

Le choix énergétique en France

Hervé Nifenecker

SLC

LOI PROGRAMME ENERGIE 2005

■ LES FAITS :

- Pénuries pétrole, gaz ?
- Accroissement de l'effet de serre associé aux rejets de CO²

■ LES OBJECTIFS :

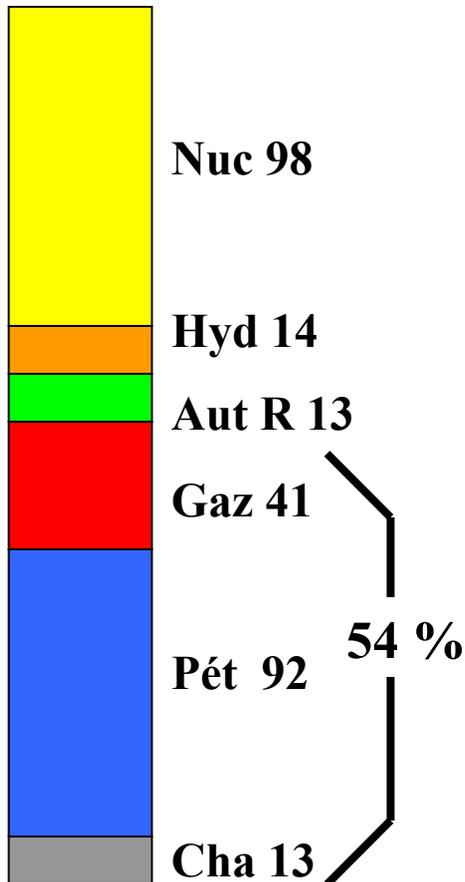
- Diviser par 4 nos rejets de CO² d'ici 2050 « Décarbonner »
- Limiter les combustibles fossiles « Sortir des fossiles »

■ LES 3 AXES D' ACTIONS :

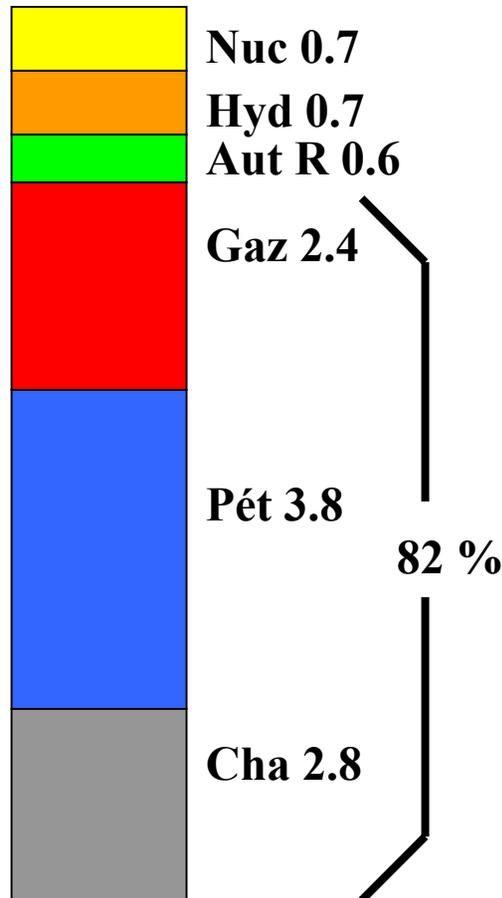
- Économies d'énergie
- Développement des Renouvelables:
(thermique bois, thermique Solaire, biocarburants, éolien)
- Poursuite du Nucléaire (décision tête de série EPR)

SITUATION ENERGETIQUE 2005

FRANCE 2005
271 Mtep



MONDE 2004
11.6 Gtep



Fossiles
Pénurie ? Quand ?

	R/P act.	R/P ten
Gaz	67	d60
Pétrole	45	60
Charbo	250	150

n

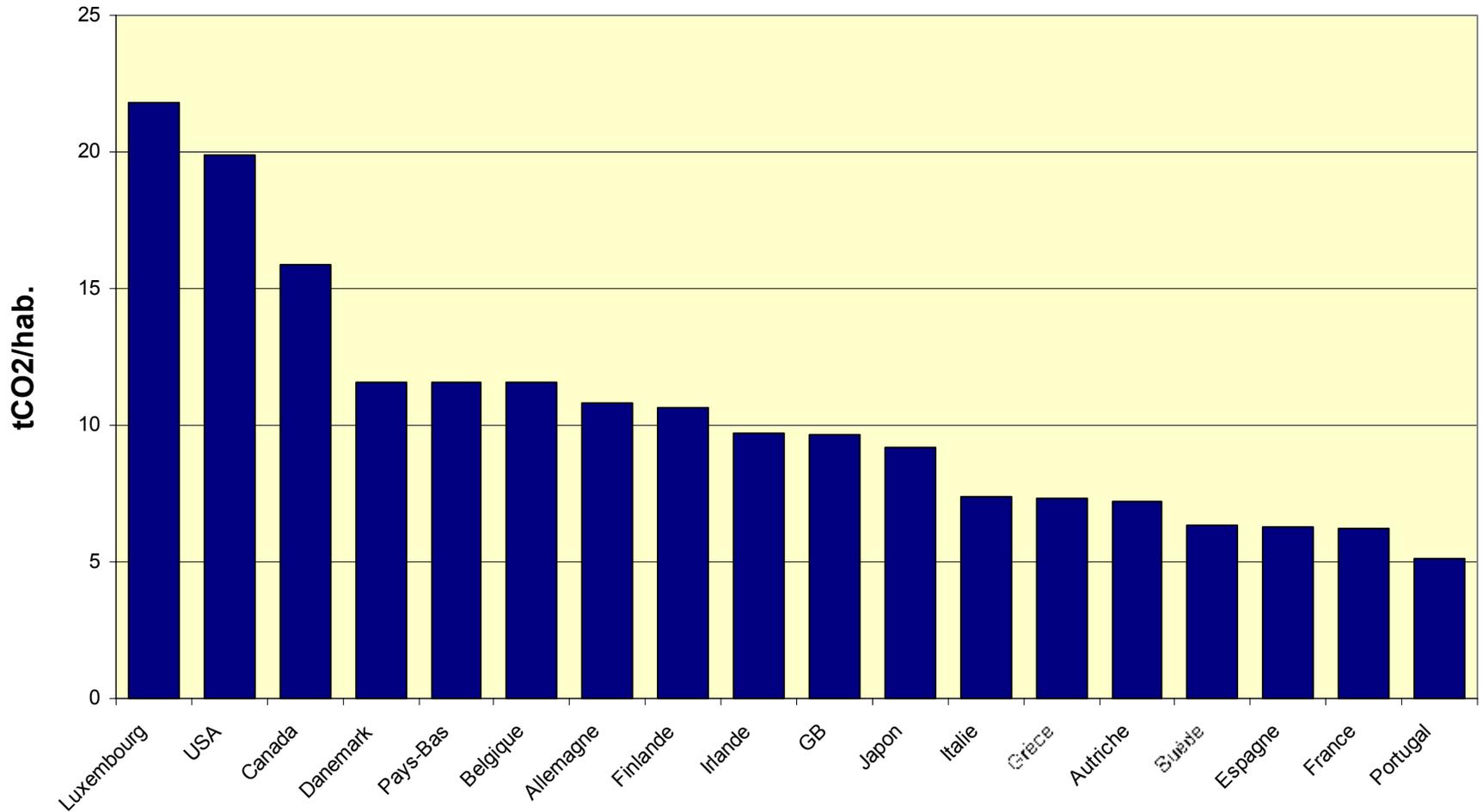
Unités de mesure

- Giga=Milliard
 - Tera=Millier de Milliards
- **Energie**
 - Gtep=Milliards de Tonnes Equivalent Pétrole
 - Twh=Millier de GWh =Milliards de kWh
- **Concentrations**
 - Ppm=parties par million
 - Ppb= parties par milliard
- **Equivalence**
 - 1 MWh=0,086 tep (énergie finale)
 - 1MWh=0,261 tep (énergie primaire nucléaire)
 - 1MWh=0,860tep (énergie primaire géothermique)
 - 1MWh=0,086tep (énergie primaire le reste)

Rôle crucial de l'électricité

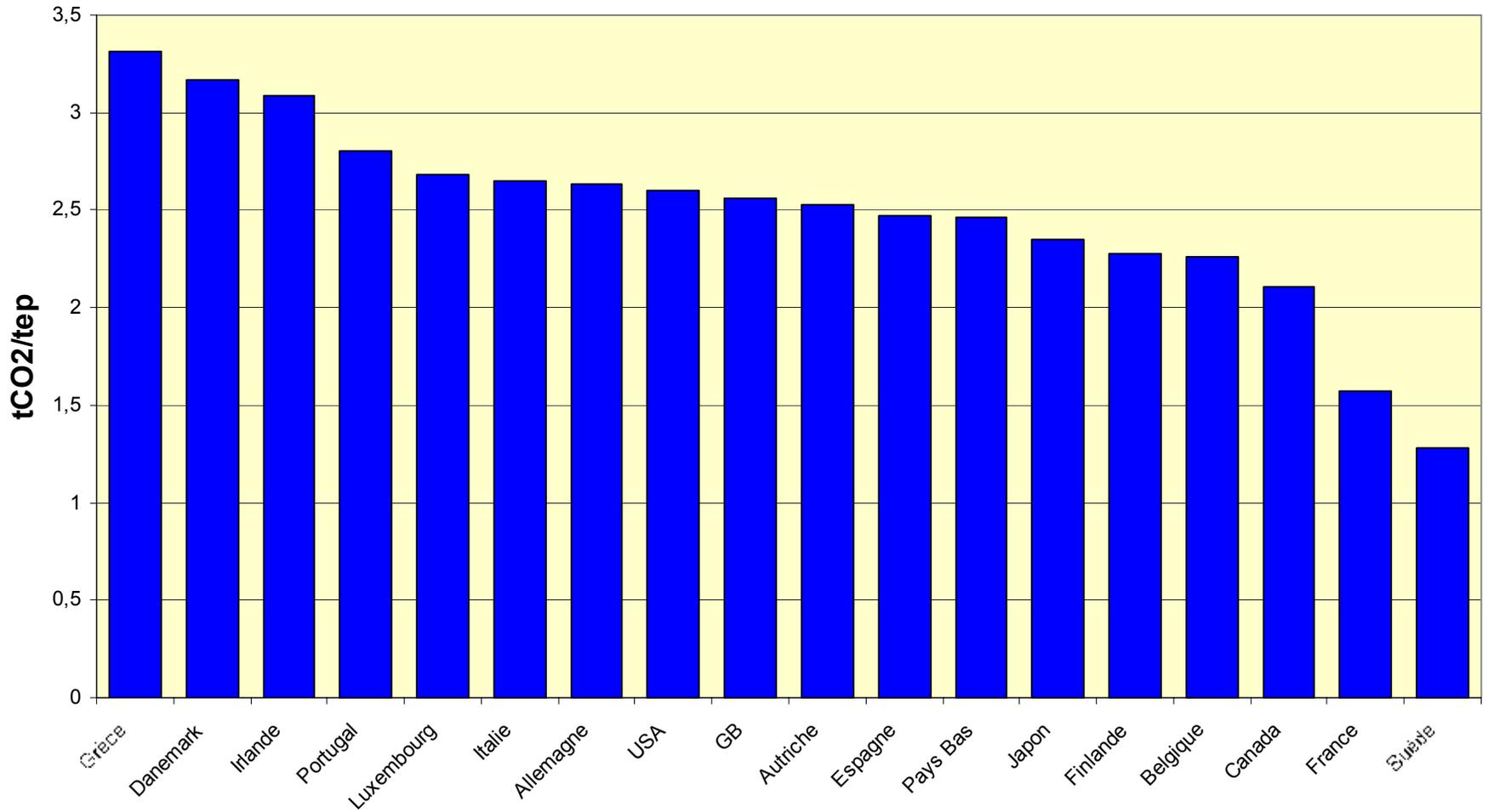
tCO₂/ha

Emission de CO₂ par habitant

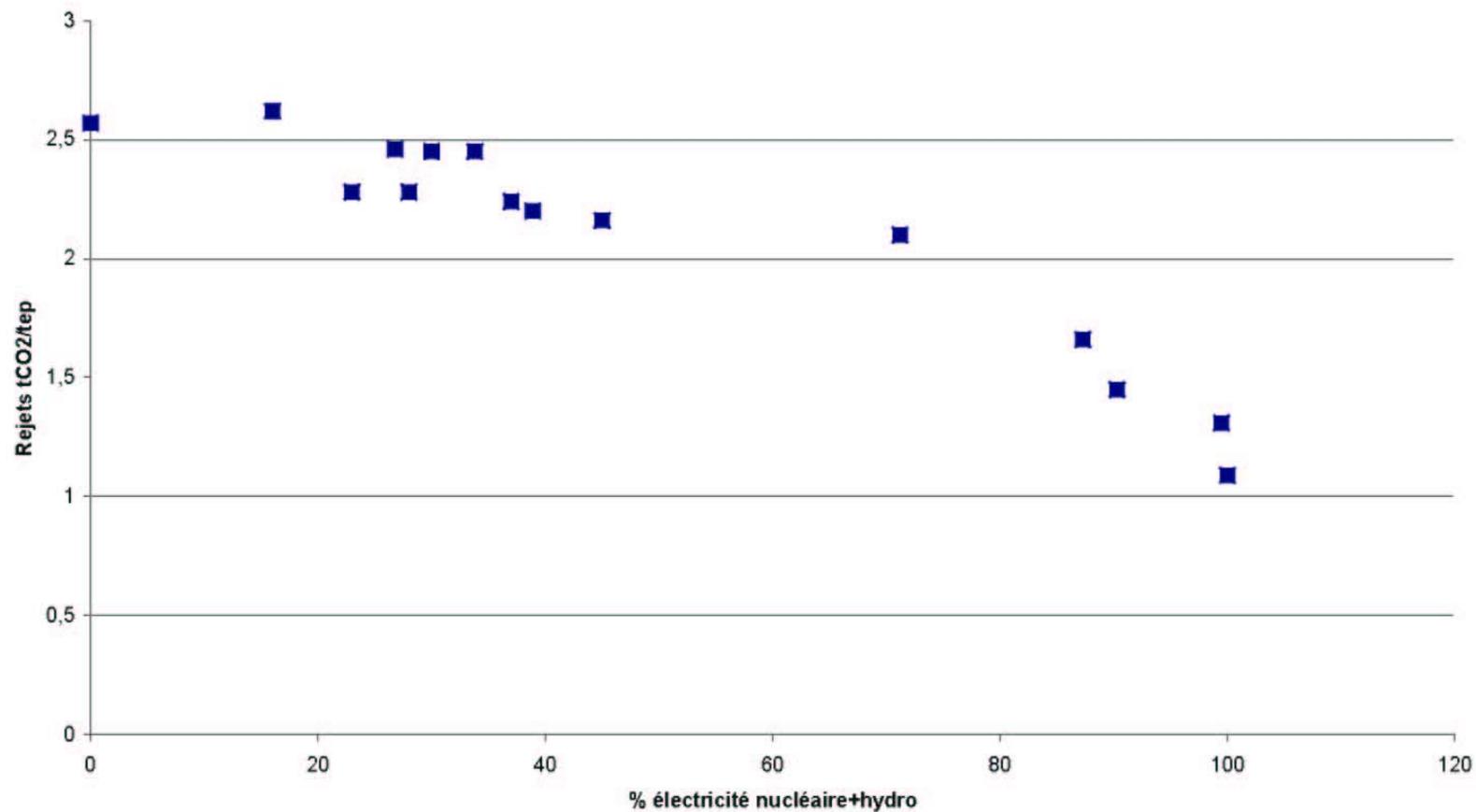


tCO₂/tep

tCO₂/tep (1995)

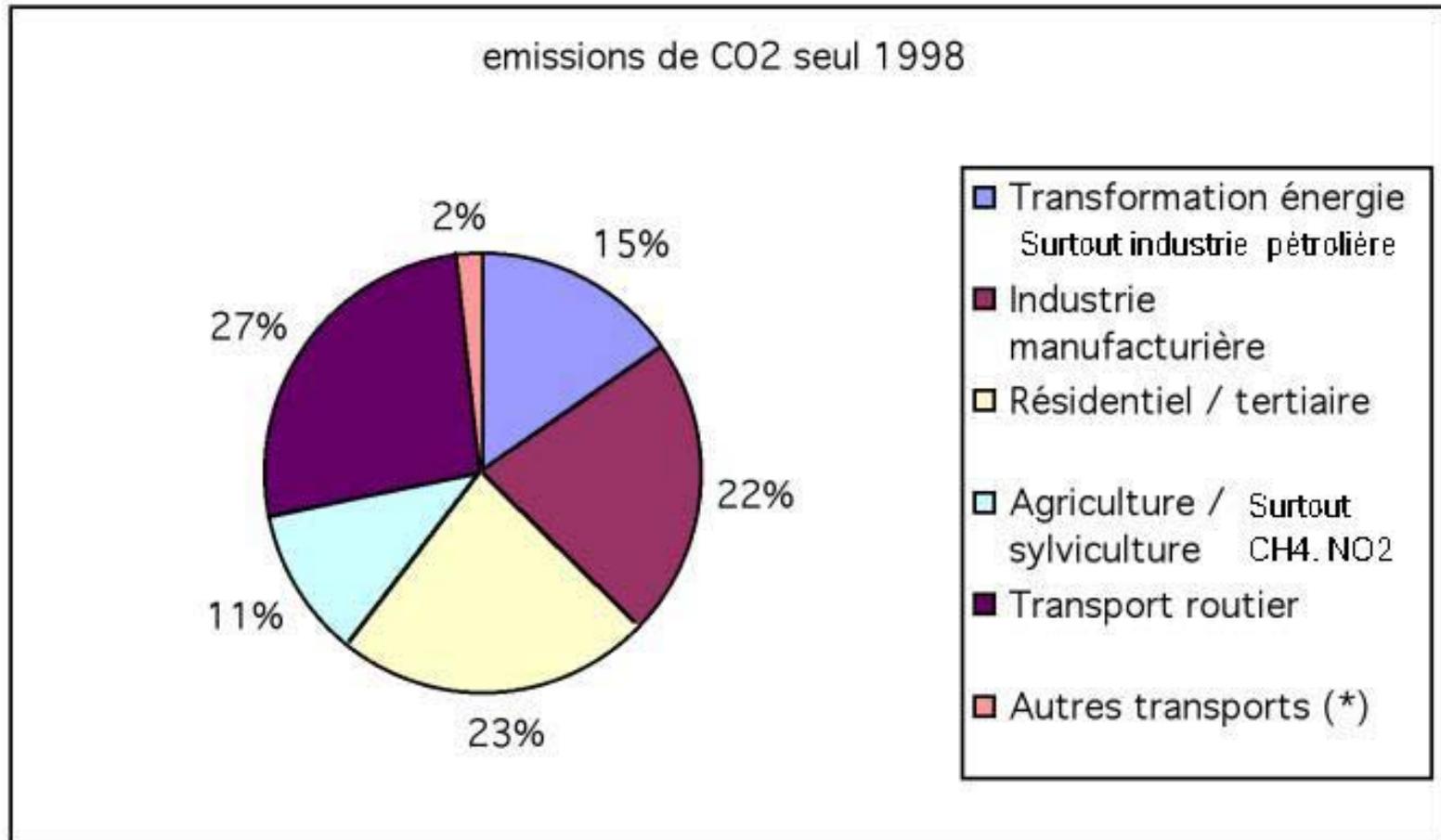


Influence du mode de production de l'électricité sur les rejets de CO2

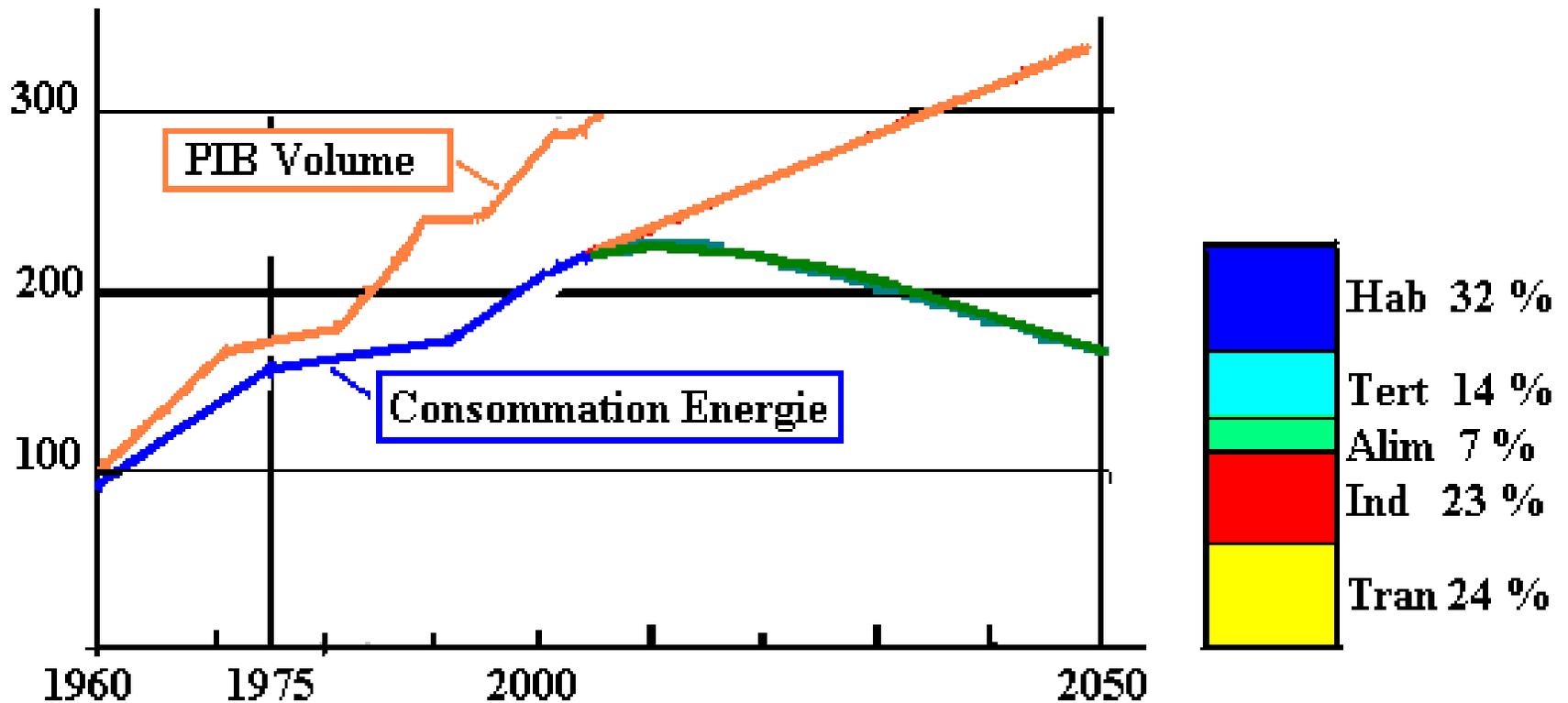


Maintenir notre structure
de production électrique

Emissions GES équivalent CO2 en France



CONSOMMATION

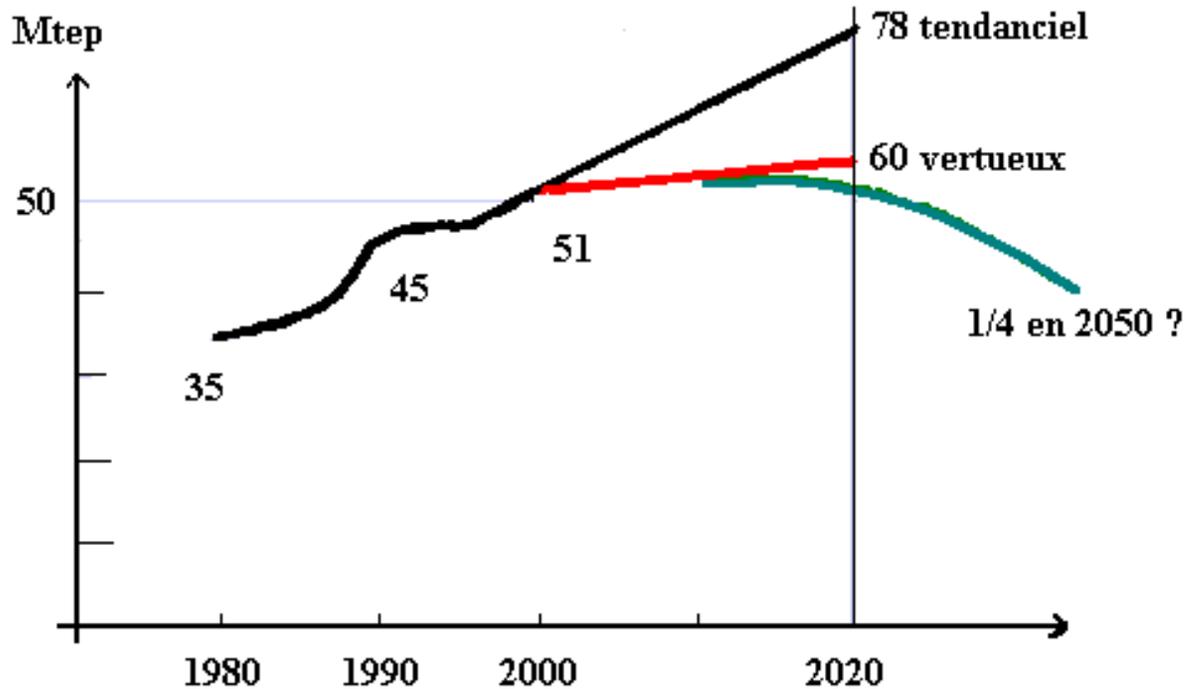


- Hab Tert + 1.2 % / an depuis 1990**
- Industrie + 0.8 % / an depuis 1990**
- Transport + 1.4 % / an depuis 1990**

TRANSPORTS

24 % Cons totale 40% Rejets CO²

Vp 25, Vu 8, Pl 9, Av 6, Bat 2.5, Tr 2.5)

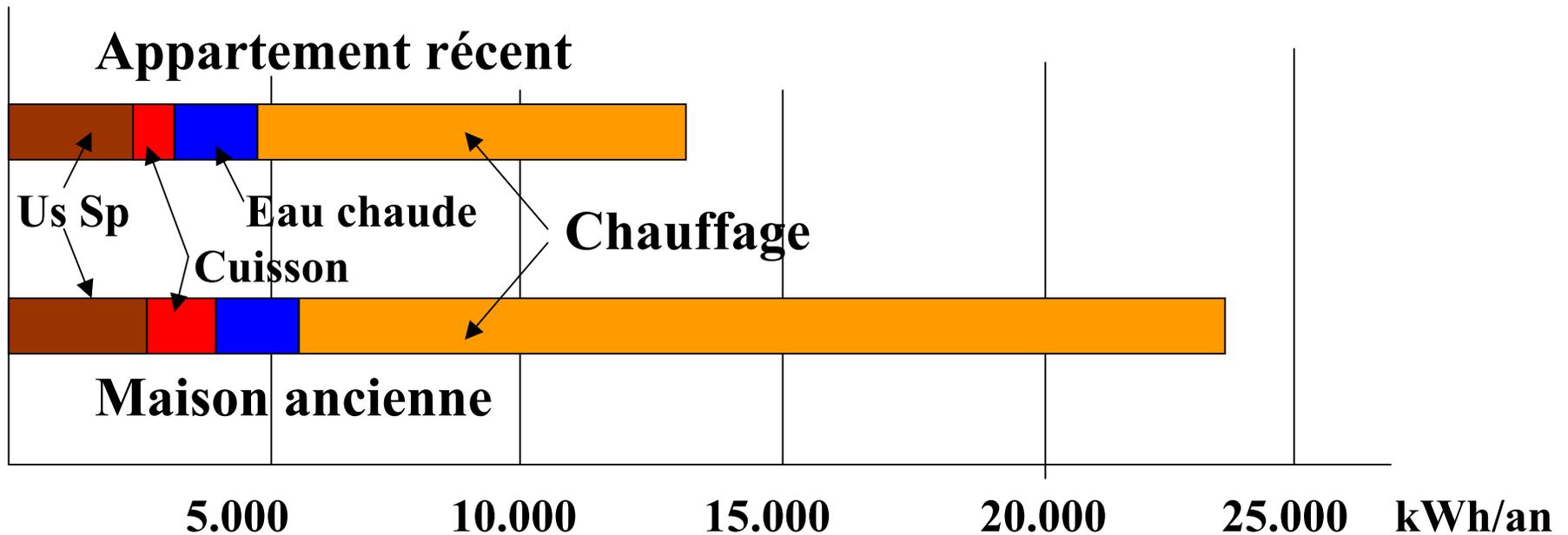


Évolution (continuité)
Injection directe et HP
Distribution variable
Downsizing
Hybridation
Électrique 100 %
Hydrogène et PAC
Carburants alternatifs

RESIDENTIEL – TERTIAIRE

46 % Cons totale

Chauffage eau chaude 72 % Autres 28 %



Energies renouvelables

LES RENOUVELABLES en 2004

Électricité	74 TWh	14% du total	525 TWh
Chaleur	12 Mtep	16% du total	73 Mtep
Mobilité	0.4 Mtep	0.9% du total	53 Mtep

LES ANCIENS

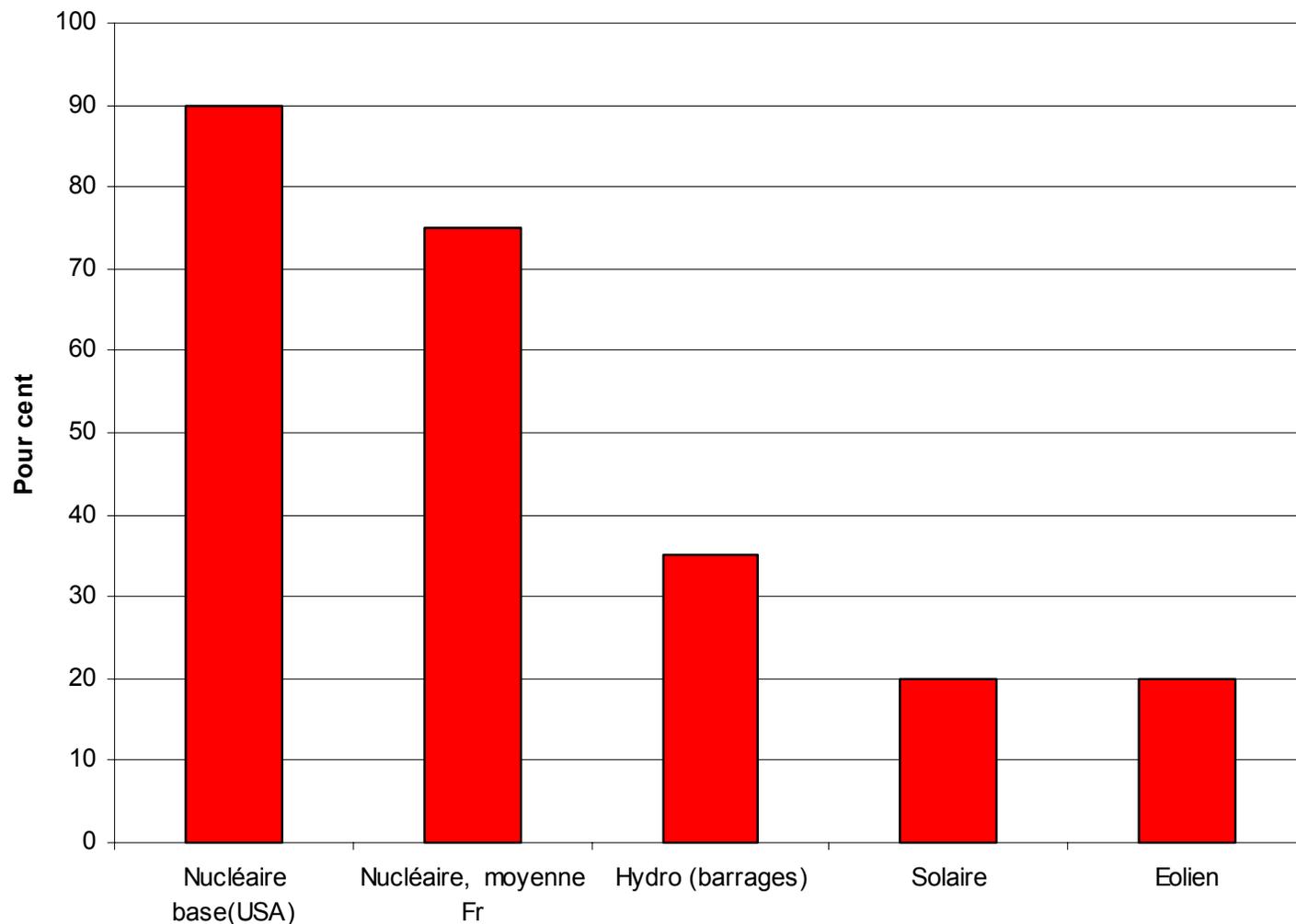
Hydraulique	70 TWh	(15 ou 6 Mtep !)	stabilisation
Forêt, bois	9 Mtep		croissance

LES NOUVEAUX

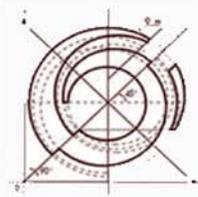
Éolien	0.6 TWh		forte croissance
Solaire	0.03 Mtep	et 0.027 TWh	forte croissance
Biocarburants	0.4 Mtep		forte croissance

Disponibilité de la ressource

Taux d'utilisation pour la production d'électricité



Hydroélectricité



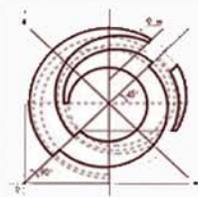
L'hydraulique: principale energie renouvelable

Les avantages et les inconvenients

Les avantages

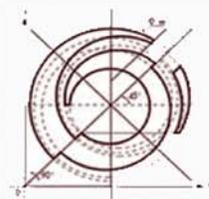
- **Energie renouvelable:**
 - Pas de cout de “combustible”
 - Pas de limitation dans le temps
 - Faible cout de maintenance et d'exploitation
 - Pas/ Peu d'emission de CO₂
- **Capacité de stokage de l'energie**
- **Grande flexibilité de regulation des reseaux:**
 - Mise en route en quelque secondes
- **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**



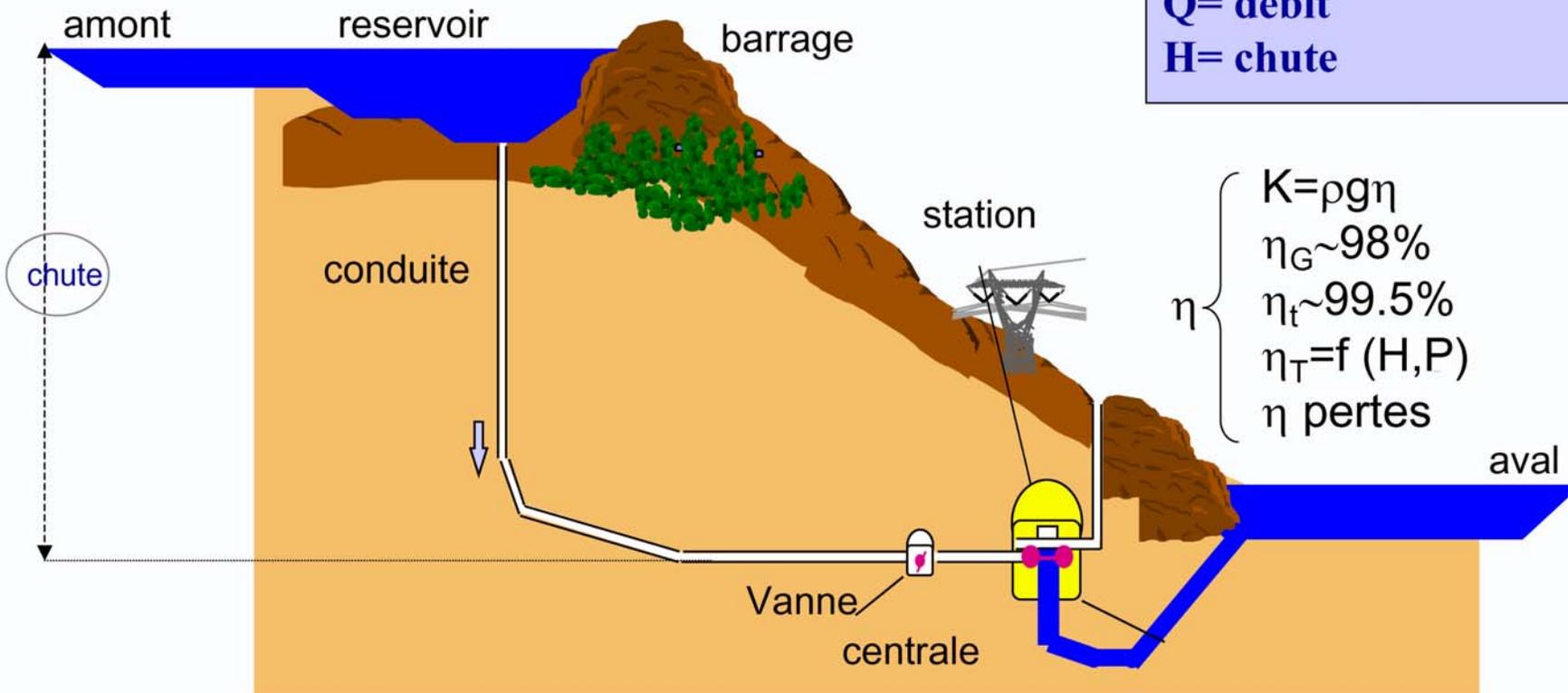
L'hydraulique: principale energie renouvelable

Le principe

$$MW = k Q.H$$

Q= débit

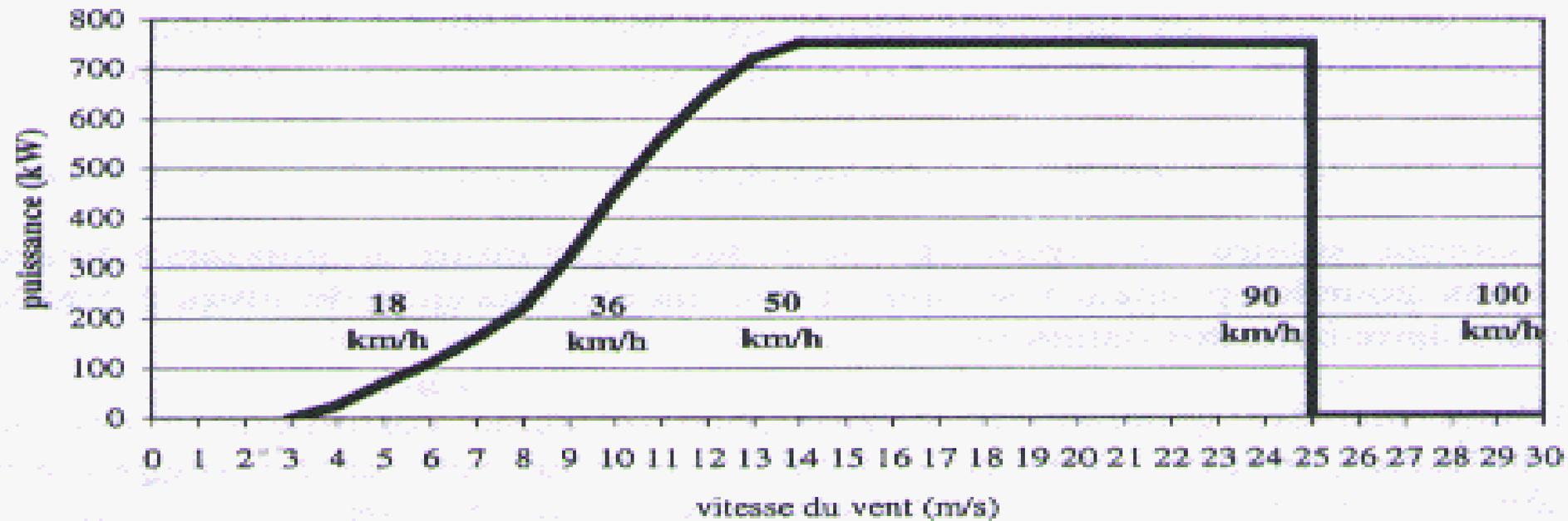
H= chute



$$\eta \left\{ \begin{array}{l} K = \rho g \eta \\ \eta_G \sim 98\% \\ \eta_t \sim 99.5\% \\ \eta_T = f(H, P) \\ \eta \text{ pertes} \end{array} \right.$$

EOLIEN

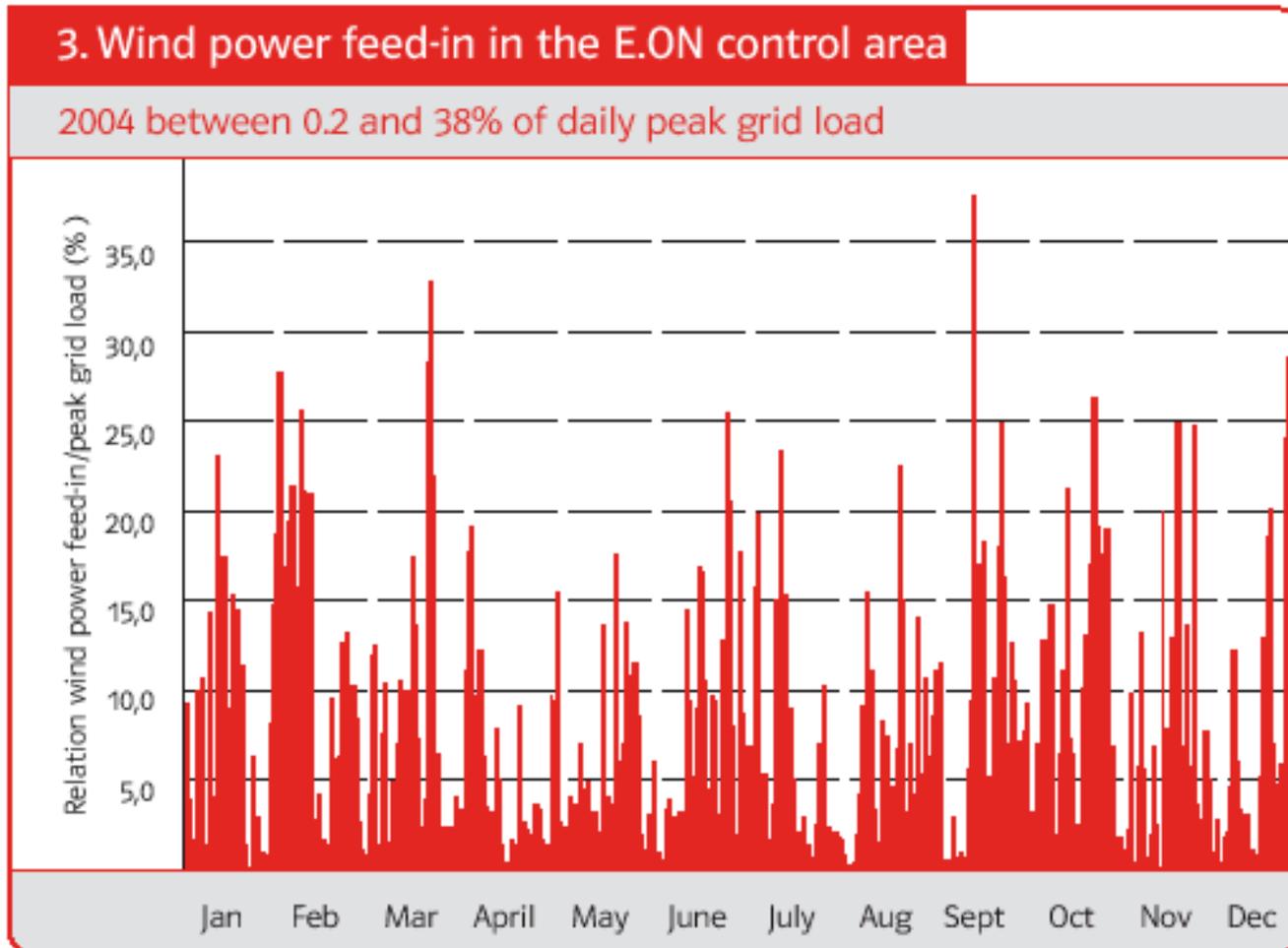
Rendement



Parcs éoliens

- Vitesse de sortie du vent sous le vent: $V/3$
- Distance entre éolienne: 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)

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

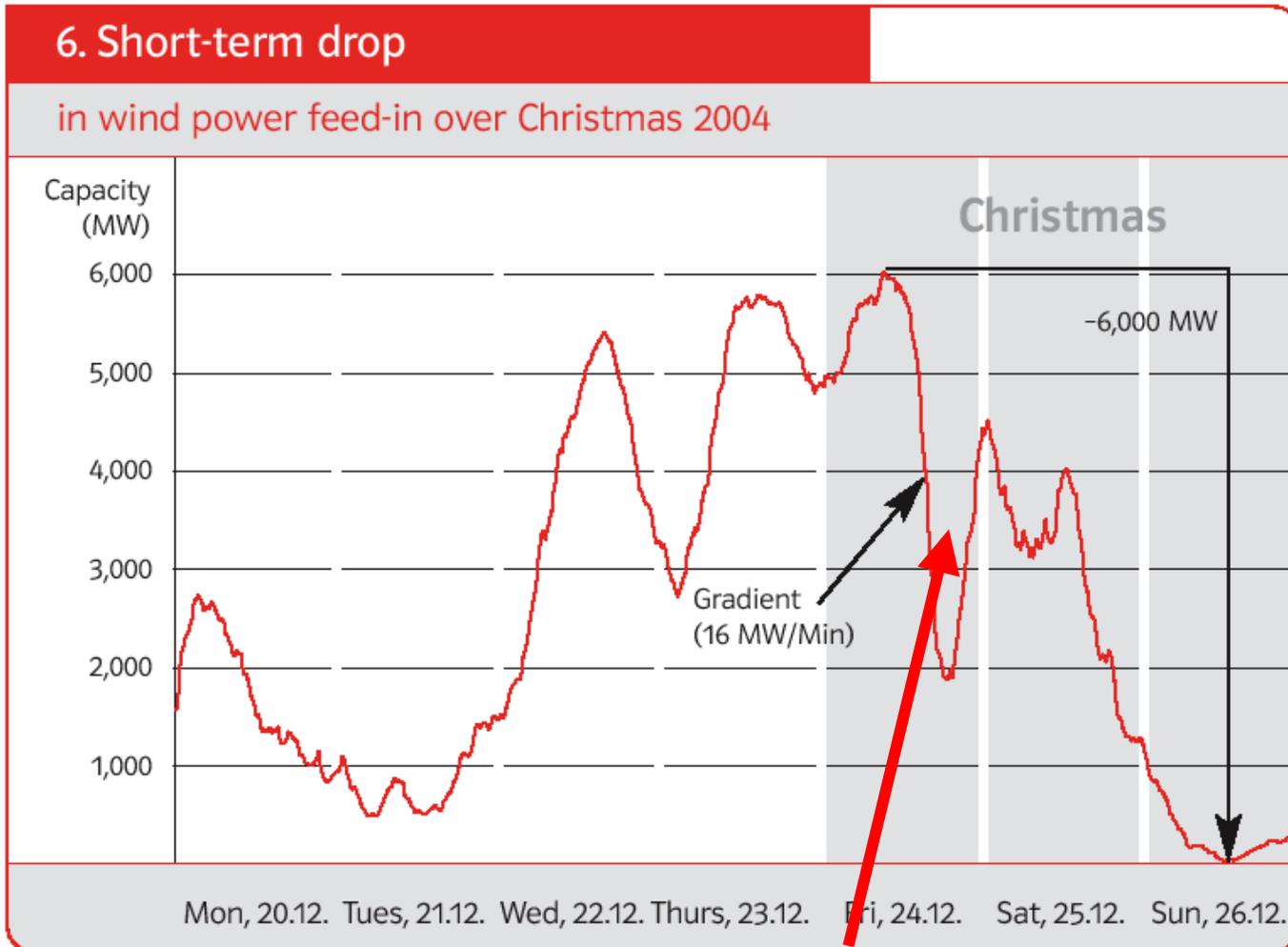


Max
6234 MW

Min
8 MW

Puissance installée: 33.200MW dont éolien 7.558 MW (23%)
Production: 271.300 GWh dont éolien 11.300 GWh (4,16%)

Puissance éolienne délivrée: détail

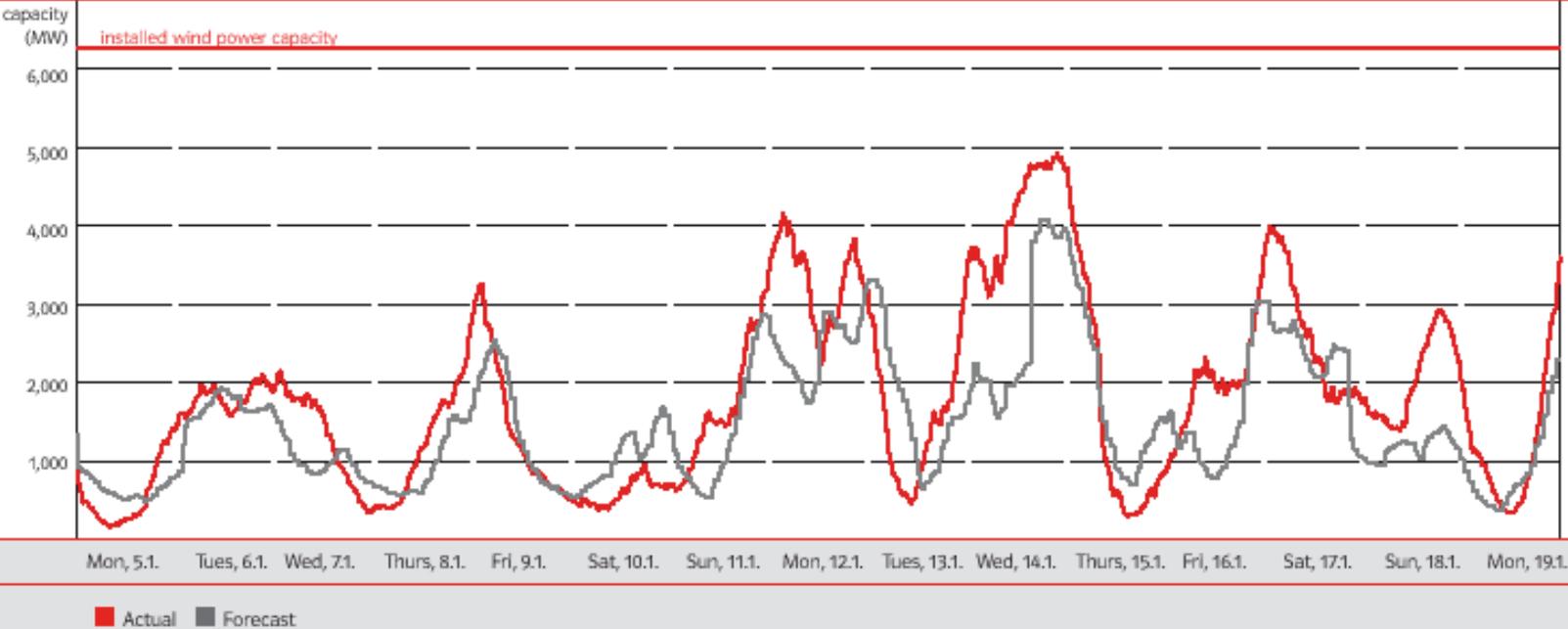


Pente: 1000 MW/h

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



Eolien en France: un bon investissement? Pour qui?

- **Eoliennes terrestres:**

 - année 1 à 10 : 82 €/MWh

 - année 10 à 15 : 82 si moins de 2400 h/an

 - : 82 à 68 de 2400 à 2800 h/an

 - : 82 à 28 de 2800 à 3600 h/an

 - : 28 à plus de 3600 h/an

- **Outre-mer:** : 110 €/Mwh

- **Eoliennes marines:**

 - année 1 à 10 : 130 €/MWh

 - année 10 à 20 : 130 €/MWh si moins de 2800 h/an

 - : 130 à 90 de 2800 à 3200 h/an

 - : 130 à 30 de 3200 à 3900 h/an

 - : 30 au delà de 3600 h/an

Crédit d'impôt sur l'investissement: 40%

Coûts Bénéfices en France

- Limite puissance totale: 30% de la puissance réseau
Soit 25 GWe
- 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

Biomasse

Rendements

rendement annuel : 2 t/ha à 20 t/ha,

Colza: 3t/ha Blé: 9t/ha

3,6 à 7,2 tep/ha , 40 à 80 Mwh/ha.

rendement de la biomasse : 0.2 à 0.5%.

rendement électrique maximum : 0.2 %.

Une centrale produisant 7 Twh/an : 2500 km².

Surface emblavée en France :

45000 km²= 20 centrales

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....)

LA BIOMASSE

Inventaire du potentiel national

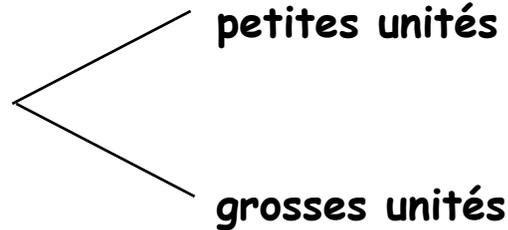
- Selon :
- * (1) X. DEGLISE, J. LEDE, *Entropie* n° 94 (1980)
 - * (2) R. DUMON
 - * (3) *Débat énergie et environnement SOUVIRON* (1994)
 - * (4) *Rapport CEE* (octobre 1998)
 - * (5) *Biomasse Normandie* (1994), d'après ministère de l'agriculture, ADEME, AFOCE.

	Mm ³	Mtonnes
♦ PLAQUETTES FORESTIERES		
-Rémanents (2)	4	
-Eclaircies de plantation (2)	2	
-Taillis (potentiel 50 Mm ³) (1)	10	
	<hr/> 16	8
♦ DECHETS DE 1ère et 2ème TRANSFORMATION (1)		
-Ecorces, délignures, sciures	Non utilisés	7
-Copeaux, chutes, rebus	Mal utilisés	5
	<hr/> 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)		<hr/> 36
		<hr/> 91

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

Filières de transformation énergétique de la biomasse

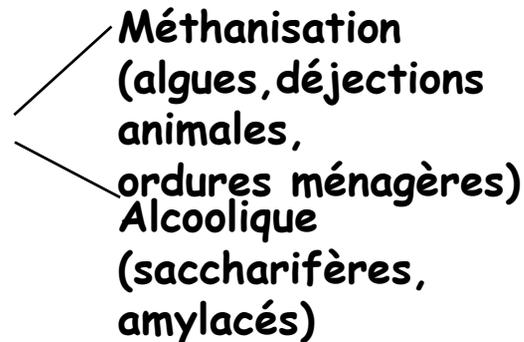
• COMBUSTION



Investissement élevé
rejets mal contrôlés

Présence d'azote +
acides et goudrons ⇒
température $\leq 650^{\circ}\text{C}$
d'où cogénération
limitée à
30% élec/70% chaleur

• FERMENTATIONS



50 à 60% CH₄
30 à 40% CO₂

Plante utilisée à 50%
Distillation
consomme énergie
⇒ Indice 1,2 à 1,4

• GAZEÏFICATION



Tous végétaux à 100%
Indice 2,8 à 3

Besoins en eau de la biomasse*

Il faut 10 000 m³ d'eau pour produire 1 tep (céréales, oléagineux, betteraves)

En doublant le sur-pompage actuel (160 milliards m³) on ne produirait que *18 Mtep* !

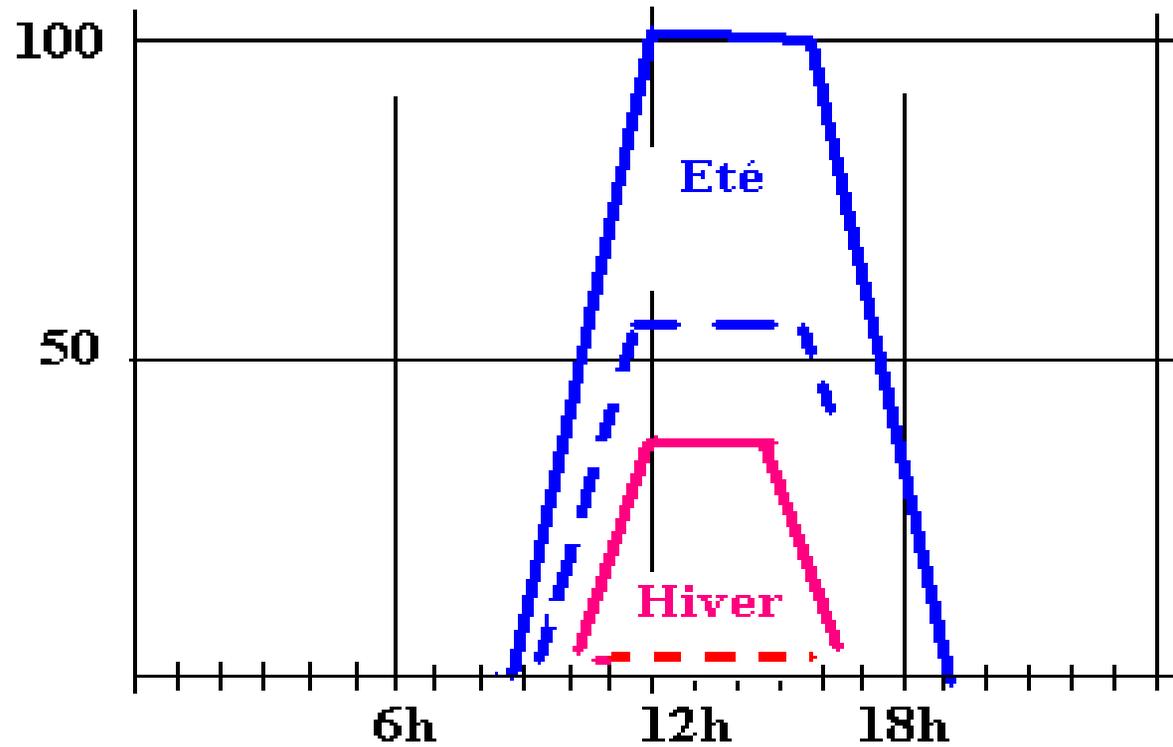
L'eau est le facteur le plus limitatif pour les biocarburants !

La dépense en énergie pour le pompage (hauteur supposée de 10 m) est de **0,12 tep** par tep produit ; à cela, il faut ajouter les autres consommations d'énergie (engins, transport, transformation...)

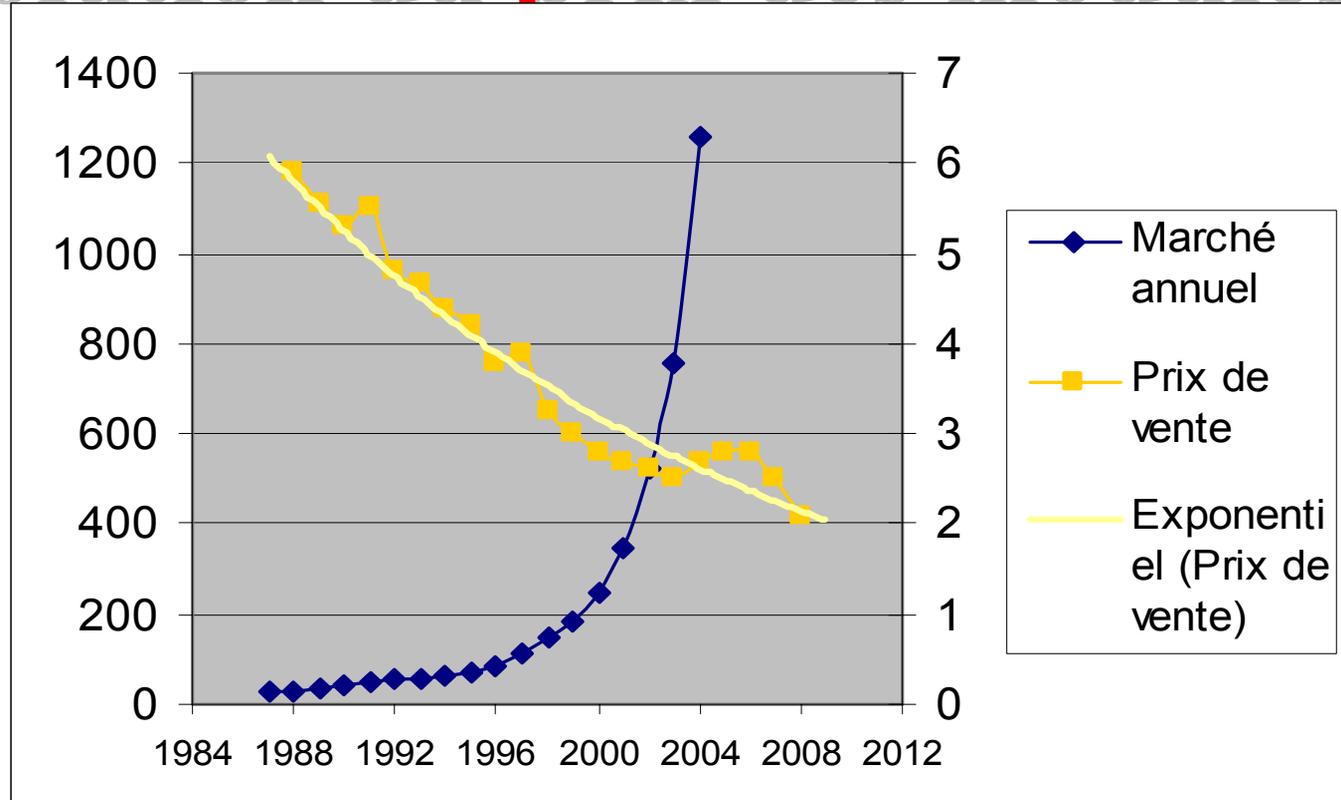
Solaire

- 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



Evolution du prix des modules



- Prix de vente actuel : 2,75 à 3€ /Wc
- Objectif : division par 2 sous 10 ans, et 4 avec break technologique sous 25 ans

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 applications de l'électricité solaire photovoltaïque

- **En sites isolés**

- Les applications professionnelles (balises, télécommunications, mobilier urbain)
- L'électrification rurale, dans les pays industrialisés (les écarts) et dans les pays en développement

- **En couplage sur un réseau électrique**

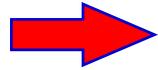
- Les systèmes individuels : 1 à 10 kW
- Les centrales de puissance : 100 kW à 10 MW (long terme)

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 ?

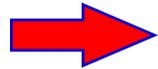
Le solaire thermique

Le marché de la chaleur est important



Exploitation passive : architecture

(10% d'économie pour l'Europe en 1990)



Capteurs solaires

(eau chaude sanitaire, planchers chauffants)

Environ 4 à 5 m² de capteurs pour produire l'eau chaude sanitaire d'une famille de 4 personnes

Cas pratique: PV

- PV 15m², 2 kWc, 2000 kWh
- Prix total : 19000 €
- Prix cellules: 6000 €
- Crédit d'impôt: 8000 €
- Subventions(?): 5000 €
- Coût net: 6000 €
- Revenu: 2000kWh*0,55€=1100 €/an
- **Retour: 5,5 ans**
- **CO₂ évité <88,2 kg/an >-113 kG/an**

Cas pratique: solaire thermique

- Maison 120 m² sur 2 étages
- Besoin total ECS+chauffage=25500 kWh
- Capteur: 12 m²
- Prix: 1150 €/m² Total: 13800 €
- Crédit d'impôt: 6000 €
- Subventions: 800 €
- Coût net: 7000 €
- Production capteurs: 6800 kWh/an
- Economie: gaz: 238 € fioul: 340 €
- **Retour: gaz: 29 ans fioul: 21 ans**
- CO₂ évite: gaz 1,4 tonnes fioul: 2,1 tonnes
- Coût CO₂ évité(10 ans,gaz):0,9 €/kg

Cas pratique: isolation

- Pose de doubles fenêtres: 8185 €
- Crédit d'impôt: 2159 €
- Coût: 6026
- Economies de gaz (10000 kWh): 350€/an
- **Retour: 17 ans**
- **CO2 évité:**
 - **Fioul: 5 tonnes**
 - **Gaz: 3,5 tonnes**
 - **Electricité: 0,53 tonnes**
- **Coût CO2 évité (10 ans, gaz): 0,23 €/kg**

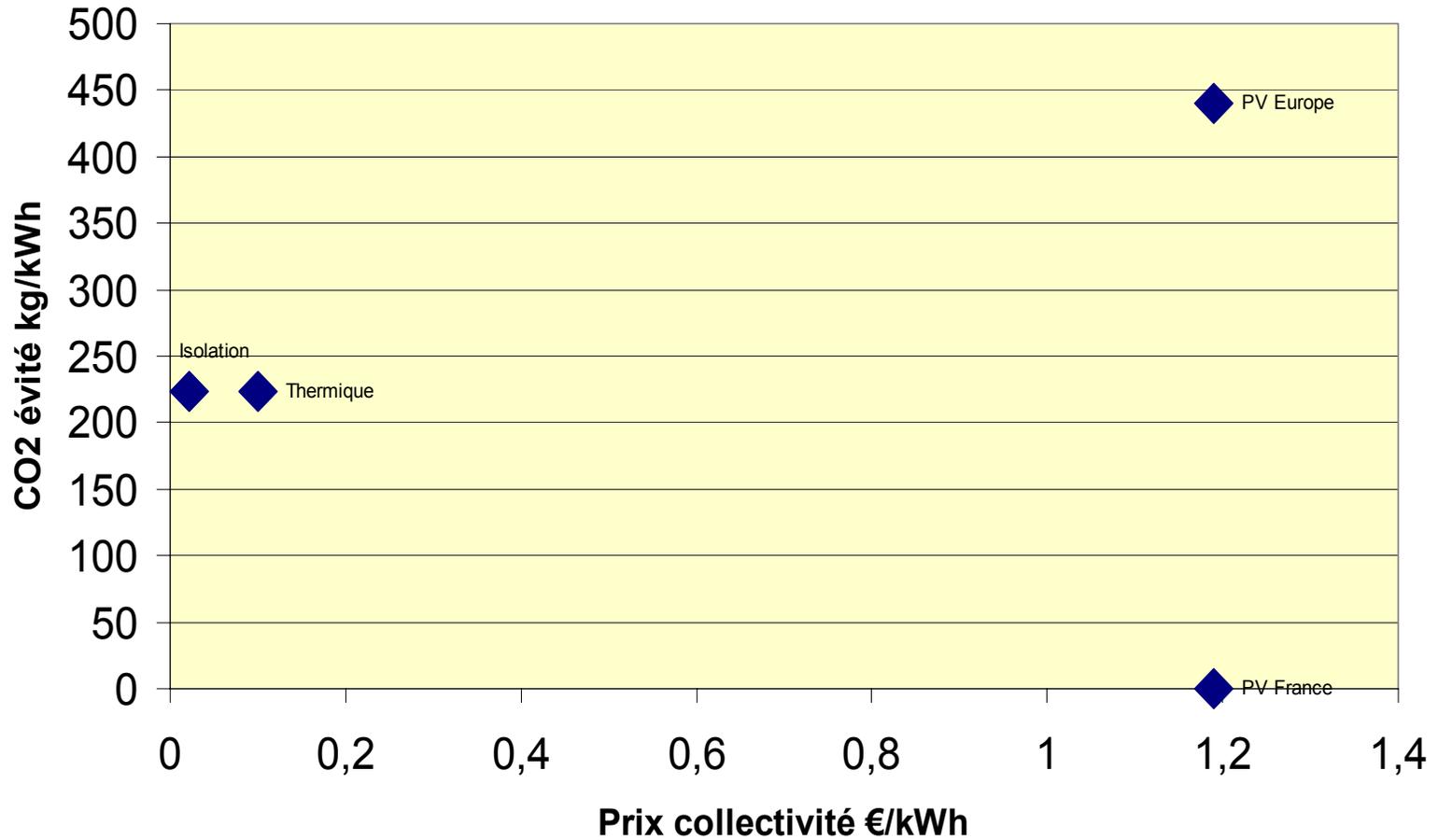
Electricité effaçable

- Consommation gaz: 20000 kWh
- Coût: 556 €/an
- Remplacement par électricité effaçable
- Gaz restant: 2000 kWh=56 €/an
- Electricité(gain d'efficacité)=13000 kWh
- Coût électricité: $13000 * 0,06 = 780$ €/an
- Surcoût annuel: 280 €
- Gain CO2: 7 tonnes
- Prix CO2 évité: 0,04 €/kg

Récapitulation Tableau

	Prix du kWh	CO2 évité/kWh
	Collectivité	g/kWh
PV France	1,19	0,00
Thermique	0,10	224,00
Isolation	0,02	224,00
PV Europe	1,19	440,00

Récapitulation Graph



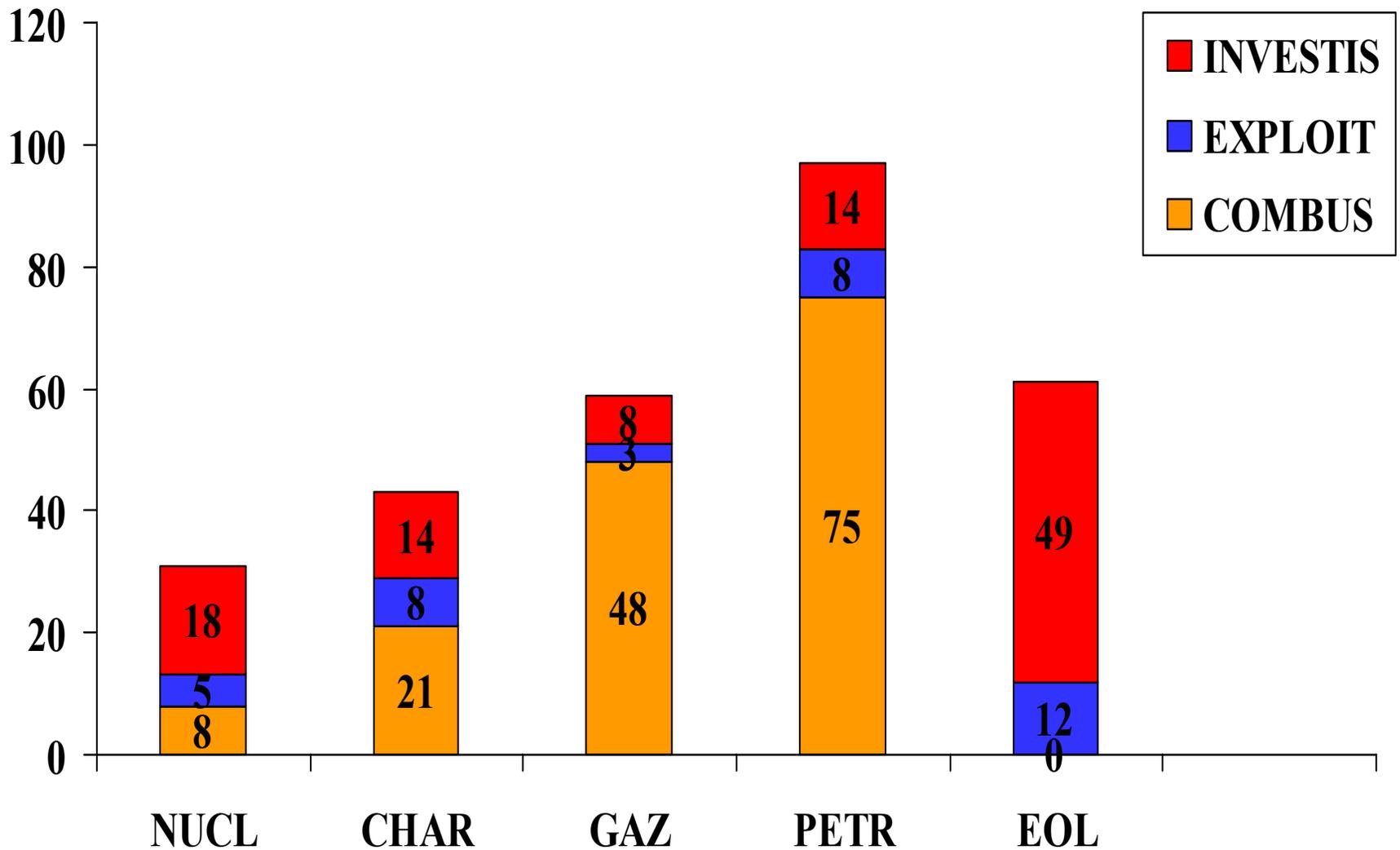
Coûts

Investissements

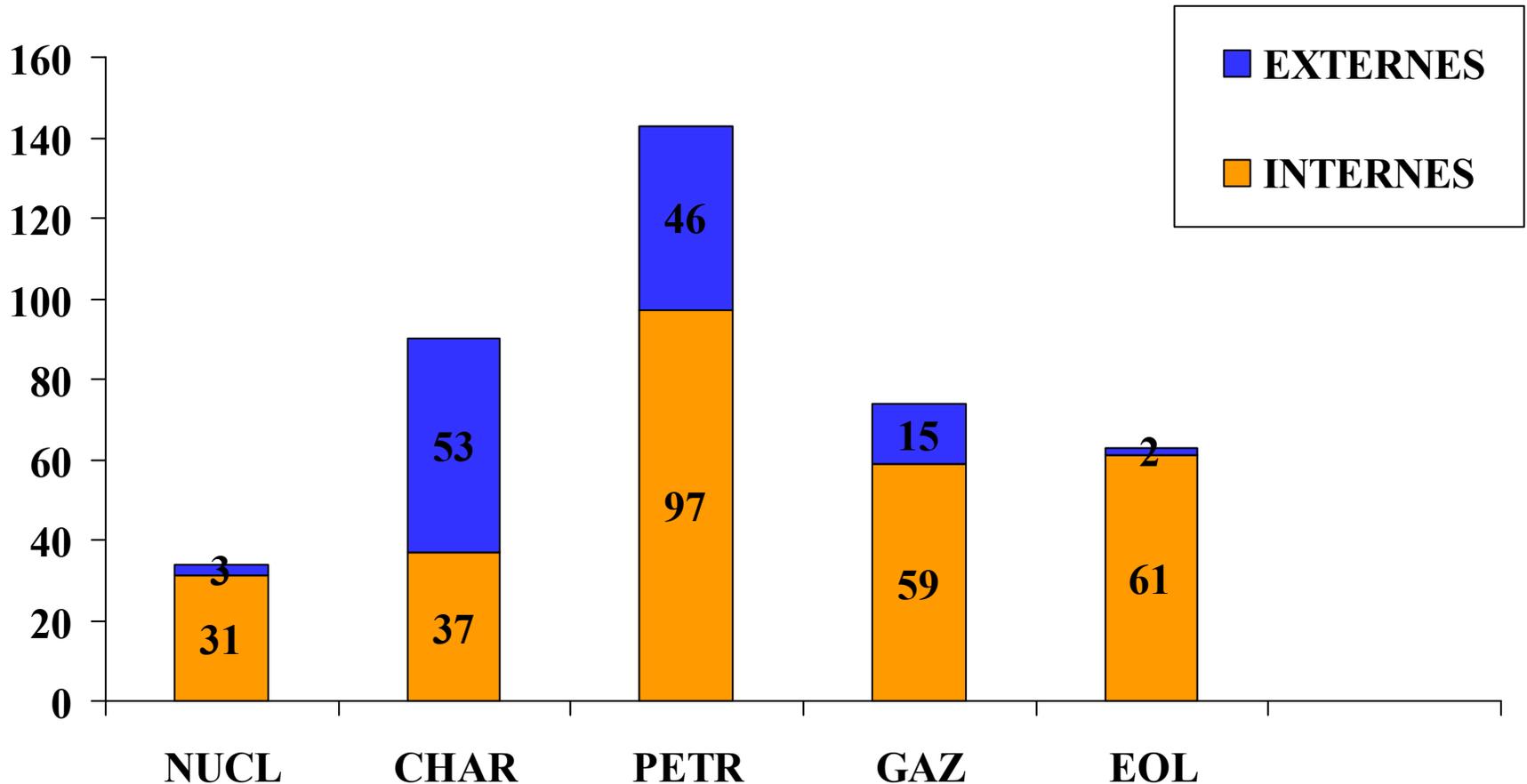
Production de 7 Twh/an (un réacteur de 1 Gwe

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

Coûts totaux internes



Coûts totaux (externes+internes)



Négatep (Acket-Bacher)

RENOUVELABLES PERSPECTIVES 2050

A ce jour	29 Mtep (12 %)	Obj. 2050 x 2 à 3
◆Hydraulique	16 Mtep (70 TWh)	≅ 16 Mtep
◆Bois Déchets	12 Mtep	24 Mtep
◆Biocarburants	0.5 Mtep	5 à 15 Mtep
◆Solaire thermique		6 Mtep
◆Géothermie		9 Mtep
◆Éolien		5 à 20 Mtep (22 à 88 TWh) <i>10.000 à 40.000 MWe P.inst</i>

Mtep : Millions de tonne ~ pétrole

TWh : Tera Watt heure : 1.000 Milliards de Wh

Hydraulique 1 TWh = 0.222 Mtep et non 0.086

Production électrique 2050

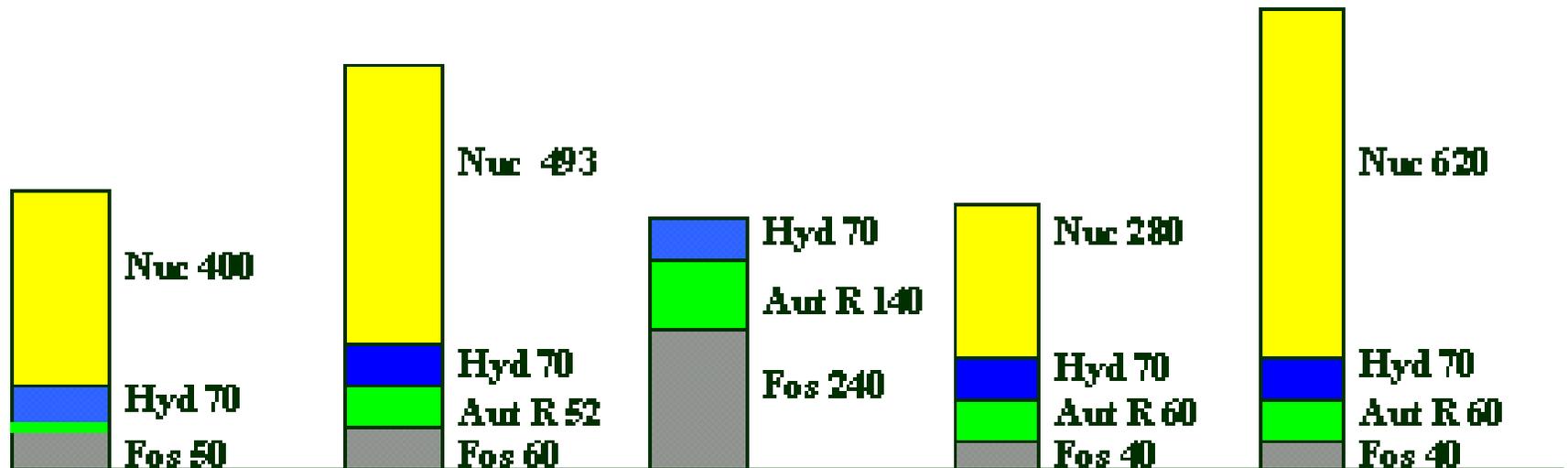
Auj: 525 TWh
(exp 75)

B: 675 TWh

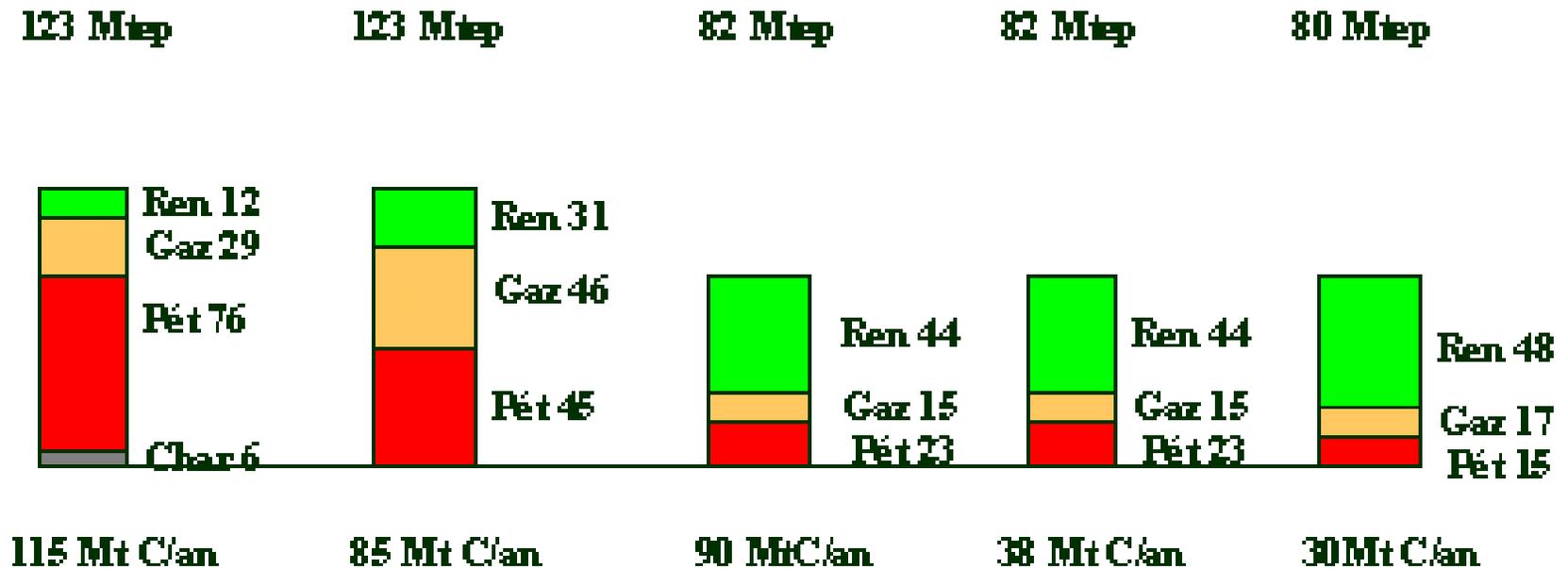
Cs: 450 TWh

Cn: 450 TWh

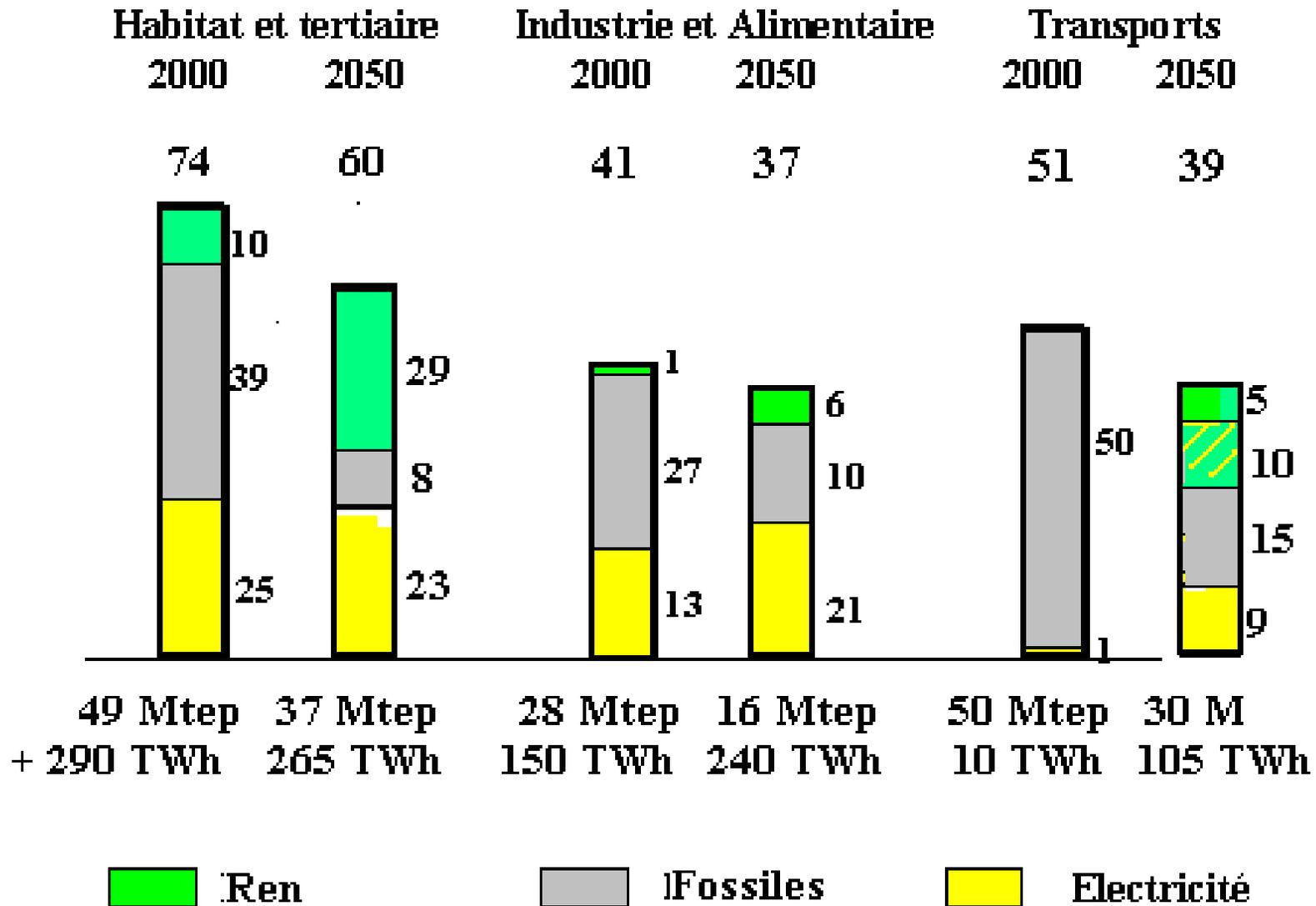
F4: 790 TWh



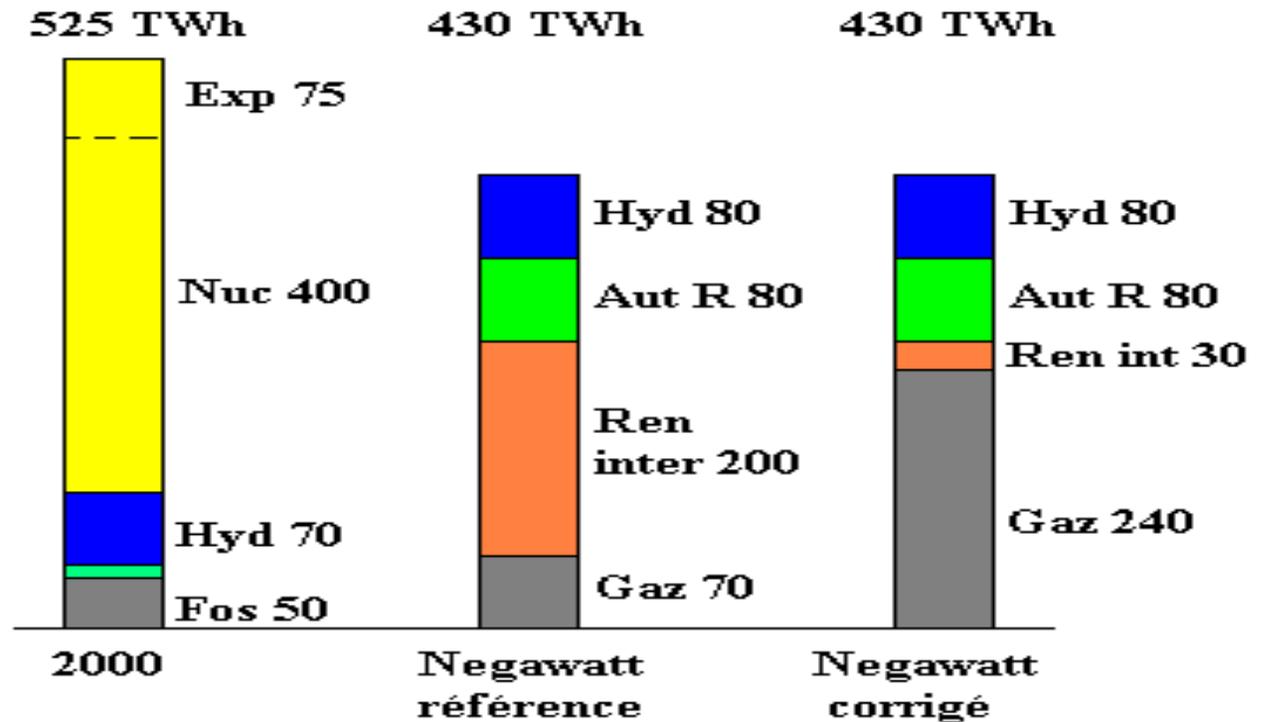
Chaleur Mobilité



Répartition par secteur



Negawatt rêve et réalité



Rejets CO2 Mt/an
production électricité
(soit en C Mt/an)

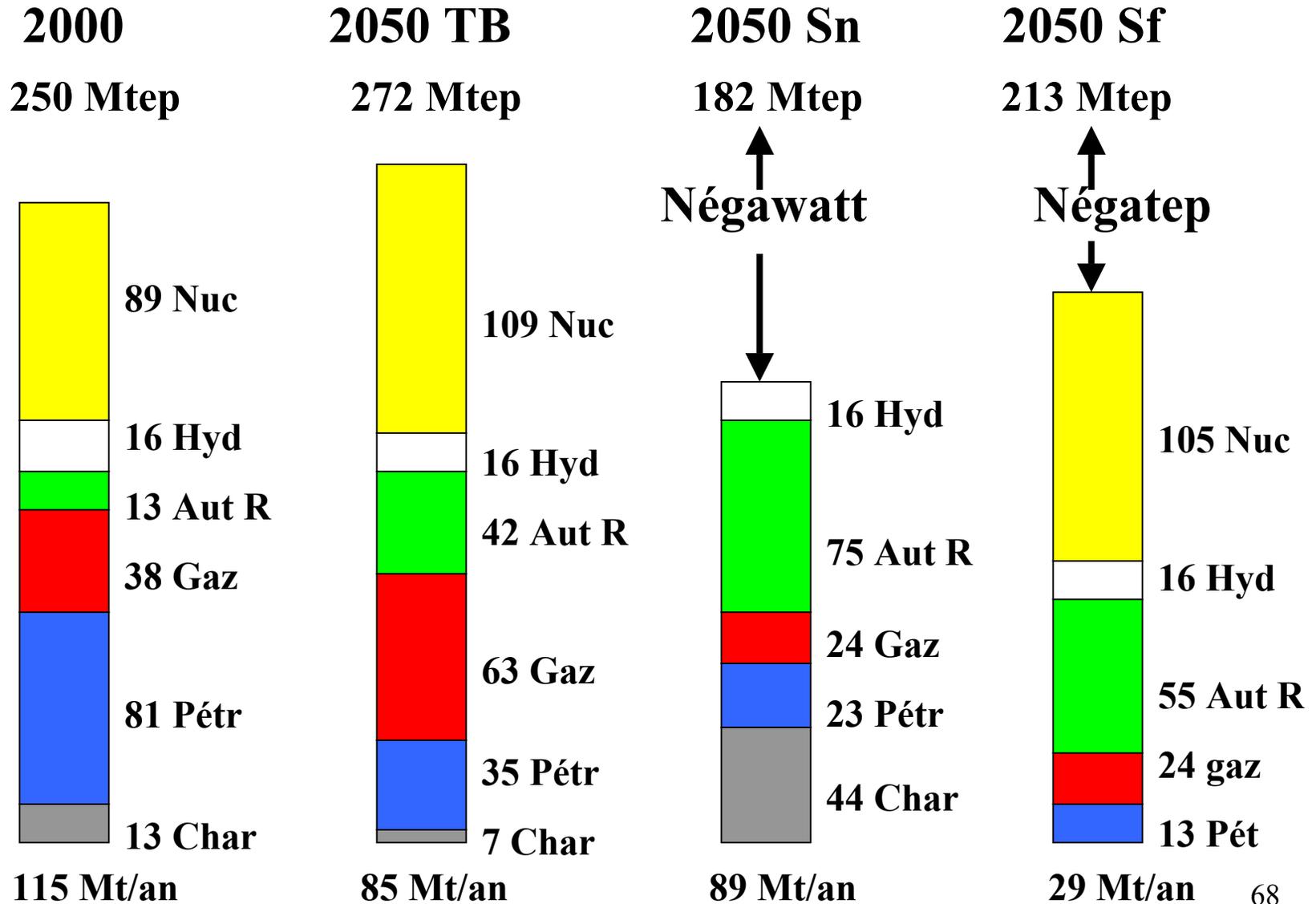
40	42	143
11	11	39

Schéma 3 : modes de production de l'électricité

Tous postes de consommation
total rejets CO2 Mt/an
(soit en C Mt/an)

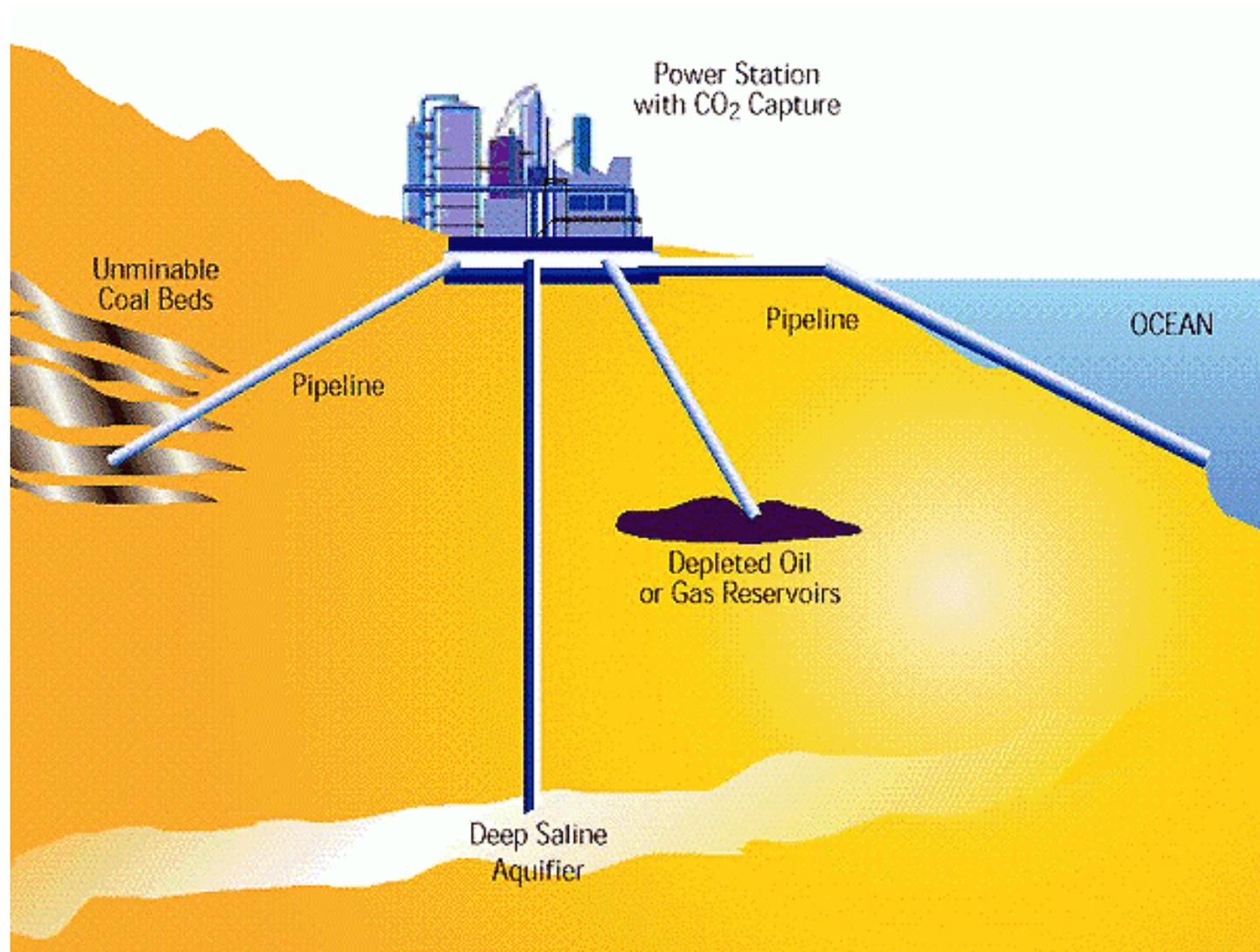
407	118	220
110	32	60

SCENARIO Négatep (Acket, Bacher)



FIN

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)