

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

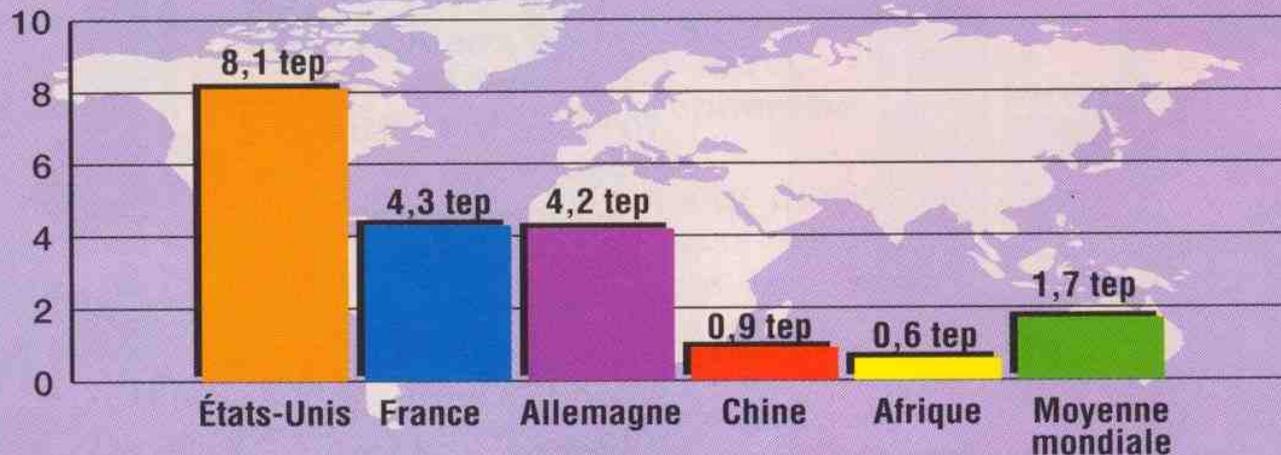
La recherche peut-elle permettre ?

- ✓ 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



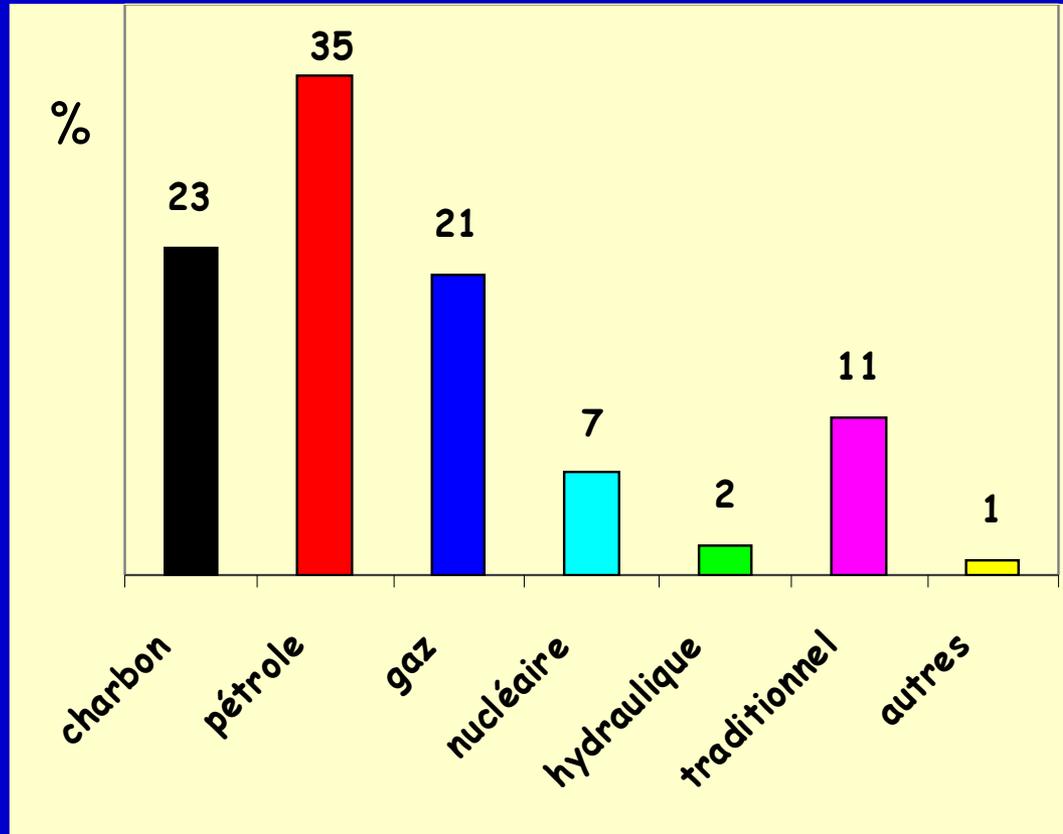
Près de deux milliards de personnes sur Terre, soit un tiers de la population mondiale, n'ont toujours pas accès à une quelconque forme d'énergie autre que la biomasse traditionnelle, essentiellement le bois.

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
Total	10,2		270	

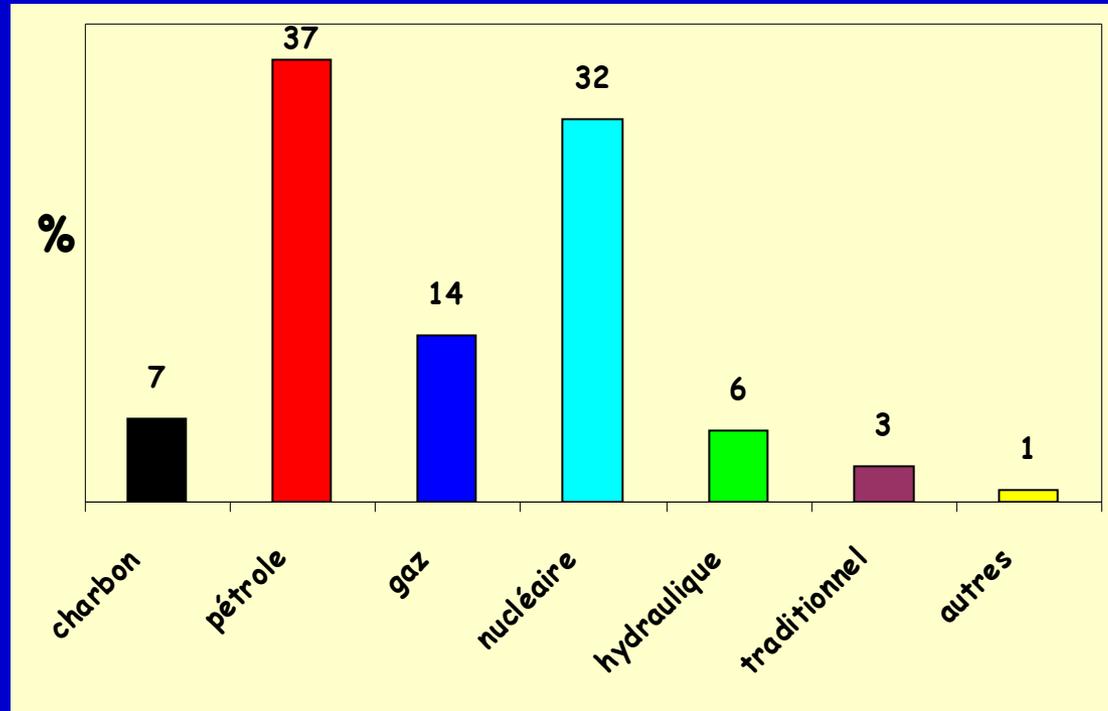
Gtep = 1 milliard de tep
Mtep = 1 million de tep

Consommations d'énergies primaires au niveau mondial (2002)



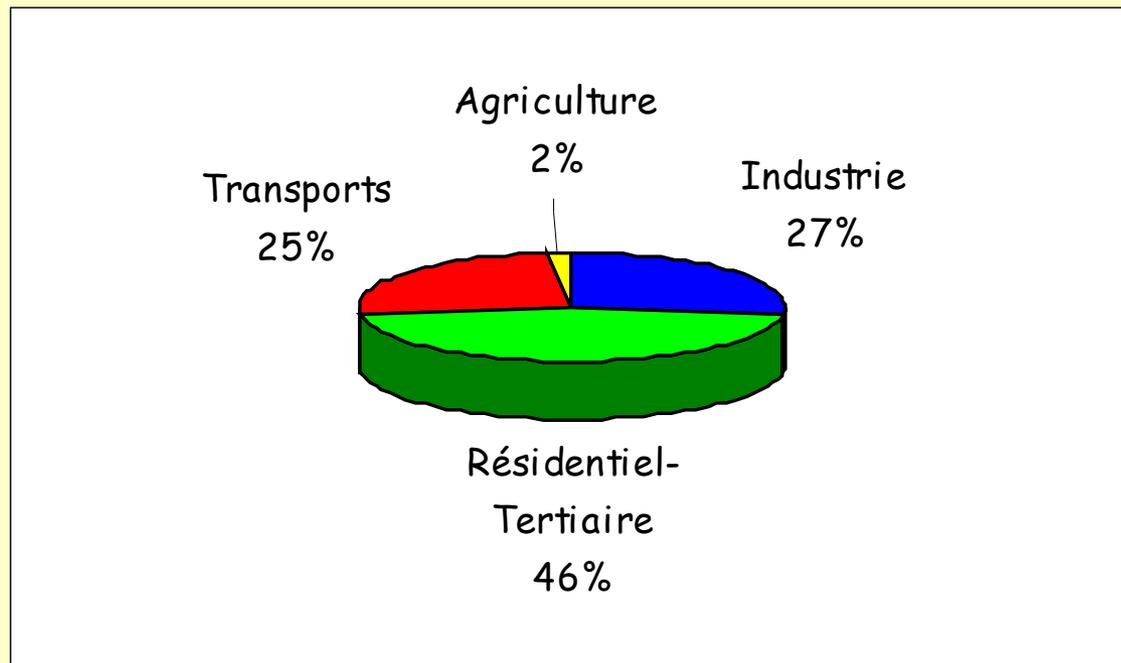
Consommation totale 10 Gtep
80% d'origine fossile
87% non renouvelable

Consommations d'énergies primaires en France (2002)



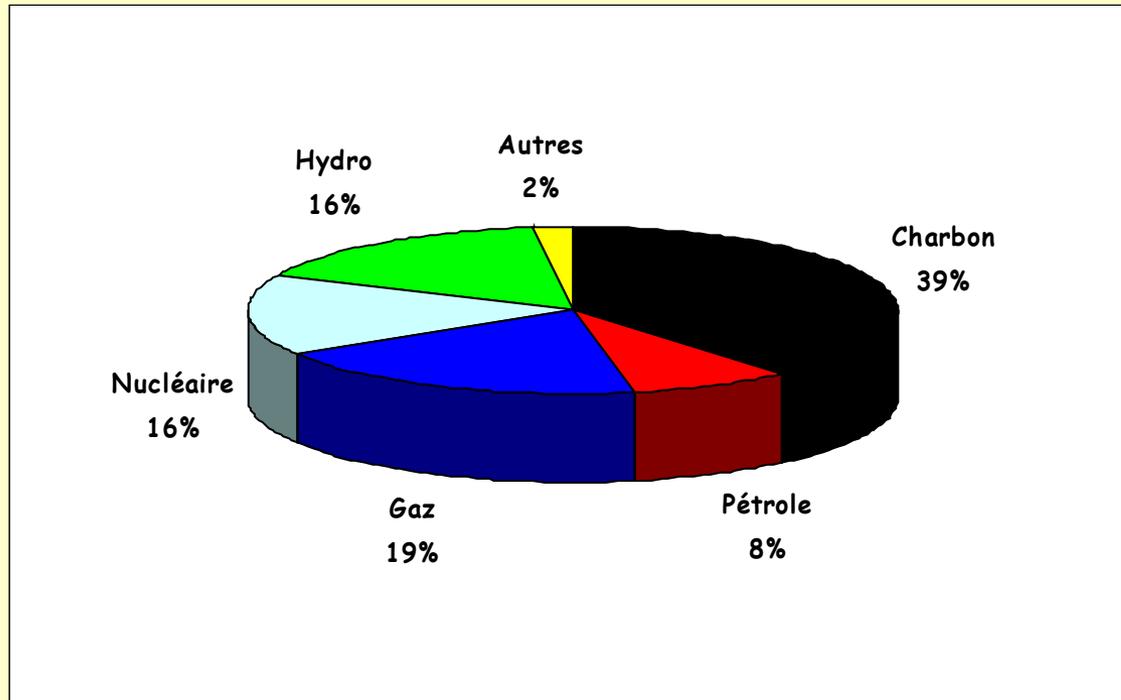
Consommation totale 270 Mtep
58% d'origine fossile

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

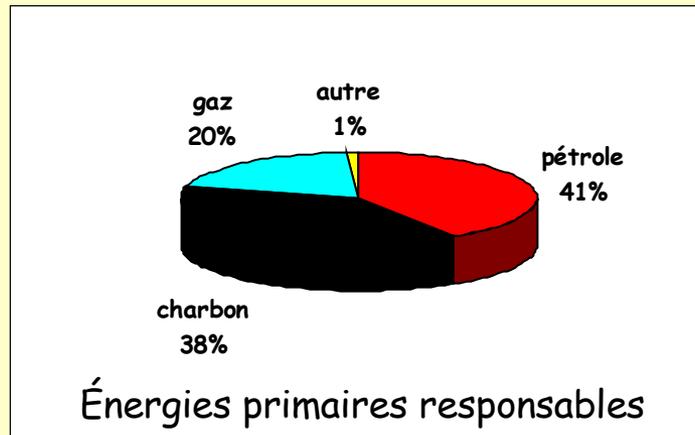
(1 TWh = 1 milliard de kWh).

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

Émissions de gaz carbonique dues à l'énergie (en tonnes de CO₂/habitant, 1999)

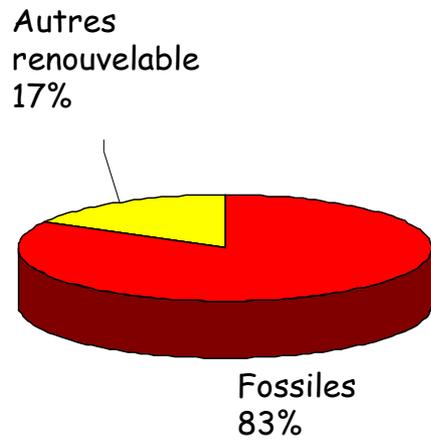


Total de CO₂ émis: 24 milliards de tonnes par an

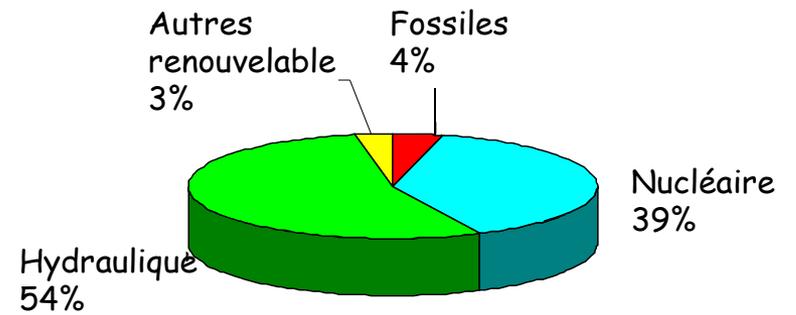


2 pays voisins

Danemark

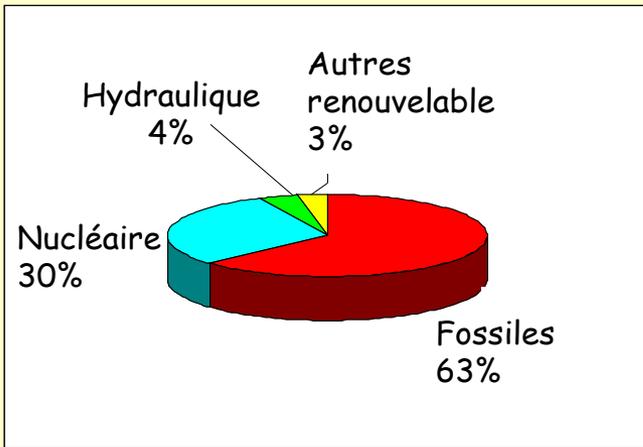


Suède

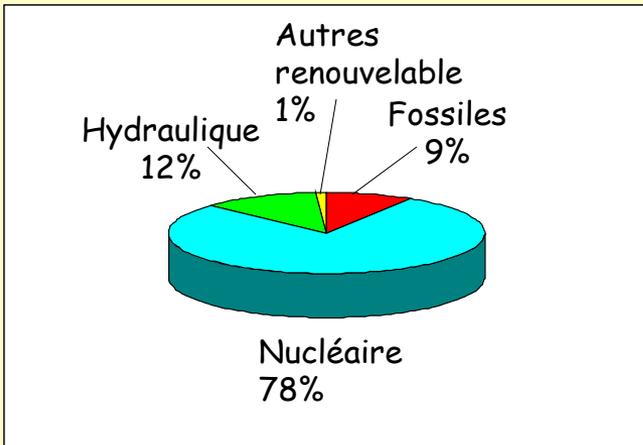
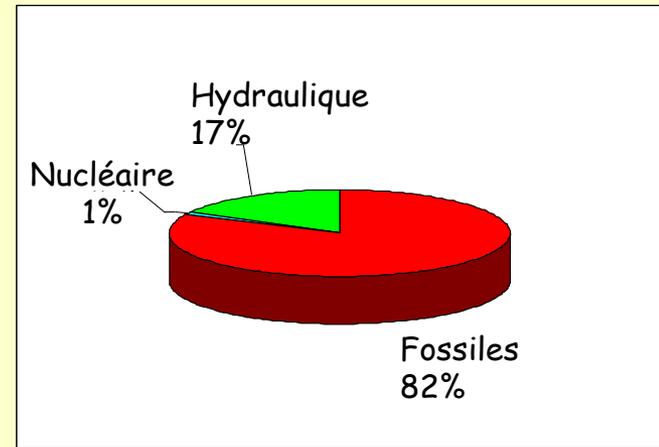


Charbon >50% au Danemark, Allemagne, Etats-Unis et Chine

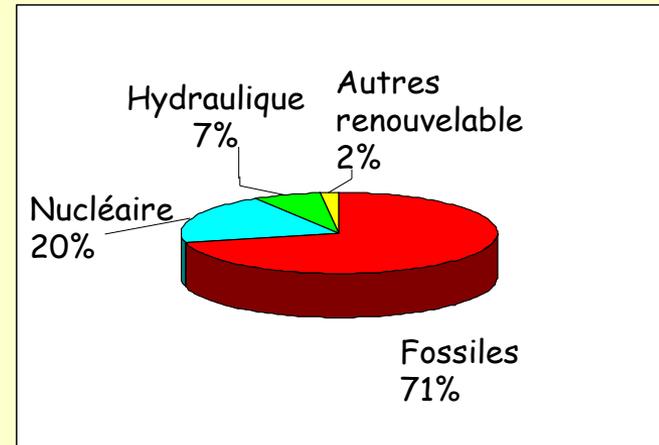
Allemagne



Chine



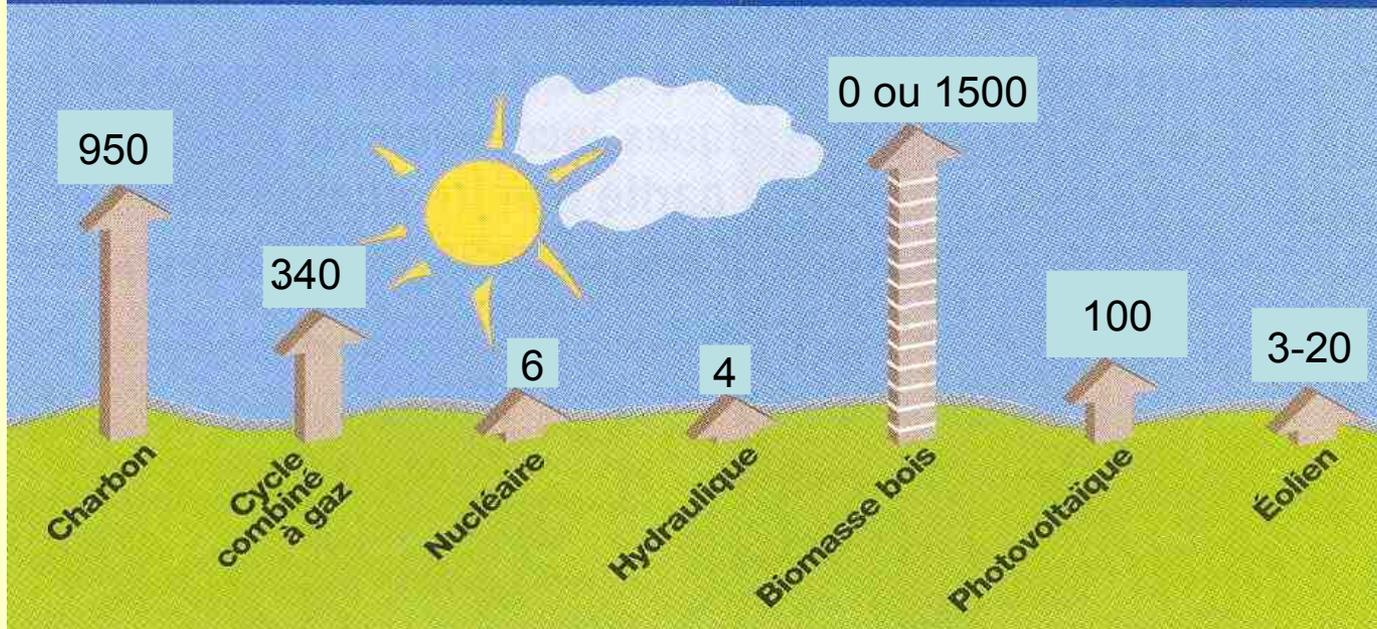
France



Etats-Unis

Émissions de CO₂ 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 W/m^2 à l'équateur. (en 12 h l'énergie solaire arrivant sur terre égale la totalité des énergies fossiles connues)

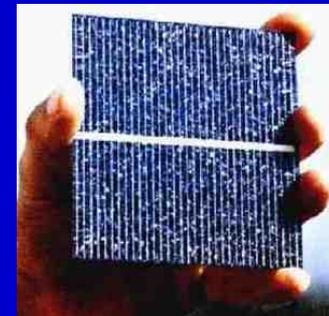
Utilisation la plus directe: production domestique d'eau chaude et chauffage

- ✓ 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 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 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.

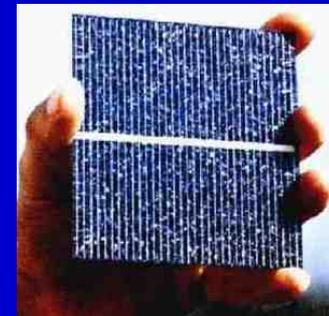
Le Solaire



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

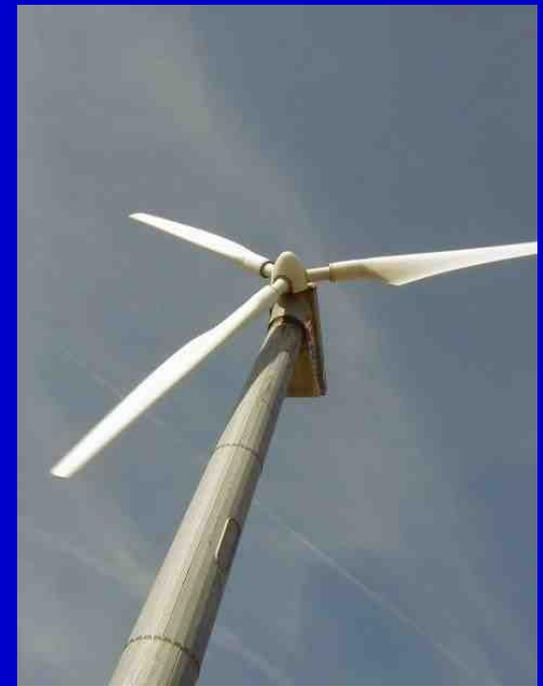
En revanche dans des endroits isolés ou dans les pays à faible densité de population où il n'est pas rentable d'établir un réseau, l'énergie solaire est compétitive

Panneau solaire

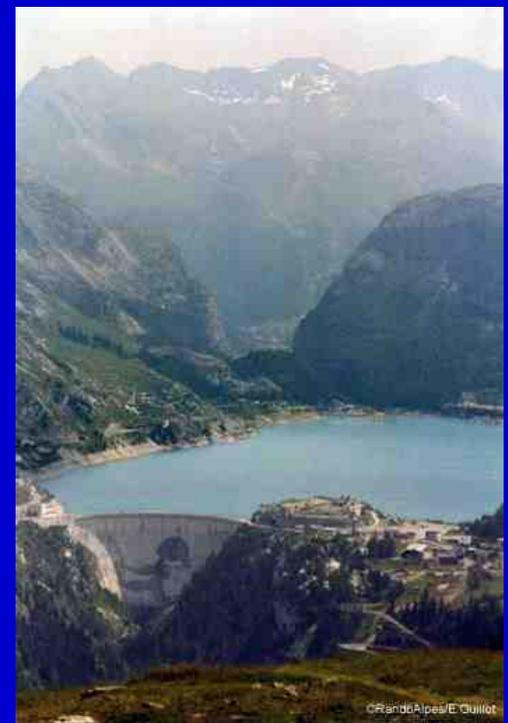


L' Eolien

- 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



- 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 km² 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

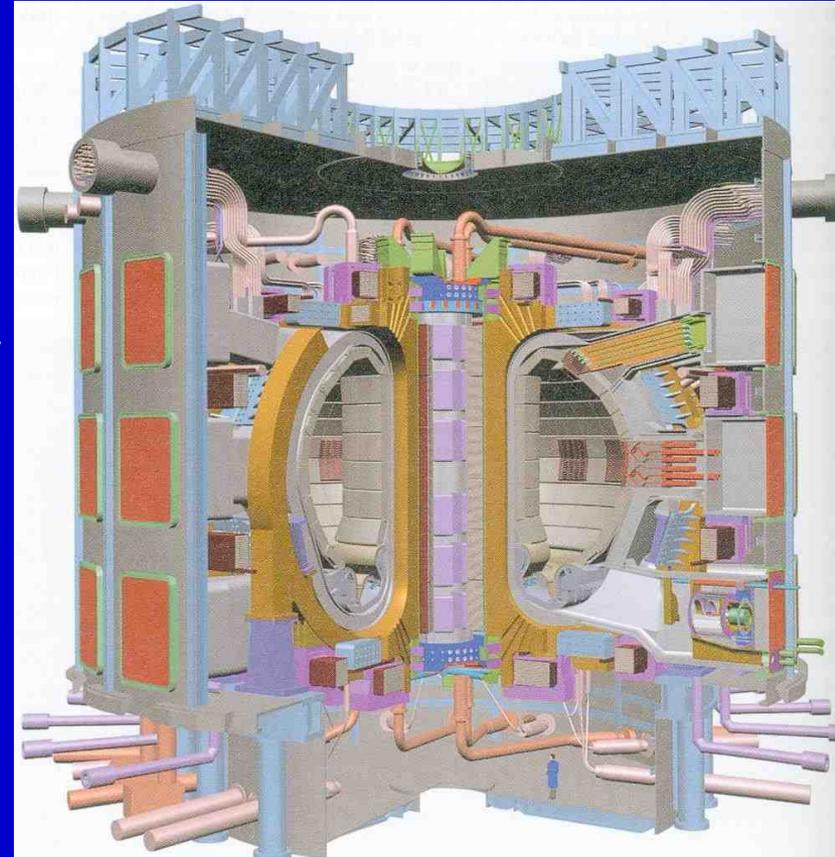
- du gaz (méthane)
- de l'alcool (éthanol)
- de l'huile végétale estérifiée

Ces combustibles sont ≈ 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 (${}^6\text{Li} \sim 7,5\%$)



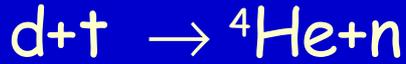
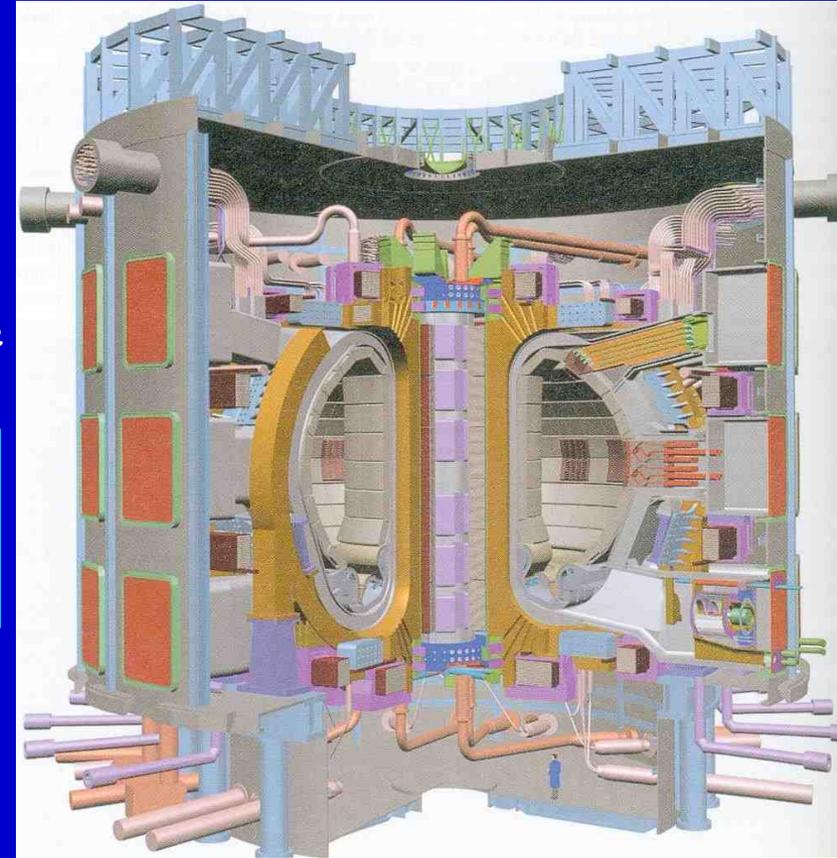
Avantages

- ✓ 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 (${}^6\text{Li} \sim 7,5\%$)

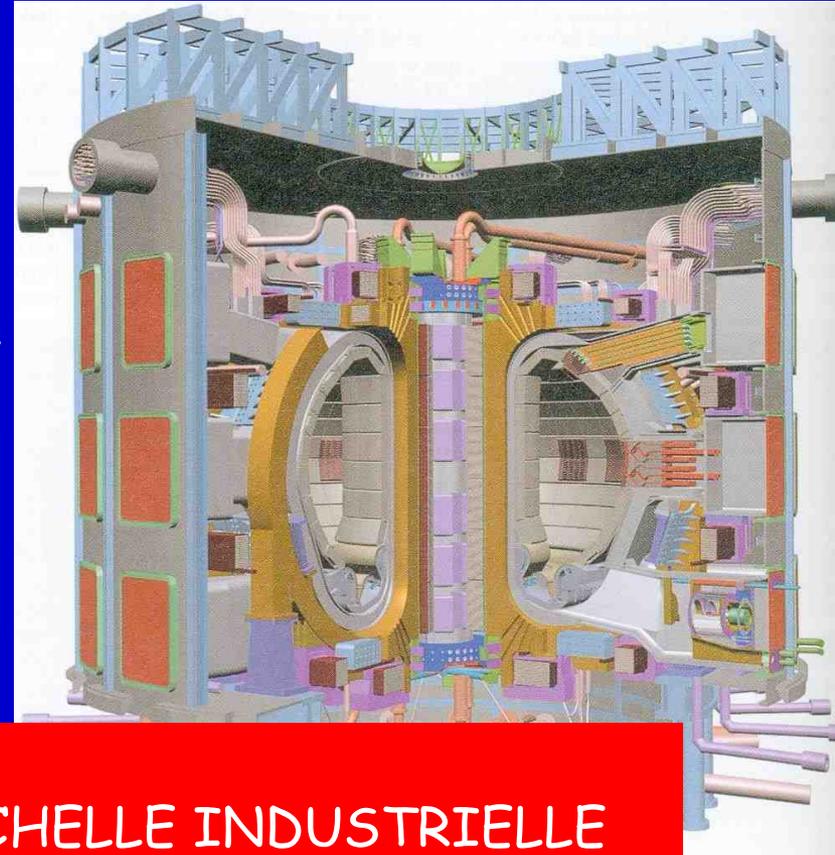


Nombreux problèmes technologiques

- ✓ 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

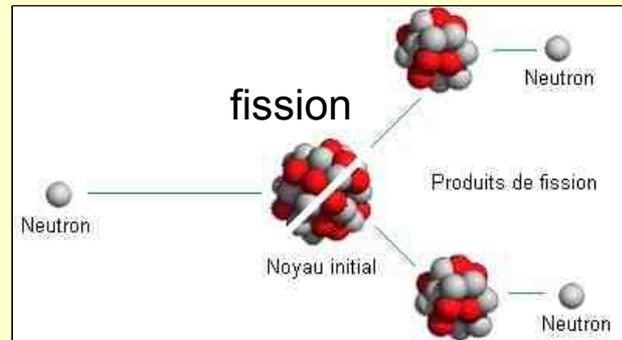


Turbine

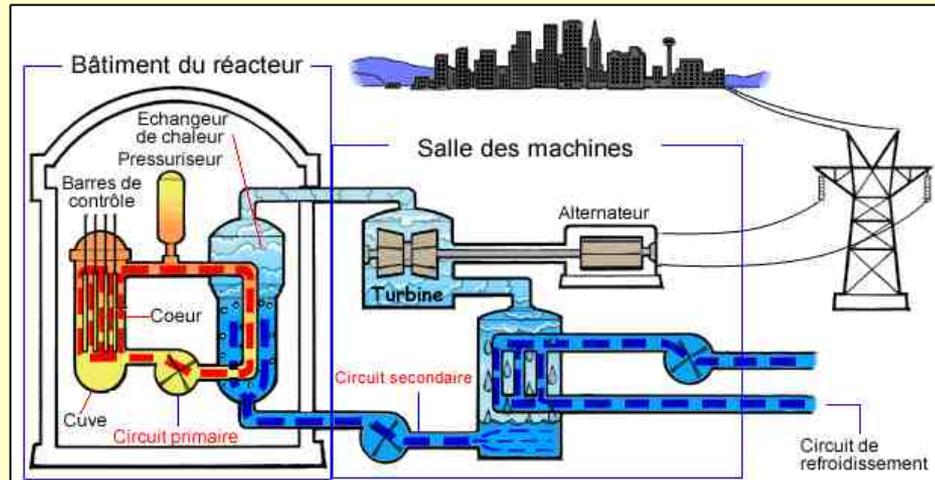


Alternateur

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

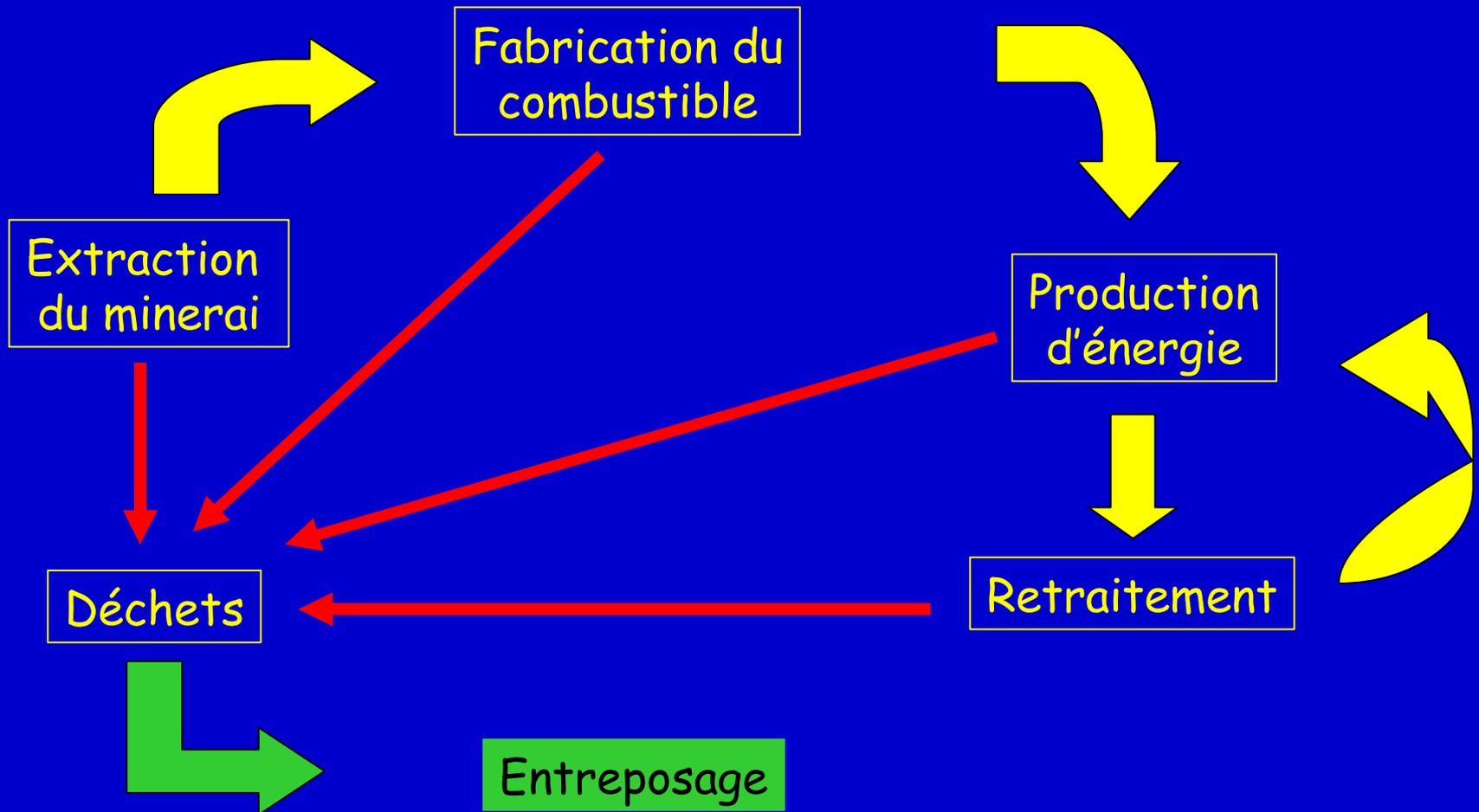


1 t ↔ 2 millions t de pétrole



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}U et ^{238}U) sont bombardés par des neutrons lents

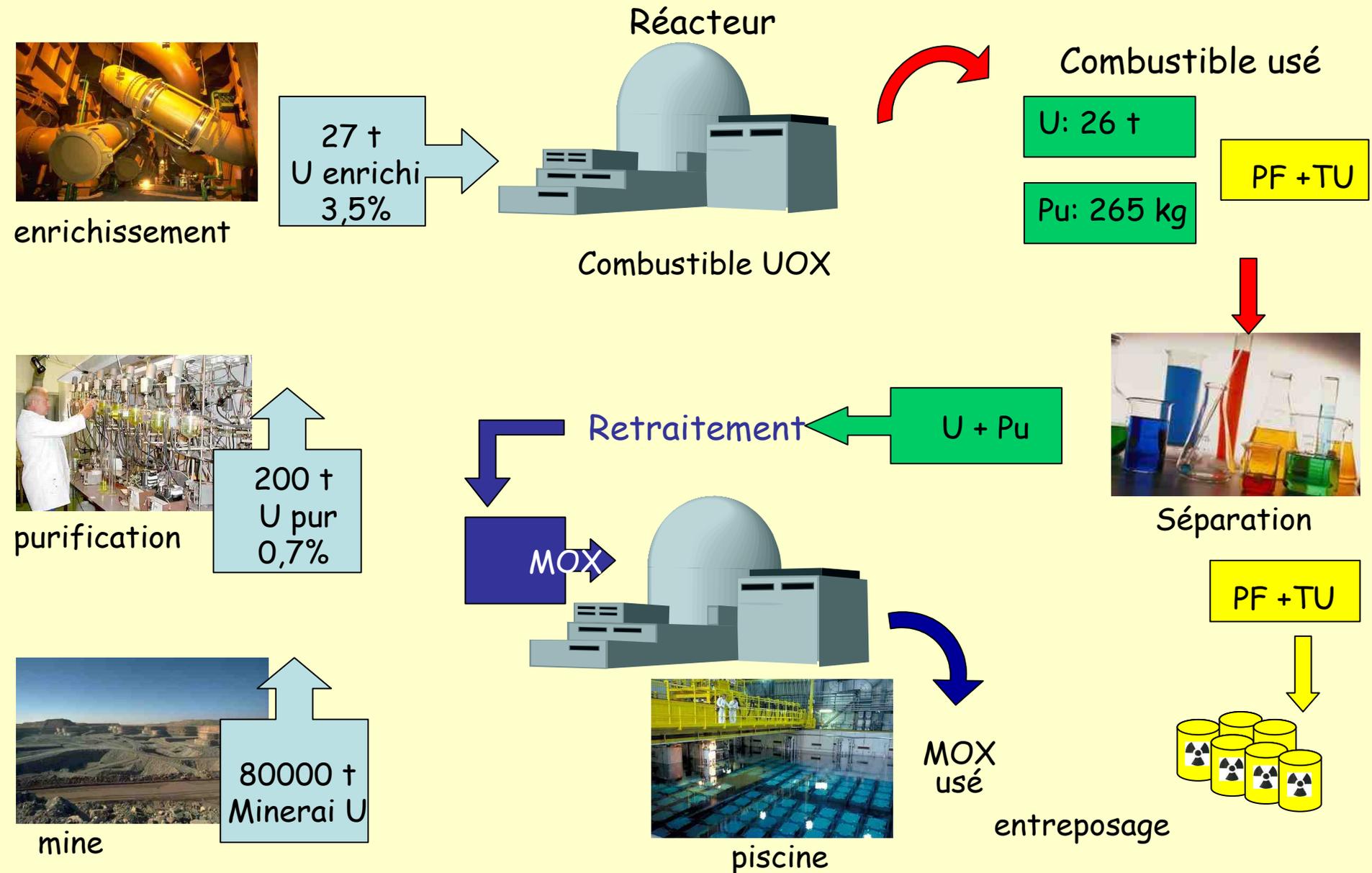
^{235}U fissionne en libérant de l'énergie. Les débris, plus légers que ^{235}U , sont les cendres de la réaction. On les appelle:

PRODUITS DE FISSION

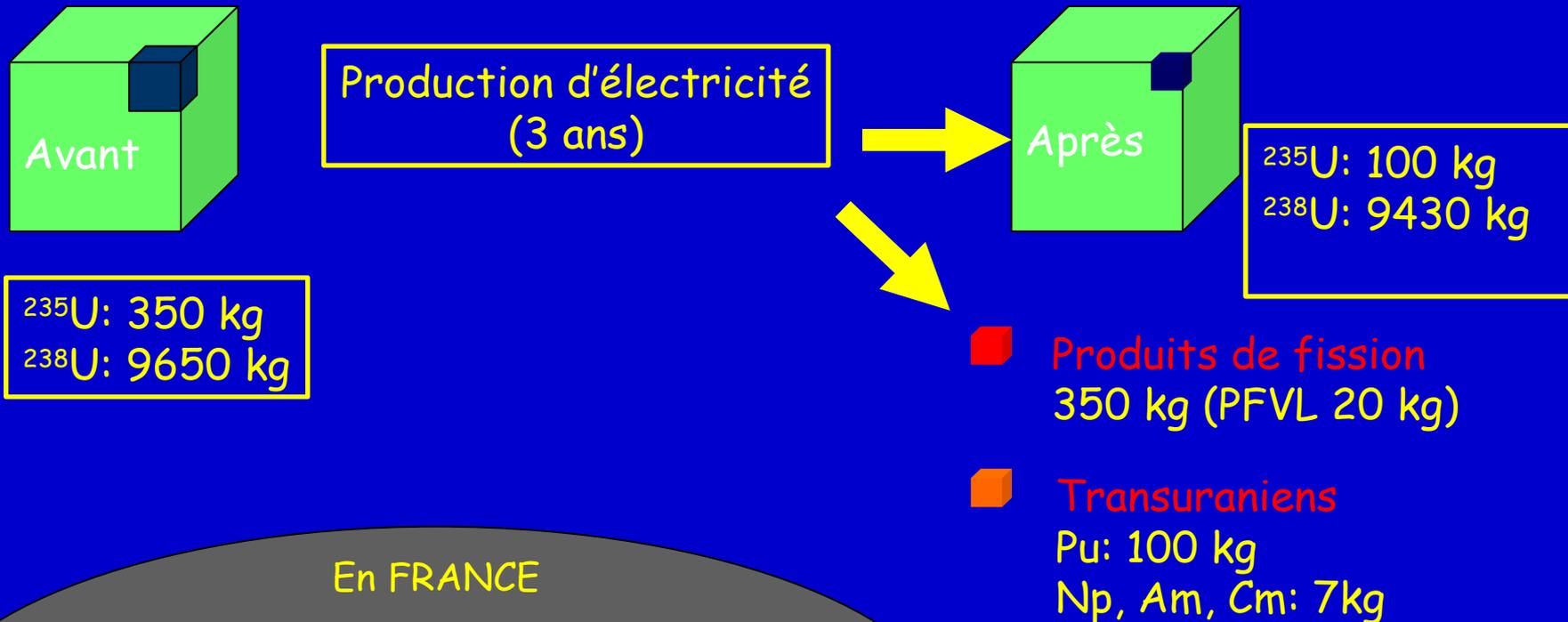
^{238}U fissionne peu mais il absorbe les neutrons. Cela conduit à la création d'éléments chimiques nouveaux, radioactifs, plus lourds que ^{238}U . On les appelle:

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

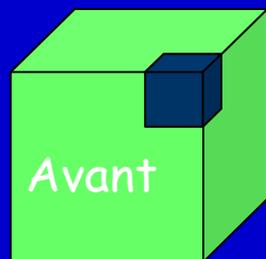


En FRANCE

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

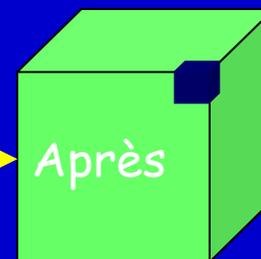
Inventaire des déchets d'un réacteur 1000MWe



Avant

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

Production d'électricité
(3 ans)



Après

^{235}U : 280 kg
 ^{238}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)

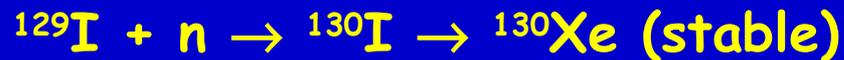
D'autres voies sont à l'étude

- 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}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}U (fertile)/ ^{239}Pu (fissile)

100 fois moins de déchets que dans les réacteurs actuels

- On utilise du thorium

Réacteurs sels fondus (neutrons lents)

régénérateurs: ^{232}Th (fertile)/ ^{233}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 CO₂
- ✓ au nucléaire

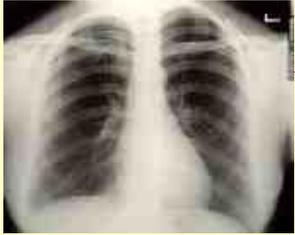
au niveau mondial, national et individuel

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%

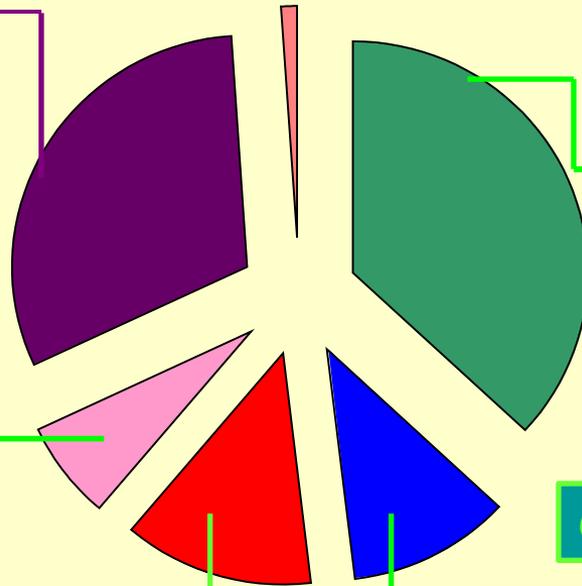


Terrestre 13%



Cosmique 11%

Origine naturelle 68%



Exemples de radioactivité naturelle

Granite: 8000 Bq/kg

Lait: 40 Bq/l

Pommes de terre: 150 Bq/kg

Corps humain (^{40}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