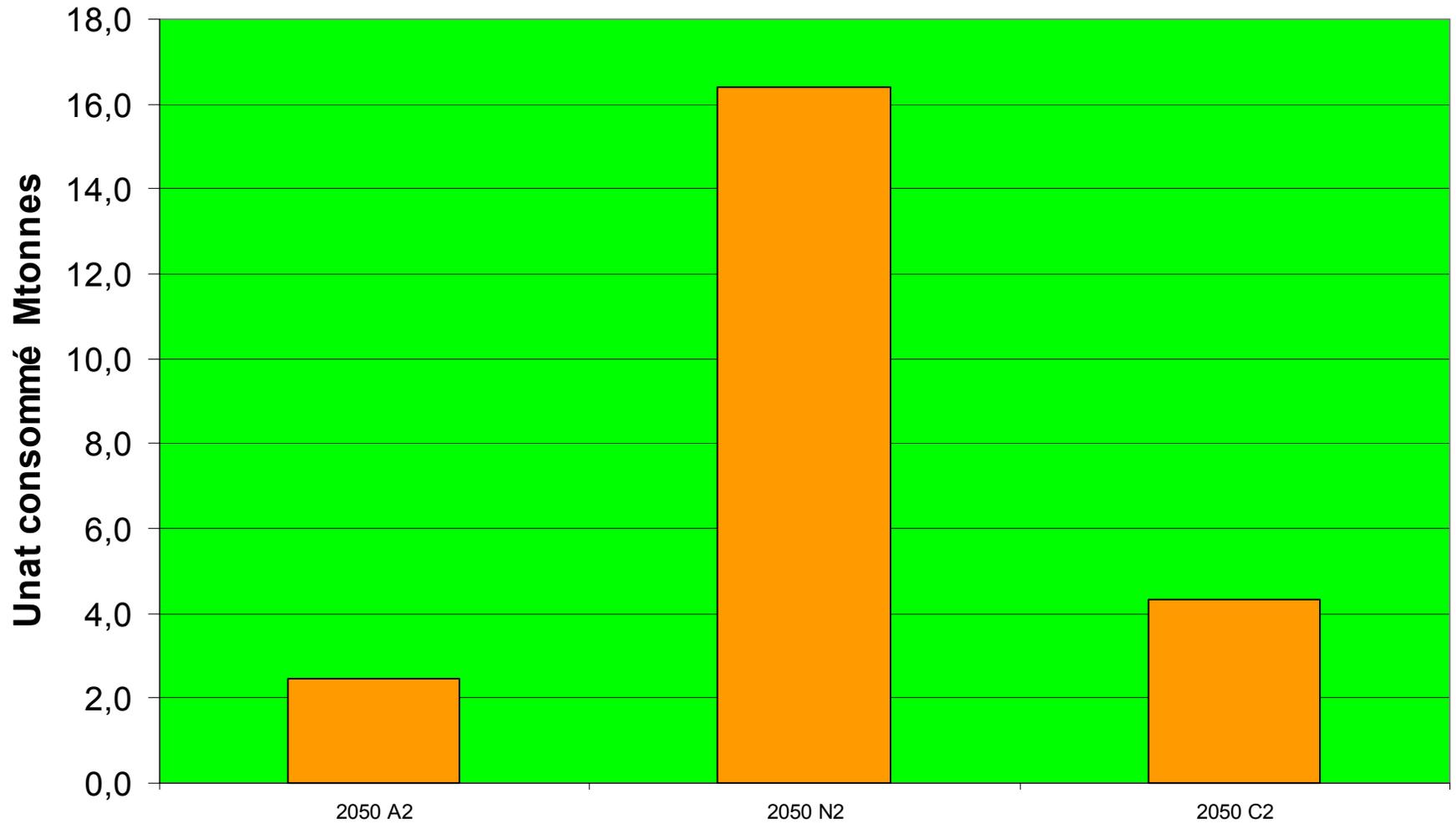
CO2/GDP



- Stabilisation de la concentration de CO₂ à 450 ppm
- Stabilisation de la température à +2 d°C

Gestion des Réserves d'Uranium

épuisement Unat

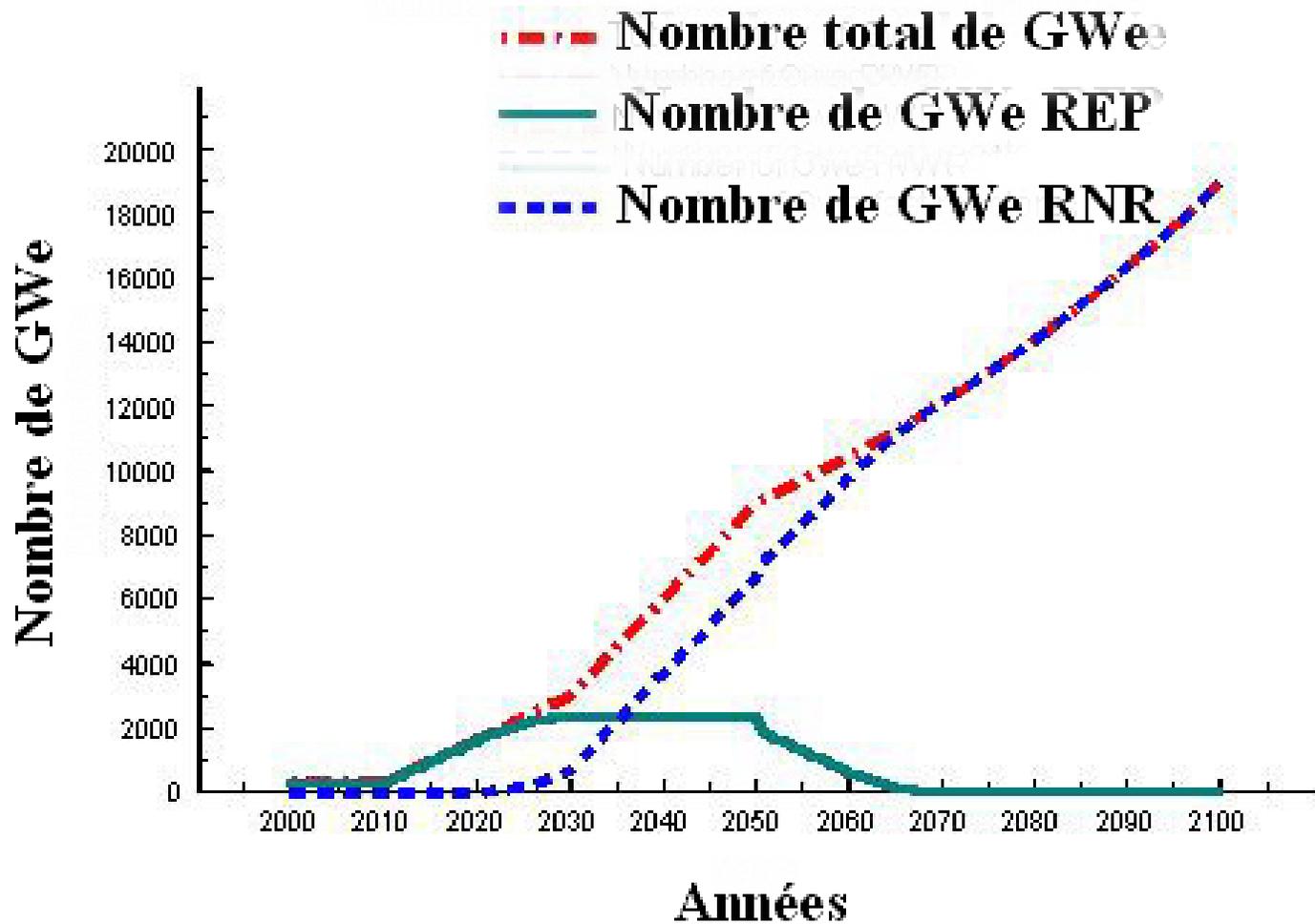


Cycles Surgénérateurs

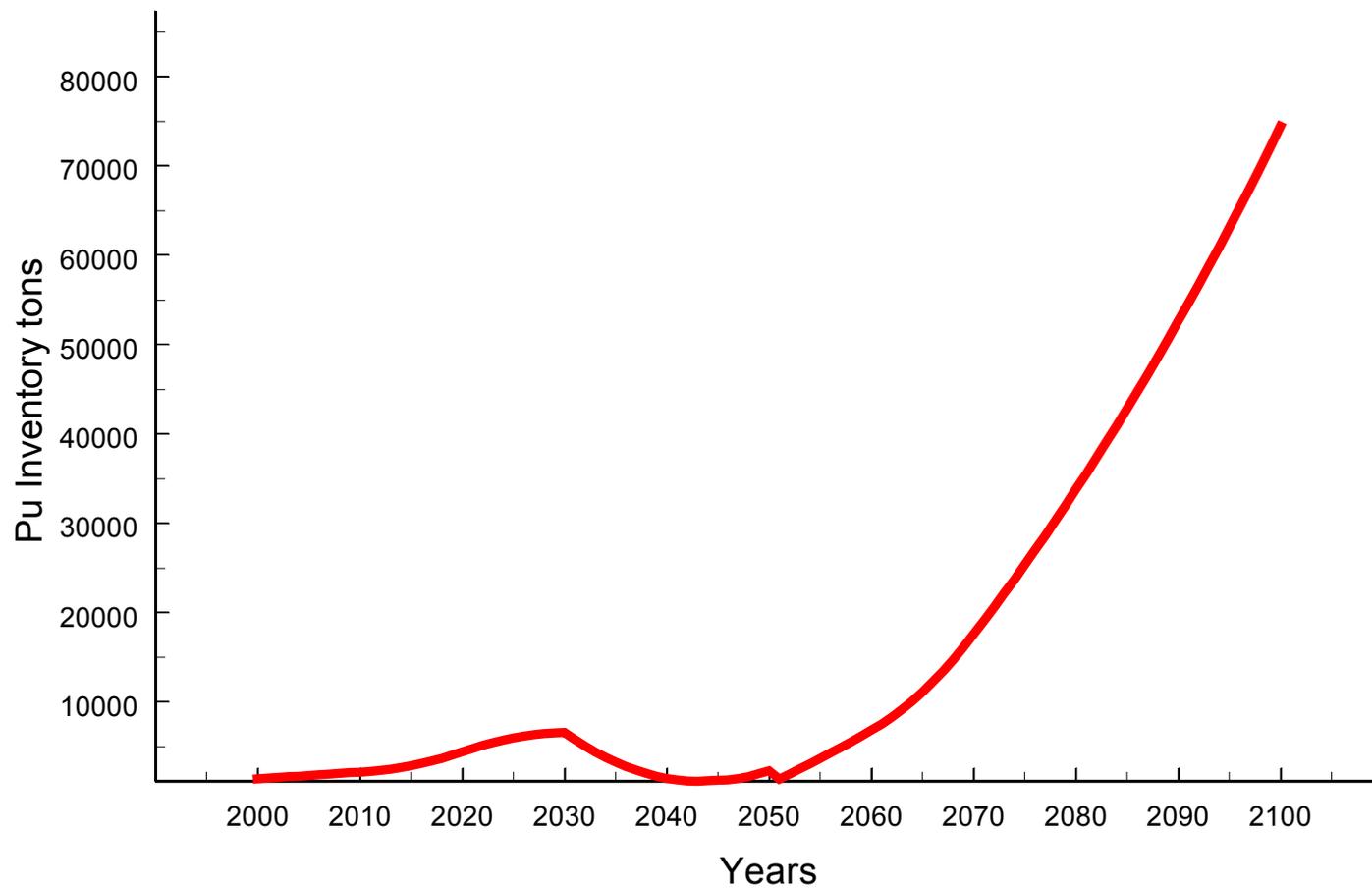
Exemple: cycle Uranium-Plutonium

- Spectres Rapides
- Fissile Pu
- Réacteurs 1.2 GWe
- Combustibles Solides
- Inventaire Pu initial:
 - 4 tonnes=16 REP-an
- Refroidissement 1 an
- Temps de doublement 25 ans
- Gain de radio-toxicité d'un facteur 50(1000 ans)

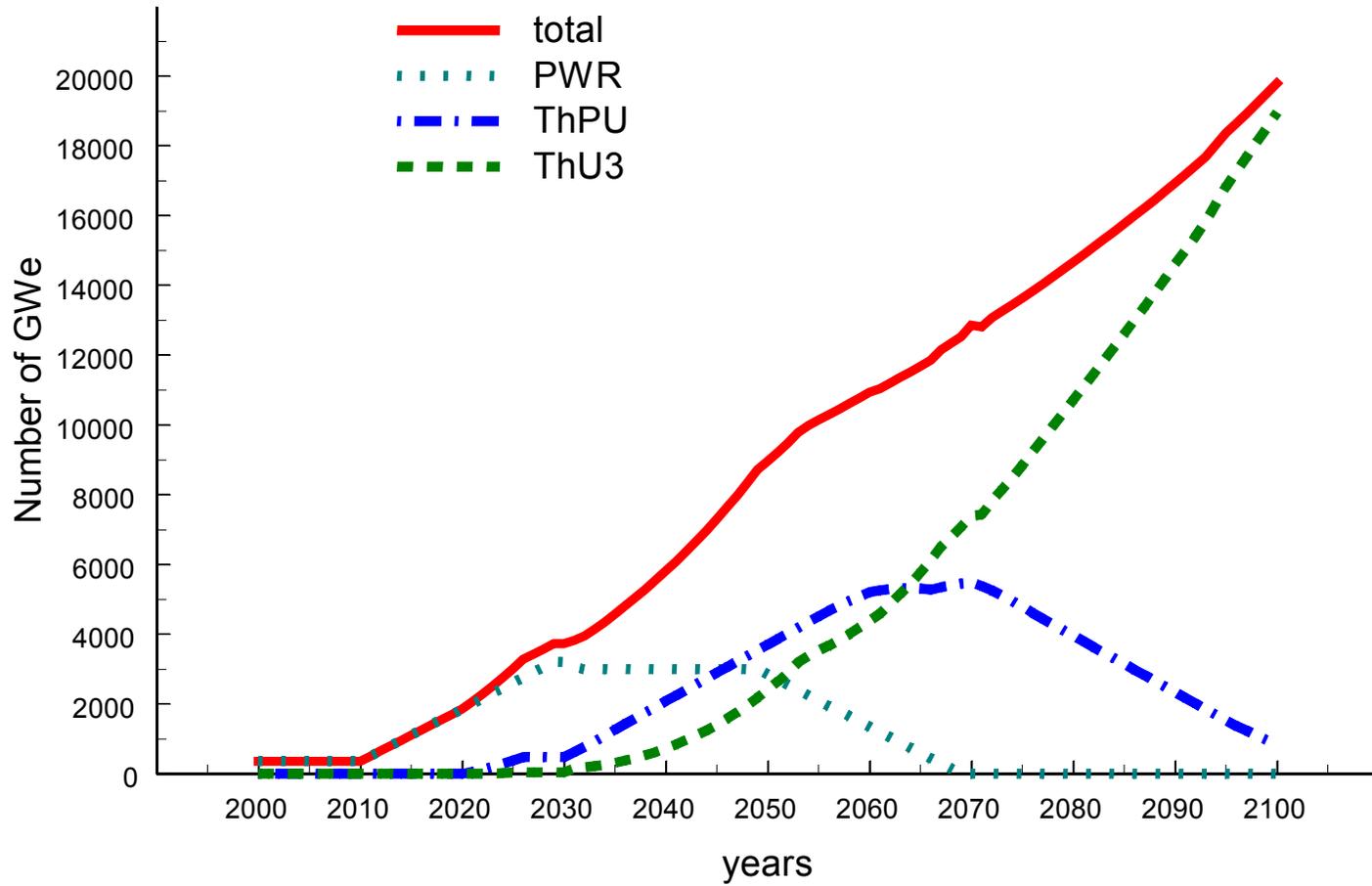
Nombre de GWe (REP+RNR) en fonction du temps



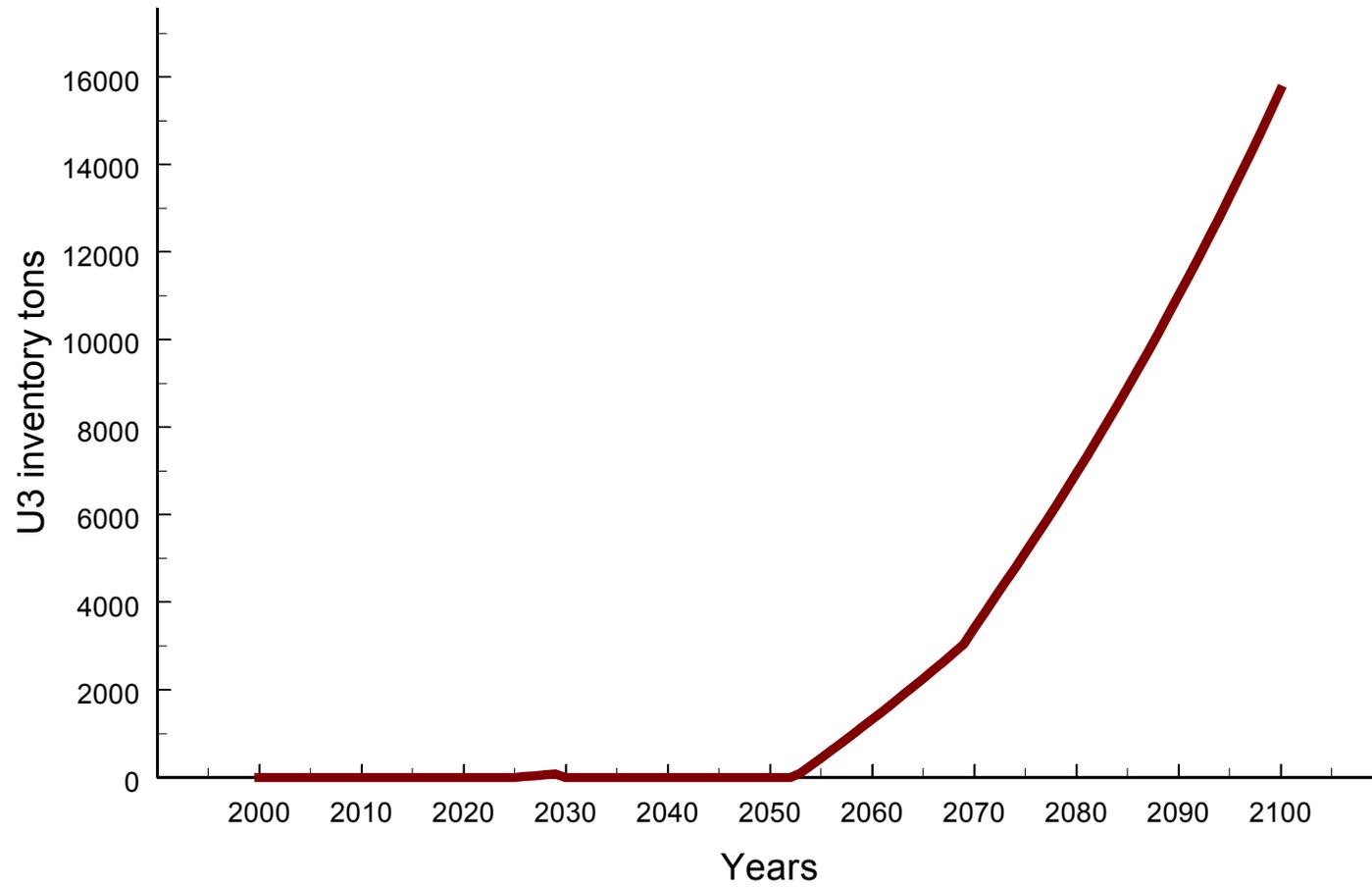
Pu inventory



Evolution of the number of Gwe for the Th-U cycle



Evolution of the U3 stockpile



Scénarios Différences

Exemple: Heuer, Merle et al. (LPSC-Grenoble

Données de base : Part du Nucléaire

Heuer Merle

Hypothèse

- Stabilisation de l'utilisation des énergies fossiles
- Besoin énergétiques mondiaux x 2
- Même part d'énergie renouvelable et d'énergie nucléaire

Conséquences

- Difficulté à contenir l'augmentation de l'émission de gaz à effet de serre

Energie Primaire en GTEP	2000	2050
Fossile	7.5	7.5
Hydraulique	0.7	1.4
Traditionnel	1.2	1.1
Renouvelables	0.2	5.2
Nucléaire	0.6	5.2
<i>Total</i>	<i>10.2</i>	<i>20.4</i>

Augmentation des besoins énergétiques mondiaux

+

Réduction de l'émission des gaz à effet de serre

Production Nucléaire :



- ~ Constante de 2000 à 2015
- Augmente de 6.2% par an jusqu'à 2050
- **→ Multiplication par un facteur 8**
- Augmente de 1.2% par an jusqu'à 2100

Scénario REP-RNR-RSF (avec Thorium)

RSF-U233

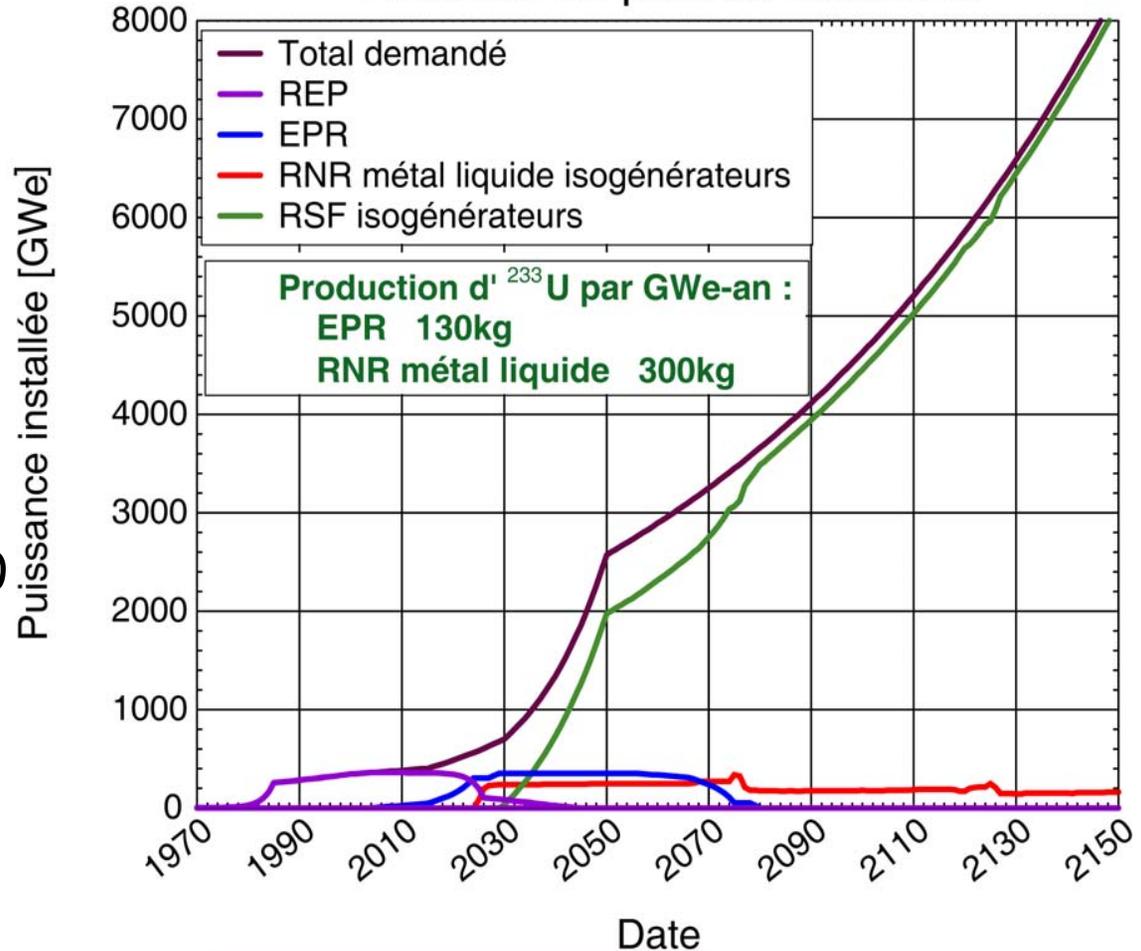
Caractéristiques :

- Production d' ^{233}U : 450 REP et 300 RNR
- Les RNR ferment le cycle U/Pu

Conclusions:

- Consommation d' $^{\text{nat}}\text{U}$: **7 millions de tonnes** en 2100
- **10 fois moins de matière fissile dans le cycle**
- Production d'actinides mineurs fortement réduite

Scénario "REP + RNR + RSF"
Evolution du parc de réacteurs



Scénario optimisé

Conclusions

- Au niveau mondial il sera impossible de stabiliser la température au 21ème siècle sans un recours massif au nucléaire.
- On aura besoin de surgénérateurs.
- On aura besoin d'un important parc de réacteurs « classiques » pour fournir le combustible des surgénérateurs
- Le solaire (PV) est l'énergie d'avenir pour les PVD en absence de réseau.
- L'avenir climatique se jouera en Chine et en Inde.
Nous pouvons encore fournir un exemple de développement à faible émission de GES.

FIN

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