

# 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 CO<sup>2</sup>

## ■ LES OBJECTIFS :

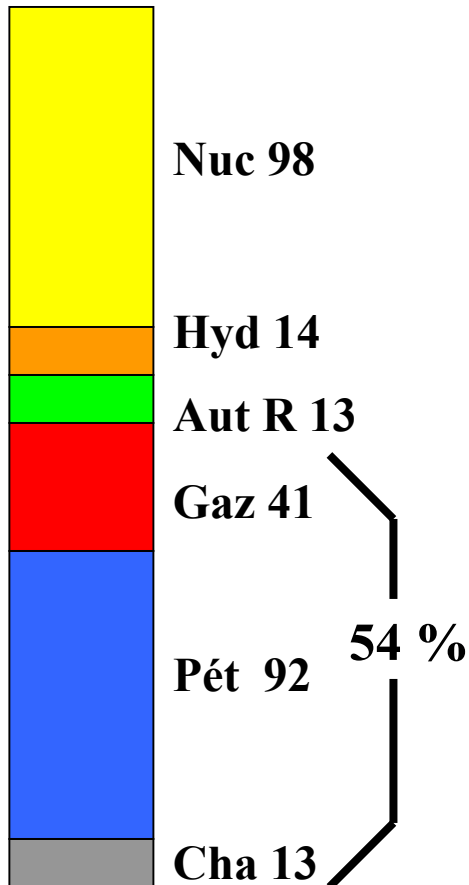
- Diviser par 4 nos rejets de CO<sup>2</sup> d'ici 2050 « Décarbonner »
- Limiter les combustibles fossiles « Sortir des fossiles »

## ■ LES 3 AXES D' ACTIONS :

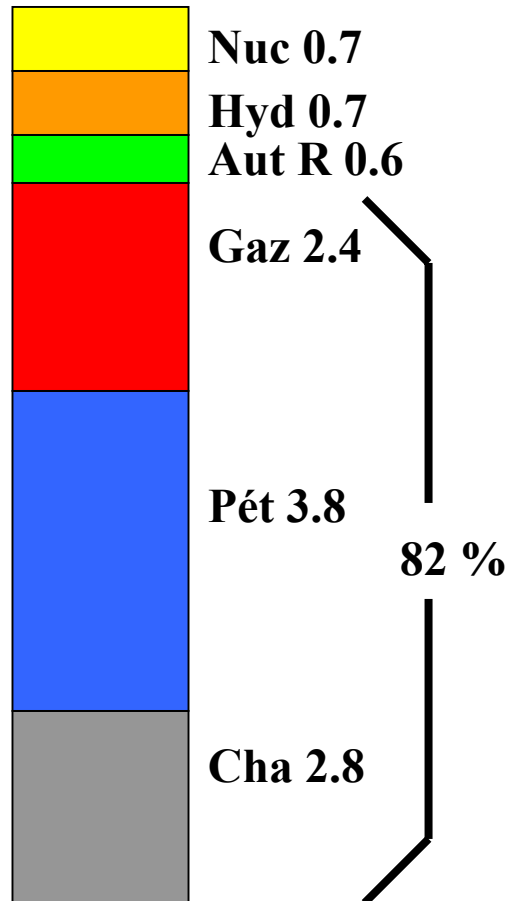
- Économies d'énergie
- Développement des Renouvelables:  
( thermique bois, thermique Solaire, biocarburants, éolien )
- Poursuite du Nucléaire ( décision tête de série EPR)

# 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

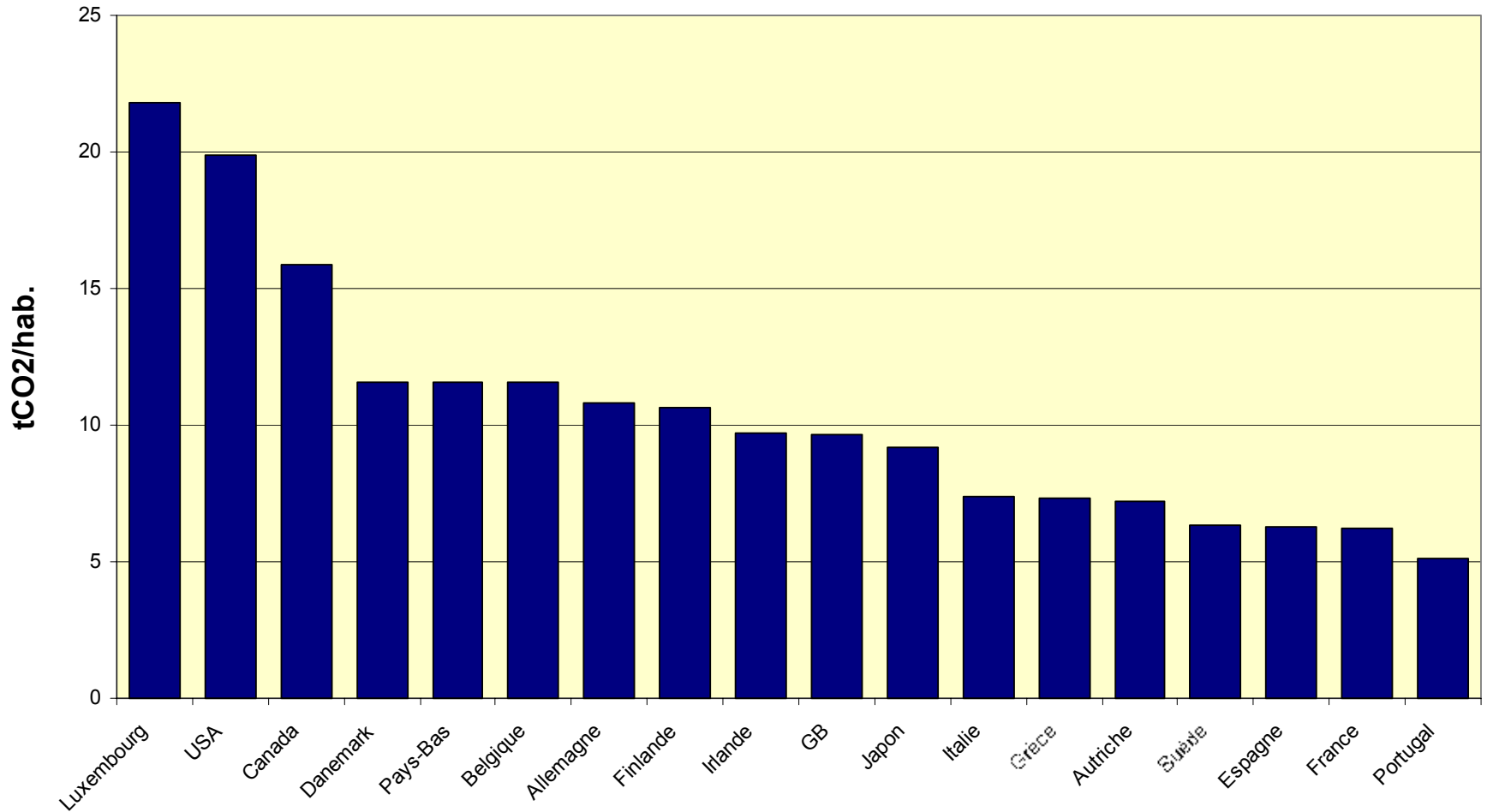
- Giga=Milliard
  - Tera=Millier de Milliards
- **Energie**
  - Gtep=Milliards de Tonnes Equivalent Pétrole
  - Twh=Millier de GWh =Milliards de kWh
- **Concentrations**
  - Ppm=parties par million
  - Ppb= parties par milliard
- **Equivalence**
  - 1 MWh=0,086 tep (énergie finale)
  - 1MWh=0,261 tep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



# Rôle crucial de l'électricité

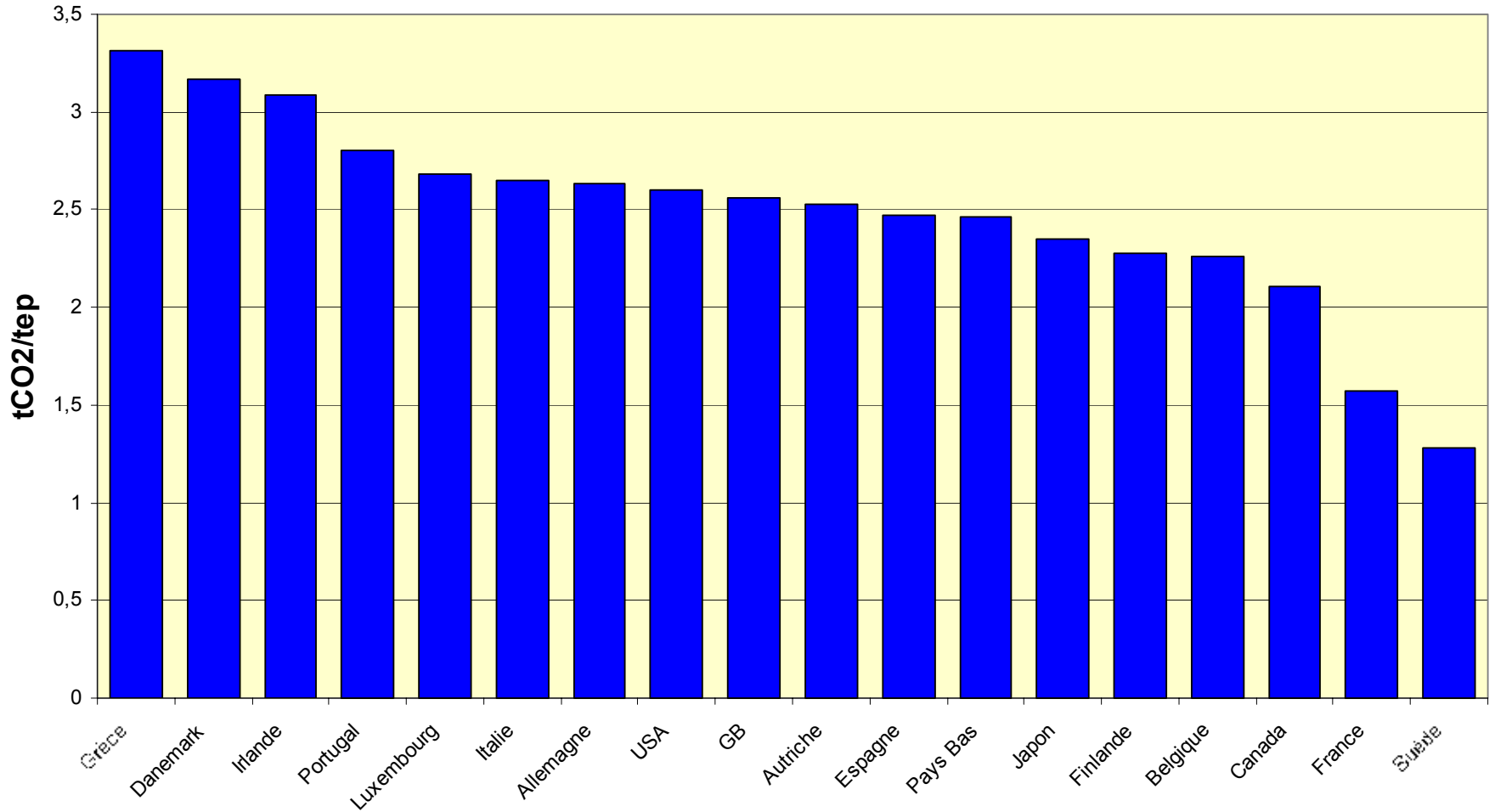
# tCO2/ha

Emission de CO2 par habitant



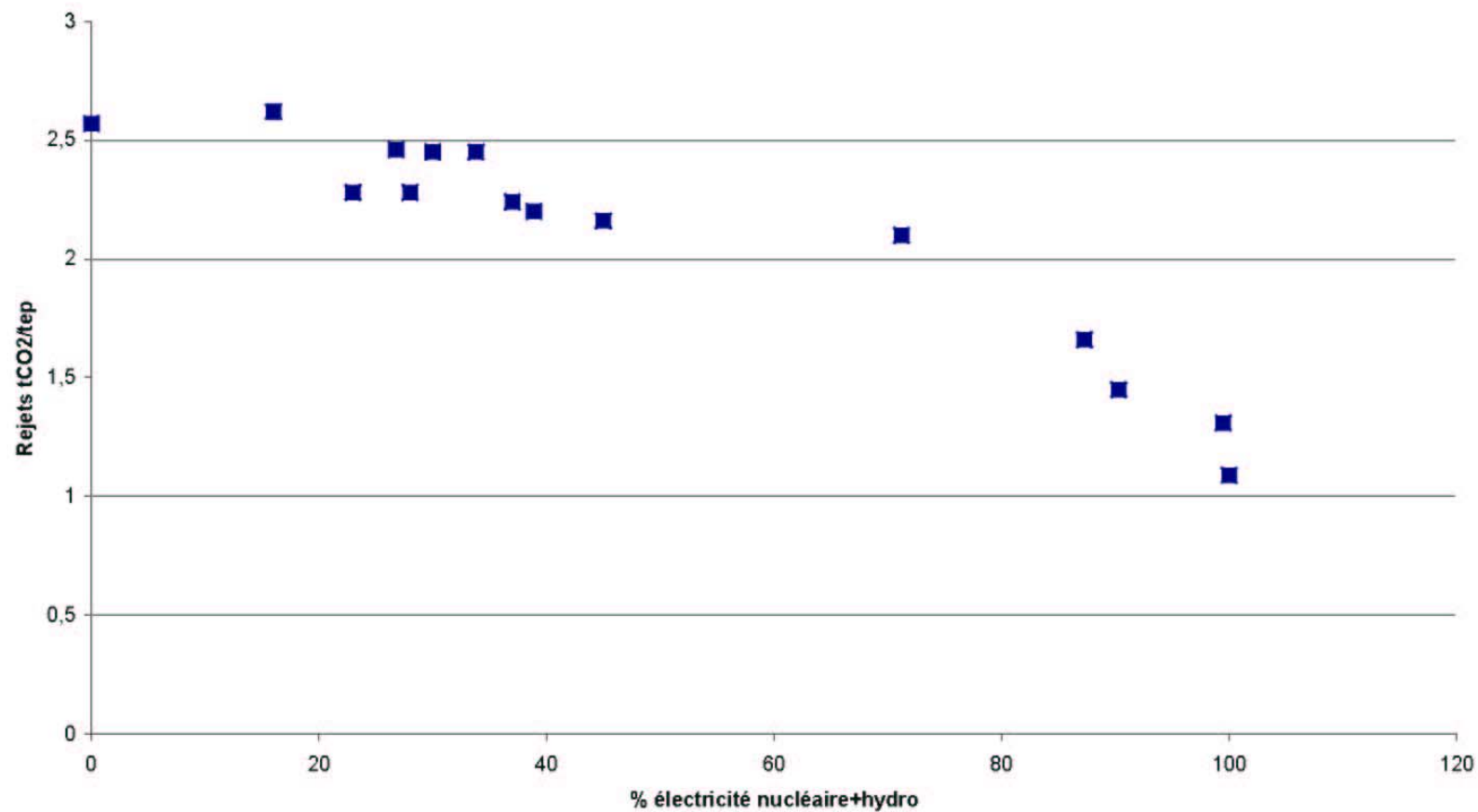
# tCO<sub>2</sub>/tep

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



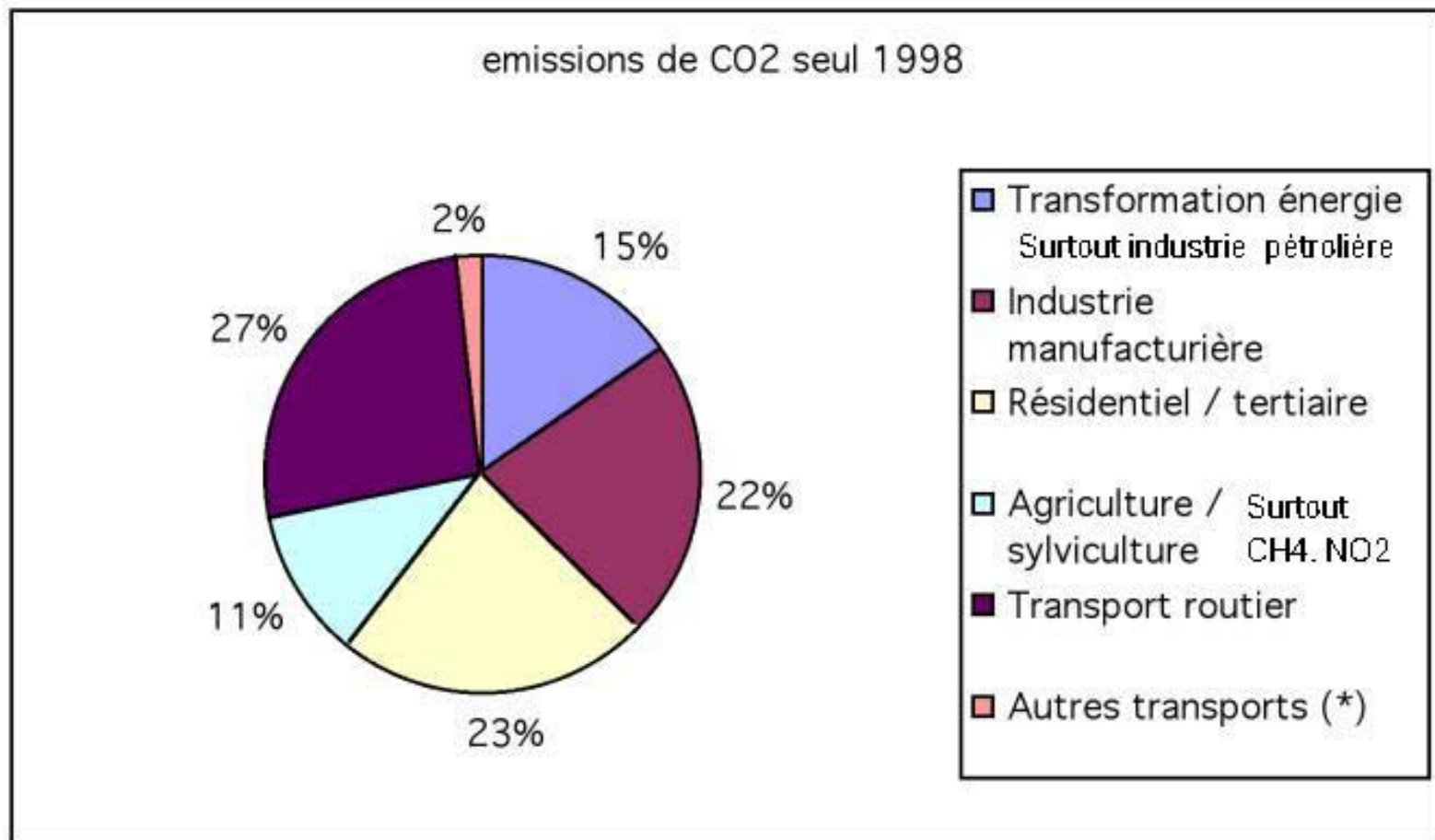


Influence du mode de production de l'électricité sur les rejets de CO2

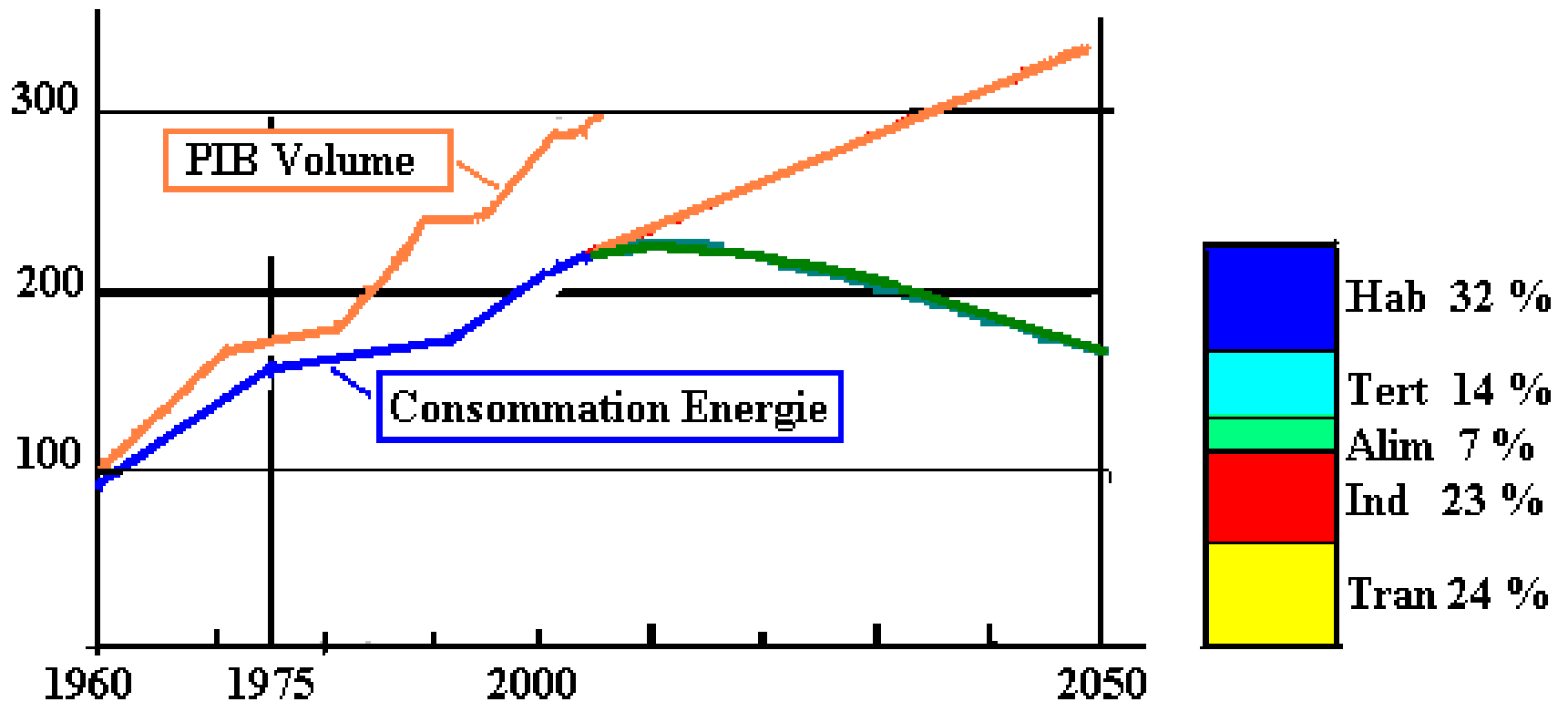


Maintenir notre structure  
de production électrique

# Emissions GES équivalent CO2 en France



# CONSOMMATION

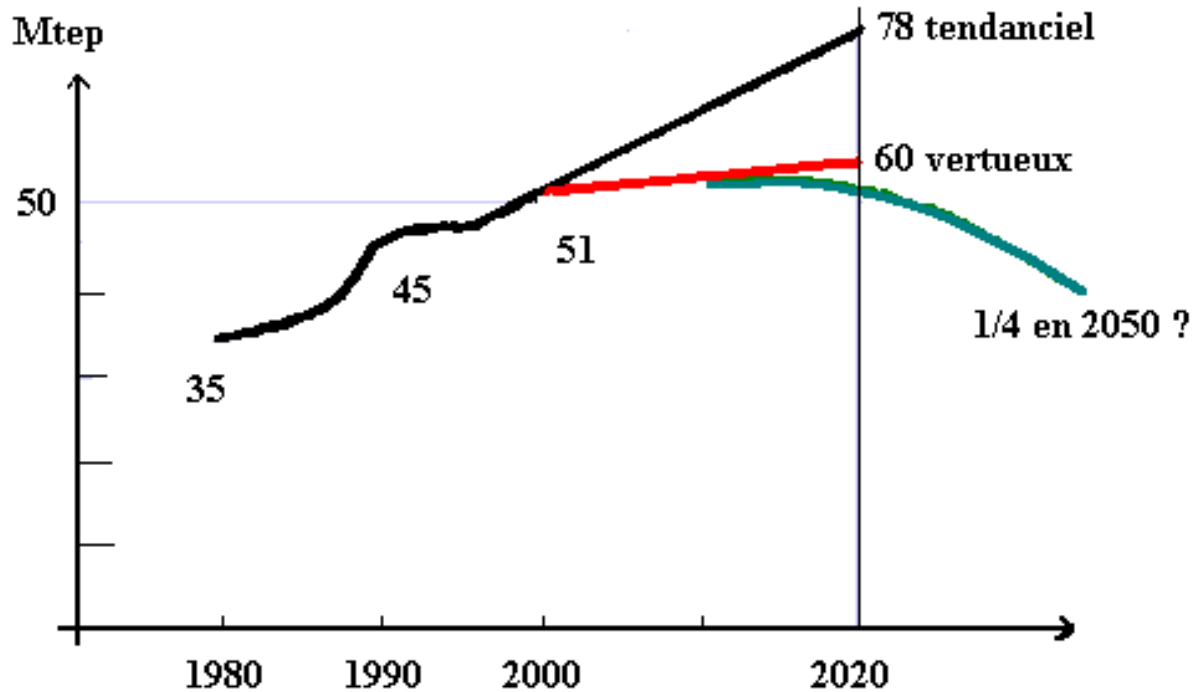


- Hab Tert + 1.2 % / an depuis 1990**
- Industrie + 0.8 % / an depuis 1990**
- Transport + 1.4 % / an depuis 1990**

# TRANSPORTS

24 % Cons totale 40% Rejets CO<sup>2</sup>

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

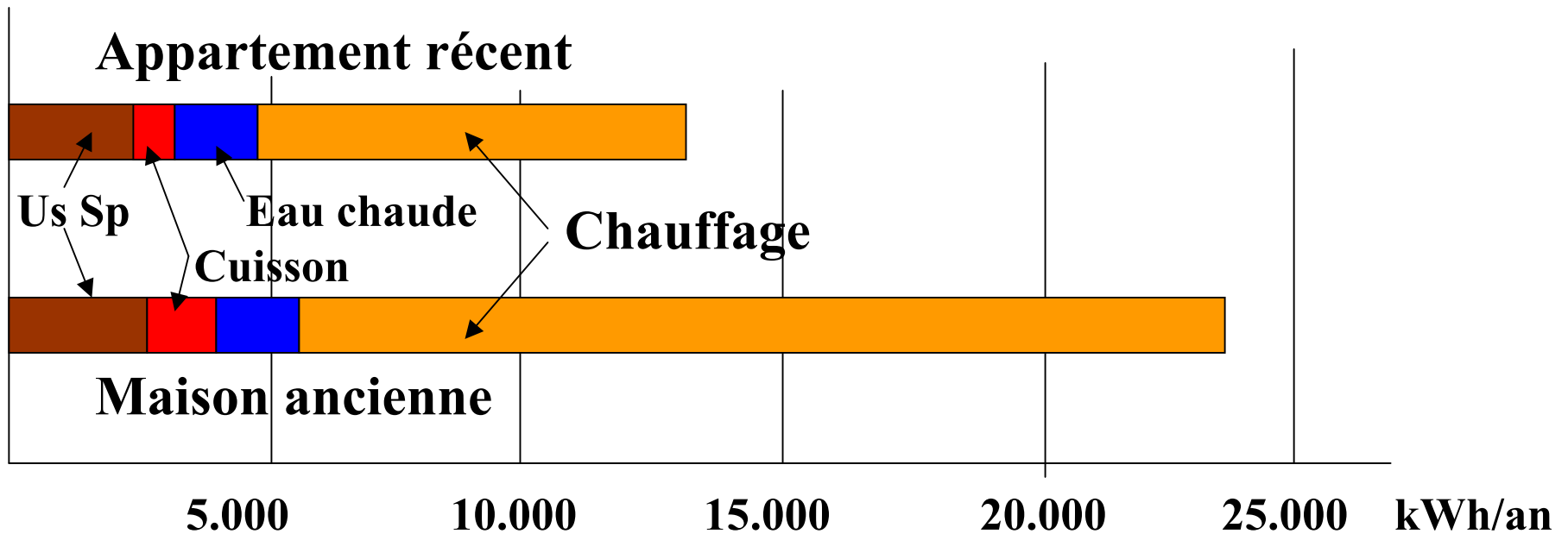


Évolution (continuité)  
Injection directe et HP  
Distribution variable  
Downsizing  
Hybridation  
Électrique 100 %  
Hydrogène et PAC  
Carburants alternatifs

# RESIDENTIEL – TERTIAIRE

46 % Cons totale

Chauffage eau chaude 72 % Autres 28 %





# Energies renouvelables



# LES RENOUVELABLES en 2004

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

## LES ANCIENS

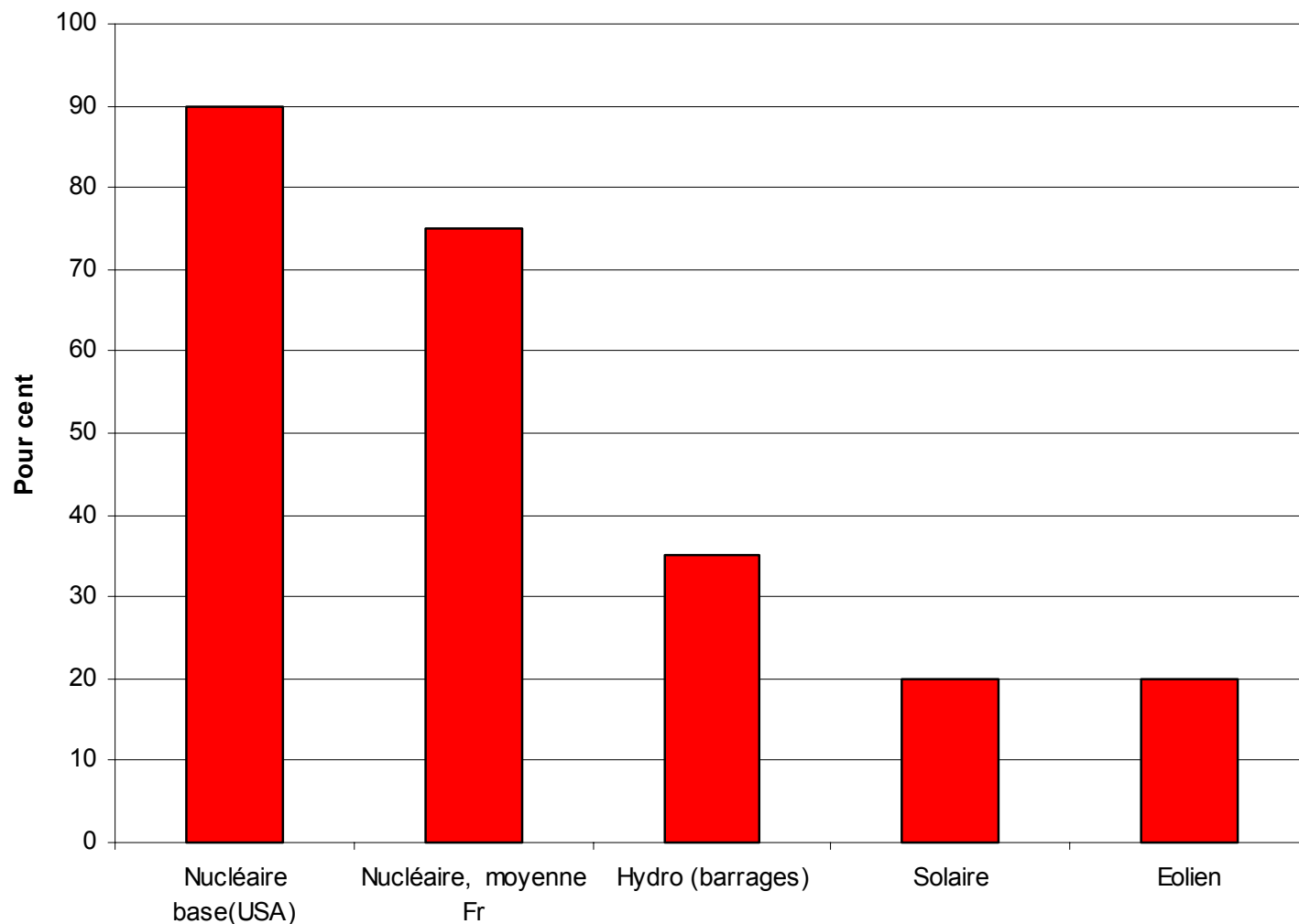
<b>Hydraulique</b>	<b>70 TWh</b>	<b>( 15 ou 6 Mtep !)</b>	<b>stabilisation</b>
<b>Forêt, bois</b>	<b>9 Mtep</b>		<b>croissance</b>

## LES NOUVEAUX

<b>Éolien</b>	<b>0.6 TWh</b>		<b>forte croissance</b>
<b>Solaire</b>	<b>0.03 Mtep</b>	<b>et 0.027 TWh</b>	<b>forte croissance</b>
<b>Biocarburants</b>	<b>0.4 Mtep</b>		<b>forte croissance</b>

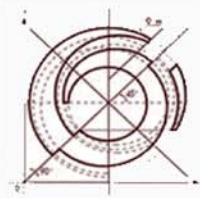
# Disponibilité de la ressource

Taux d'utilisation pour la production d'électricité





# Hydroélectricité



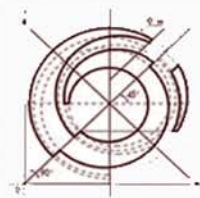
# L'hydraulique: principale energie renouvelable

## 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 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**

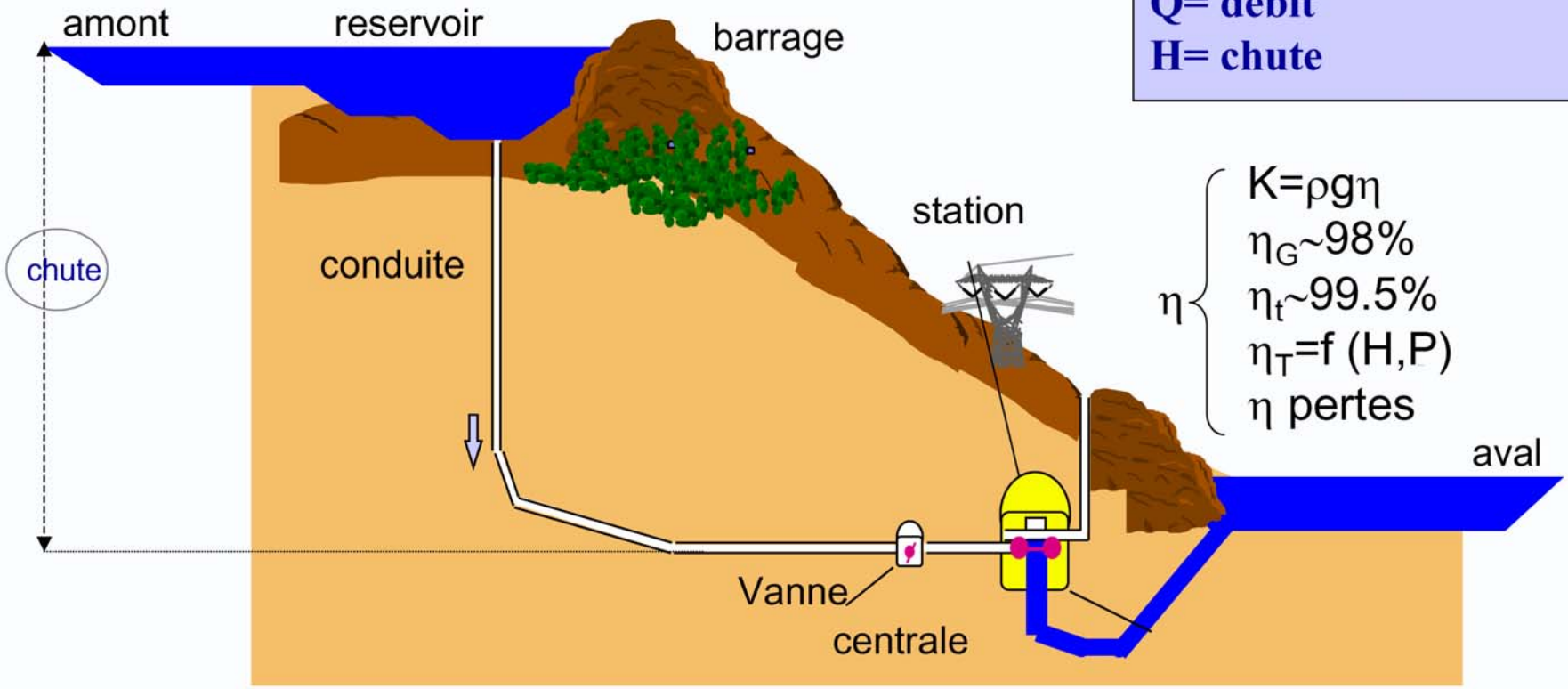


# L'hydraulique: principale energie renouvelable

## Le principe

$$MW = k Q.H$$

Q= débit  
H= chute



$$K = \rho g \eta$$

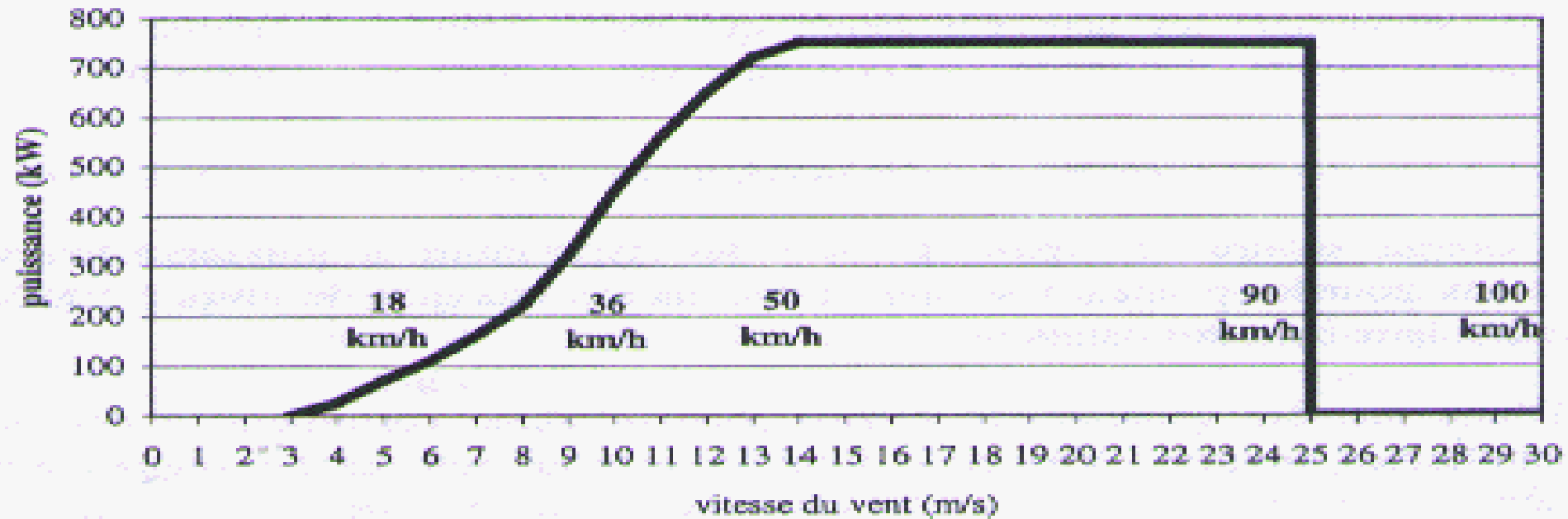
$\eta_G \sim 98\%$   
 $\eta_t \sim 99.5\%$   
 $\eta_T = f(H, P)$   
 $\eta$  pertes





# EOLIEN

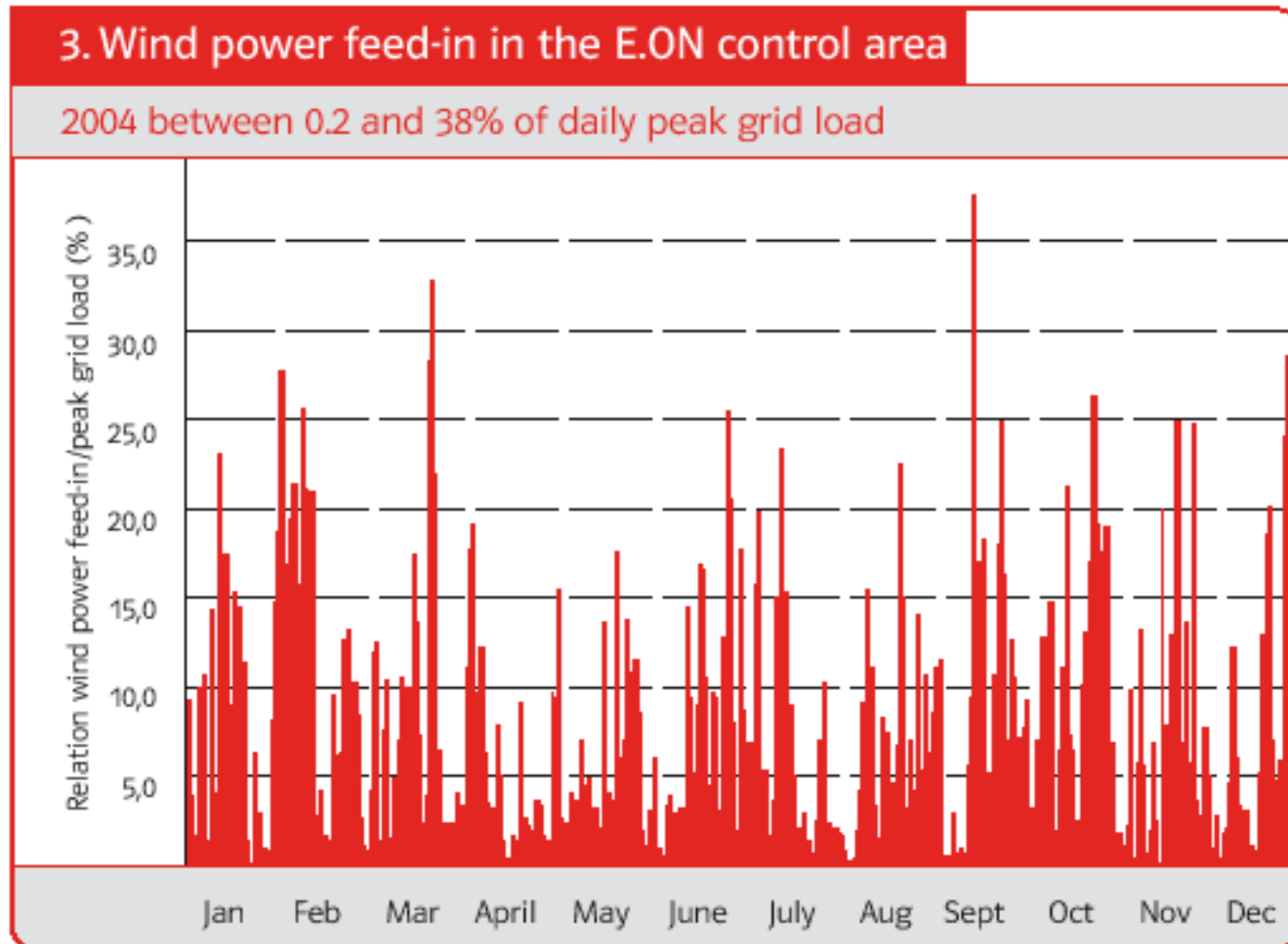
# Rendement



# 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/m<sup>2</sup> (10 fois moins que PV)

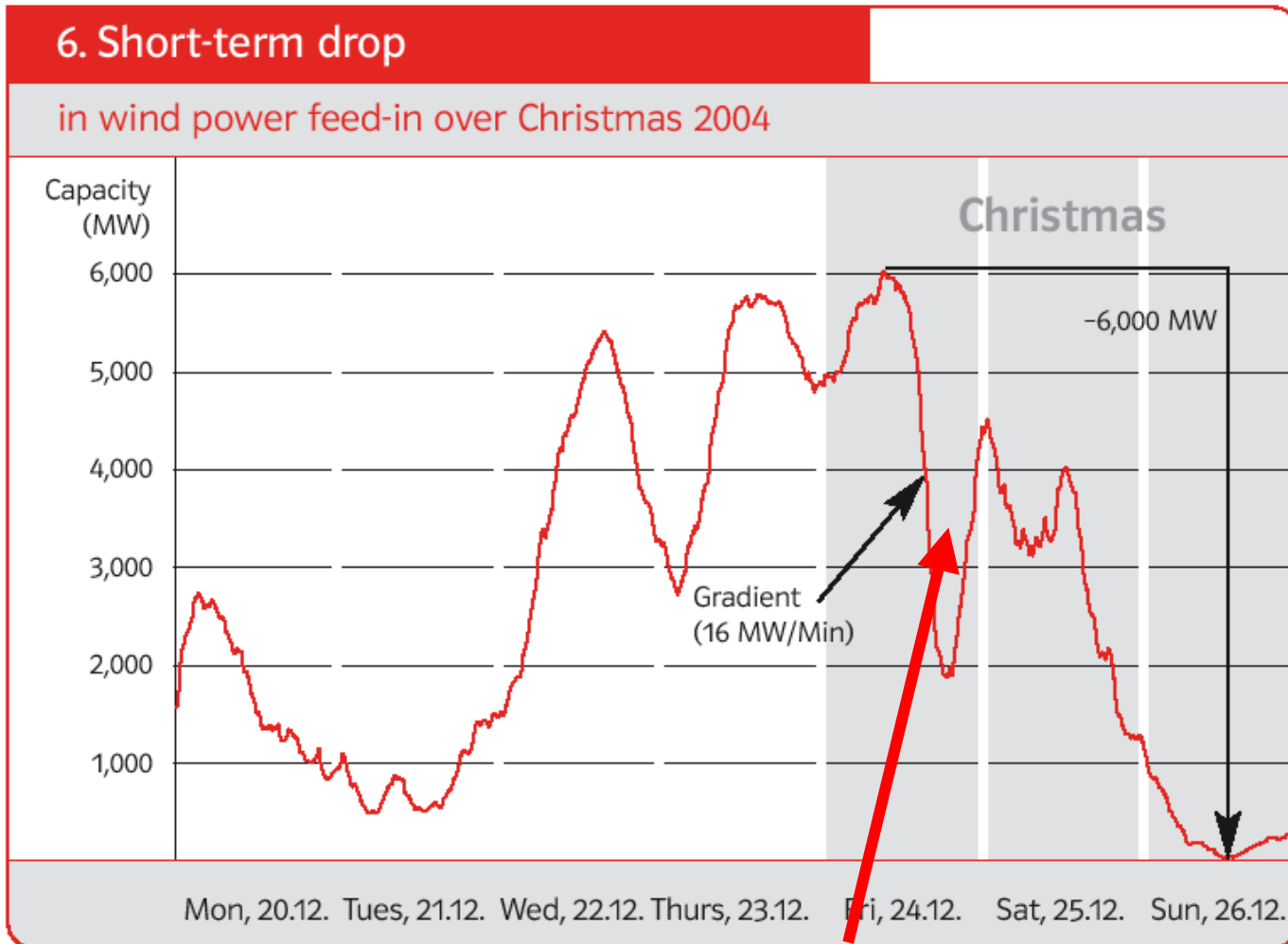
## Puissance éolienne E-ON sur un an (max théorique: 7.558 MW)



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

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

# Puissance éolienne délivrée: détail

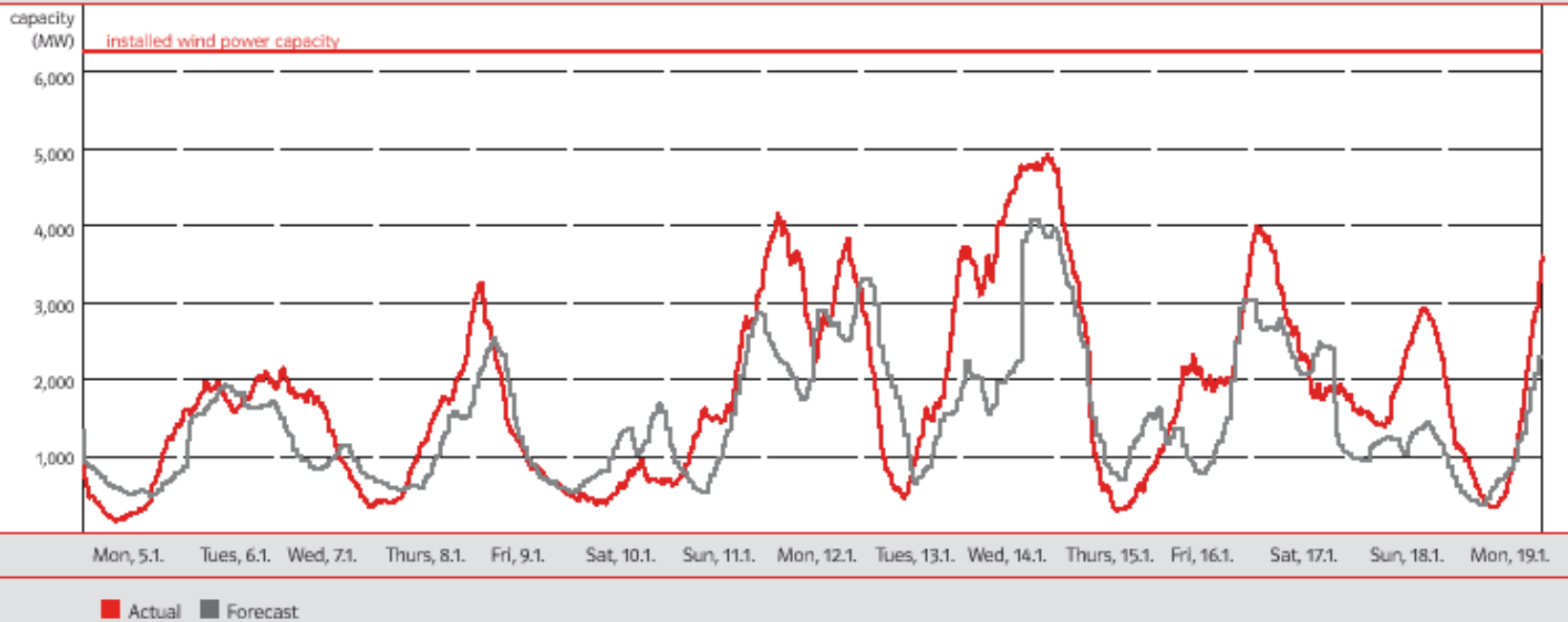


**Pente: 1000 MW/h**

# 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 km<sup>2</sup>.

Surface emblavée en France :

45000 km<sup>2</sup>= 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 km<sup>2</sup>=10 Mtep
  - Mais rejets GES? (prairies, engrais....)

# LA BIOMASSE

## Inventaire du potentiel national

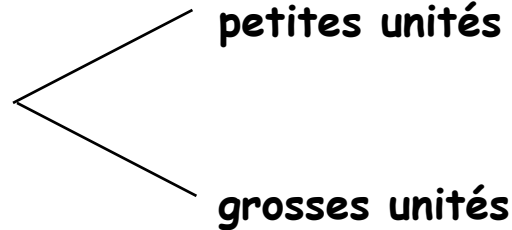
- Selon :
- \* (1) X. DEGLISE, J. LEDE, *Entropie* n° 94 (1980)
  - \* (2) R. DUMON
  - \* (3) *Débat énergie et environnement SOUVIRON* (1994)
  - \* (4) *Rapport CEE* (octobre 1998)
  - \* (5) *Biomasse Normandie* (1994), d'après ministère de l'agriculture, ADEME, AFOCE.

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

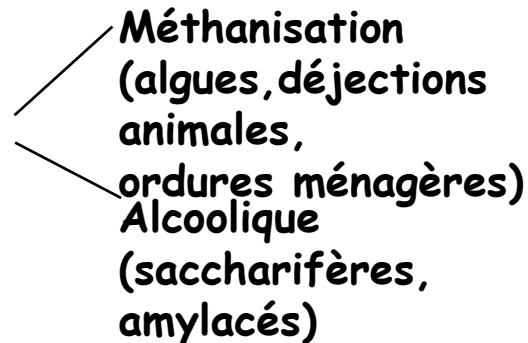
## • COMBUSTION



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% CH<sub>4</sub>  
30 à 40% CO<sub>2</sub>

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 m<sup>3</sup> d'eau pour produire 1 tep (céréales, oléagineux, betteraves)

En doublant le sur-pompage actuel (160 milliards m<sup>3</sup>) 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...)

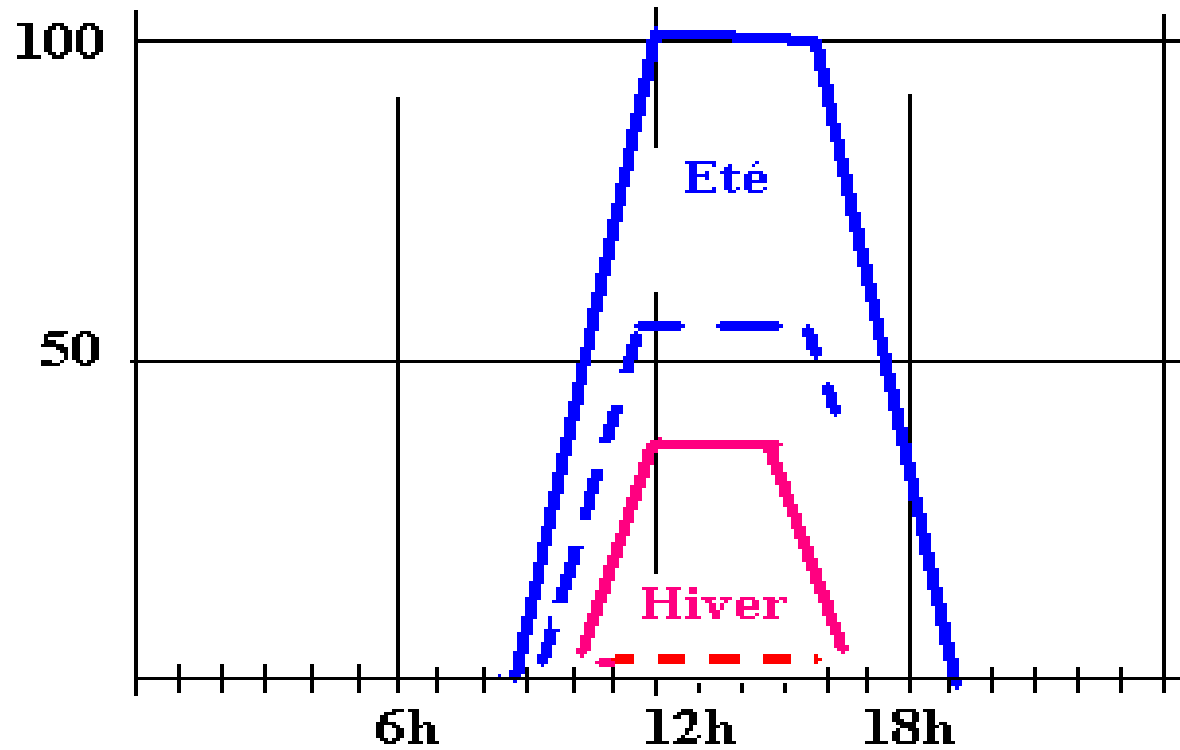




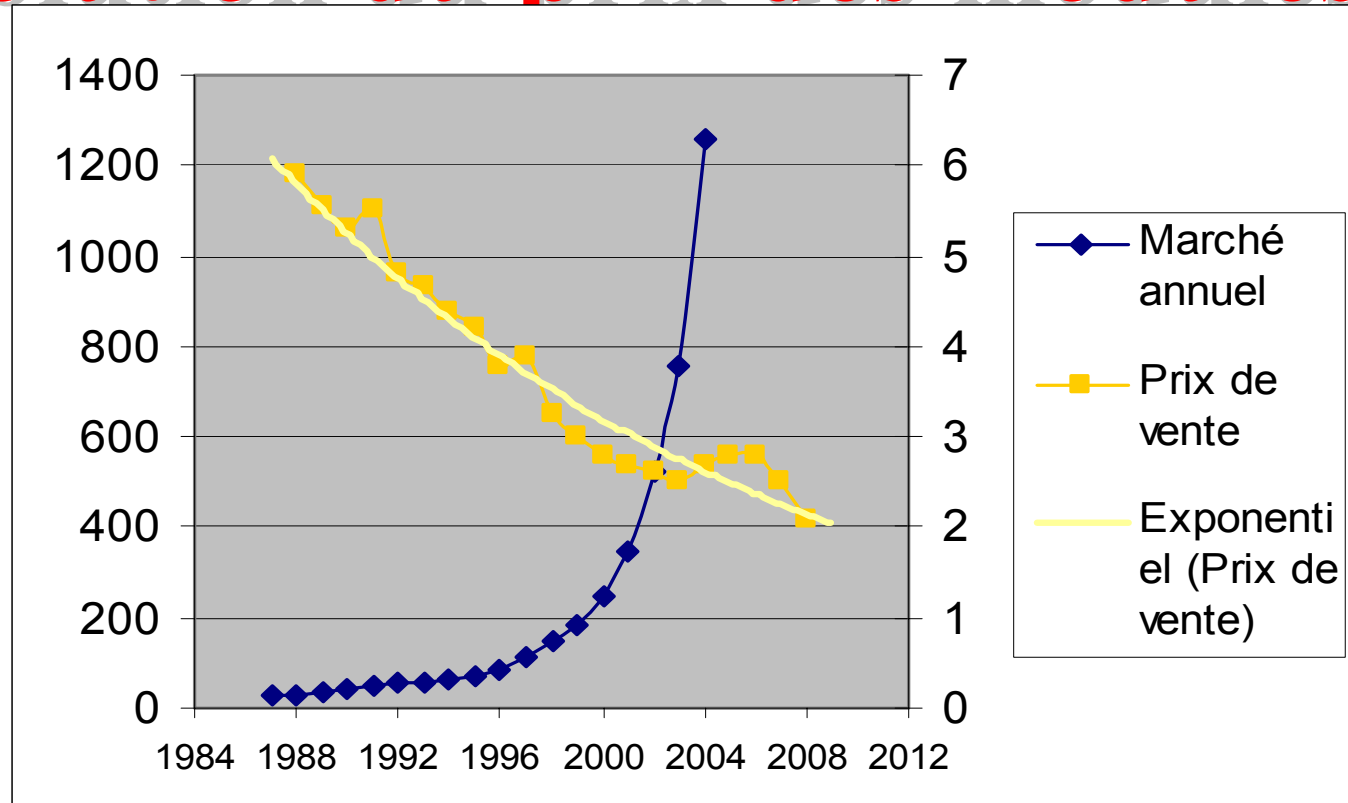
Solaire

- Puissance du rayonnement solaire perpendiculaire aux rayons :  
1 kW/ m<sup>2</sup>.
- Utilisable (Var) :  
1800 kwh/m<sup>2</sup>/an
- rendement photovoltaïque de 15% :  
270 kwh/m<sup>2</sup>
- Chauffage solaire:  
500 Kwh/m<sup>2</sup>

# 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 $\rho$ 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

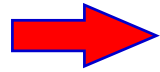
- Imbattable en terrain vierge pour  $< 2$  kW
- Imbattable pour usagers  $< 10$  kWh/mois
- Sans concurrence pour 1/3 de l'humanité
- Cher, mais sans inconvénients ni limites
- Croissance rapide (30%/an) mais artificielle.
- Handicap : stockage

⇒ Sur réseau : sera un jour le toit standard ?

⇒ En PED : sera l'énergie standard ?

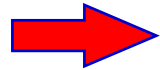
# Le solaire thermique

*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 m<sup>2</sup> de capteurs pour produire l'eau chaude sanitaire d'une famille de 4 personnes





# Cas pratique: PV

- PV 15m<sup>2</sup>, 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**
- **CO<sub>2</sub> évité <88,2 kg/an >-113 kG/an**

# Cas pratique: solaire thermique

- Maison 120 m<sup>2</sup> sur 2 étages
- Besoin total ECS+chauffage=25500 kWh
- Capteur: 12 m<sup>2</sup>
- Prix: 1150 €/m<sup>2</sup> 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**
- CO<sub>2</sub> évite: gaz 1,4 tonnes fioul: 2,1 tonnes
- Coût CO<sub>2</sub> 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**

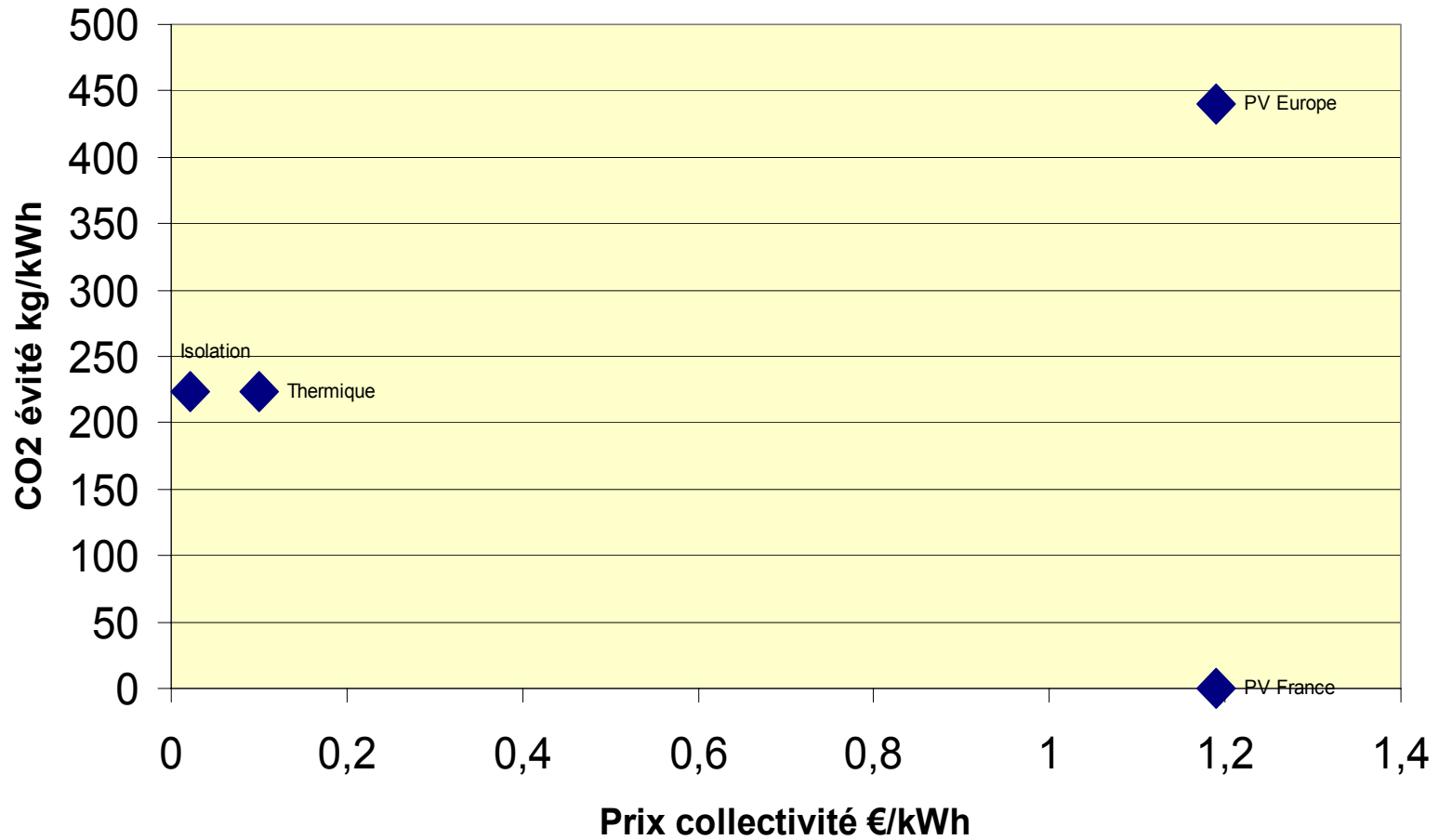
# Electricité effaçable

- 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







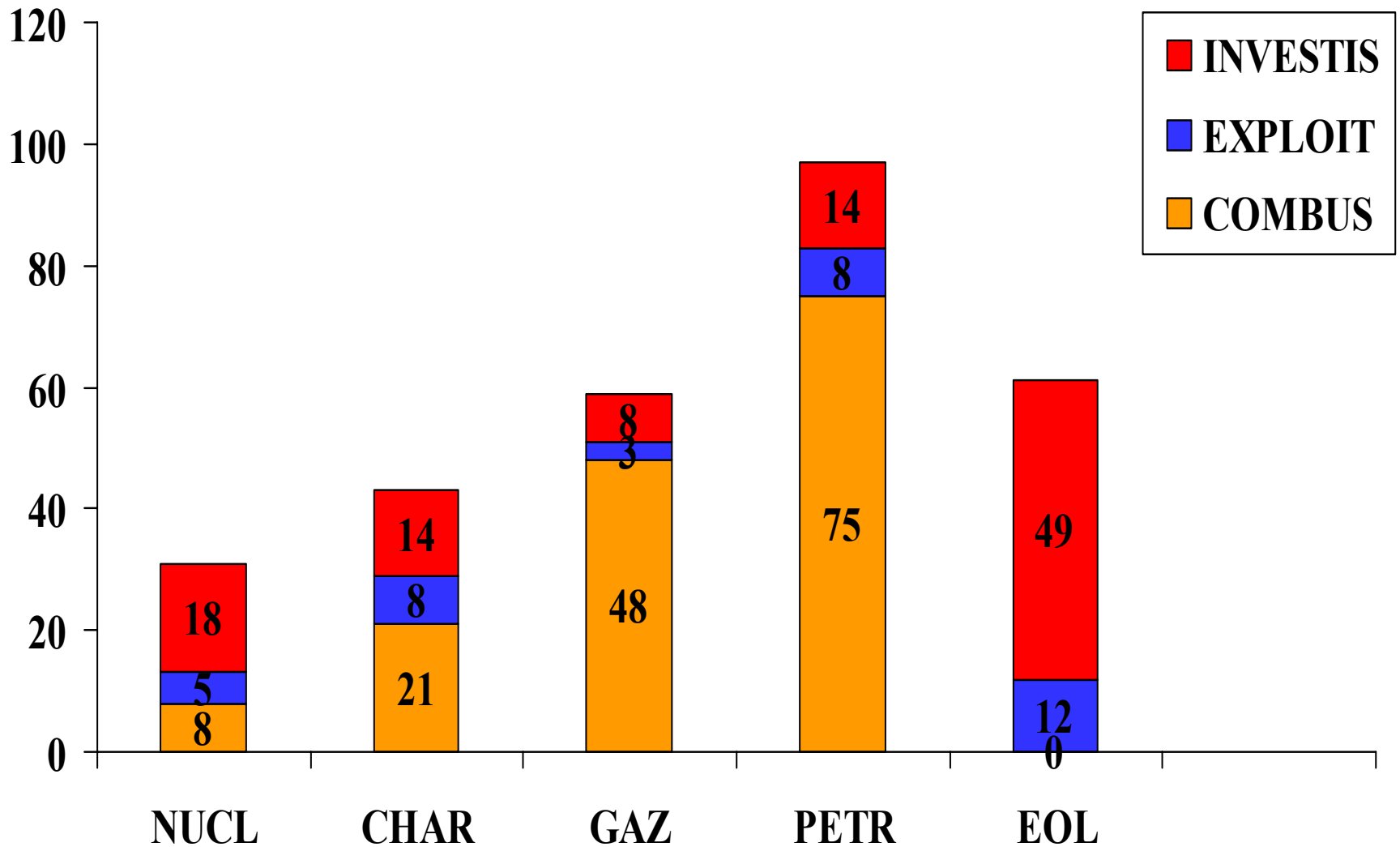
# Coûts

# Investissements

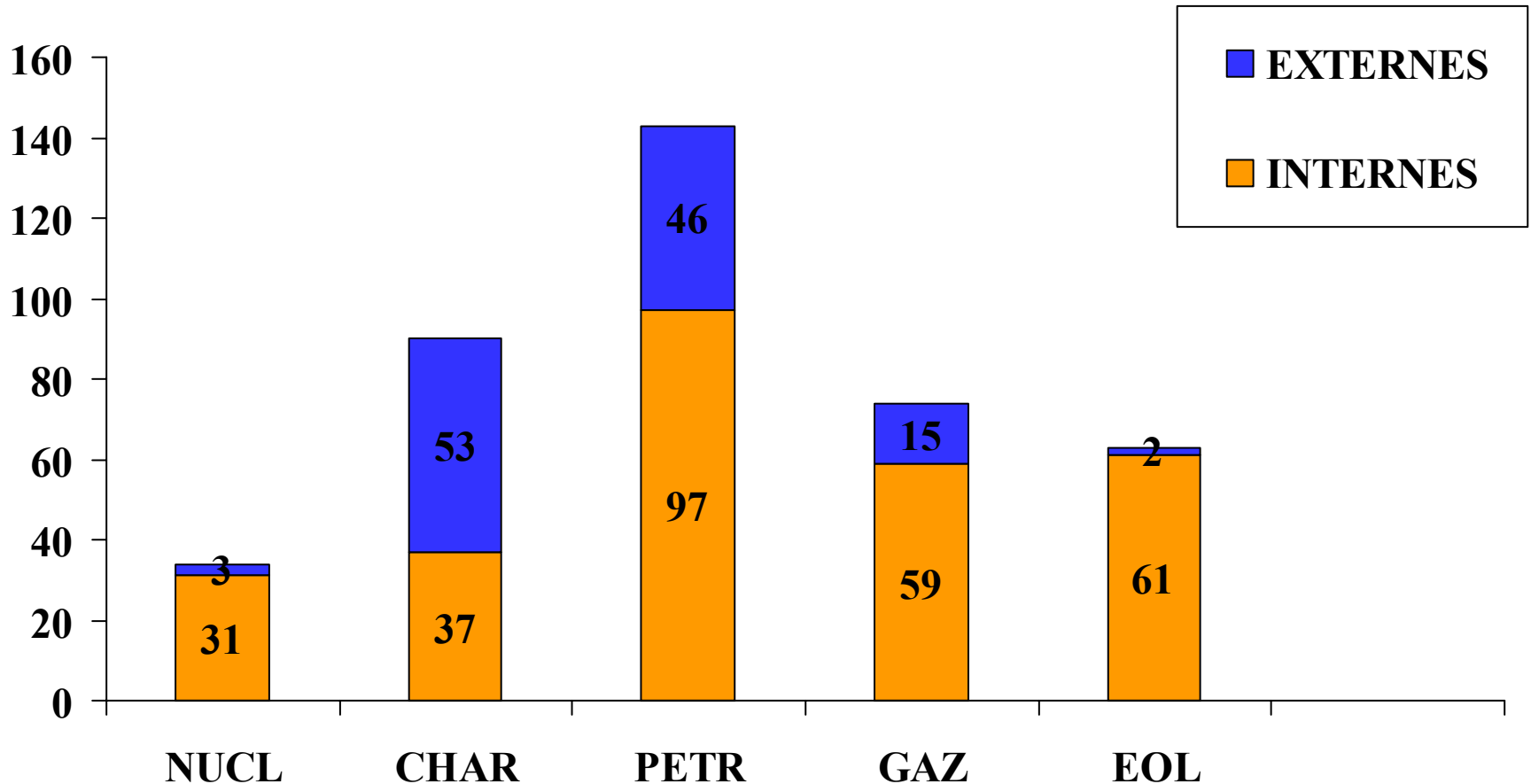
Production de 7 Twh/an (un réacteur de 1 Gwe

- 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

<b>A ce jour</b>	<b>29 Mtep (12 %)</b>	<b>Obj. 2050 x 2 à 3</b>
◆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

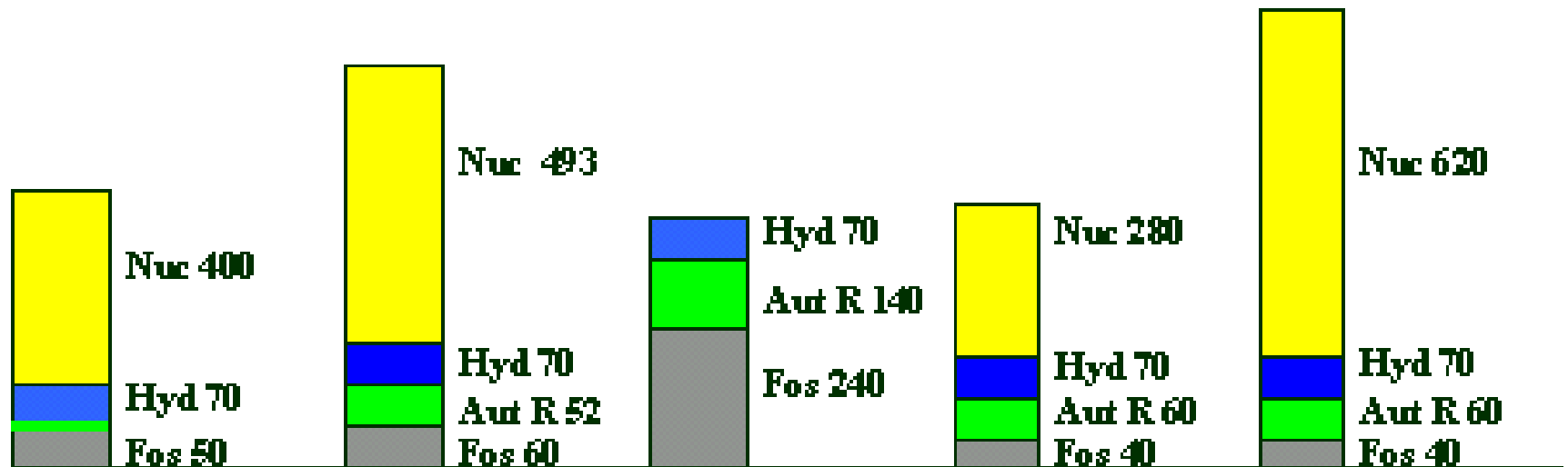
Auj: 525 TWh  
(exp 75)

B: 675 TWh

Cs: 450 TWh

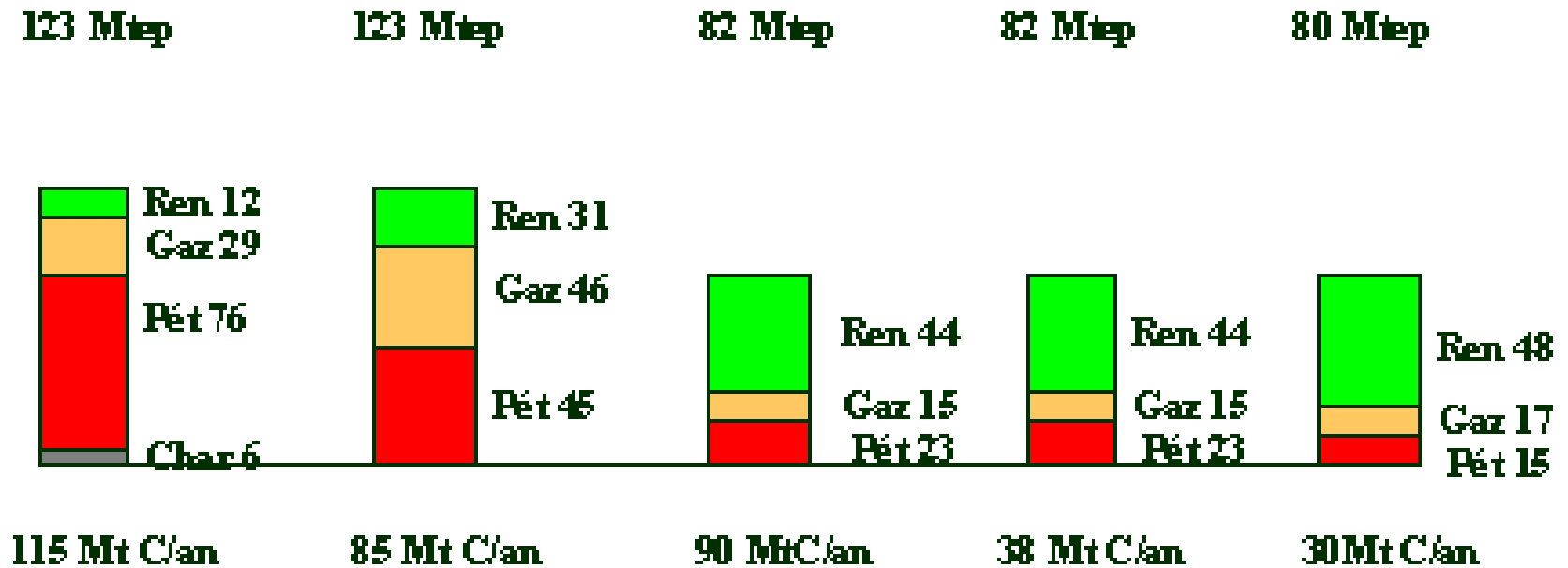
Cn: 450 TWh

F4: 790 TWh

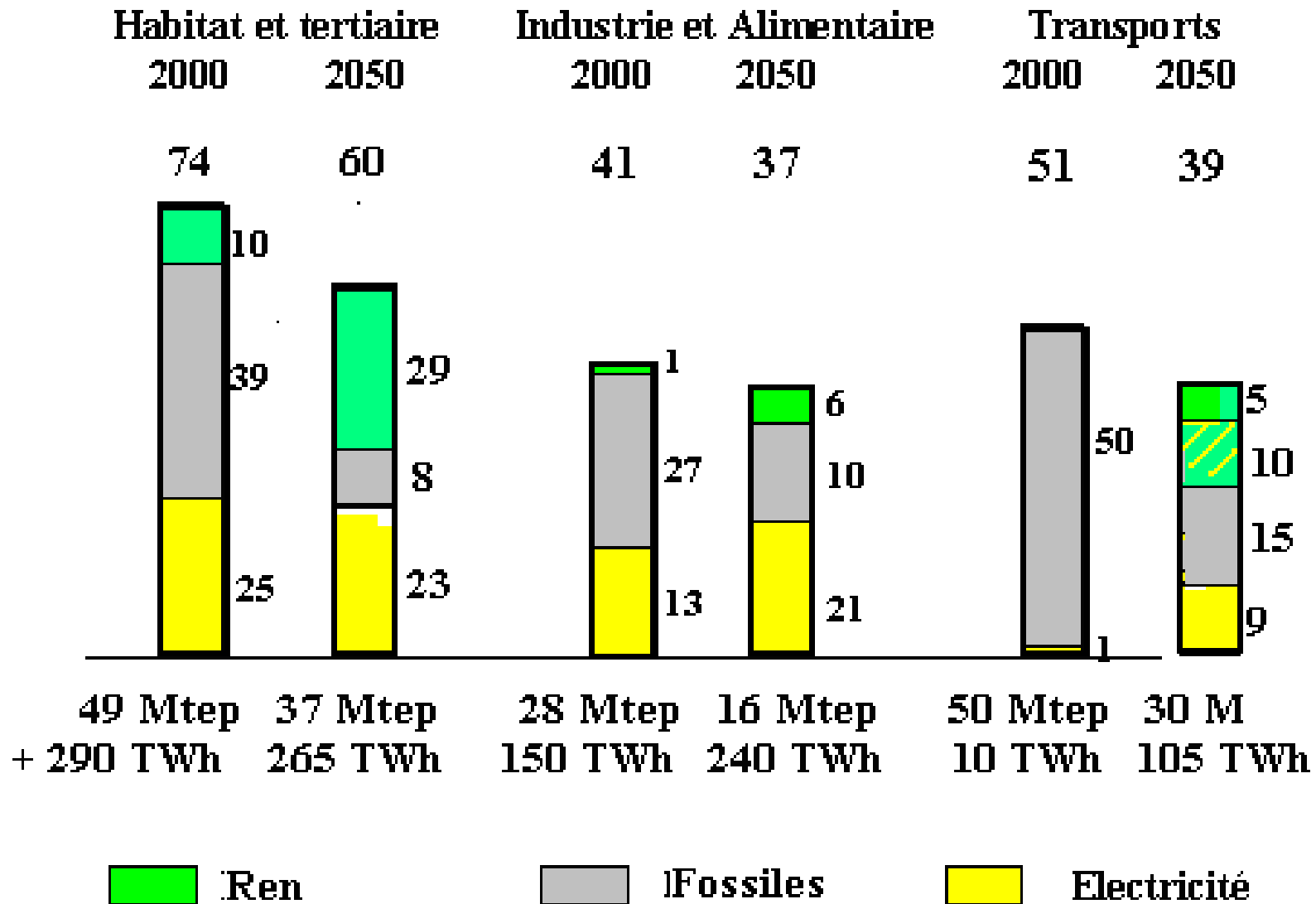




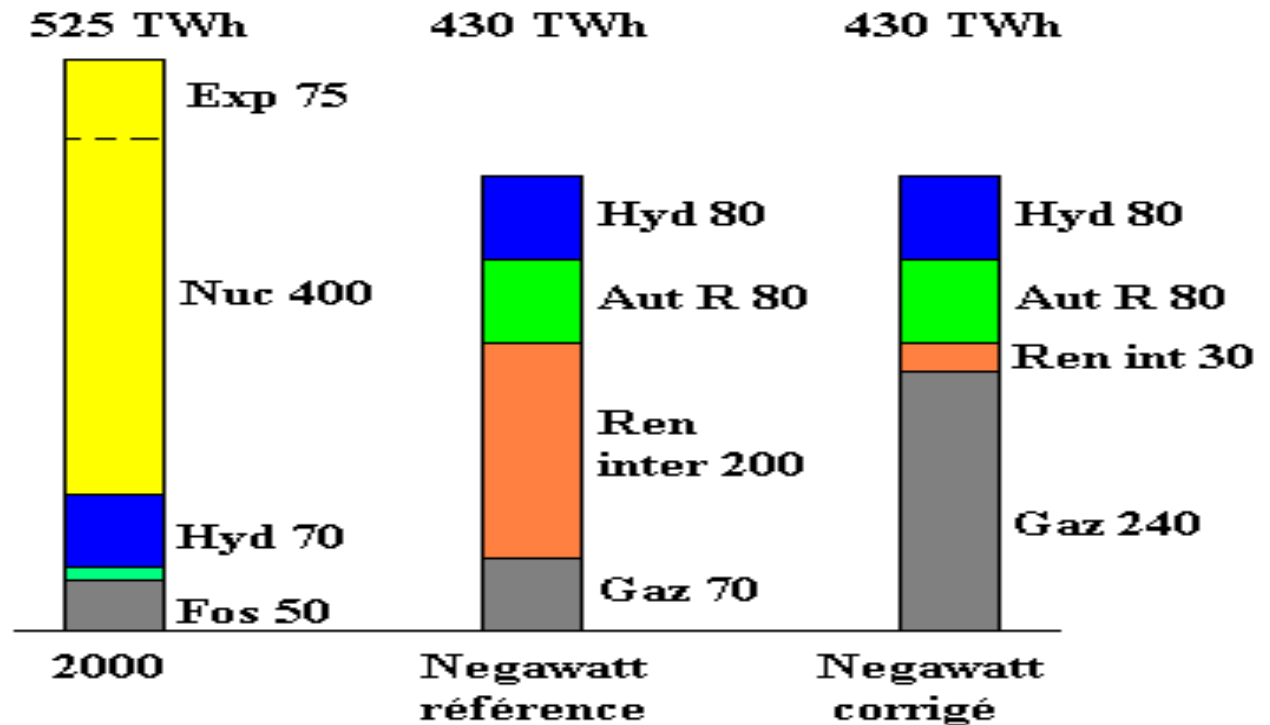
# Chaleur Mobilité



# 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

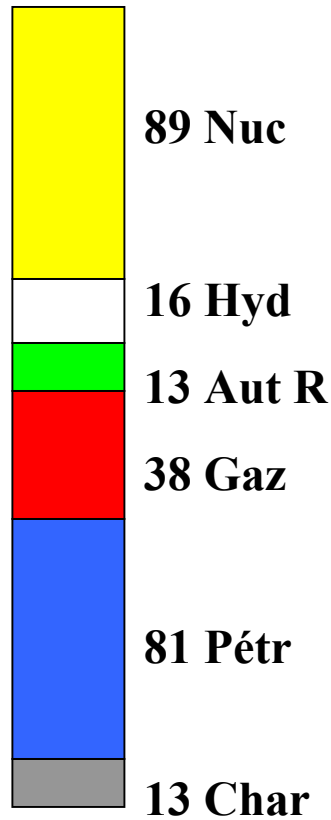
*Tous postes de consommation*  
*total rejets CO2 Mt/an*  
*(soit en C Mt/an)*

407	118	220
110	32	60

# SCENARIO Négatep (Acket, Bacher)

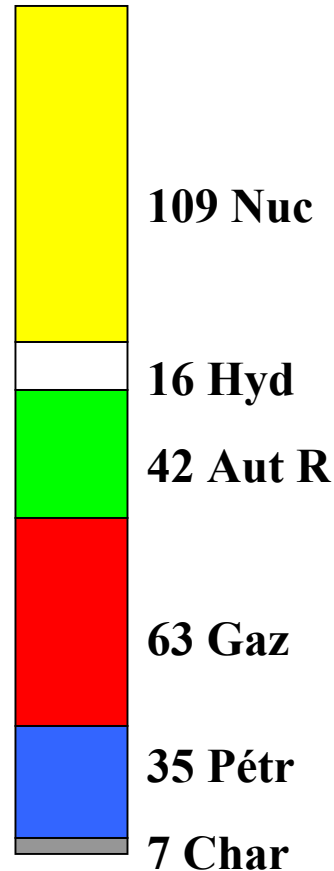
**2000**

**250 Mtep**



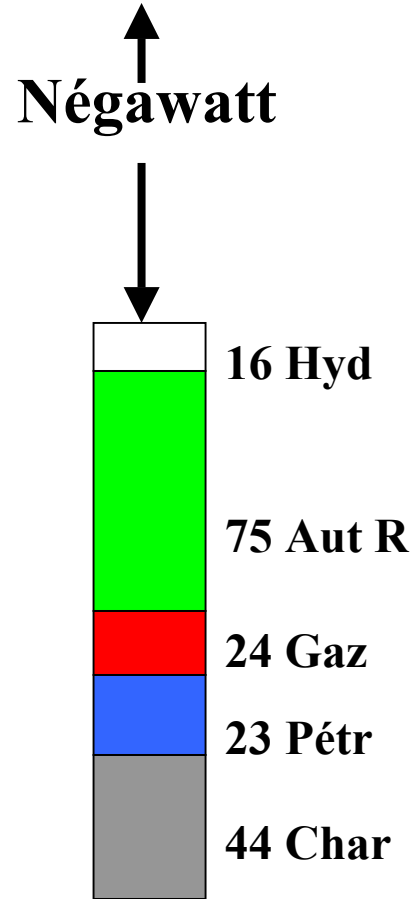
**2050 TB**

**272 Mtep**



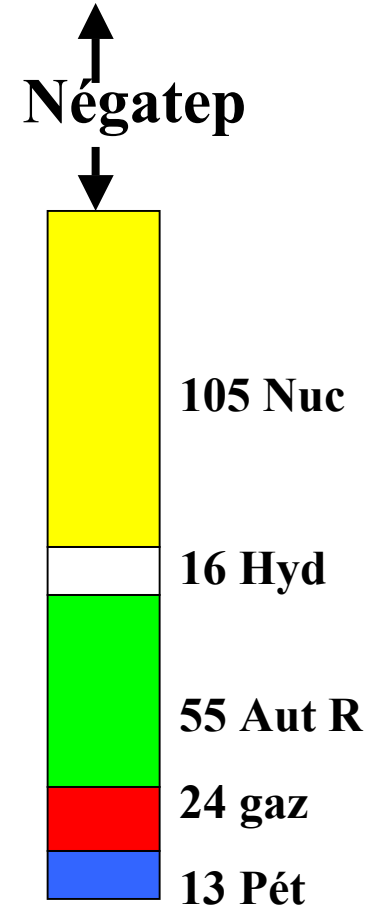
**2050 Sn**

**182 Mtep**



**2050 Sf**

**213 Mtep**



**C: 115 Mt/an**

**85 Mt/an**

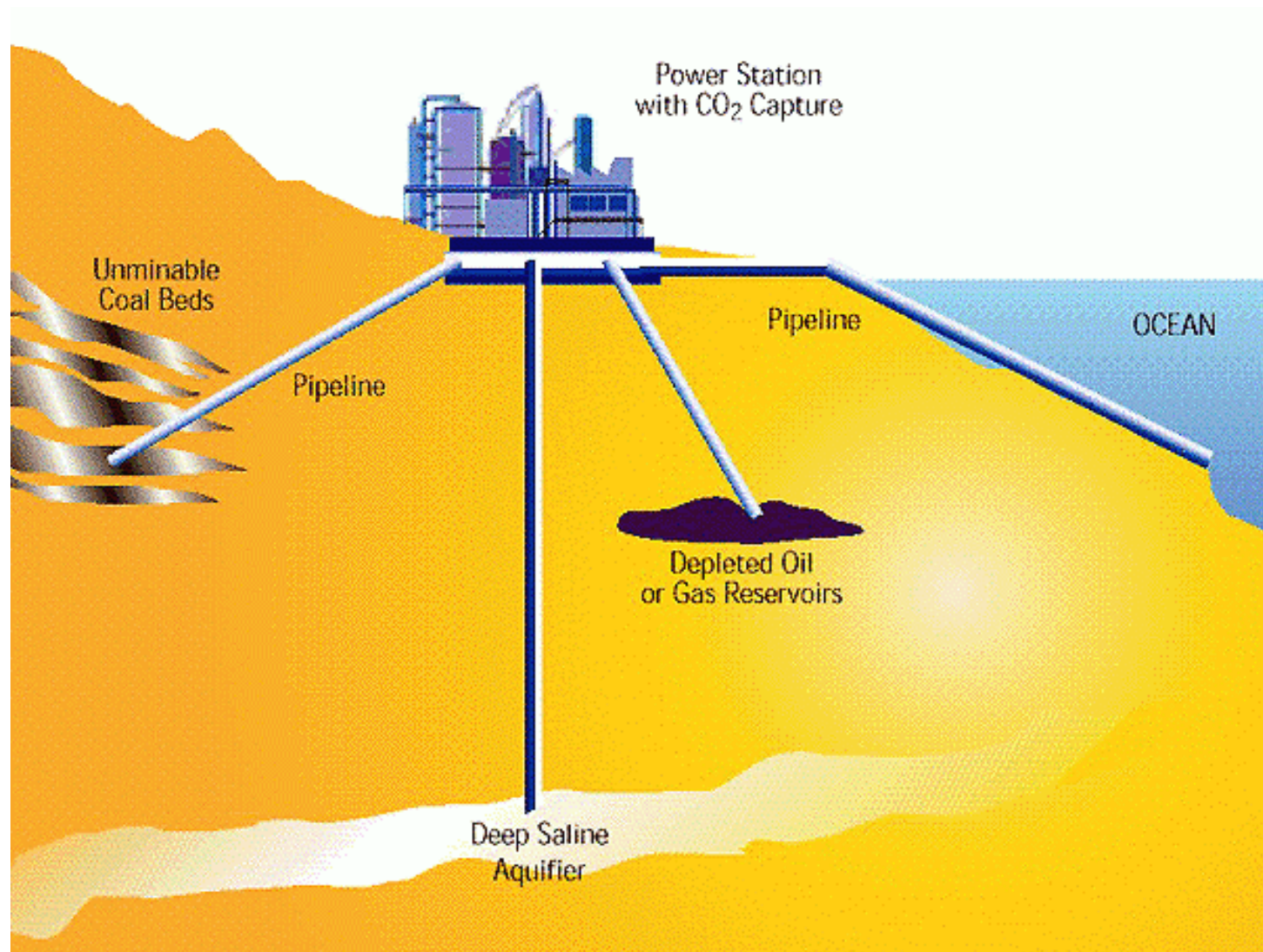
**89 Mt/an**

**29 Mt/an**

FIN



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



# Fossiles sans CO<sub>2</sub>

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



# 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)