

Quelles énergies pour un développement durable?

Hervé Nifenecker

LPSC

Consommation d'un foyer

- Electricité (énergie finale): 10000 kWh
 - Energie primaire: 35000 kWh=3Tep
- Chauffage (énergie finale): 3 Tep
- Transport (20000 km): 1,5 Tep

Unités de mesure

- 1 tep=1 tonne équivalent pétrole
- **Energie=Puissance x temps**
 - 1 Wh=1 Watt pendant 1h.
- Giga=Milliard
 - Tera=Millier de Milliards
 - Mega Million
- **Energie**
 - Mtep=Million de tonnes equivalent pétrole
 - Gtep=Milliards de tonnes equivalent pétrole
 - Twh=Millier de GWh =Milliards de kWh

Sources d'énergie

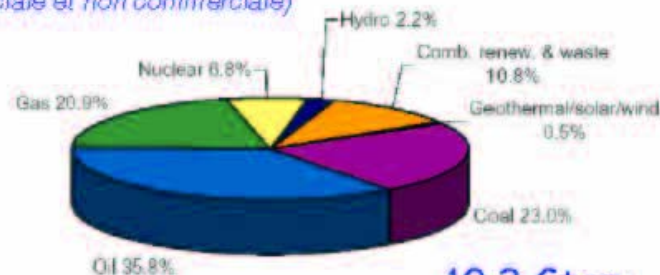
Un monde dominé par les combustibles fossiles

➔	Charbon	23%
➔	Pétrole	36%
➔	Gaz	21%
➔	Nucléaire	7%
➔	Énergies renouvelables	

2,2%	➔	Hydraulique
10,8%	➔	Biomasse (houille verte, déchets)
0,5%	➔	Eolien
	➔	Solaire (thermique, photovoltaïque)
	➔	Géothermie

Consommation mondiale d'énergie primaire
(2001)

(Commerciale et non commerciale)



10,2 Gtep

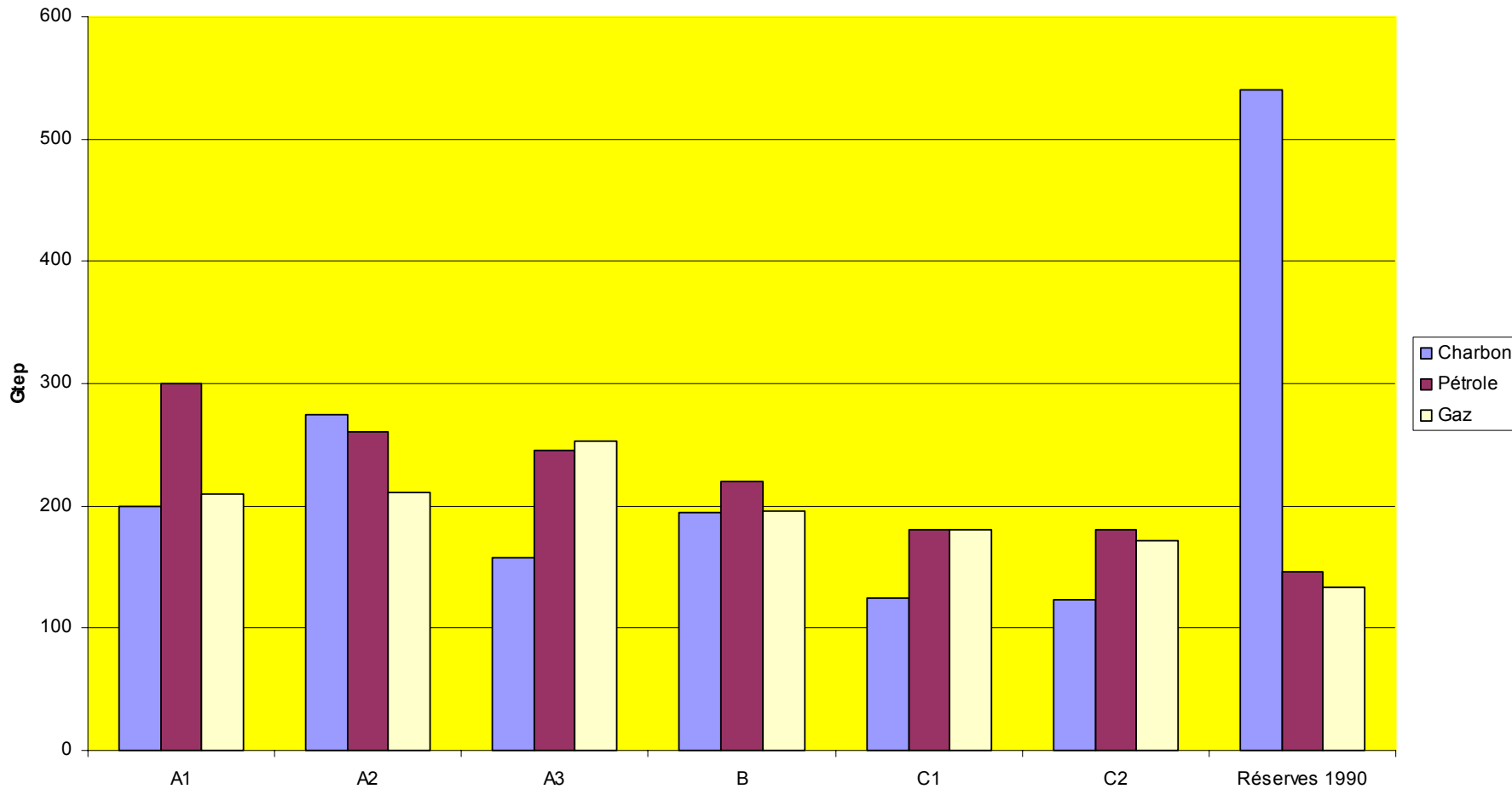
Remarque : la biomasse est renouvelable si l'on replante ce que l'on consomme

Scénarios

Conseil Mondial Energie

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

Épuisement des réserves fossiles



Quel effort?

- Rejets actuels : 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?

Les facteurs à contrôler

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

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

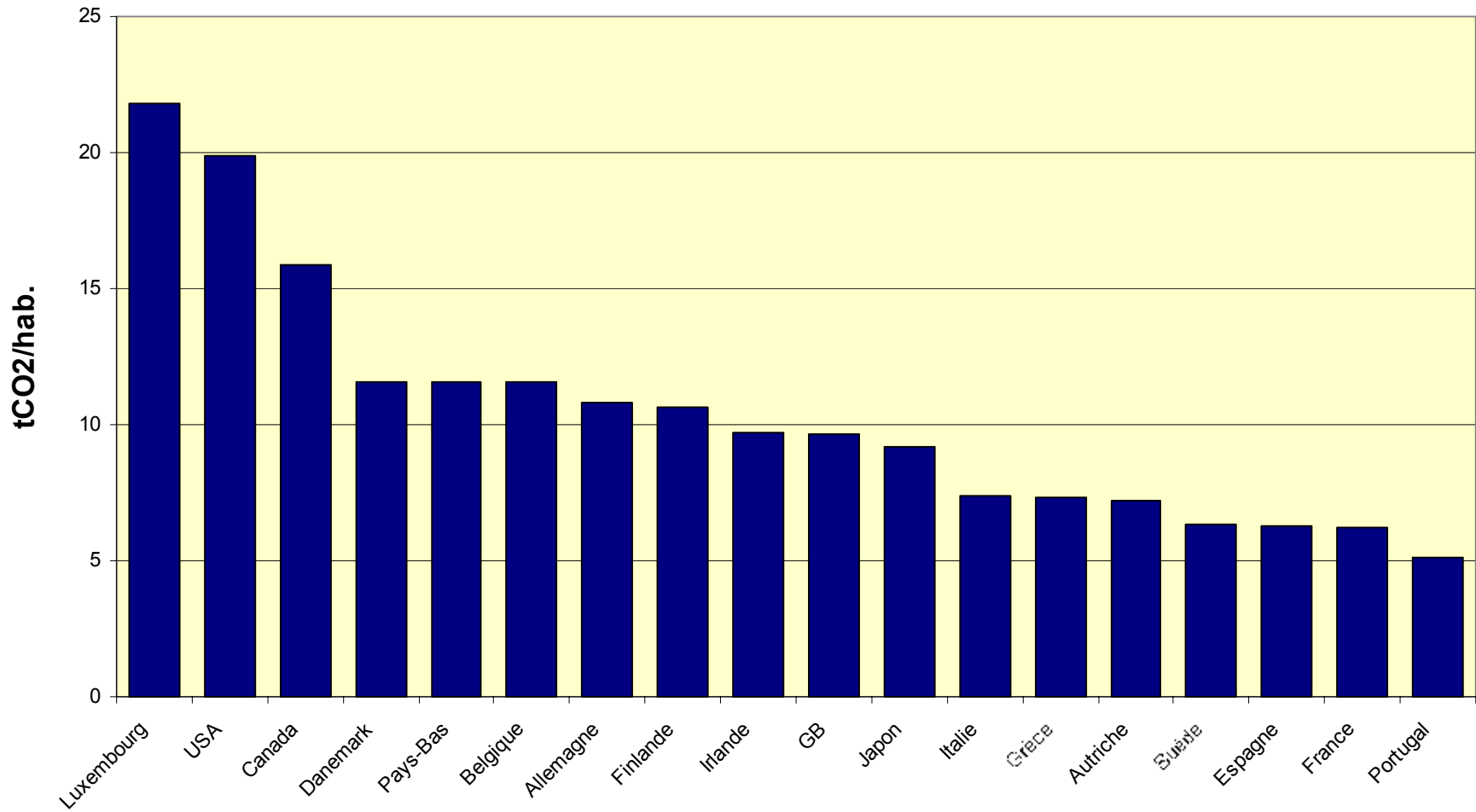
Intensité énergétique

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

Intensité en CO₂

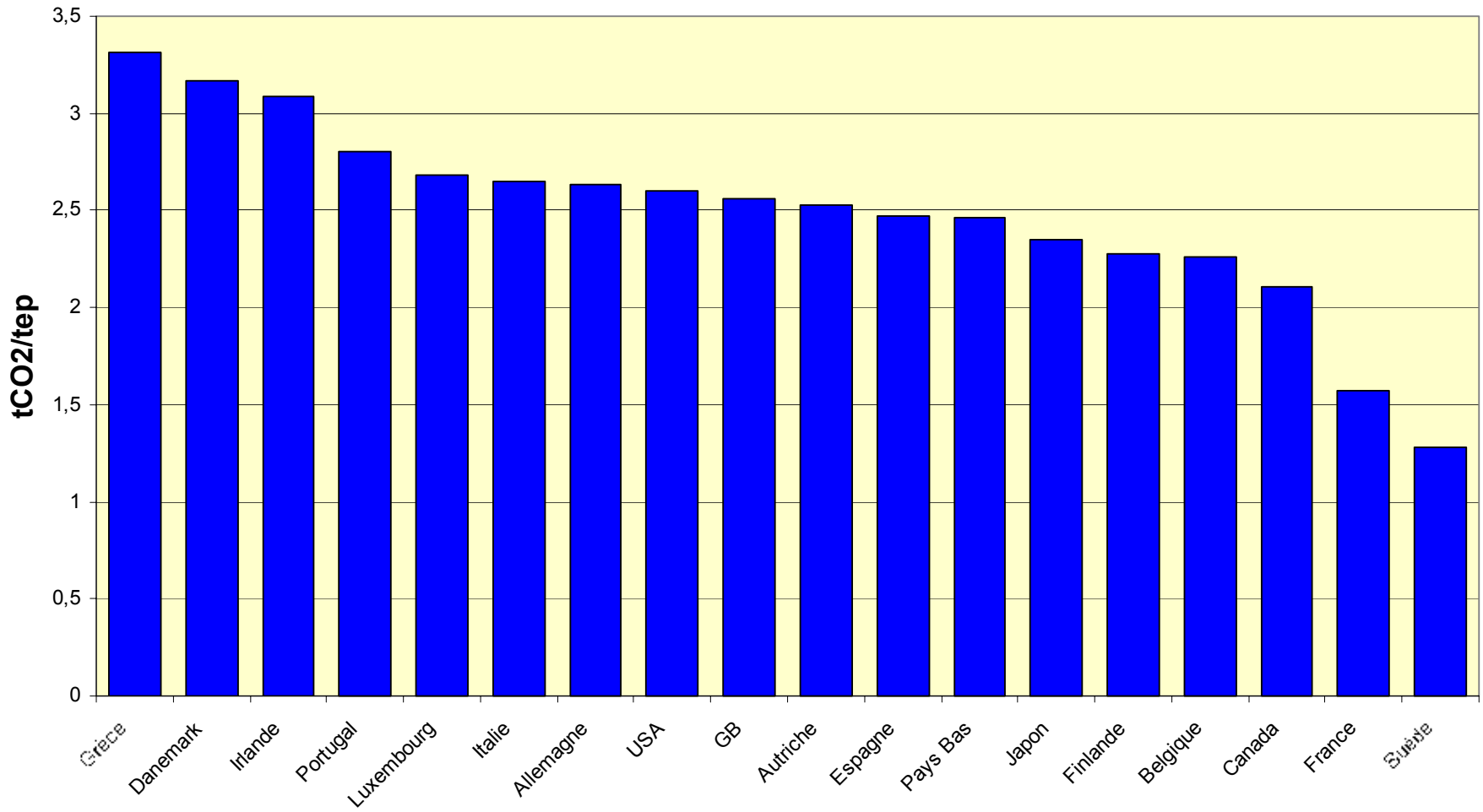
tCO2/ha

Emission de CO2 par habitant

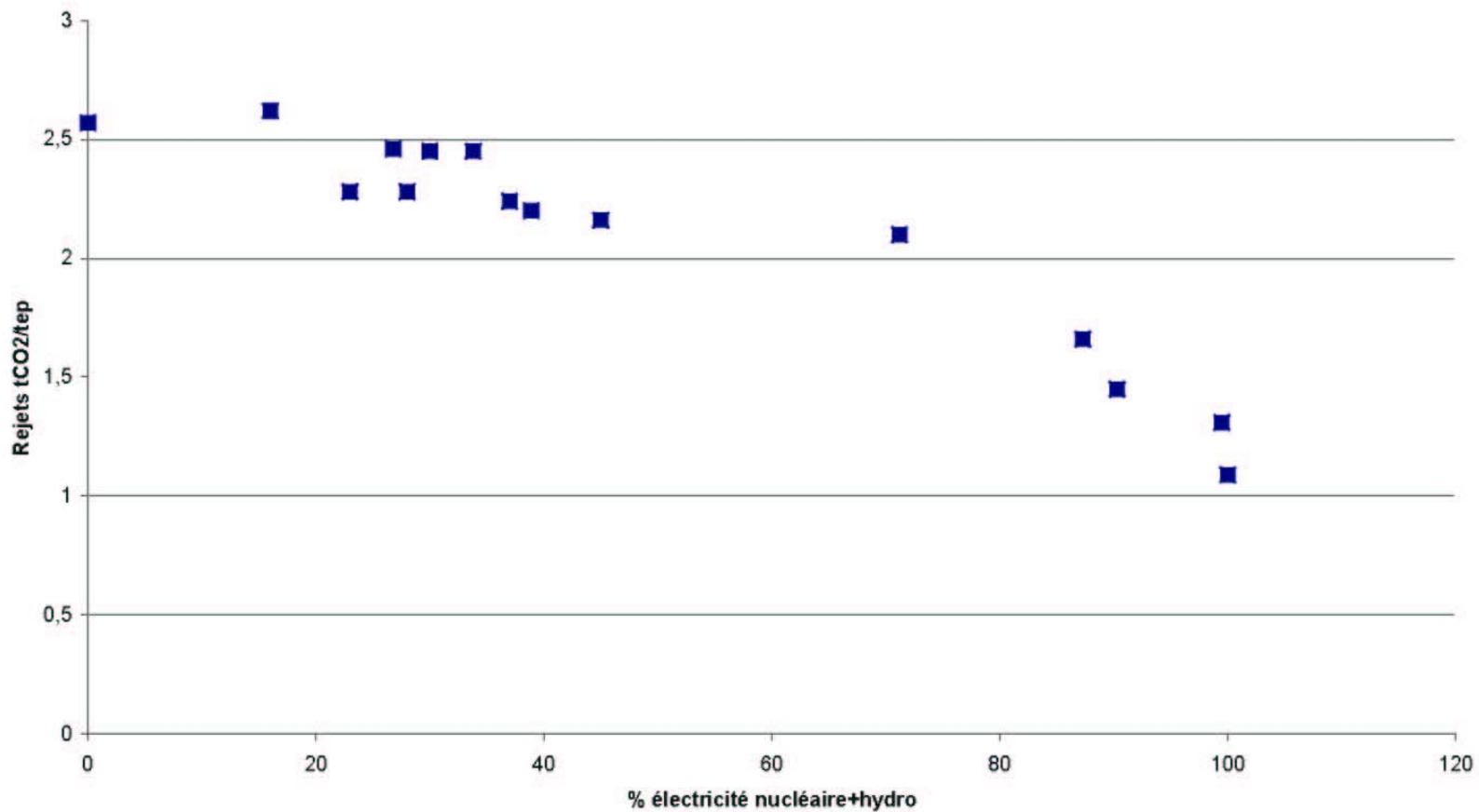


tCO₂/tep

tCO₂/tep (1995)



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

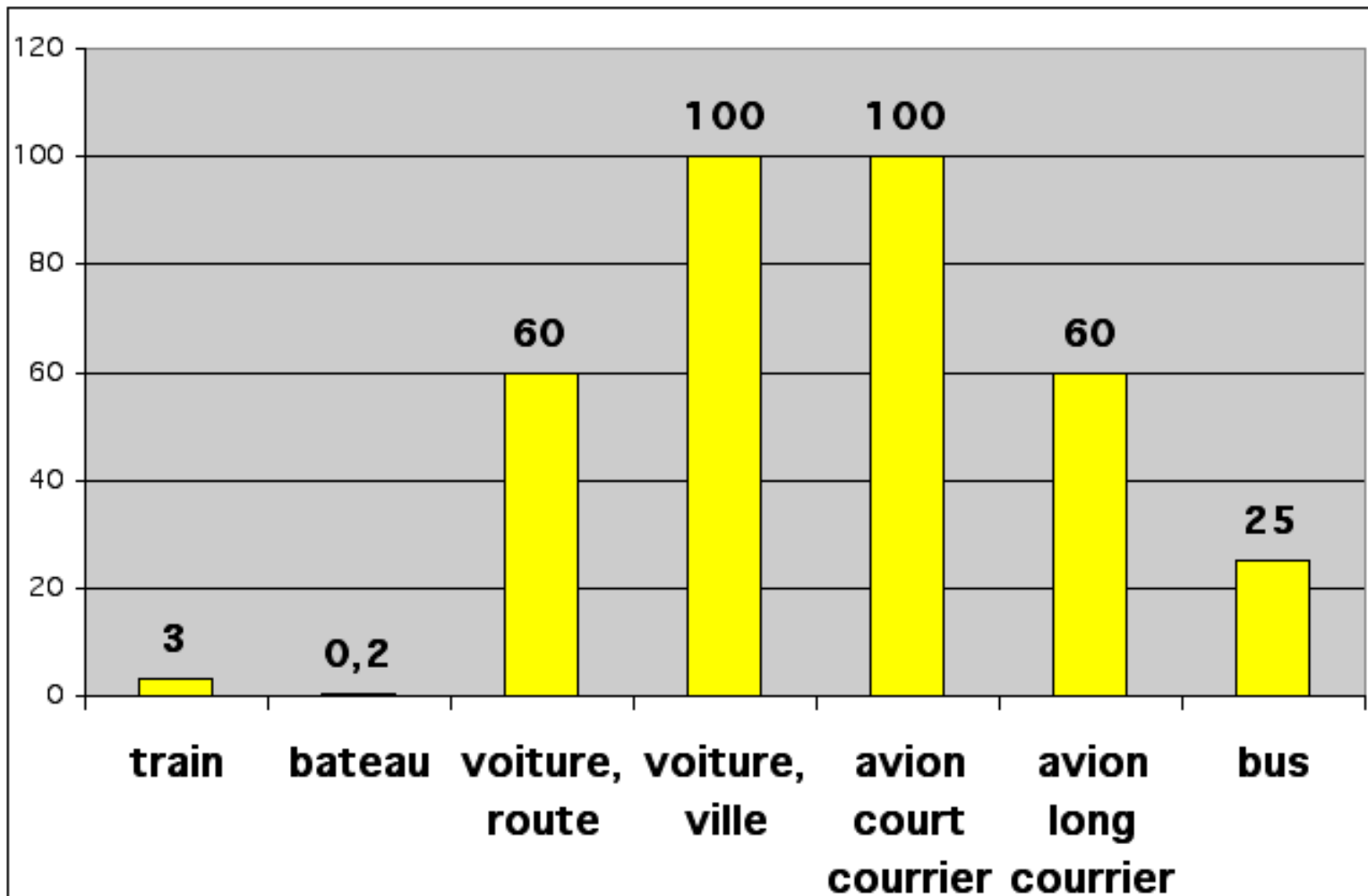


Economies d'énergie

Pratiques de vie

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

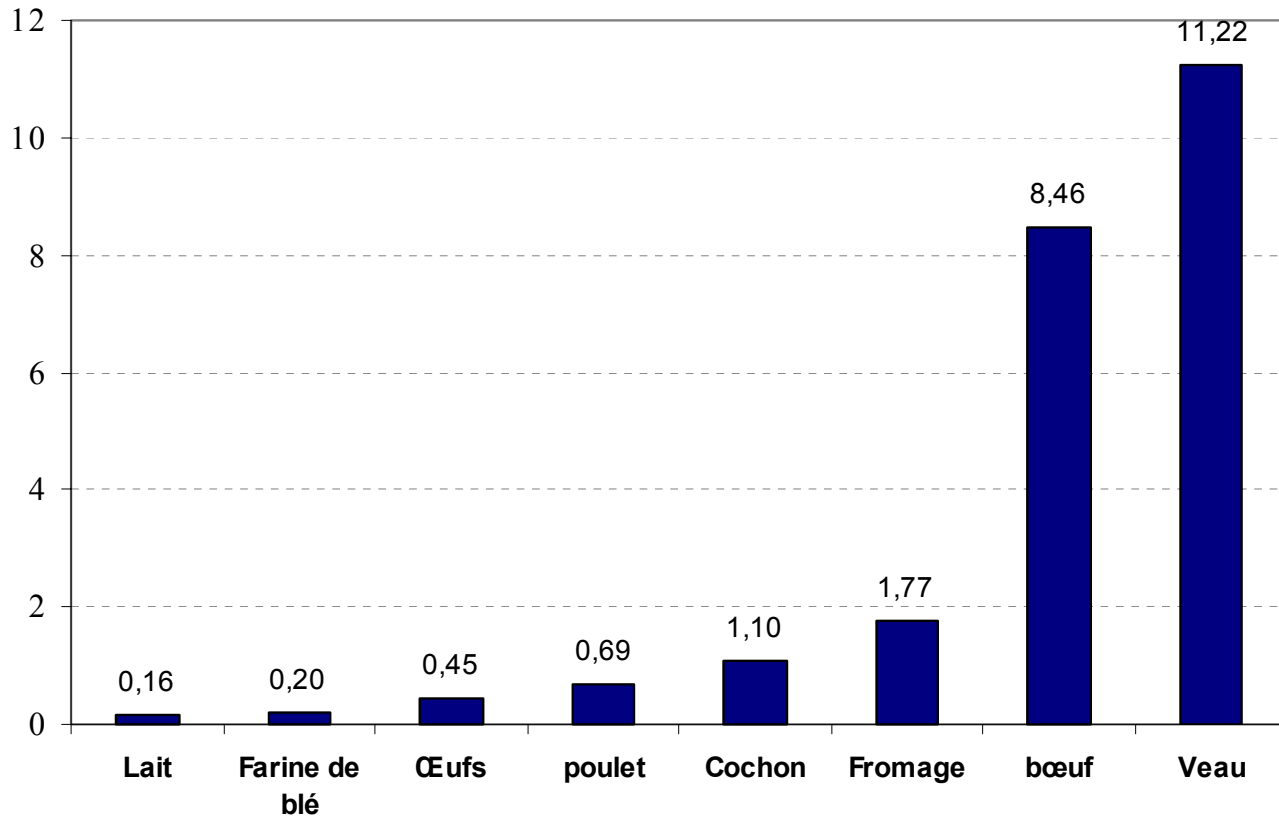
Emissions de GES en g.e.C par km.passager France



Alimentation

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

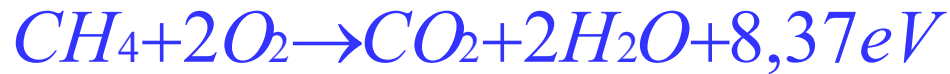
(engrais, énergie pour fabriquer ces engrais, transports, récolte, ..)



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

Les centrales à flamme

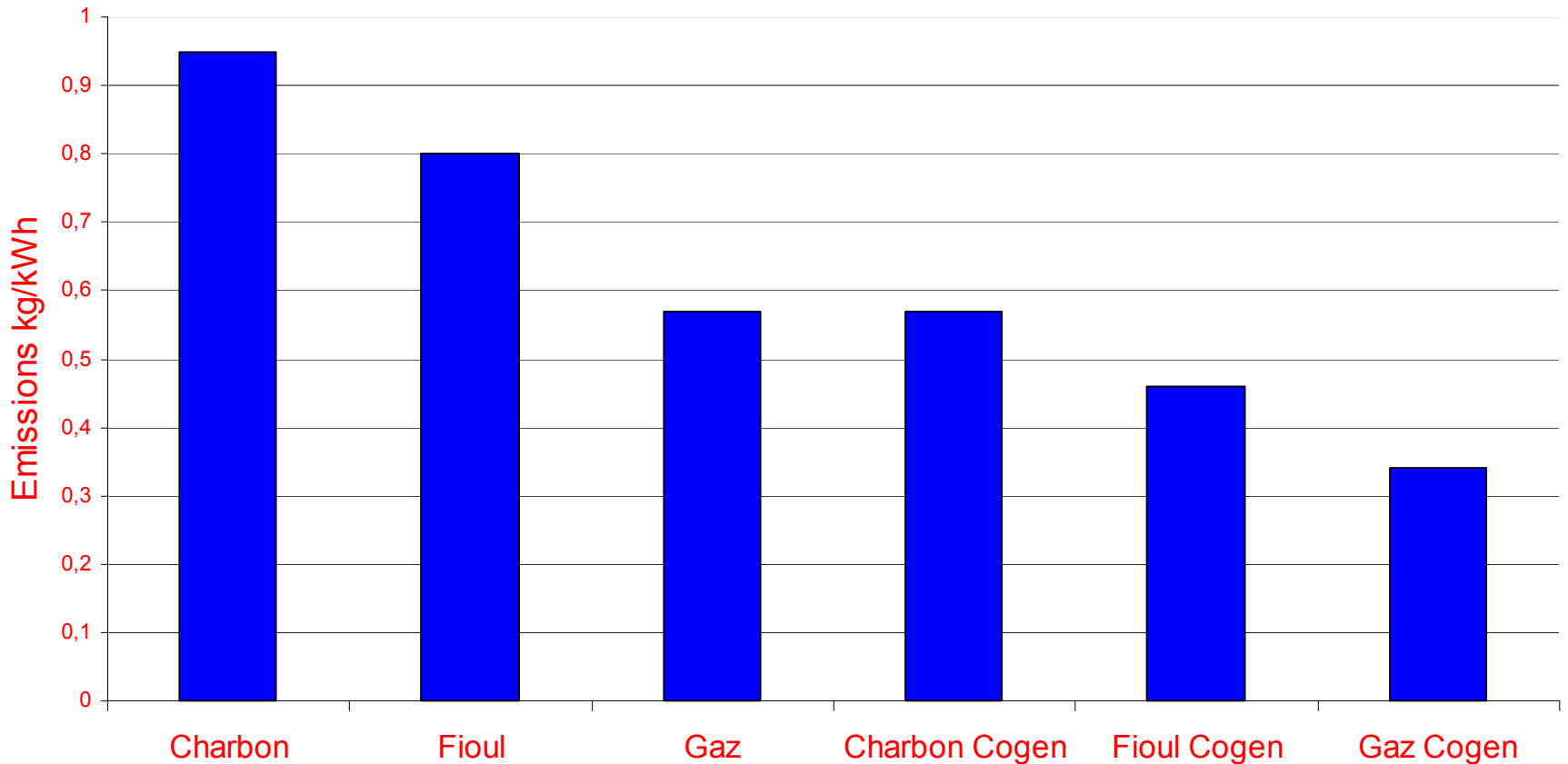
Réactions



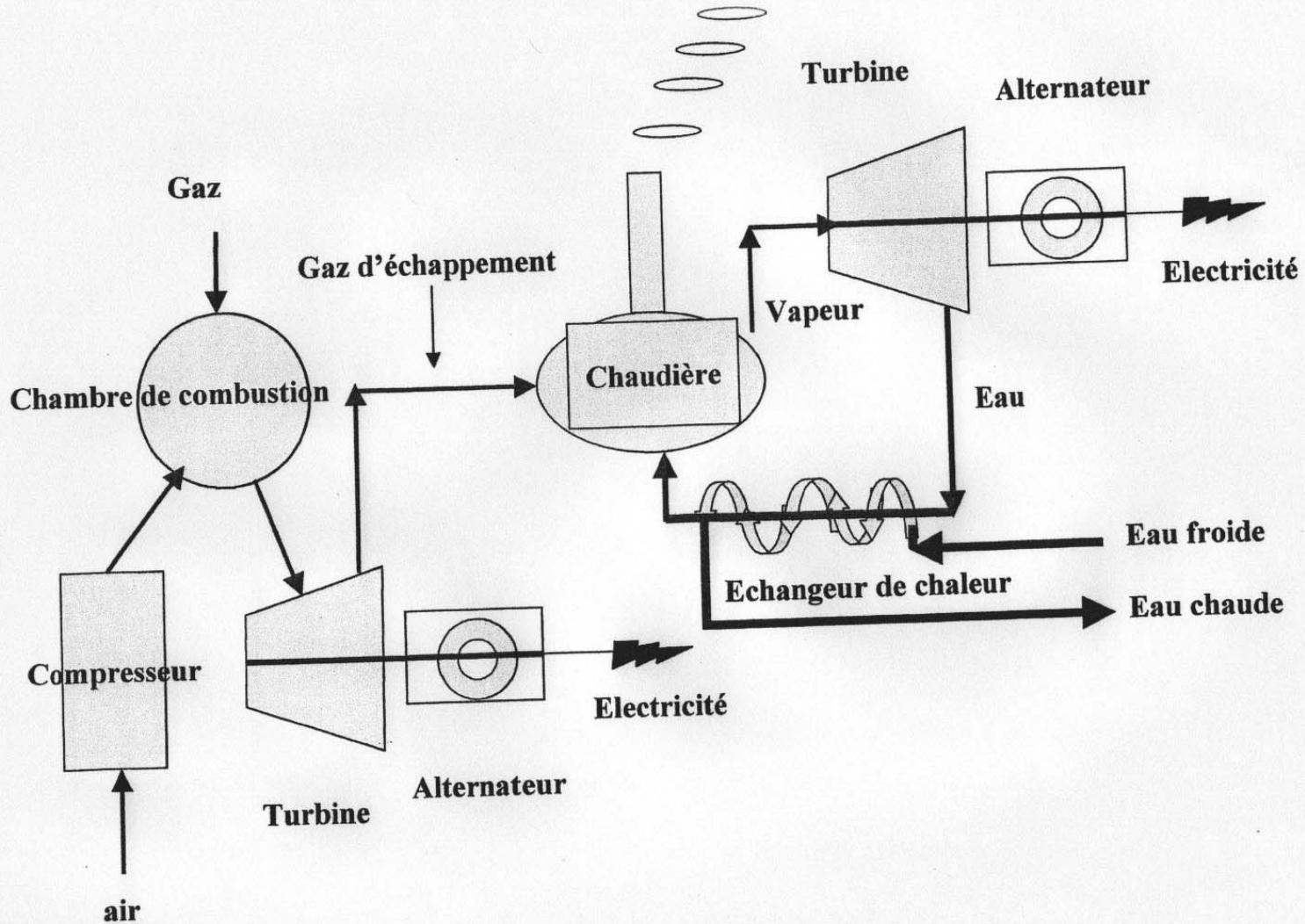
énergie par CO₂ = 6,21 eV

CO2 par combustibles fossiles

Emissions de CO2 pour la production d'énergie avec différents combustibles fossiles



Cycle Combiné à Gaz



Le Charbon

- Les avantages:

- Abondant

- Bien réparti

- Bon marché

- Les inconvénients

- Polluants atmosphériques (SO₂, poussières)

- Cendres radioactives

- Rejets de CO₂

Le charbon propre

SO₂:

- charbon à faible taux de S ou
- Réaction avec la chaux (production d'un sulfate)

NO_x:

- Températures de flamme < 1300 d° (Lit fluidisé)

Poussières:

- Filtres

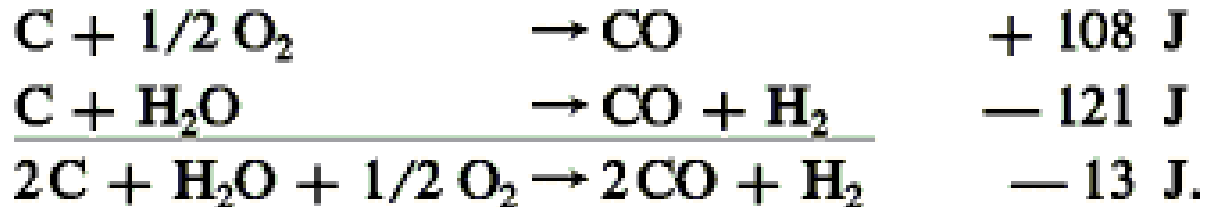
Procédés

- Injection de charbon pulvérisé (PCI) : flamme 1400 d°. Standard
- Lits fluidisés: flamme 900 d°. Propres
- Gazéification: réaction vers 1500 d° avec air (oxygène) et eau. Production d'un mélange H₂, CO, CO₂
- Liquéfaction. Production de combustibles liquides pour environ 25\$/baril. Par exemple Fisher-Tropsch

Procédés 2

Gaz de synthèse:

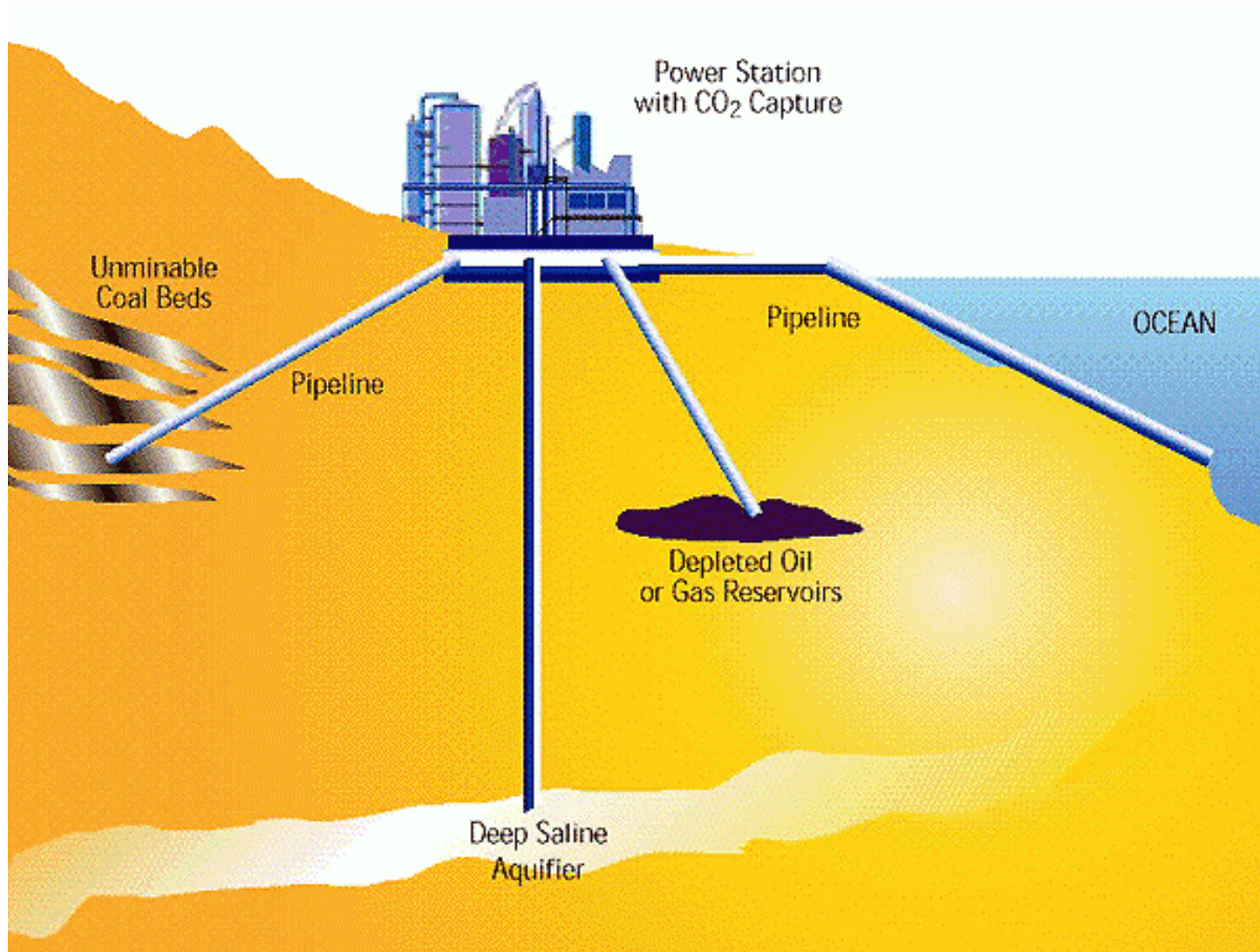
exemple (dépend du mélange O₂+H₂O)



Fischer-Tropsch: catalyseurs Fe ou Co



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?)

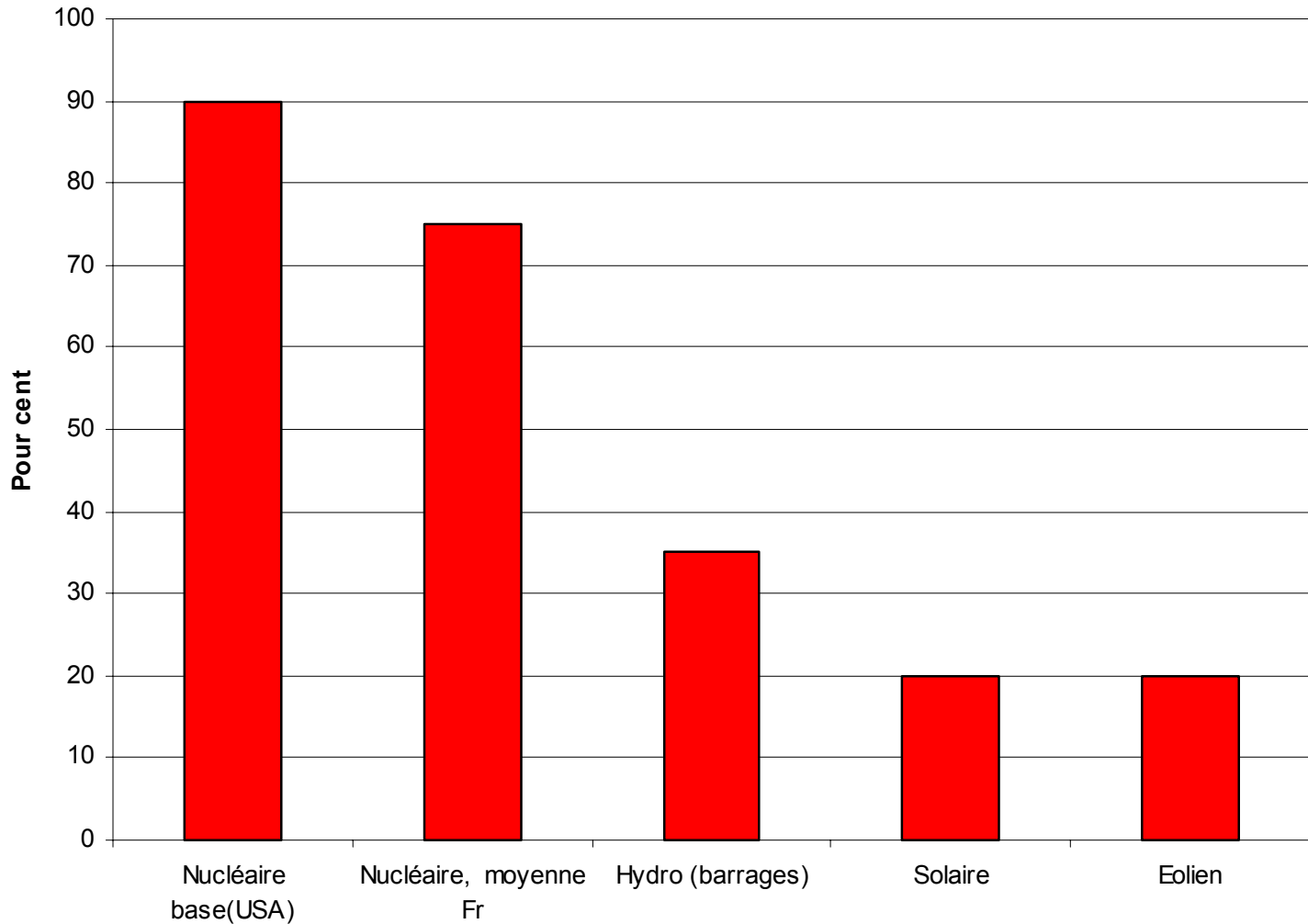
Fossiles sans CO2

- 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

Disponibilité de la ressource

Taux d'utilisation pour la production d'électricité



Energie solaire



Intégration dans l'habitat individuel



- 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

Maison individuelle (hors subventions)

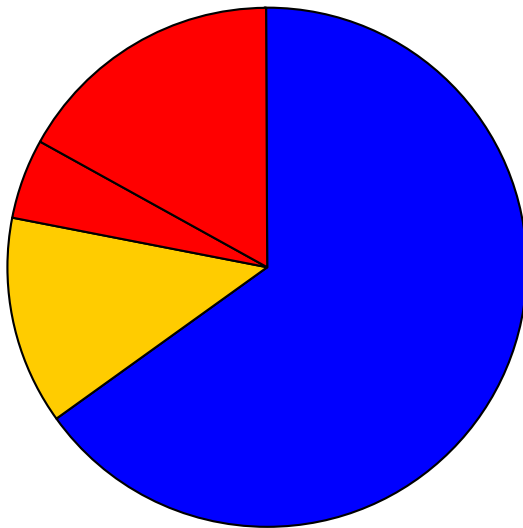
- 10000 kWh
- 40 m² de capteur
- Prix des capteurs: 25000 Euros
- Structure
- Intérêts
- **Energie intermittente**
- 0,3 Euro/kWh (sans stockage) (cf:0,06-0,1)
- 1,5 Euro/kWh (avec stockage)

Facteurs Technico- économiques

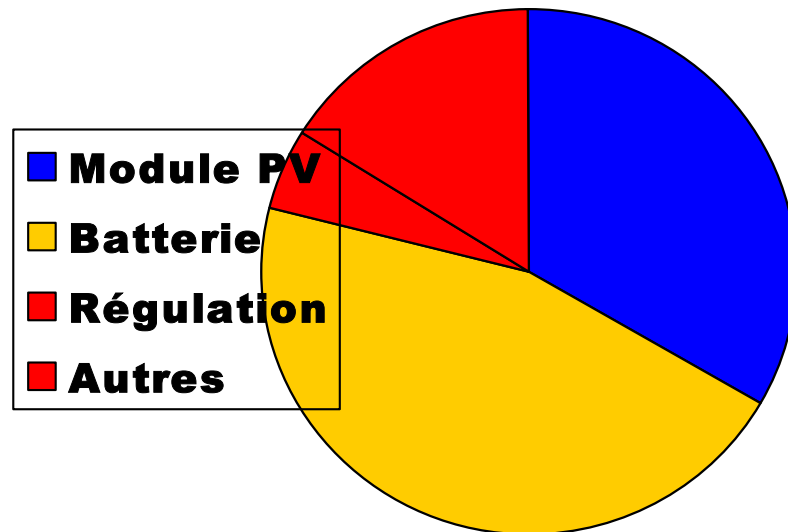
	Raccordé	Autonome
Eléments prix du kWh	Prix module Durée de vie Taux argent Substitution	Idem + Stockage
Substitution Taux :	Toît, façade 10 à 100%	Service, Réseau >100%
Prix mini kWh Problème n°1	0,3 Euros Module Intégration	1,5 Euros Stockage ρ utilisation

LES COÛTS DES SYSTEMES AUTONOMES

Répartition de l'investissement initial



Répartition des coûts sur le cycle de vie

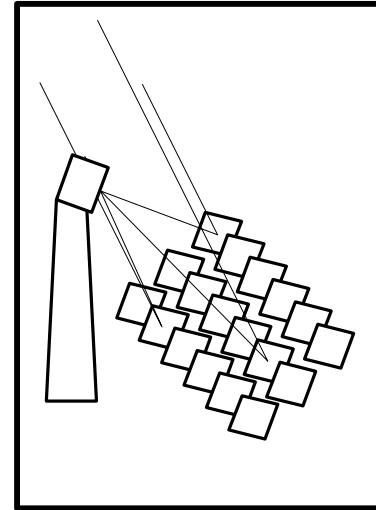


Les modules représentent :

2/3 de l'investissement initial,
1/3 des coûts complets

Centrales à tour

- Grandes installations
- Fluide de refroidissement
Sodium, Sels fondus, Air, vapeur
- Rendement des miroirs: 20%
- Stockage de chaleur possible
- Suivi du soleil
- Rendement thermodynamique: 40%



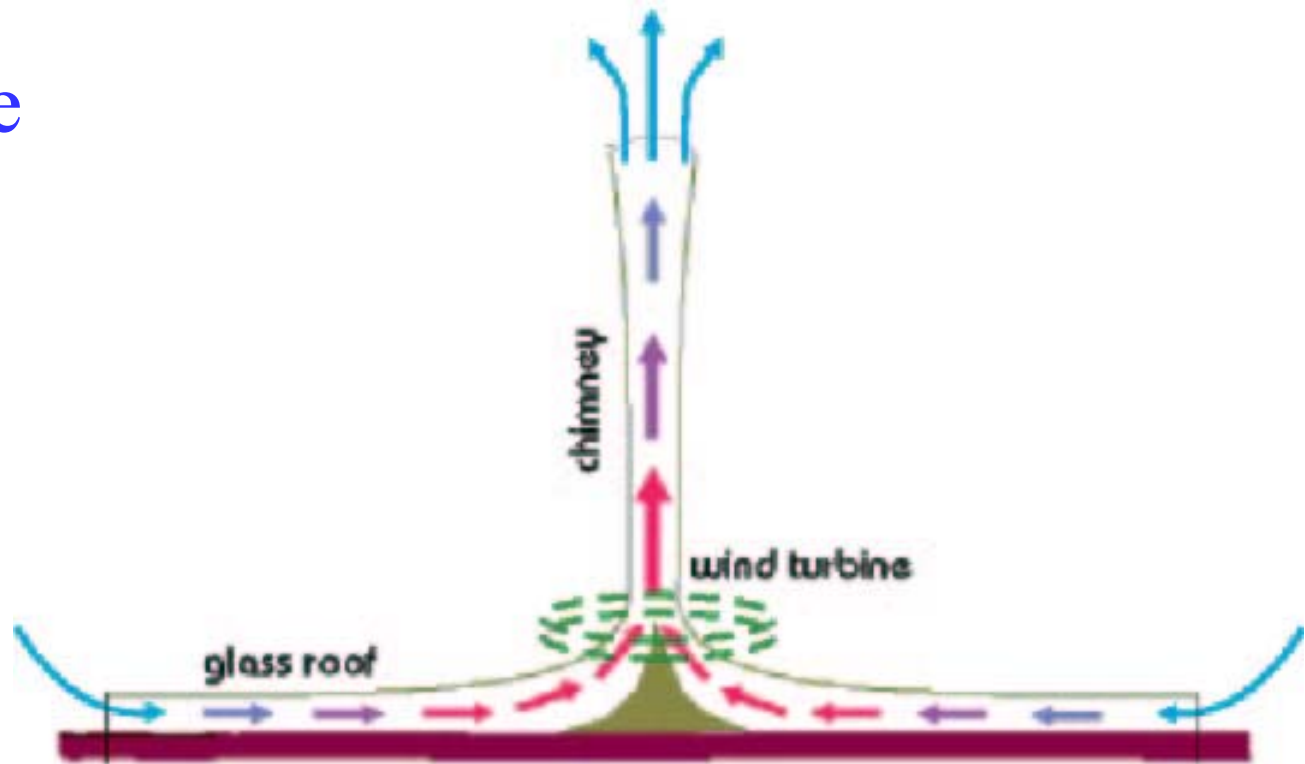
La tour cheminée

$H=1\text{km}$

$D=100\text{m}$

$S=10\text{km}^2$

$W=100\text{ MWe}$



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

EOLIEN2

Loi de Betz

Puissance du vent (et des courants marins)

$$P = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad V_1 \rightarrow V_2$$

$$P_{disp} = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{4} \rho S V_1^3 \left(1 + \frac{V_2}{V_1} \right) \left(1 - \frac{V_2^2}{V_1^2} \right)$$

Puissance maximum récupérable (Betz)

$$P_{\max} = \frac{16}{27} P$$

$$P_{\text{réel}} = 0,25 \times \frac{16}{27} P$$

Exemples

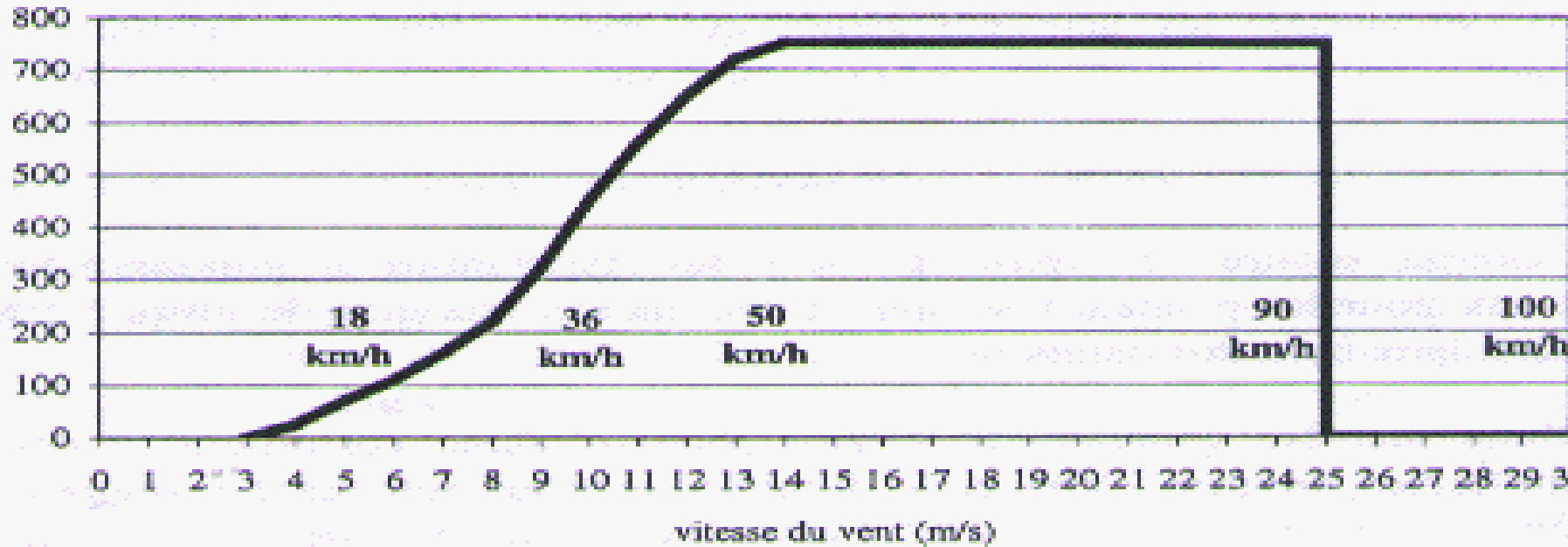
Eolienne $V=55$ km/h $R=50$ m $P=2,3$ MW

Hydrolienne $V=10$ km/h $R=50$ m $P=13$ MW

Caractéristiques types

D	Ω t/s	P_m kW
1	33,33	0,4
2	16,67	1,6
5	6,67	10,1
10	3,33	40,3
20	1,67	161,2
50	0,67	1007,2
100	0,33	4028,9

Rendement

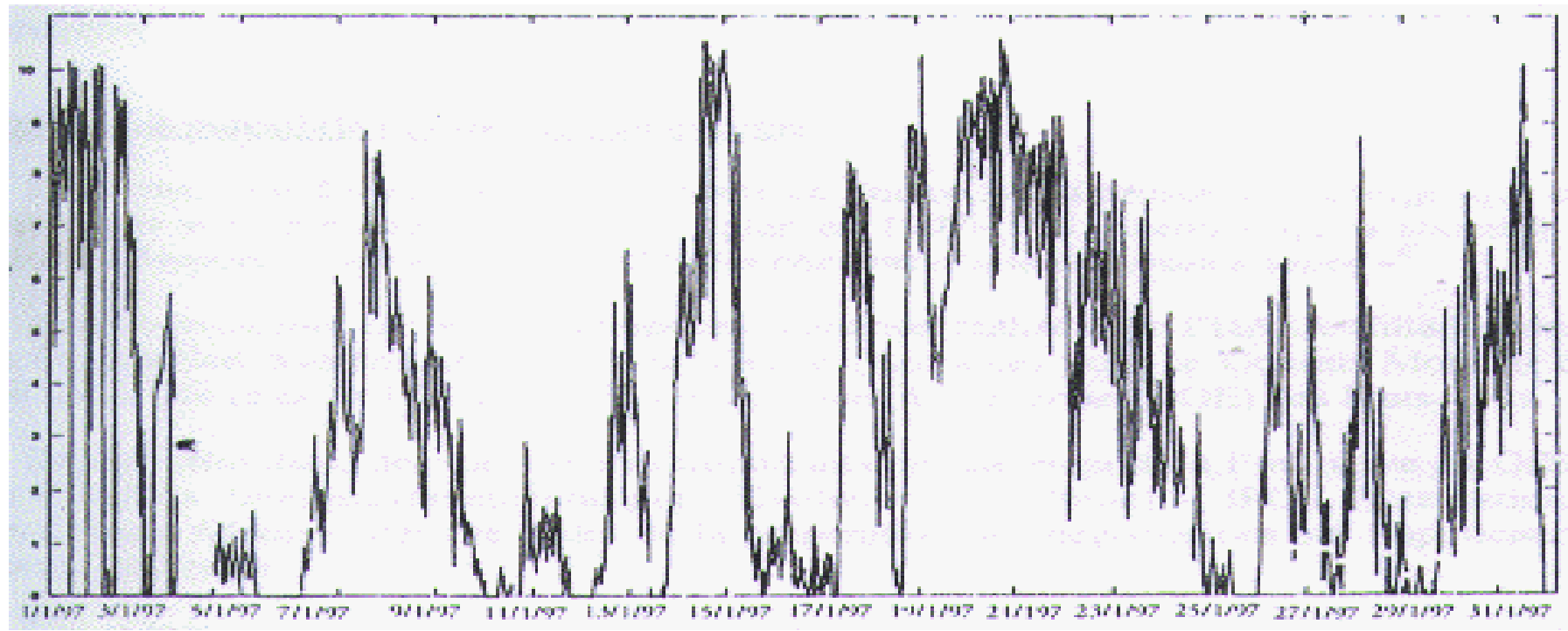


Parcs éoliens

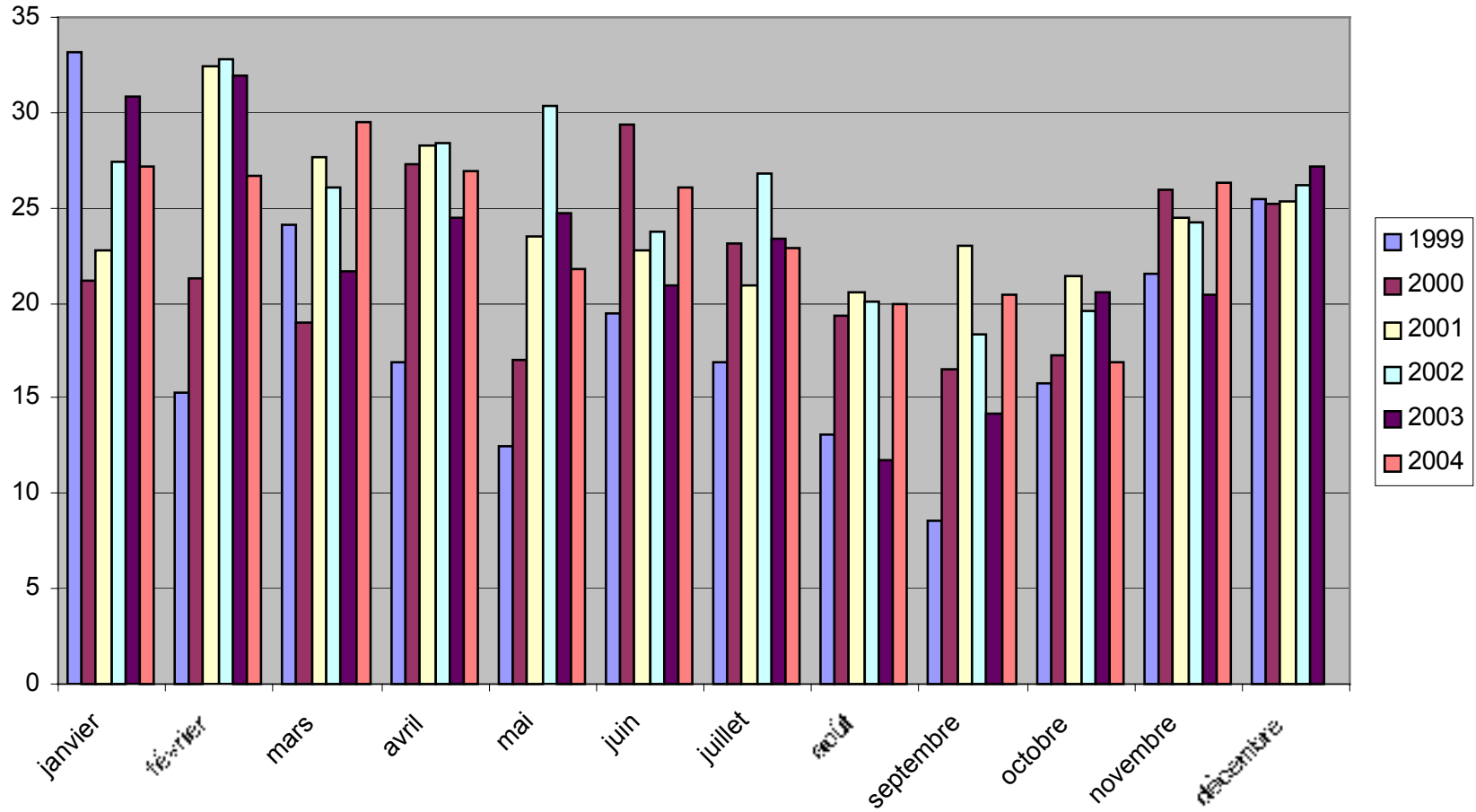
- Vitesse de sortie du vent sous le vent: $V/3$
- Distance entre éoliennes: environ 5 diamètres des pales
- Distance entre rangées: 3 à 9 D
- Exemple: Eoliennes de 1 MW espacées de 250 m, et en rangées espacées de 250 m soit 0,016 kW/m² (10 fois moins que PV)

- Potentiel de production France :
 - 66 TWh/an à terre
 - 97 TWh/an offshore peu profond
- 20 réacteurs nucléaires
 - 100000 éoliennes de 1 MWe
 - 5000 kms de côtes
 - densité: 20 éoliennes par km
- Coûts si reliée au réseau:
 - 0,05 Euros/kwh sur un bon site (cf. 0,03)
- Energie intermittente

Variation des vitesses du vent pendant le mois Janvier 1997



Rendement mensuel des éoliennes



Thermique évité

$$W_{eole} \frac{W_{thermique}}{W_{nucleaire} + W_{thermique} + W_{Hydro}}$$

$$0,1 W_{eole}$$

Le cas Danois

- 2000 MW éolien = Puissance de 2 réacteurs 1 GWe
Mais 3,7 TWh = production de 0.5 réacteur
- 8% de l'électricité danoise
- 4% Biomasse
- Economies (Electricité deux fois plus chère)
- Co-génération
- Coût annuel du programme danois: 1,4 Geuros
- Consommation énergétique/tête :
17% de moins que la France
- CO₂/tête: 50% de plus que la France

Coûts Bénéfices en France

- Limite puissance totale: 30% de la puissance réseau
Soit 25 GWe (PPI 17GWe)
- Rendement maxi: 30%
- Energie Max délivrée: 10% soit 50 TWh (5 EPR)
- Thermique évité: 5TWh (soit 0.5 EPR)
- Coût 25 Geuros, soit entre 8 et 9 EPR
- Surcoût de l'électricité produite: 3 G€/an
- Production nucléaire: 13 G€/an

Puissances installées

	Puissance (MW)	Energie (TWh)	Heures équivalentes pleine puissance
	(1999)		
Allemagne	4445	6,60	1480
Danemark	1742	3,35	1900
Espagne	1530	2,51	1640
Etats Unis	2492	4,41	1770

Hydroliennes

- Choix de sites à fort courants: ex.:La Hague
 - Courant de marée 15 km/h max.
 - $R=20\text{m}$
 - $P_{\text{max}}=6,5 \text{ MWe}$
 - $P_{\text{moyen}}= 1,6 \text{ MWe}$
- Potentiel français: 3 GWe
- Gulf Stream: 8 km/h 100km*20km
 - Projet 1500 MW 600 M€
 - Courant continu

Biomasse

Taille

rendement annuel :

3,6 à 7,2 tep/ha ,

rendement électrique maximum : 0.2 %.

7 Twh::2500 km².

Surface emblavée en France :

45000 km²= 20 centrales

Ressources mondiales

- Production mondiale: 71 Gtep/an
- Prélèvements
 - ❖ Alimentation: 2,1 Gtep
 - ❖ Matériaux: 0,4 Gtep
 - ❖ Energie: 1,3 Gtep

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)

LA BIOMASSE

Inventaire du potentiel national

- Selon :
- * (1) X. DEGLISE, J. LEDE, *Entropie* n° 9-4 (1980)
 - * (2) R. DUMON
 - * (3) *Débat énergie et environnement* SOUVIRON (1994)
 - * (4) *Rapport CEE* (octobre 1998)
 - * (5) *Biomasse Normandie* (1994), d'après ministère de l'agriculture, ADEME, AFOCE.

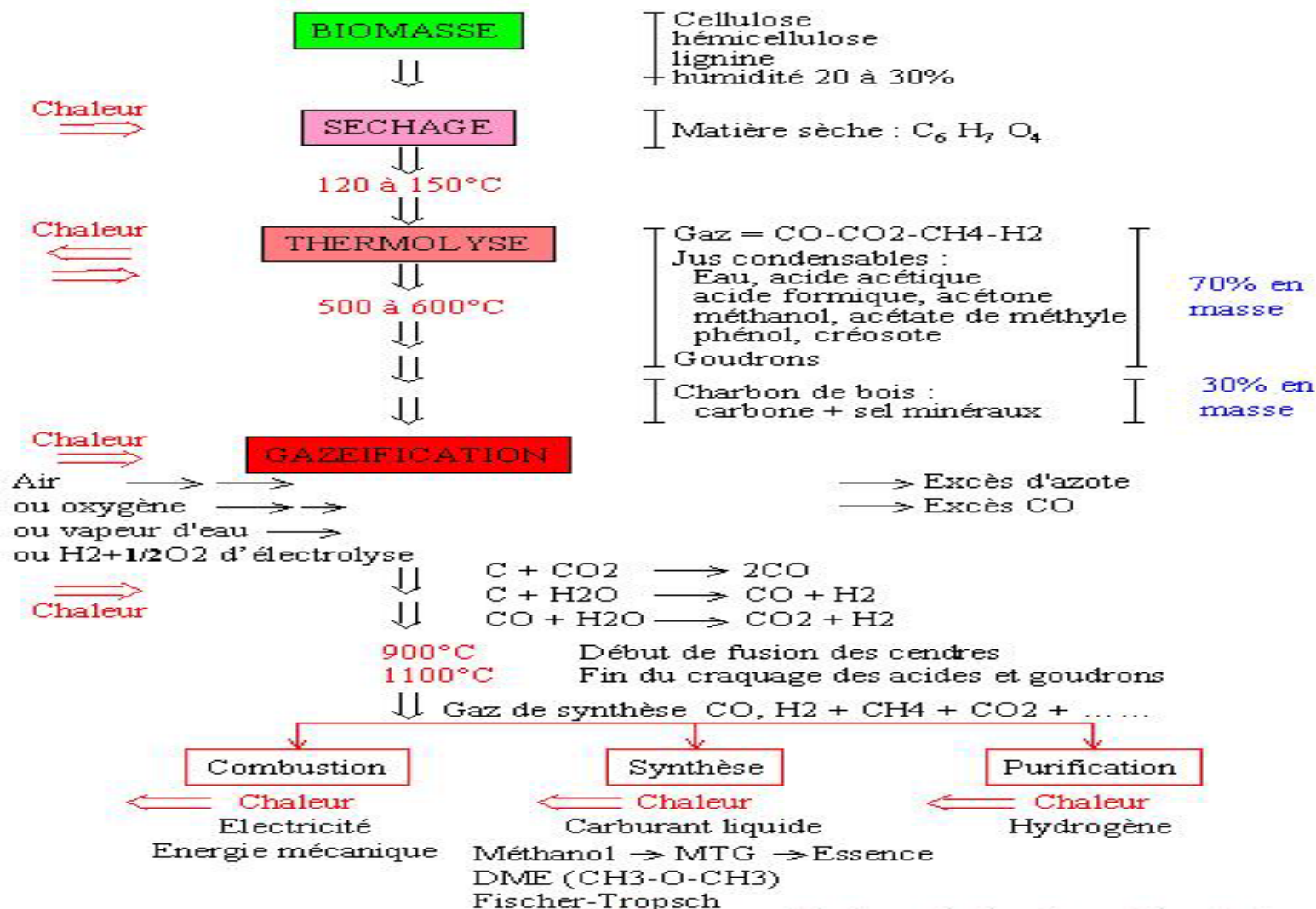
	Mm ³	Mtonnes
♦ PLAQUETTES FORESTIERES		
-Rémanents (2)	4	
-Eclaircies de plantation (2)	2	
-Taillis (potentiel 50 Mm ³) (1)	10	
	16	8
♦ DECHETS DE 1ère et 2ème TRANSFORMATION (1)		
-Ecorces, délignures, sciures	Non utilisés	7
-Copeaux, chutes, rebuts	Mal utilisés	5
	12	6
♦ DECHETS INDUSTRIELS BANALS (3)		
-40 Mt dont 25% disponibles (bois en fin de cycle)		10
♦ DECHETS MENAGERS (3)		
-20 Mt dont 60% disponibles		12
♦ RESIDUS AGRICOLES (2), (4)		
-Paille et tiges de céréales, maïs et oléagineux		
-Taille, noyaux, coquilles,...	43 Mt dont utilisables	19
♦ CULTURES ENERGETIQUES (2), (4)		
-Taillis à courte révolution (peupliers, eucalyptus, saules)		
-Plantes herbacées (canne de Provence, céréales)		36
		91

✚ Soit équivalent à 40 Mtep en énergie primaire
ou 20 Mtep en énergie finale

Bio-carburants

- Bio-gaz: 0,05 E/kWh sur place, bois gratuit
- Bio-carburants: 0,5E/litre
 - Rendements énergétiques:
 - Bio-éthanol: 1,2 à 1,5
 - Ester de Colza: 2
- Programme OPECST:
 - 40000 km²=10 Mtep
 - Mais rejets GES? (prairies, engrais....)

FILIERE THERMOCHIMIQUE de THERMOLYSE et GAZEIFICATION



Géothermie

La ressource

- Gradient de température moyen: $3\text{d}^\circ/100\text{m}$
- Points chauds(zones volcaniques, panaches)
 - Pouvant atteindre 10 et même $100\text{d}^\circ/100\text{m}$
- Flux moyen d'énergie géothermique: $0,05\text{W}/\text{m}^2$
- Durée de vie des sites: quelques dizaines d'années

Les types de gisements

- Basse enthalpie: 80 d° à 2500m.
 - Chauffage
 - Nombreux sites possibles
- Haute enthalpie: 300d° à 1000m.
 - Electricité
 - Sites rares (Islande, Lardarello, Bouillante))
 - Points chauds: Soultz la Forêt

Techniques

- Production de vapeur sèche (Lardarello)
- Eau Chaude (vaporisation partielle)
- Roches chaudes sèches
- Nécessité de fissurer la roche
 - Envoi d'eau ou de vapeur sous pression
 - Cycle fermé avec échangeur
 - Soultz la Forêt: 3500m., 200 d°C, 50MWth, 10MWe

Production (2002)

	Amérique du Nord	Amérique du Sud	Asie	Europe
Production TWh	21,1	1	12,5	5

Le Nucléaire



Nucléaire et Gaz

- Centrale nucléaire ou fossile:
1000 Mwe puissance électrique
3000 Mwth consommation d'énergie primaire
- Energie électrique : 7 milliards de kwh
- fission de : 1 tonne d'U
équivalent: 2 millions de tep
- Prix centrale nucléaire: 2 Geuros
Prix centrale à gaz : 0.5 Geuros

Le Nucléaire

- 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?

- Que faire des déchets?

- Stockage profond

- Stockage en surface ou subsurface

- Transmutation

- Les accidents

- Tchernobyl

- Effets des faibles doses

Combustibles irradiés

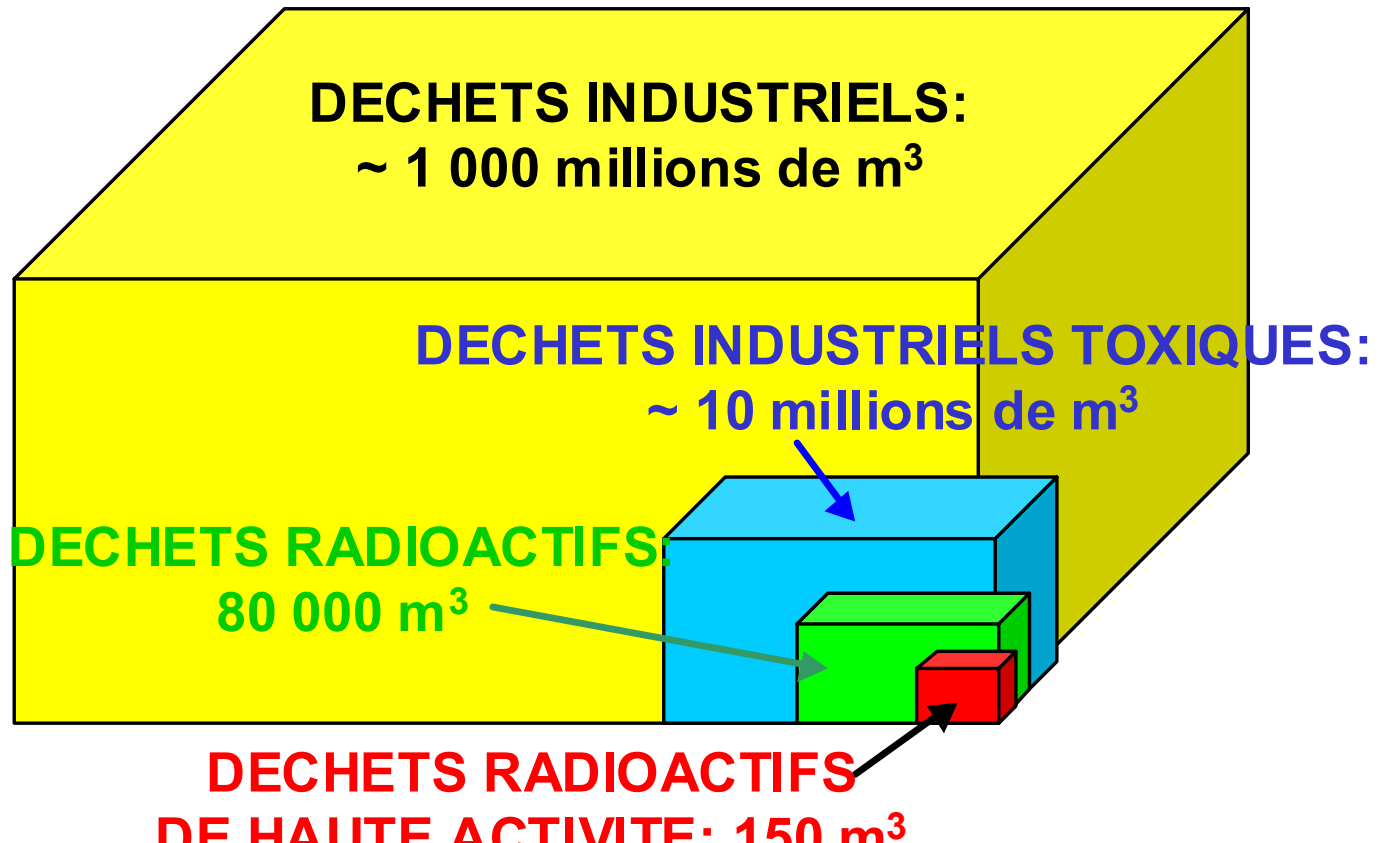
Production annuelle d'un réacteur de 1 REP 1Gwe

- 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

EST DE LA FRANCE : REPRESENTATION DU SITE ET DES OUVRAGES EN FONCTION DES CONNAISSANCES ACTUELLES

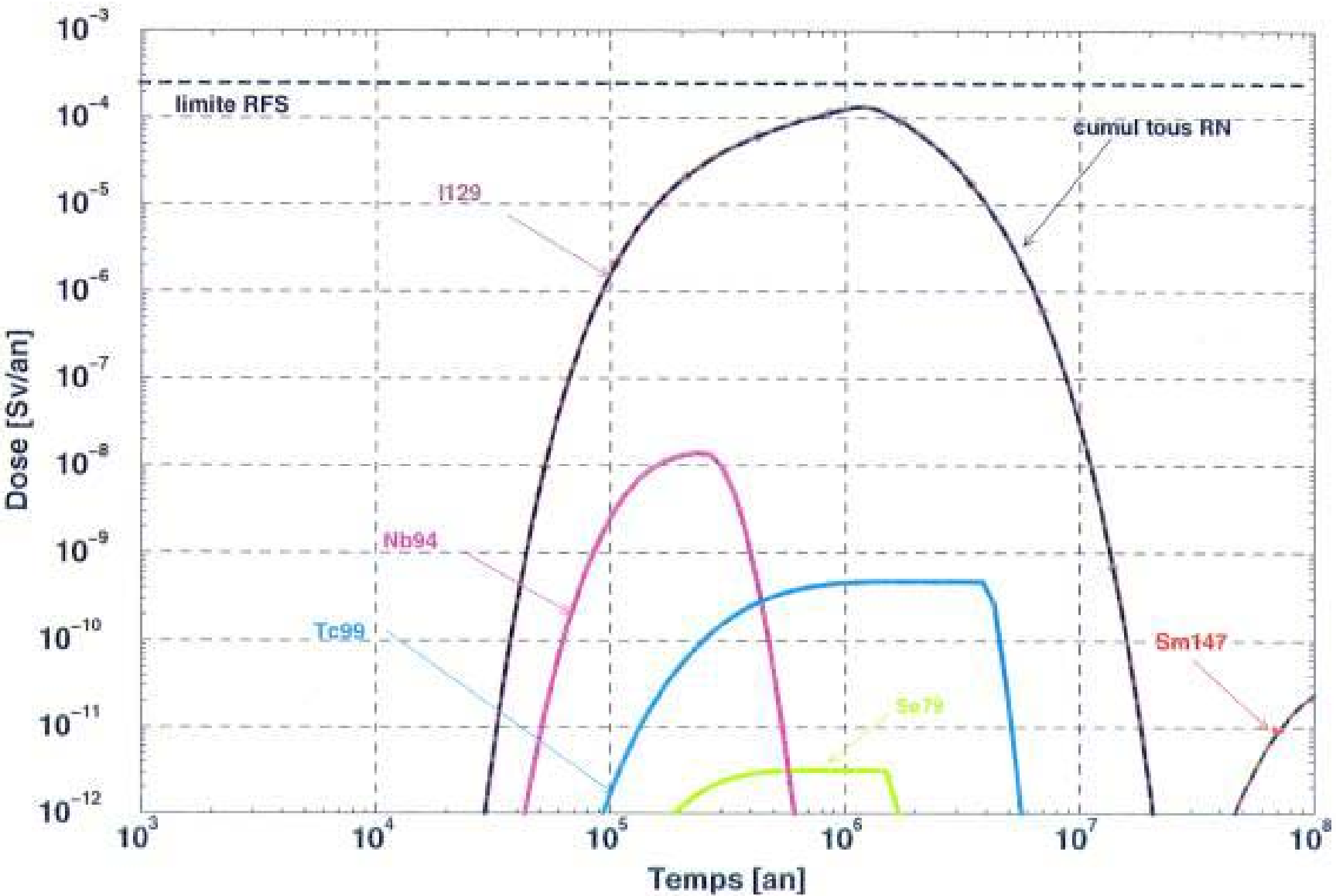


-1000

COLIS
BARRIERE OUVRAGEE



Rejets calculés



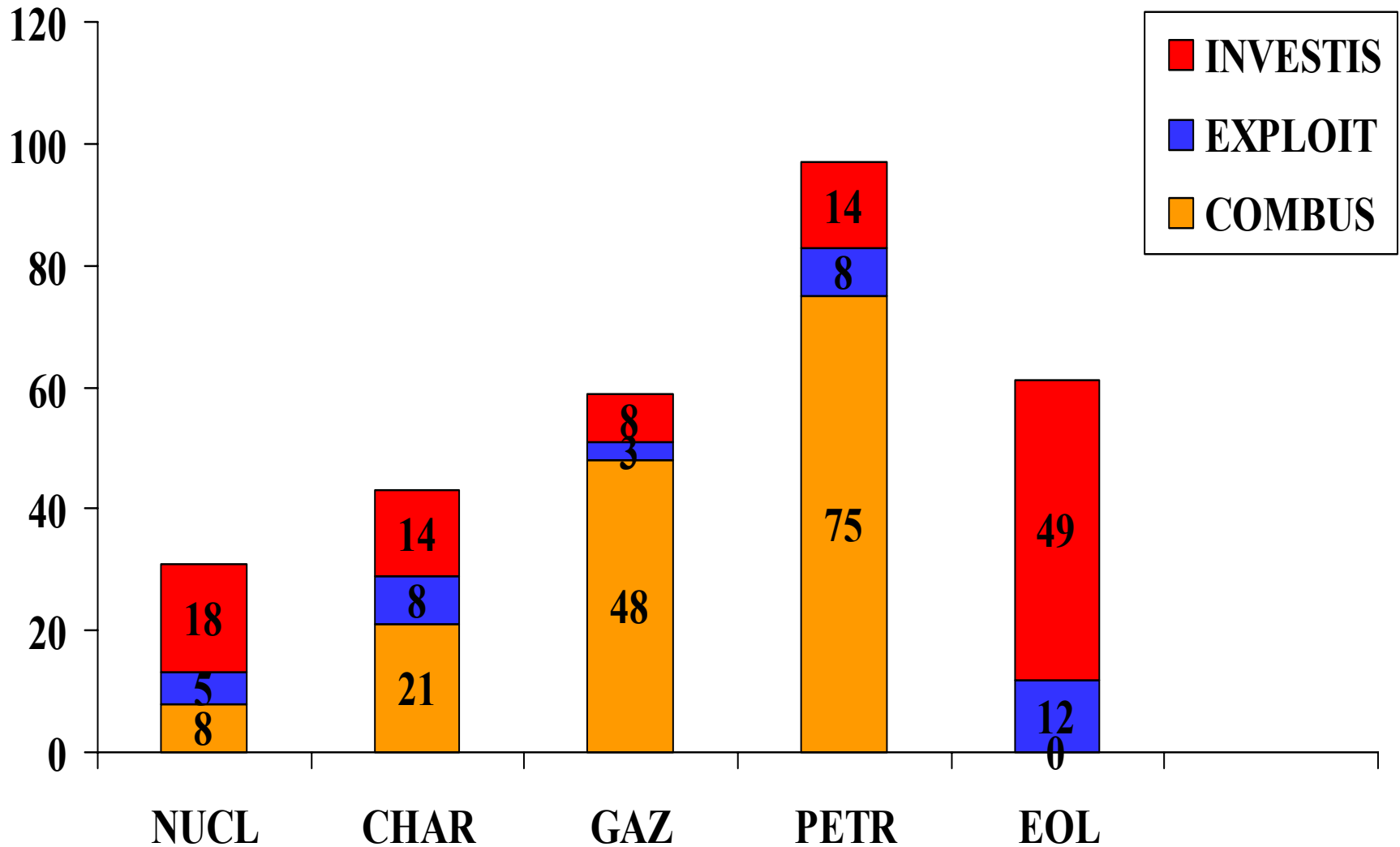
Coûts

Investissements

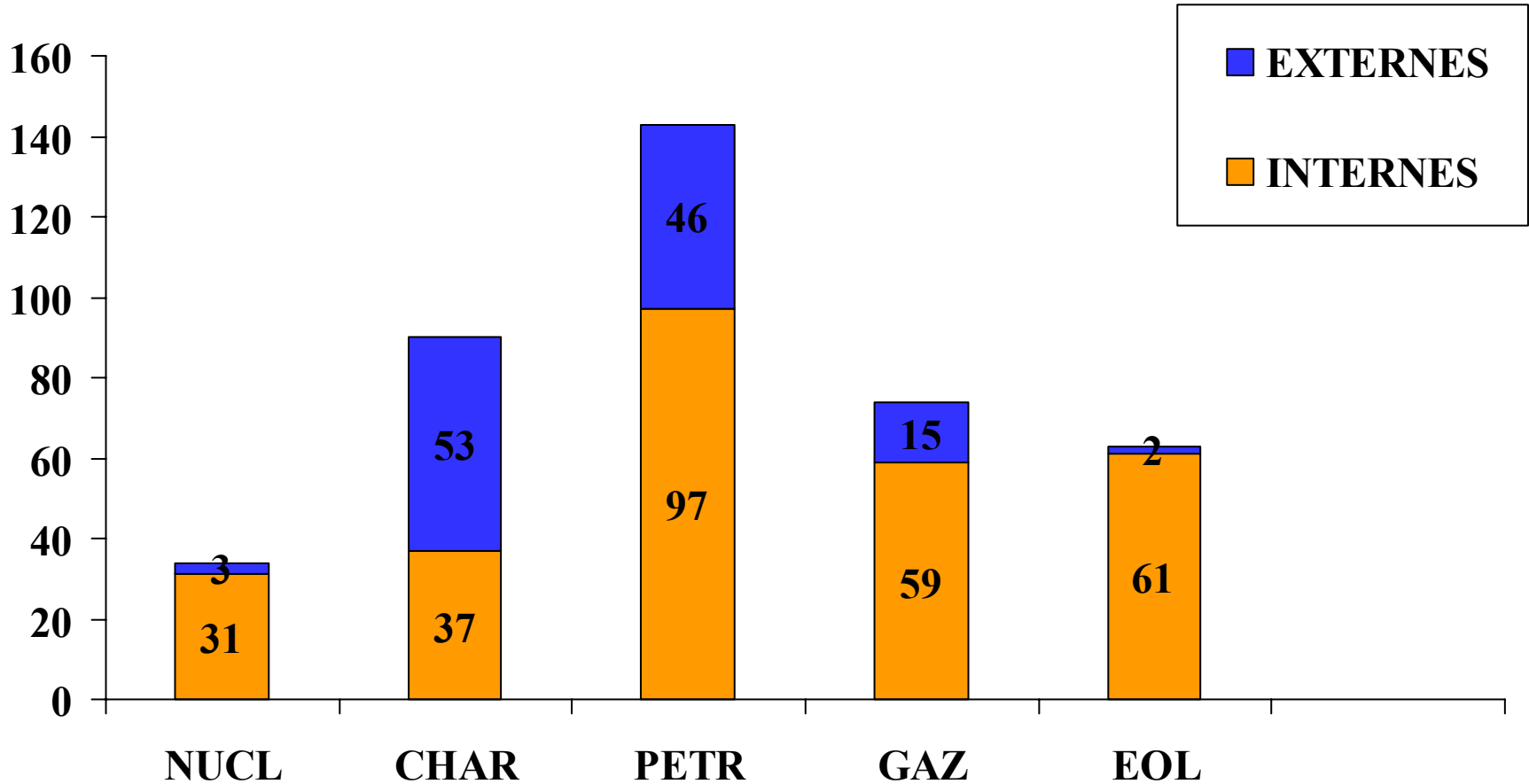
Production de 7 Twh/an (un réacteur de 1 Gwe

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

Coûts totaux internes



Coûts totaux (externes+internes)



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%

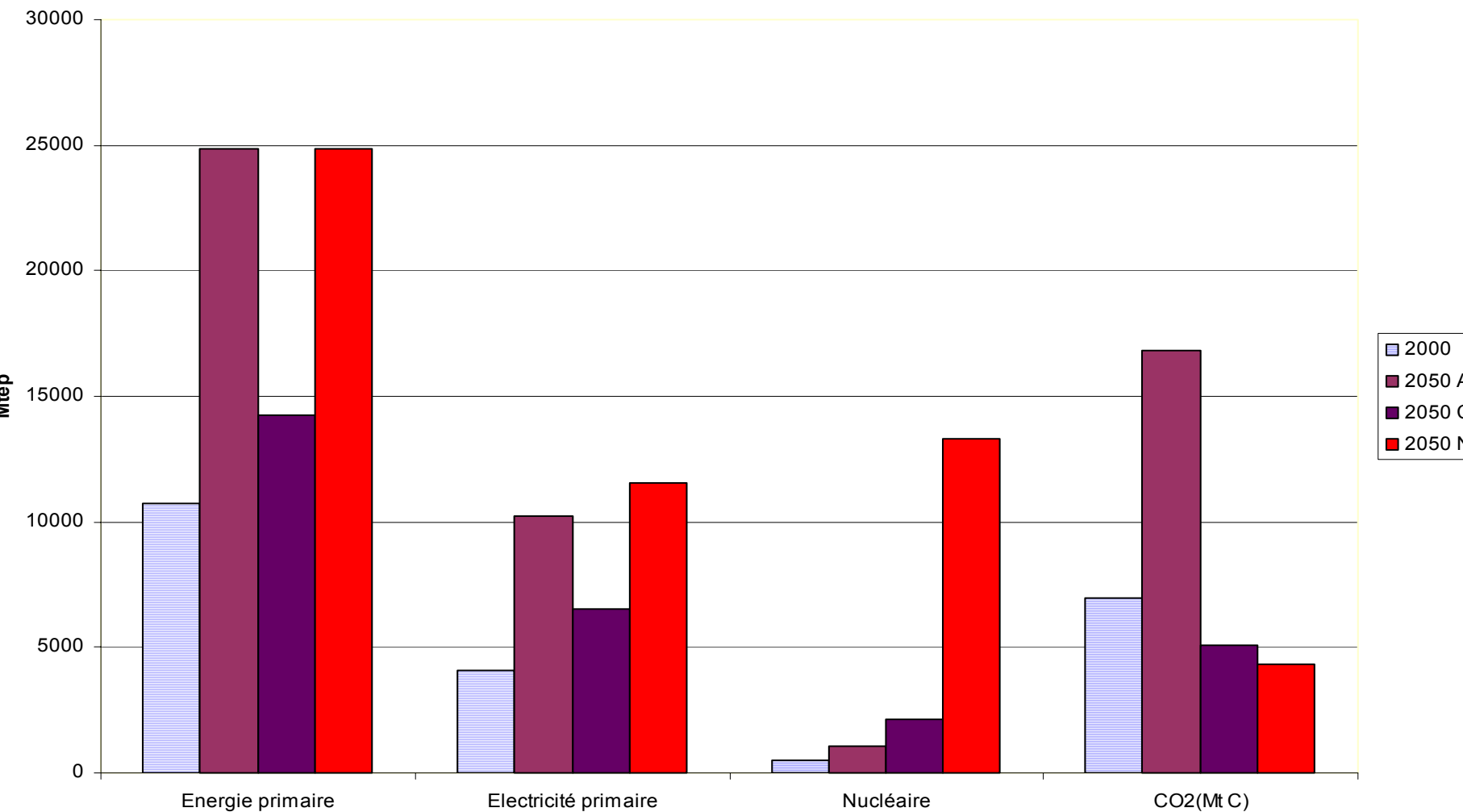
3000 GWe Nucléaire

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



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

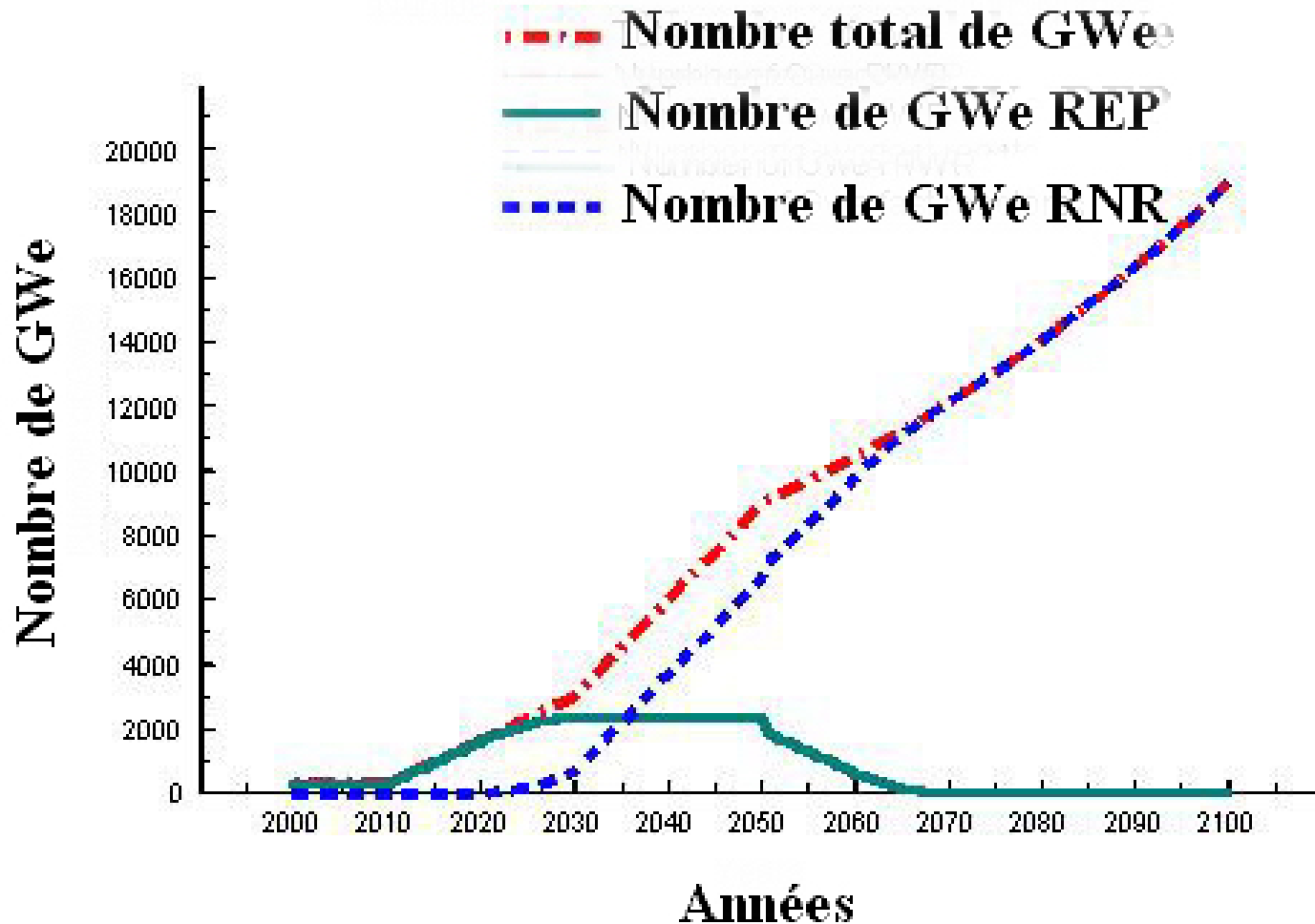
Gestion des Réserves d'Uranium

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



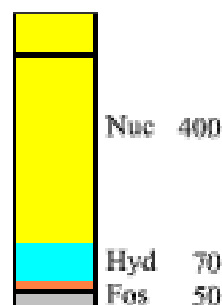
Objectif Kyoto France

- Europe réduction: 8% 2010/1990
- Pénalités pays UE: 40 Euros/tCO₂
- France réduction 0%
- Tendence 2002: +10%
- Mesures:
 - Plan Climat,
 - Permis d'émission
 - On devrait respecter Kyoto

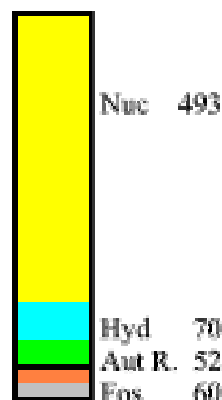
Scénarios France 2050

ÉLECTRICITÉ TWh

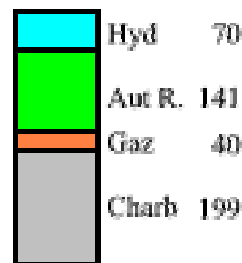
Anj. 525 TWh
dont export 75



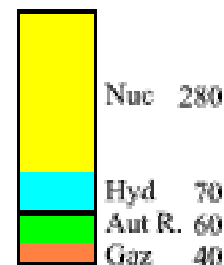
B: 675 TWh



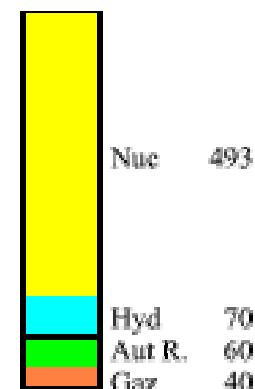
Cs: 450 TWh



Cn: 450 TWh

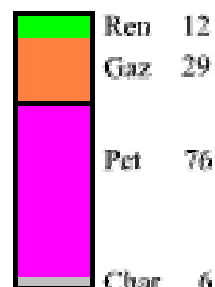


V 1/4: 663 TWh

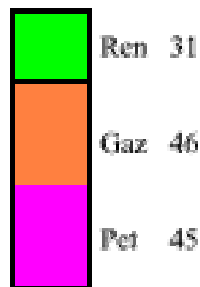


CHALEUR et MOBILITÉ Mtep (hors électricité)

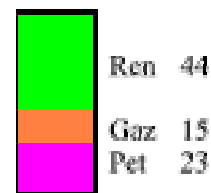
123 Mtep



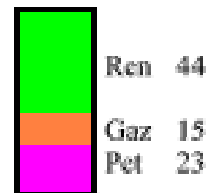
123 Mtep



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

Conclusions d'ensemble

- 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
- 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!
- La généralisation de la capture-stockage du CO2 est cruciale
- 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.

Coup de sang

- A quoi servent l'éolien, le PV, le bio-éthanol?
 - Au mieux, très faible impact sur les émissions de CO₂
 - Légère réduction (maxi.10%) de la production de déchets nucléaires
- Combien coûtent-ils? Qui paie?
 - Détournement d'investissements utiles
- Combien rapportent-ils? A qui?
 - Les vrais lobbys

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.L.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°31 , 2003

« Que doit-on craindre d'un accident nucléaire? »

R.Masse, Les Petites Pommes du savoir n°43 , 2003

« L'énergie de demain »

J.L. Bobin, E. Huffer, H. Nifenecker, EDP/Grenoble Sciences 2005

Sites

- <http://www.sauvonsleclimat.org>
- http://sfp.in2p3.fr/Debat/debat_energie/index.html
- <http://www.manicore.com/documentation/serre/index.html>
- <http://lpsc.in2p3.fr/gpr/french/gpr.html>

FIN

Autres ER

- Géothermie
- Energie des vagues
- Energie des courants