

# Les énergies du 21ieme siècle

Bernard Haas

Centre d'Etudes Nucléaires Bordeaux Gradignan

# Les énergies

## Différentes sources d'énergie disponibles dans la nature: énergies primaires

- ✓ charbon, pétrole, gaz
- ✓ noyaux fissiles, fertiles, fusibles
- ✓ bois
- ✓ vent, eau, rayonnement solaire

Energies primaires → énergies finales

calorifique  
mécanique  
électrique

### Unités

- Physique: le **joule**
- Particulier: le **kWh** (1 kWh est la quantité d'énergie nécessaire pour faire fonctionner un appareil d'une puissance de 1 kW pendant 1 heure)  
ex: chaque français consomme en moyenne 7000 kWh/an d'électricité
- Pour comparaison: la **tep** (tonne équivalent pétrole) quantité d'énergie obtenue sous forme de chaleur par la combustion d'une tonne de pétrole  
1 tep=11600 kWh

# Equivalences de différentes énergies primaires



1 tonne de pétrole



1,7 tonnes de charbon



3,3 tonnes de bois



0,5 gramme de matière fissile

# Les énergies du 21ème siècle

## L'énergie

- ✓ Un besoin vital
- ✓ Une question de société
  - Choix nécessaires entre divers modes de production
    - Compte tenu des avantages
    - Compte tenu des inconvénients

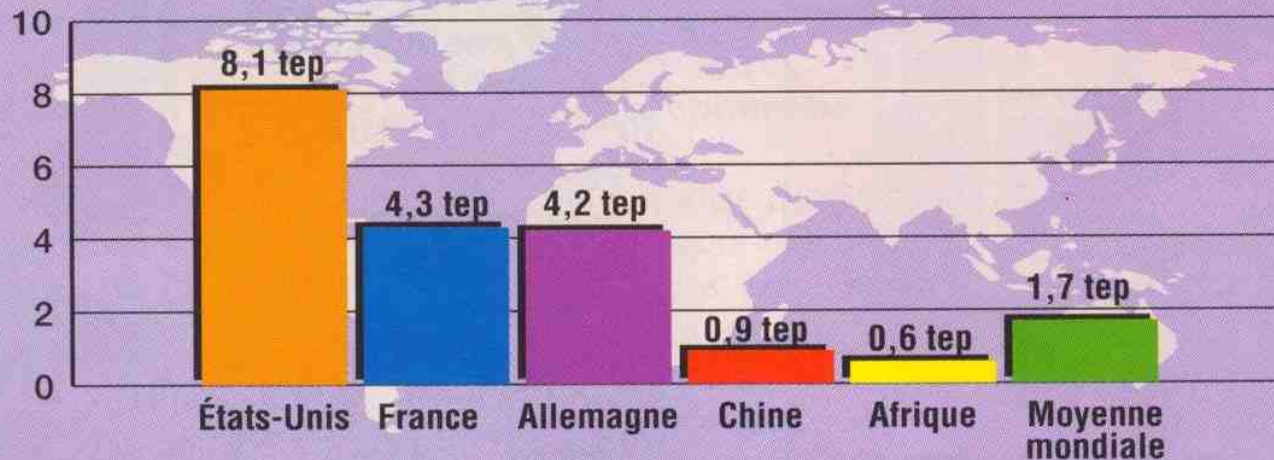
## La recherche peut-elle permettre ?

- ✓ De réduire les inconvénients
- ✓ De proposer de meilleures solutions

Consommation d'énergie de l'humanité:  
environ 10 milliards de tep (10 Gtep)  
1Gtep=1 milliard de tep

**Les 29 pays industrialisés membres de l'OCDE consomment 5 100 Mtep par an d'énergie primaire, alors que le reste du monde ne consomme que 4 600 Mtep.**

Consommation moyenne par habitant et par an



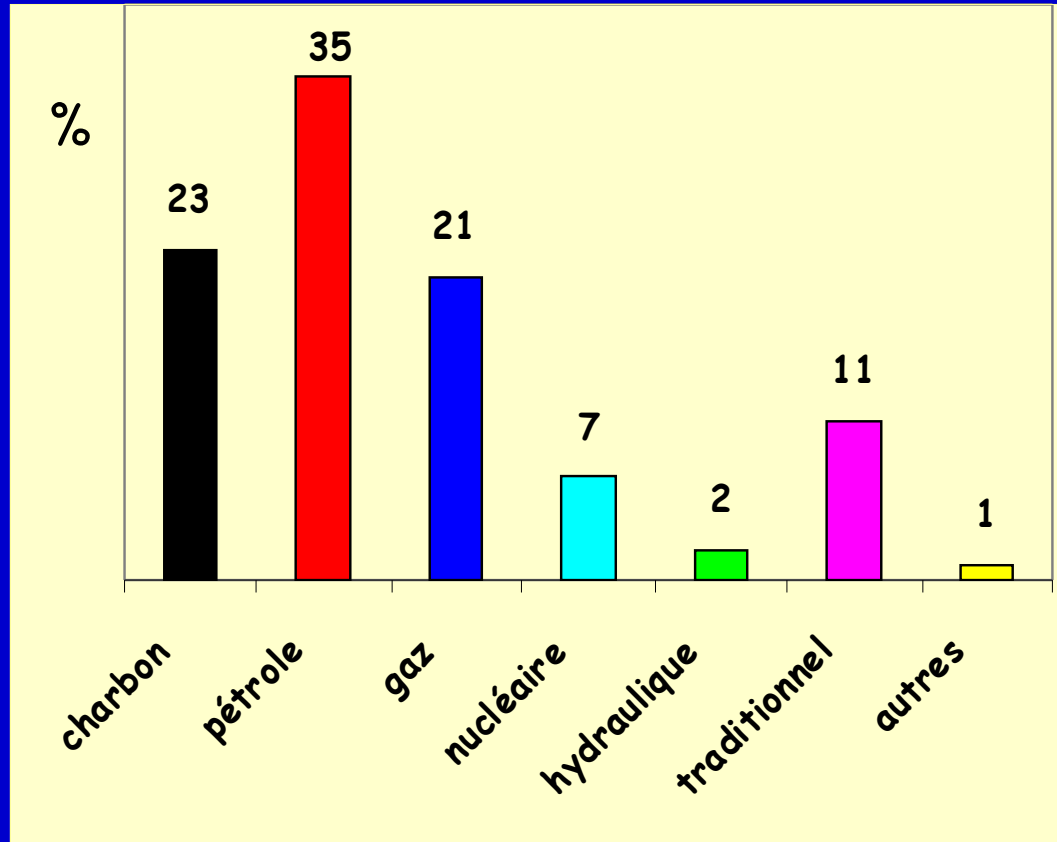
Près de deux milliards de personnes sur Terre, soit un tiers de la population mondiale, n'ont toujours pas accès à une quelconque forme d'énergie autre que la biomasse traditionnelle, essentiellement le bois.

# Consommations énergétiques au niveau mondial et français (2002)

Sources	Monde		France	
	Gtep	%	Mtep	%
Charbon	2,4	23	19	7
Pétrole	3,6	35	100	37
Gaz	2,2	21	38	14
Hydraulique	0,2	2	16	6
Traditionnel	1,1	11	8	3
Nucléaire	0,7	7	87	32
Renouvelables	0,05	0,5	2	1
<b>Total</b>	<b>10,2</b>		<b>270</b>	

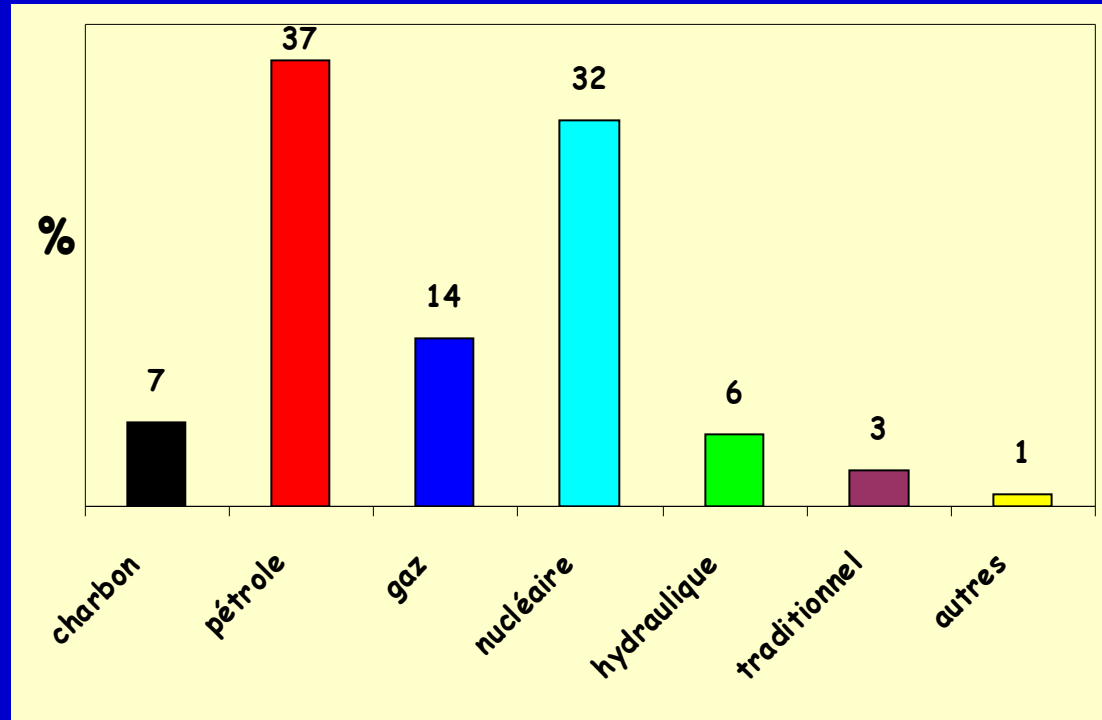
Gtep = 1 milliard de tep  
Mtep = 1 million de tep

## Consommations d'énergies primaires au niveau mondial (2002)



Consommation totale 10 Gtep  
80% d'origine fossile  
87% non renouvelable

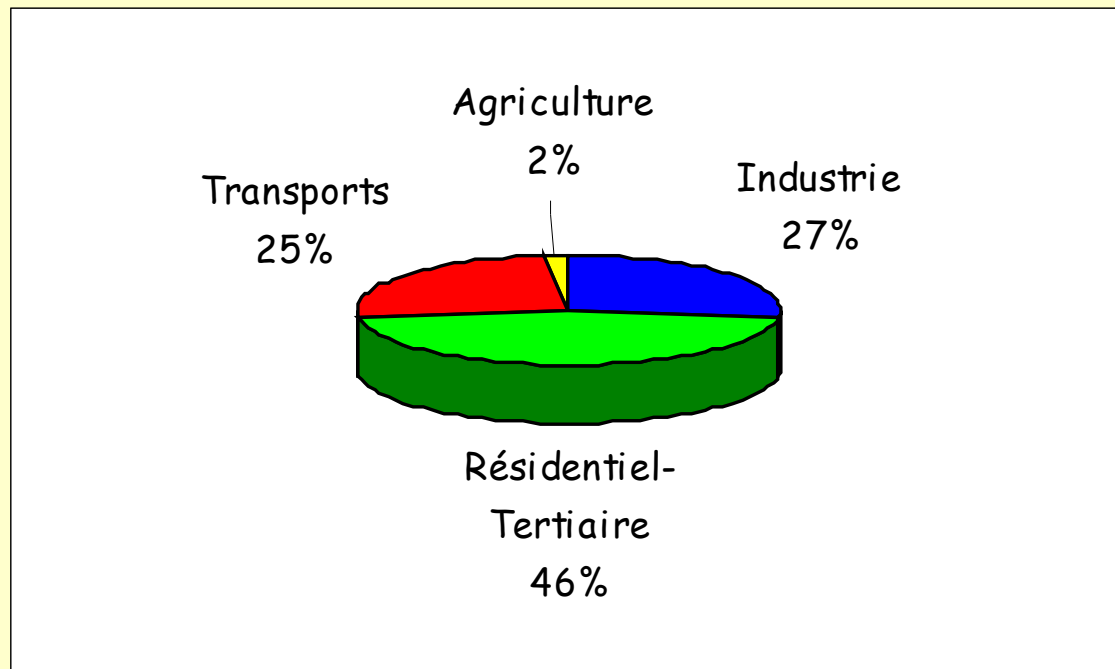
## Consommations d'énergies primaires en France (2002)



Consommation totale 270 Mtep  
58% d'origine fossile

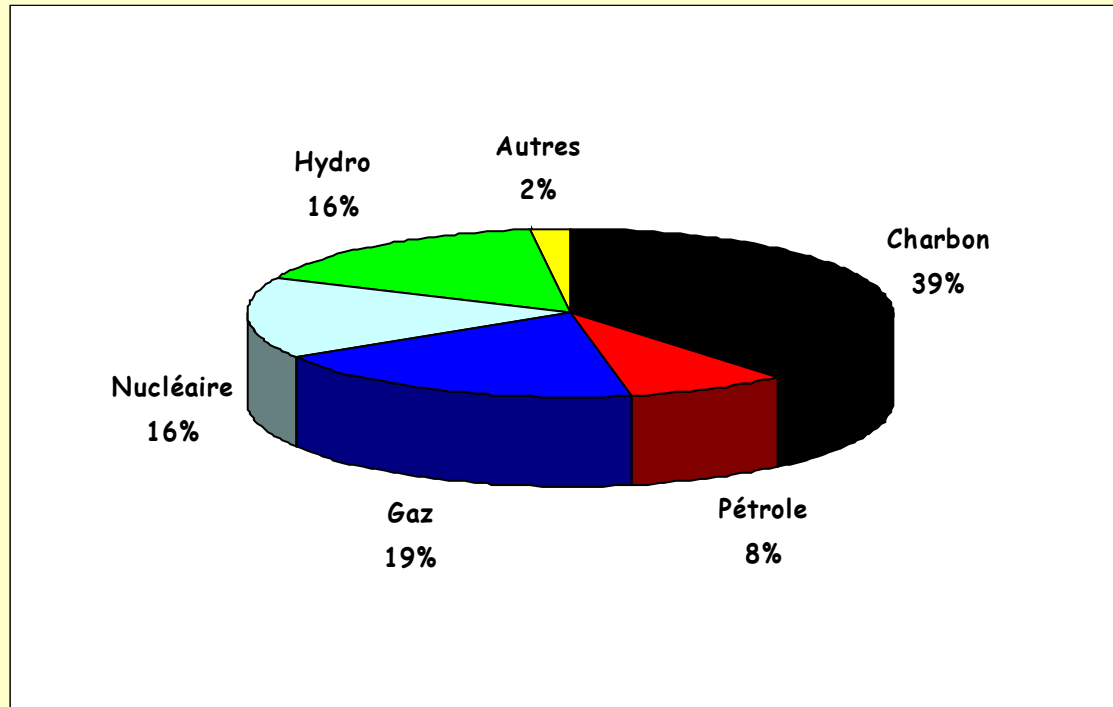


# Consommation d'énergie primaire en France par secteurs d'activité



Consommation globale 270 Mtep dont 40% sont dépensés pour produire de l'électricité

# Bouquet énergétique électrique mondial (2002)

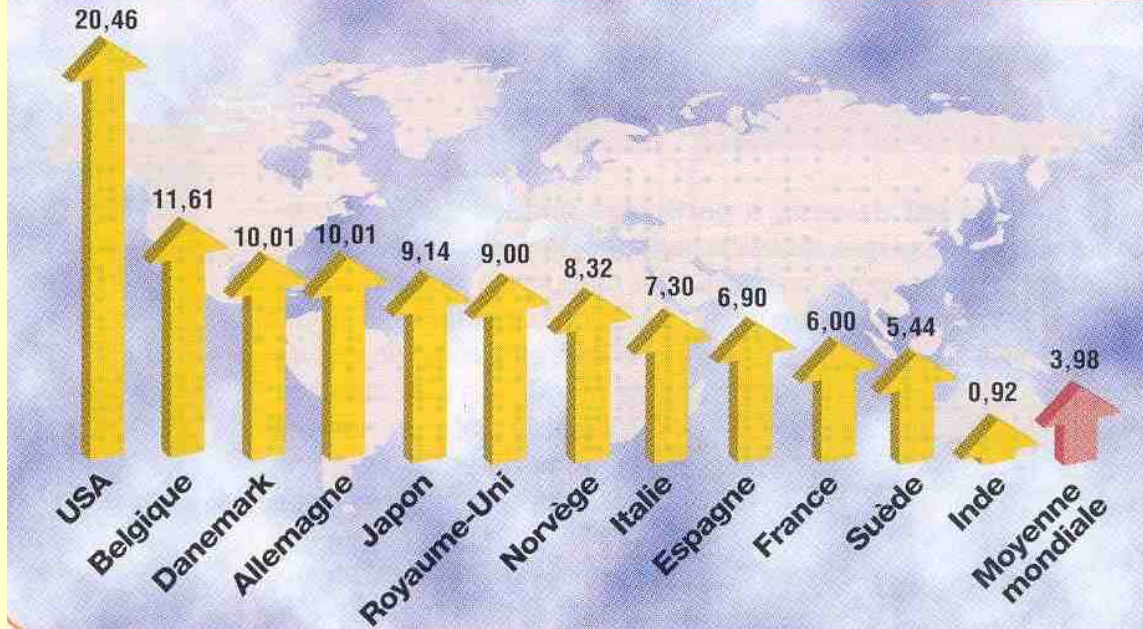


Consommation mondiale annuelle d'électricité : 16050 TWh

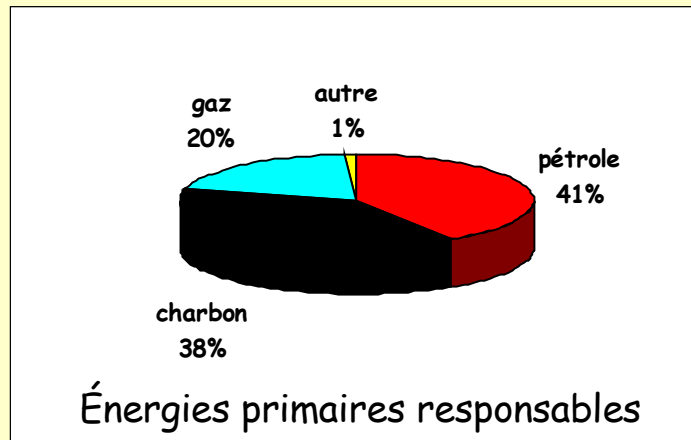
(1 TWh = 1 milliard de kWh).

Ceci correspond à 30% de l'énergie primaire globale consommée 10 Gtep

## Émissions de gaz carbonique dues à l'énergie (en tonnes de CO<sub>2</sub>/habitant, 1999)

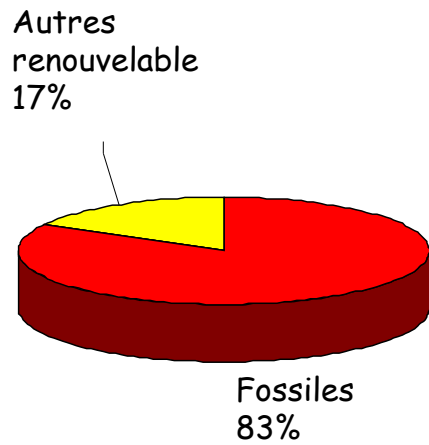


Total de CO<sub>2</sub> émis: 24 milliards de tonnes par an

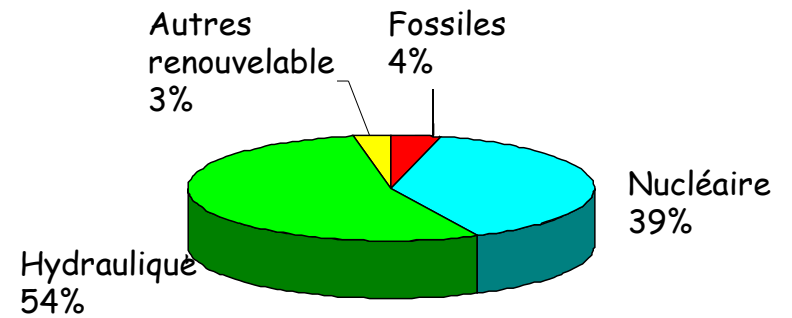


# 2 pays voisins

Danemark

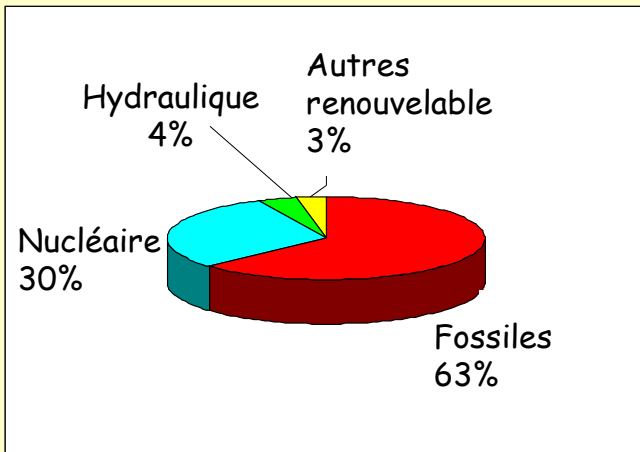


Suède

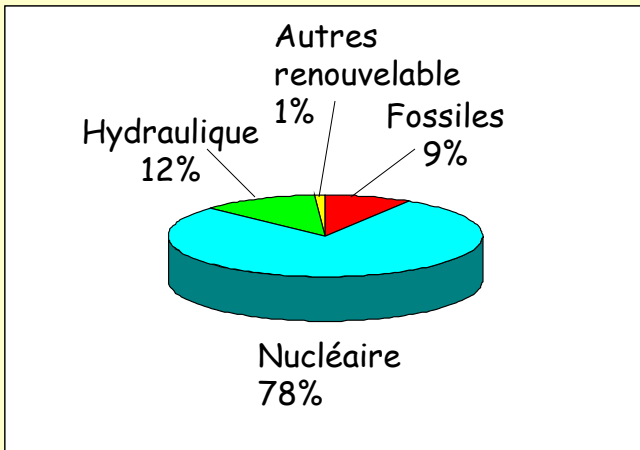
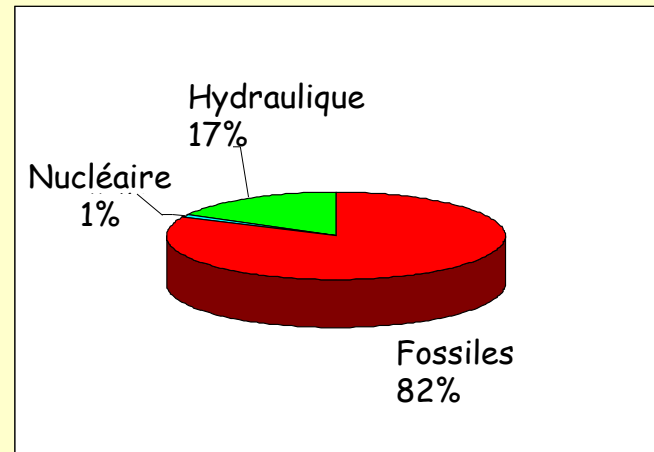


# Charbon >50% au Danemark, Allemagne, Etats-Unis et Chine

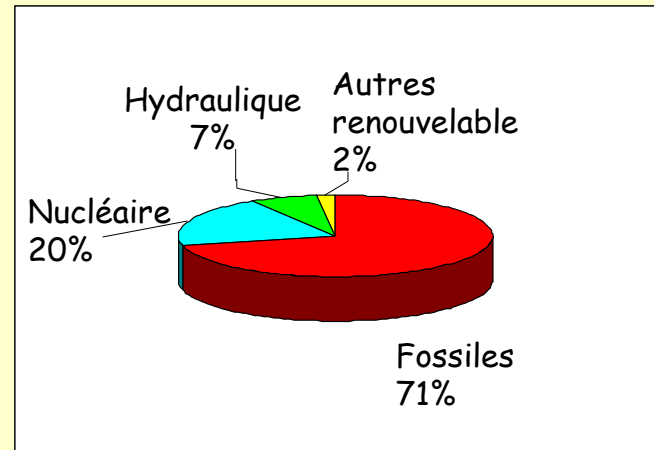
Allemagne



Chine



France

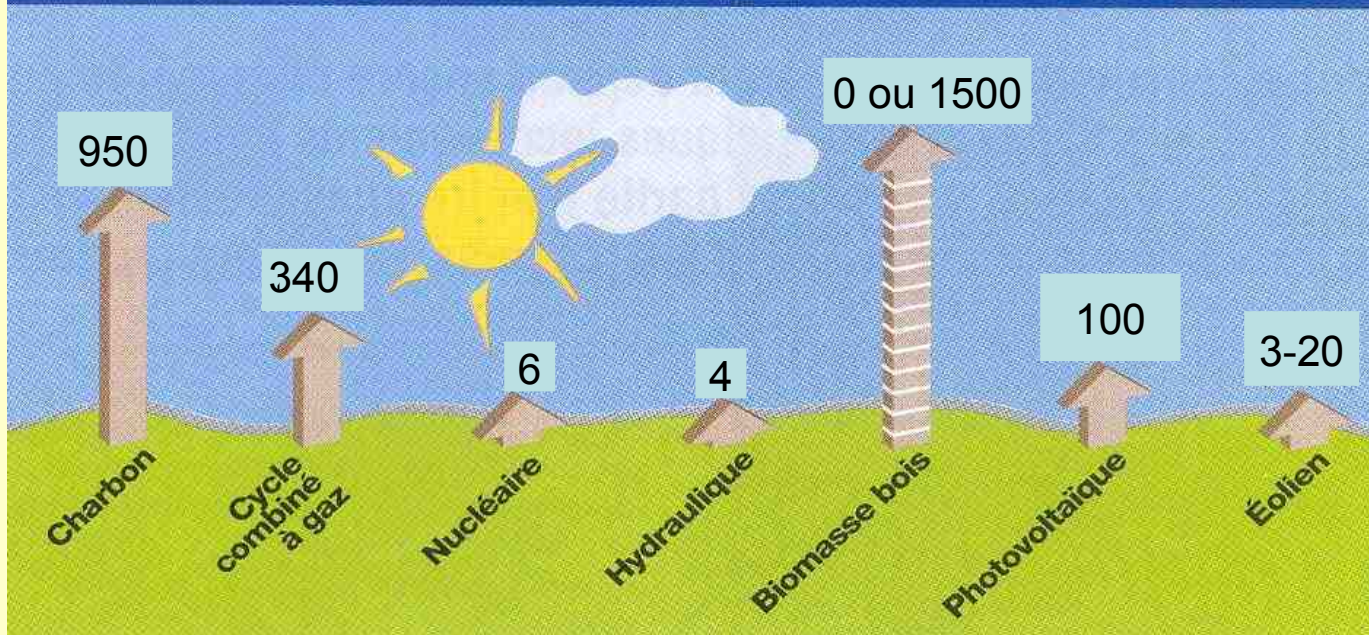


Etats-Unis



# Émissions de CO<sub>2</sub> selon les modes de production de l'électricité

(analyse du cycle de vie\* - en g/kWh)



Autres énergies fossiles

Fioul: 800 g/kWh

Gaz: 570 g/kWh

## Réerves mondiales (2000)

Source	Réerves (Gtep)	Réerves (ans)
Charbon	510	210
Pétrole	165	45
Gaz	140	65
Uranium	80	120

# Demande énergétique au niveau mondial en 2050

- Accroissement de la population mondiale  
6 milliards → ~ 10 milliards
- Pays en émergence Inde, Chine  
Chine 0,9 tep par habitant /an (France 4 tep/an)

⇒ Augmentation de la demande d'un facteur 2-3 !

- Effet de serre → modifications climatiques
- Réserves limitées



# Energies renouvelables

- Ressources inépuisables à notre échelle (soleil, vent) ou ressources renouvelables en un temps court (bois par exemple)

Quelques chiffres sur  
Le solaire  
L'éolien  
L'hydraulique  
La biomasse  
La fusion nucléaire



# Le Solaire



## Energie abondante et inépuisable

- ✓ 178 millions de milliards de Watt arrivent sur terre sur sa face éclairée soit  $350 \text{ W/m}^2$  à l'équateur. (en 12 h l'énergie solaire arrivant sur terre égale la totalité des énergies fossiles connues)

## Utilisation la plus directe: production domestique d'eau chaude et chauffage

- ✓ Gain qui pourrait atteindre 50% avec des panneaux solaires thermiques soit un gain de 10 à 20% de combustibles fossiles



## Production d'électricité

- ✓ Rendement maximum  $\approx 15\%$
- ✓ En France avec une moyenne de 100 à 200  $\text{W/m}^2$  cela conduit à  $\approx 200 \text{ kWh/m}^2$  par an
- ✓ Inconvénient majeur: coût 5 à 10 fois supérieur aux sources conventionnelles
- ✓ Surface de panneaux pour produire l'électricité d'une centrale de 1000 MWe: 50 à 100  $\text{km}^2$



Coût énergétique du panneau: 7 ans  
C'est le temps de restitution de l'énergie consommée lors de sa fabrication. On espère pouvoir le ramener à 3 ans.

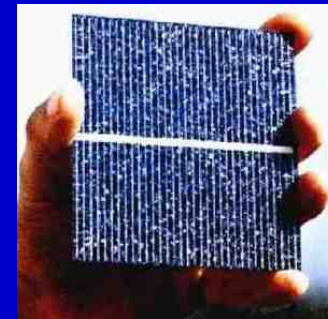
# Le Solaire



Il faudra attendre quelques décennies pour avoir une pénétration du marché de 10 à 20% (actuellement elle est de 0,04%)

En revanche dans des endroits isolés ou dans les pays à faible densité de population où il n'est pas rentable d'établir un réseau, l'énergie solaire est compétitive

Panneau solaire



# L' Eolien

- Puissance crête ~ 1 MW
  - ✓ Temps de fonctionnement ~ 20% → 2 GWh sur l'année
- Equivalence énergétique:
  - ✓ 3500 éoliennes pour une centrale de 1000 MWe
  - ✓ 66 TWh/an sur terre (~33000 éoliennes)
  - ✓ 95 TWh/an au large (~48000 éoliennes)
- Encombrement:
  - ✓ ~ 1000 km pour 7000 éoliennes (en supposant 150 m entre chaque éolienne)
- Inconvénient majeur:
  - ✓ Caractère intermittent et aléatoire du vent qui nécessite d'avoir une production parallèle pour pallier les périodes sans vent



# L'Hydraulique



©RandoAlpes/E. Duillot

- En France la quasi-totalité du potentiel est déjà utilisé ( $\approx 12\%$  de l'électricité)  
Idem dans les pays les plus industrialisés
- Potentiel inexploité:
  - ✓ Asie (27%)
  - ✓ Amérique du sud (24%)
  - ✓ Ex URSS (24%)
- Limitation de l'exploitation due à:
  - ✓ Impact environnemental, écosystèmes locaux
  - ✓ Disparition de la végétation dans la zone inondée
  - ✓ Déplacement des populations (en Chine le barrage des Trois Gorges a entraîné le départ de 1 500 000 habitants)
  - ✓ Risque de rupture du barrage

## Projets

La Chine prévoit d'installer 5 barrages d'ici à 2020 pour atteindre  $\approx 20\%$  de sa production d'électricité

Le conseil mondial de l'énergie ne prévoit pas de déploiement massif dans les décennies à venir ( $< 7\%$  des besoins en énergie primaire)



# La Biomasse

- Bois et différents alcools agricoles



Energie renouvelable seulement si on replante ce que l'on consomme



- Equivalence énergétique
  - ✓ 2500 km<sup>2</sup> de forêt cultivée (1/2 département français) pour une centrale de 1000 MWe
  - ✓ Actuellement le bois représente 1 GTep/an soit 10% de la consommation énergétique mondiale

## Projets

Extraire de la biomasse

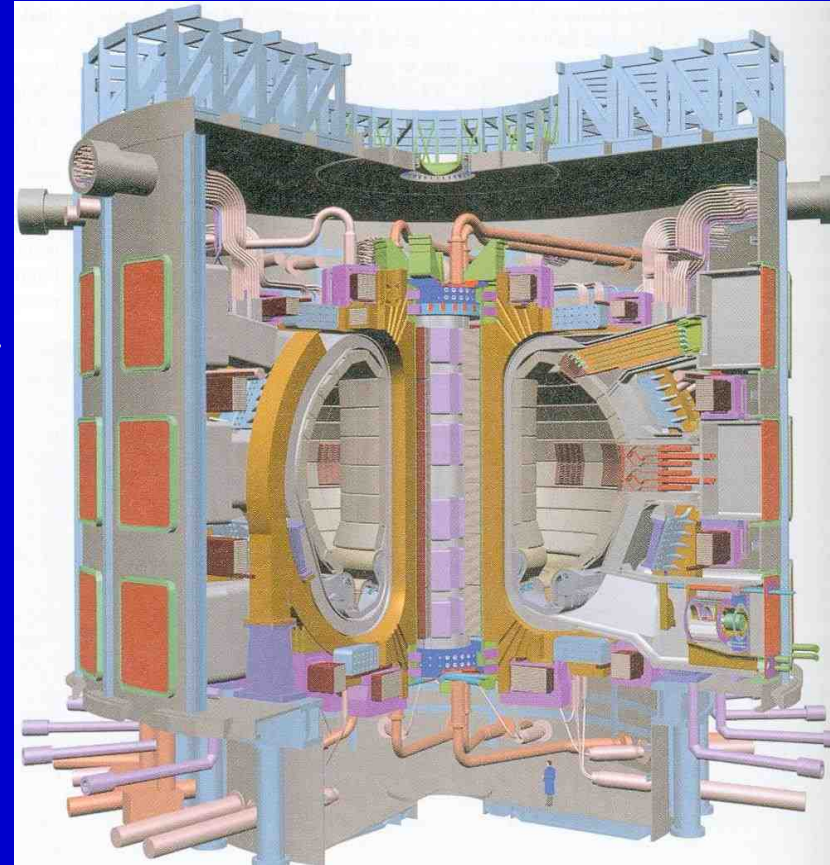
- du gaz (méthane)
- de l'alcool (éthanol)
- de l'huile végétale estérifiée

Ces combustibles sont  $\approx 3$  fois plus chers que les fossiles

Il faut consommer 1 l de carburant fossile pour produire 2 l d'ester de colza

# La Fusion nucléaire

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)



deutérium  
1 proton  
1 neutron

tritium  
1 proton  
2 neutrons

hélium  
neutron  
14 MeV  $\approx$  80% de l'énergie libérée

Le neutron joue un double rôle  
 ➤ emmener l'énergie en dehors du plasma  $\rightarrow$  chaleur  
 ➤ régénérer le tritium

Réserves infinies  
 ( $\approx$  40 mg/litre d'eau de mer)

Durée de vie 12 ans  
 n'existe pas à l'état naturel

Li : 0,17 mg/litre d'eau de mer ( ${}^6\text{Li} \sim 7,5\%$ )



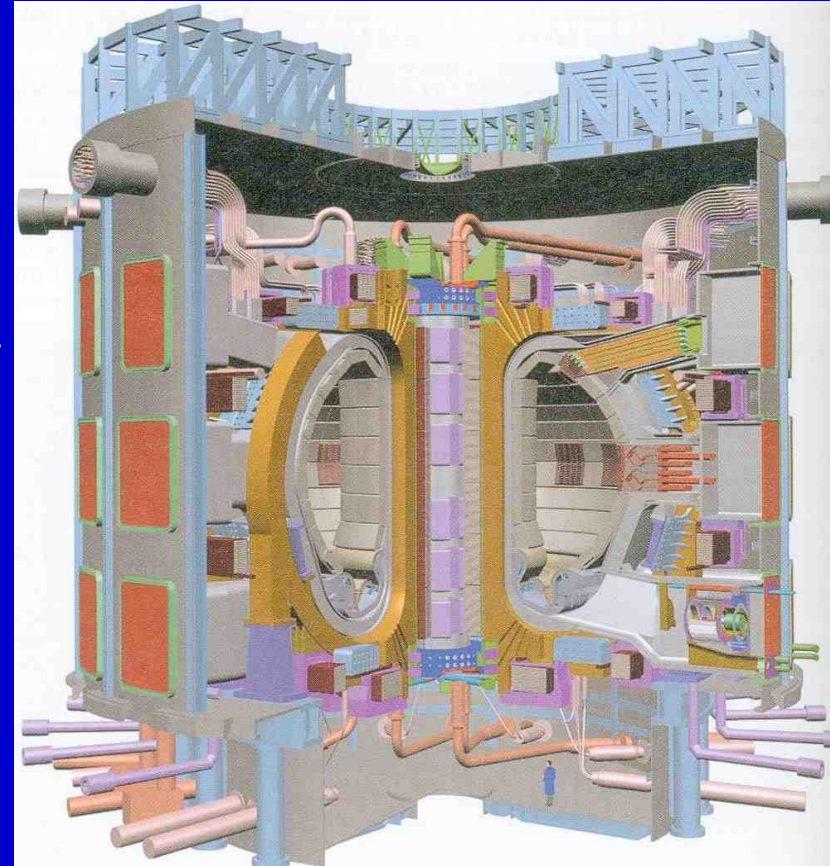
## Avantages

- ✓ Pas de déchets radioactifs à long terme
- ✓ Risques d'accidents limités
- ✓ Pas de problème de ressources

Equivalence d'une centrale de 1000 MWe  
 500 kg/an du mélange d+t

# La Fusion nucléaire

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)



deutérium  
1 proton  
1 neutron

tritium  
1 proton  
2 neutrons

hélium  
neutron  
14 MeV  $\approx$  80% de l'énergie libérée

Le neutron joue un double rôle  
 ➤ emmener l'énergie en dehors du plasma  $\rightarrow$  chaleur  
 ➤ régénérer le tritium

Réserves infinies  
 ( $\approx$  40 mg/litre d'eau de mer)

Durée de vie 12 ans  
 n'existe pas à l'état naturel

Li : 0,17 mg/litre d'eau de mer ( ${}^6\text{Li} \sim 7,5\%$ )



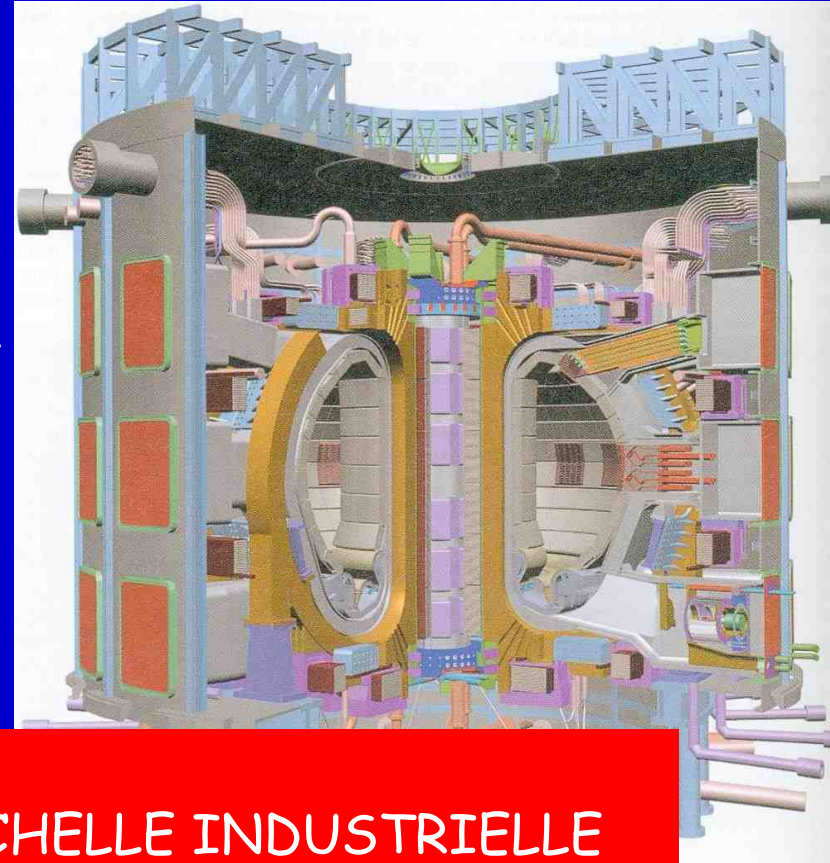
## Nombreux problèmes technologiques

- ✓ Tenue des matériaux à des neutrons 10 fois plus énergétiques que ceux de la fission
- ✓ Gestion du tritium (gaz radioactif) de la production à l'injection en cœur
- ✓ Maîtrise d'un plasma chauffé à plusieurs millions de degrés **reste à démontrer**



# La Fusion nucléaire

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)



deutérium  
1 proton  
1 neutron

tritium  
1 proton  
2 neutrons

hélium  
neutron  
14 MeV  $\approx$  80% de l'énergie libérée

Le neutron joue un double rôle  
 ➤ emmener l'énergie en dehors du plasma  $\rightarrow$  chaleur  
 ➤ régénérer le tritium

Réserves infinies  
 ( $\approx$  40 mg/litre d'eau de mer)

Durée de vie  
 n'existe pas

LA FUSION A L'ECHELLE INDUSTRIELLE  
 AVANT 2100 ?

Li : 0,17 mg/l  
 de mer ( ${}^6\text{Li} \sim 7,5\%$ )



Et le nucléaire de fission?

# Electricité d'origine nucléaire (2002)

	TWh/an	%
France	435	78
Japon	295	27
Russie	140	16
USA	805	20
Europe	900	35
Monde	2660	16



France: 58 réacteurs  
Europe: 145 réacteurs  
Monde: 440 réacteurs

1 TWh= 1 milliard de kWh

# Réacteur de fission nucléaire

Brûleur



Chaleur



Vapeur

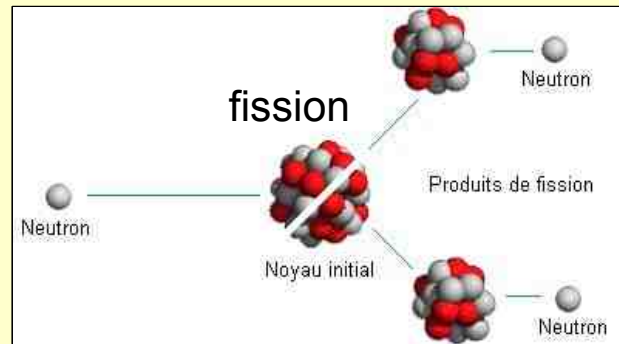


Turbine

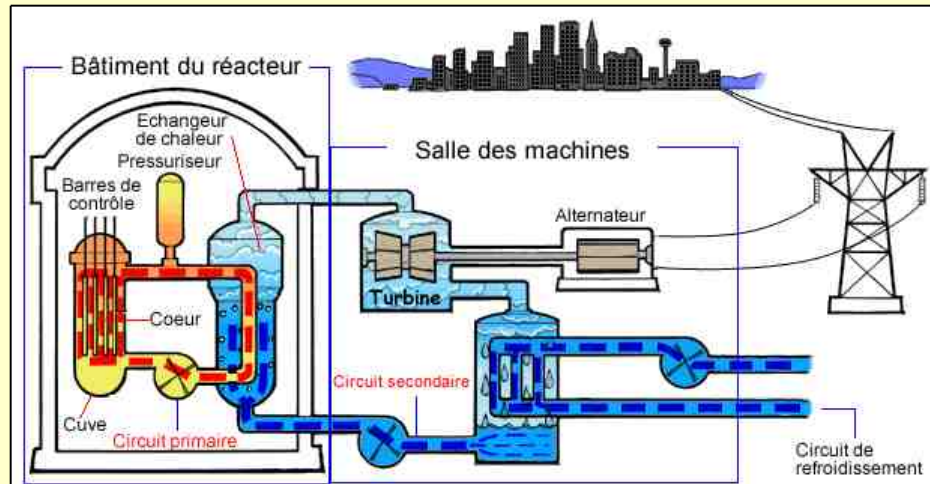


Alternateur

Matière fissile dans la nature:  $^{235}\text{U}$  (0,7%)

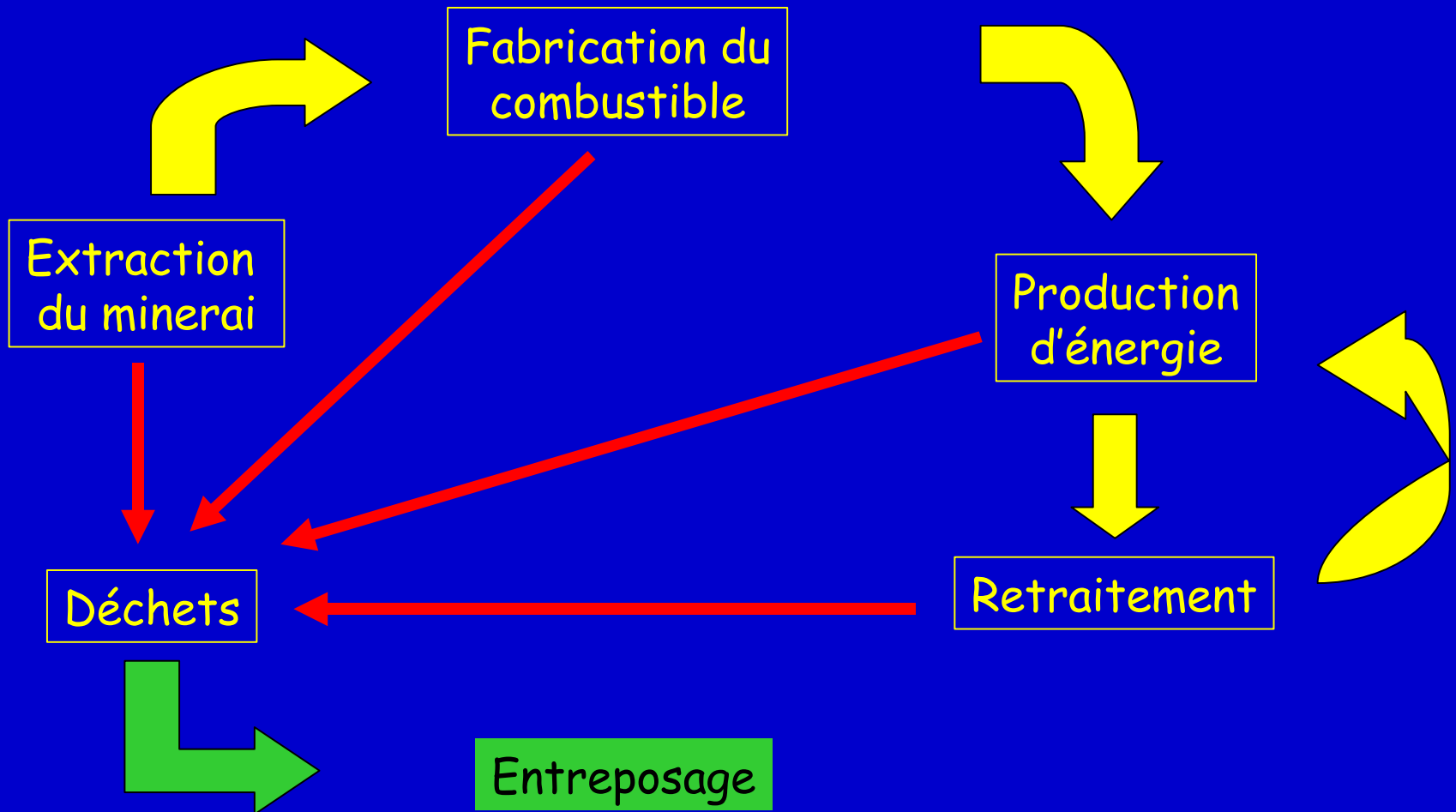


1 t ↔ 2 millions t de pétrole



REP (Réacteur à Eau Pressurisée) 1000 MWe produit 7 milliards de kWh/an

# Le cycle du combustible



# Déchets issus des centrales nucléaires

Les atomes d'uranium du combustible ( $^{235}\text{U}$  et  $^{238}\text{U}$ ) sont bombardés par des neutrons lents

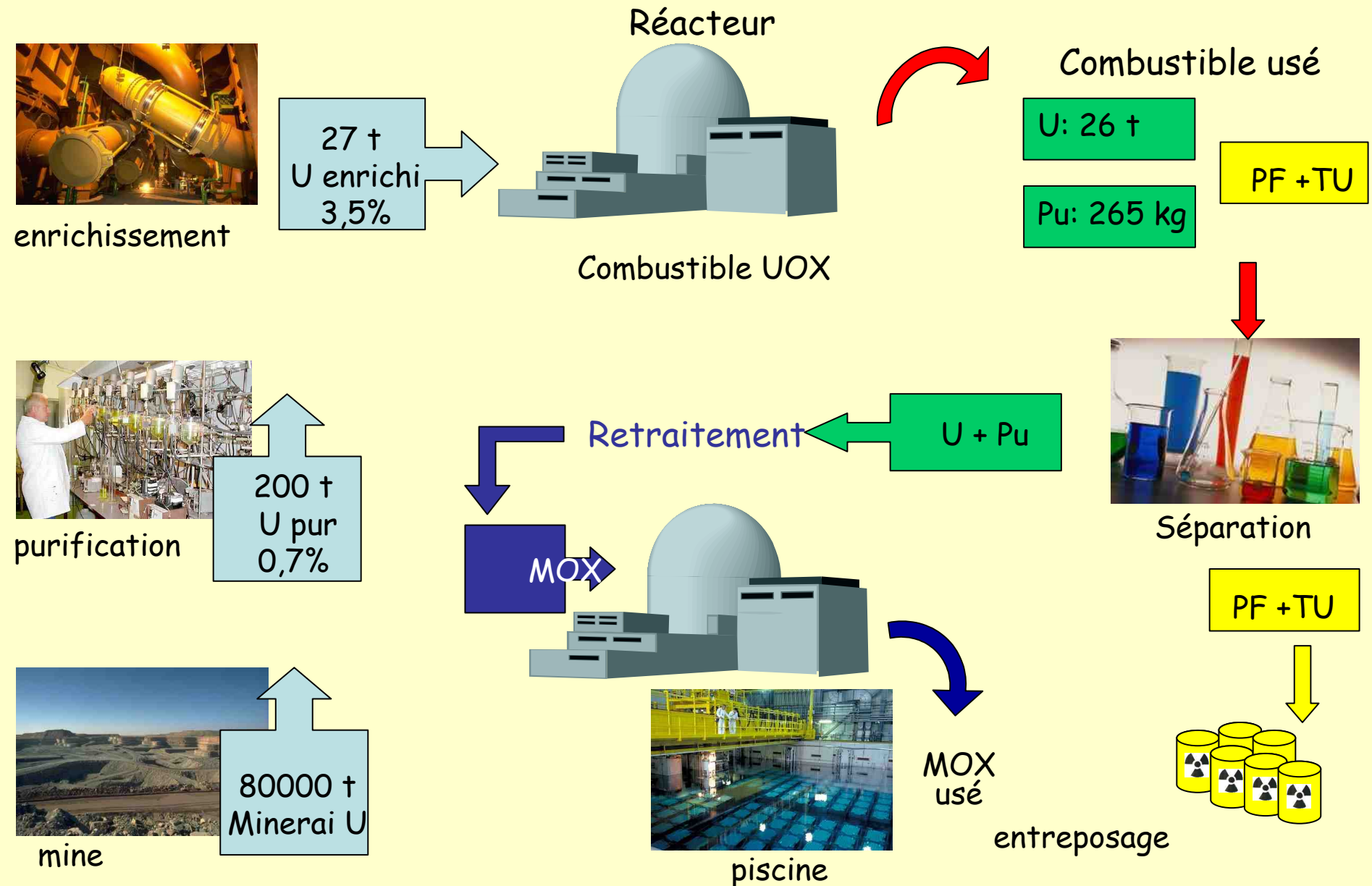
$^{235}\text{U}$  fissionne en libérant de l'énergie. Les débris, plus légers que  $^{235}\text{U}$ , sont les cendres de la réaction. On les appelle:

**PRODUITS DE FISSION**

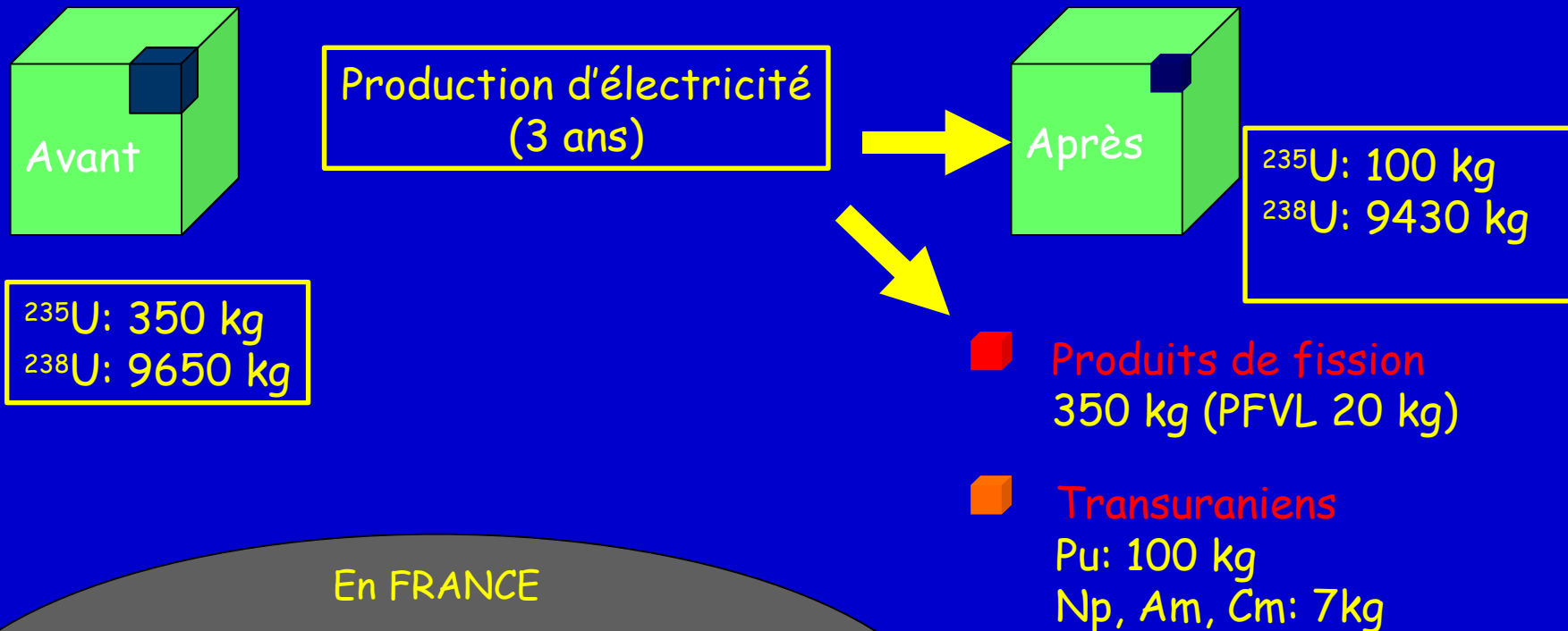
$^{238}\text{U}$  fissionne peu mais il absorbe les neutrons. Cela conduit à la création d'éléments chimiques nouveaux, radioactifs, plus lourds que  $^{238}\text{U}$ . On les appelle:

**TRANSURANIENS: Np, Pu, Am, Cm**

# Cycle annuel du combustible nucléaire pour un réacteur REP de 1000 MWe



# Inventaire des déchets d'un réacteur REP exemple pour 10 tonnes de combustible



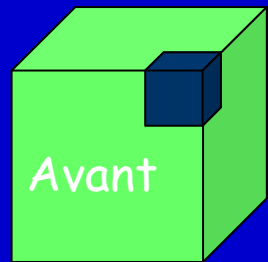
En FRANCE

Pour une production annuelle de 435 TWh:  
1300 t de combustible sont déchargées dont:

~ 12 t de Plutonium  
~ 1 t (Np, Am, Cm)  
~ 3,5 t de PFVL

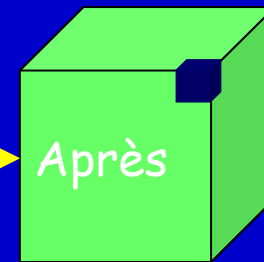


# Inventaire des déchets d'un réacteur 1000MWe



$^{235}\text{U}$ : 950 kg  
 $^{238}\text{U}$ : 26,3 t

Production d'électricité  
(3 ans)



$^{235}\text{U}$ : 280 kg  
 $^{238}\text{U}$ : 25,7 t

- Produits de fission  
945 kg (PFVL 60 kg)
- Transuraniens  
Pu: 265 kg  
Np, Am, Cm: 20kg

En FRANCE

Pour une production annuelle de 435 TWh:  
1300 t de combustible sont déchargées dont:

~ 12 t de Plutonium  
~ 1 t (Np, Am, Cm)  
~ 3,5 t de PFVL

# Rejets par an et par habitant en FRANCE

- ❑ Industriels: 2,5 tonnes dont 100 kg toxiques
- ❑ Ménagers: 0,8 tonne
- ❑ Dioxyde de carbone  $CO_2$  : 6 tonnes
- ❑ Nucléaires: 1 kg dont 100 g de moyenne et forte activités

# Quels choix pour les déchets radioactifs?

Actuellement, il y a 2 solutions possibles:

- ❑ Stockage direct du combustible usé (Suède, Etats-Unis)
- ❑ Retraitement du combustible usé en vue du recyclage de U et de Pu (France La Hague, Japon, Russie, Grande Bretagne)

D'autres voies sont à l'étude

- Transmutation ou incinération des déchets hautement radiotoxiques
- Réacteurs de 4ième génération

Principe: bombarder avec des neutrons rapides les noyaux radioactifs jugés trop dangereux à long terme pour les transformer en noyaux stables

Outils: réacteurs sous critiques assistés par accélérateur ou réacteurs critiques à neutrons rapides

### TRANSMUTATION



15 millions d'années



12 h

### INCINERATION



2 millions d'années



# Réacteurs de 4ième génération

R et D international regroupant 11 pays

- compétitivité économique
- sûreté des réacteurs
- minimisation des déchets
- économie des ressources
- non prolifération



Médiocre usage fait de l'uranium  
seul l' $^{235}\text{U}$  (0,7%) fissionne dans les REP  
Conséquence sur la quantité d'uranium naturel nécessaire  
( 70000 t/an) et sur le niveau des réserves (120 ans)

# Solutions possibles

- On exploite tout l'uranium

RNR (réacteurs à neutrons rapides)

surgénérateurs:  $^{238}\text{U}$ (fertile)/ $^{239}\text{Pu}$ (fissile)

100 fois moins de déchets que dans les réacteurs actuels

- On utilise du thorium

Réacteurs sels fondus (neutrons lents)

régénérateurs:  $^{232}\text{Th}$ (fertile)/ $^{233}\text{U}$ (fissile)

1000 fois moins de déchets que dans les réacteurs actuels



Réserves supérieures à 20000 ans !!!!!

# Conclusions

Augmenter la consommation d'énergies fossiles « tant que ça passe » pourrait nous amener assez vite dans une zone où « ça ne passe plus », soit pour des raisons de ressources, soit pour des raisons climatiques

Il convient donc de « décarboner » l'essentiel de notre consommation d'énergie en faisant appel

- ✓ aux économies d'énergie
- ✓ aux énergies renouvelables
- ✓ à la séquestration du CO<sub>2</sub>
- ✓ au nucléaire

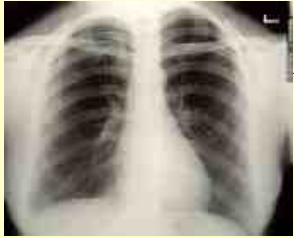
au niveau mondial, national et individuel

Logique de **développement durable** qui répond aux besoins du présent sans compromettre la possibilité, pour les générations futures, de pouvoir répondre à leurs propres besoins

# Les différentes sources de radioactivité

Origine artificielle 32%

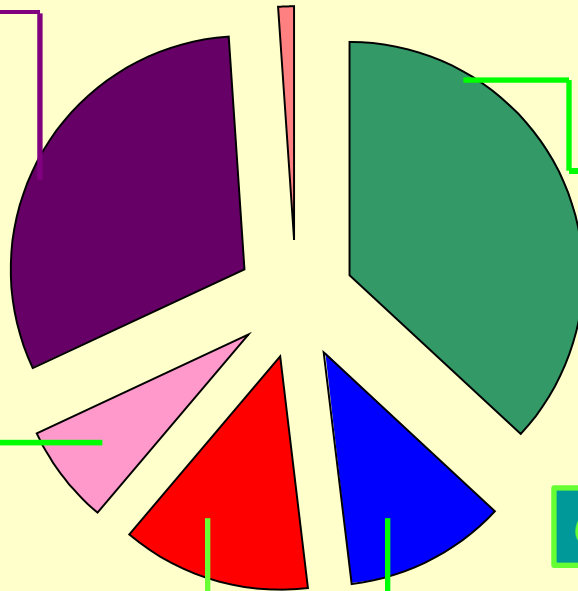
Divers 1%



Diagnostics et  
traitements  
médicaux 31%



Radon 37%



Corps humain 7%

Origine naturelle 68%



Terrestre 13%



Cosmique 11%



## Exemples de radioactivité naturelle

Granite: 8000 Bq/kg

Lait: 40 Bq/l

Pommes de terre: 150 Bq/kg

Corps humain ( $^{40}\text{K}$ ) 4000 Bq

1 Bq = 1 désintégration par seconde

- ✓ Les effets biologiques des rayonnements ionisants sur un organisme exposé (selon nature des rayonnements et sensibilité des organes) s'expriment en mSv (milliSievert)
- ✓ Indépendamment de leur origine naturelle ou artificielle les rayonnements ionisants de même type ont les mêmes effets radioactivité naturelle  $\sim 2,4$  mSv/an
- ✓ Limite réglementaire de l'exposition du public (radioactivité artificielle hors exposition médicale) : 1mSv/an