

Présentation de B. HAAS

Les énergies du XXIème siècle (2)

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 \approx 3 fois plus chers que les fossiles
Il faut consommer 1 l de carburant fossile pour produire 2 l d'ester de colza

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



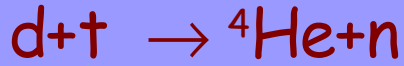
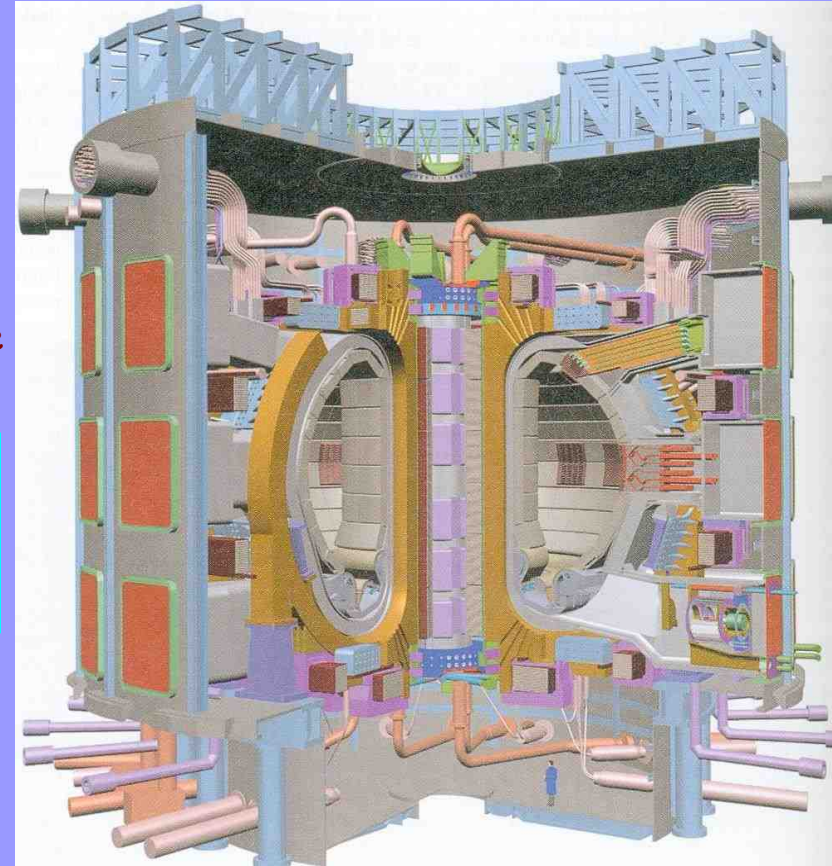
Projets

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 Fusion nucléaire

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)



deutérium
1 proton
1 neutron

tritium
1 proton
2 neutrons

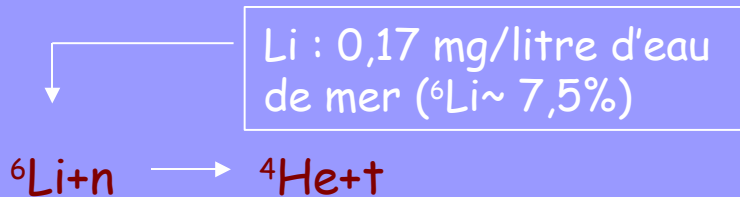
hélium
1 proton
2 neutrons

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



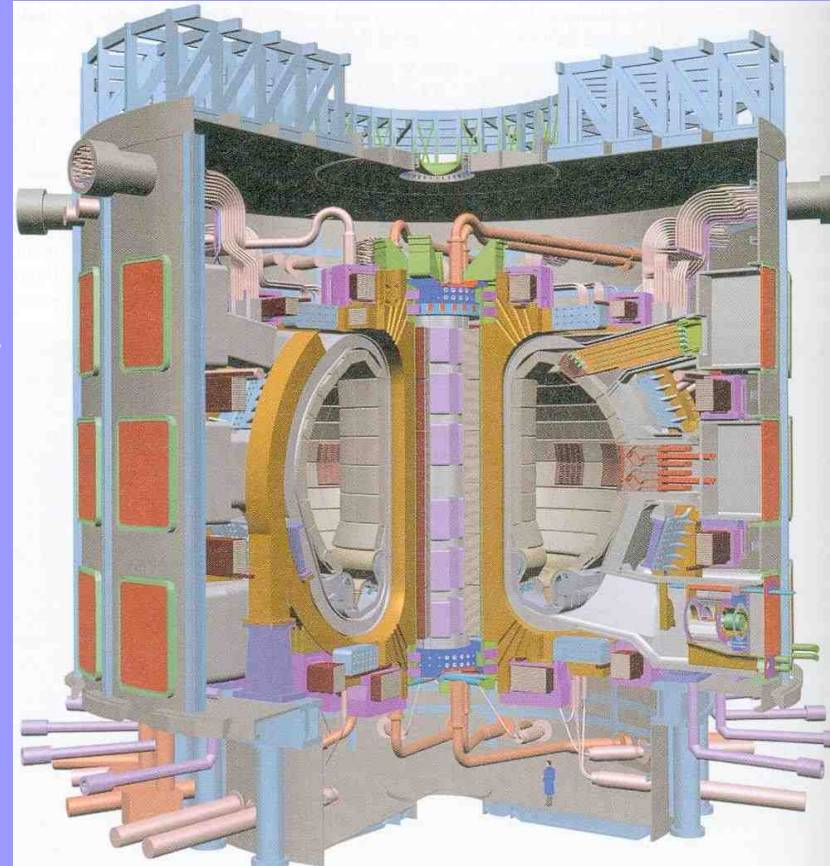
Avantages

- ✓ 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 (${}^6\text{Li} \sim 7,5\%$)

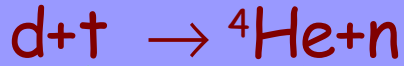
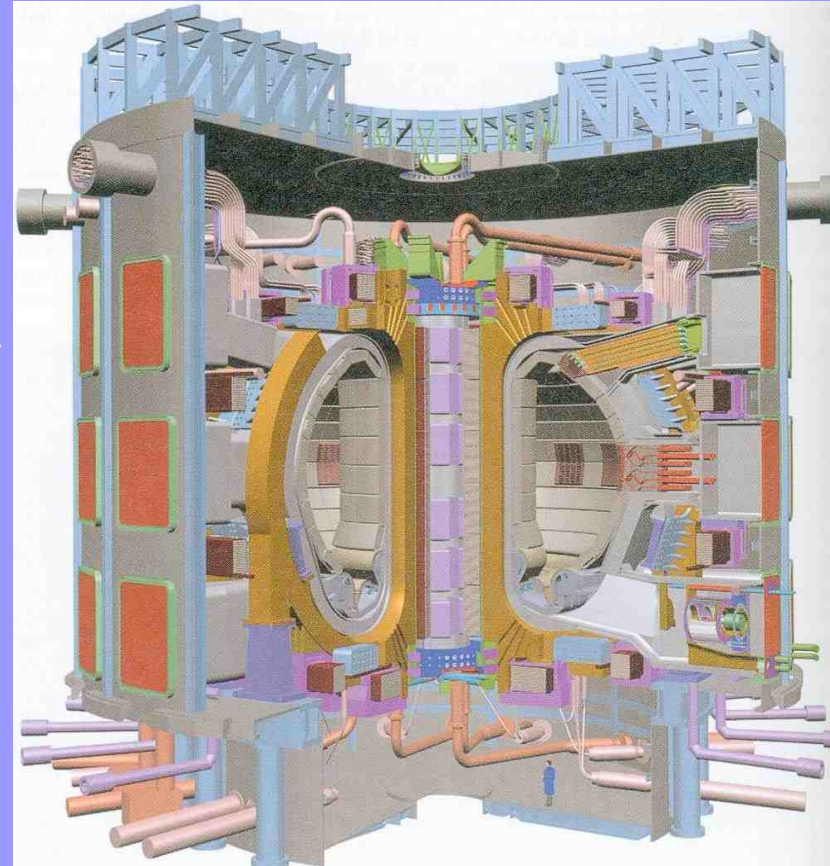


Nombreux problèmes technologiques

- ✓ 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 12 ans
 n'existe pas à l'état naturel

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



LA FUSION A L'ECHELLE INDUSTRIELLE AVANT 2100 ?

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

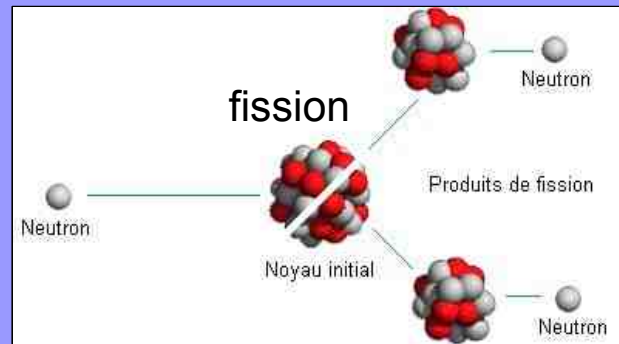


Turbine

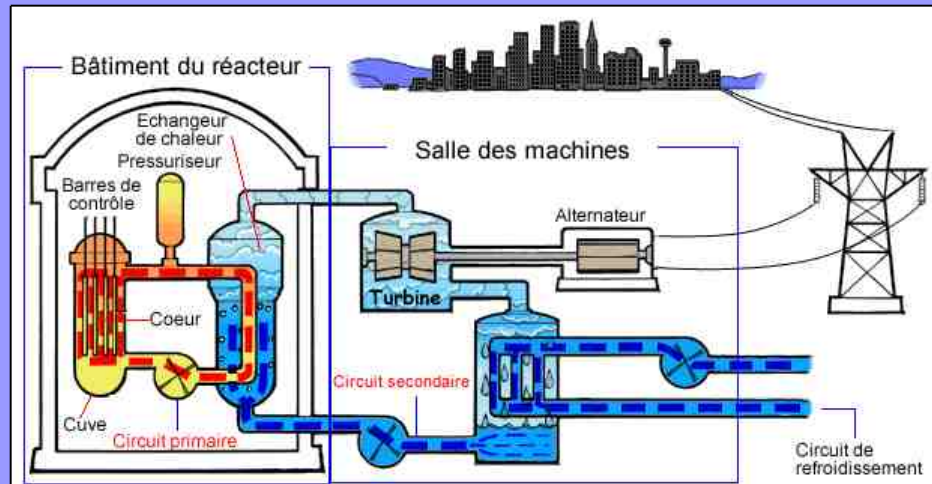


Alternateur

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

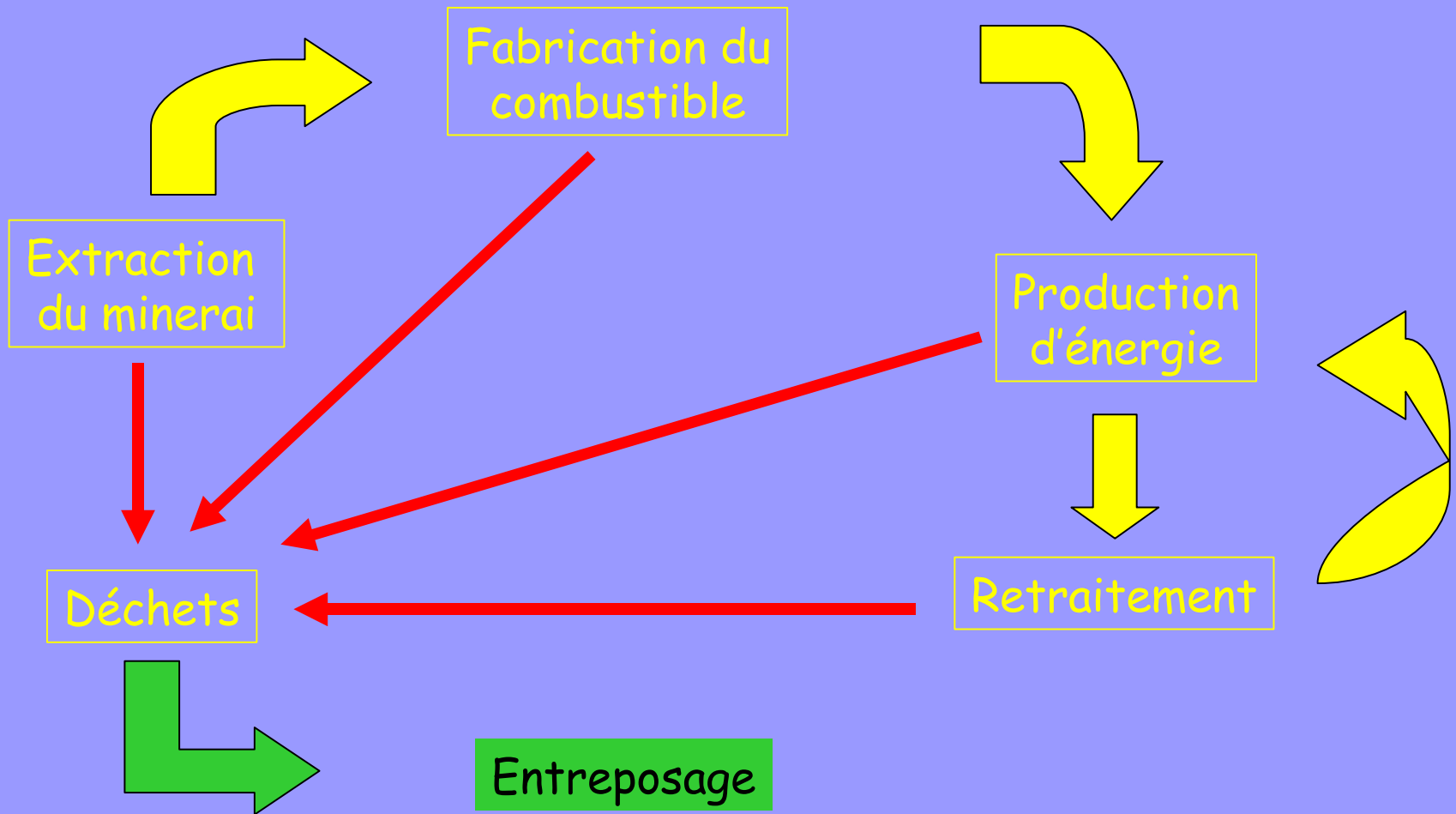


1 t ↔ 2 millions t de pétrole



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

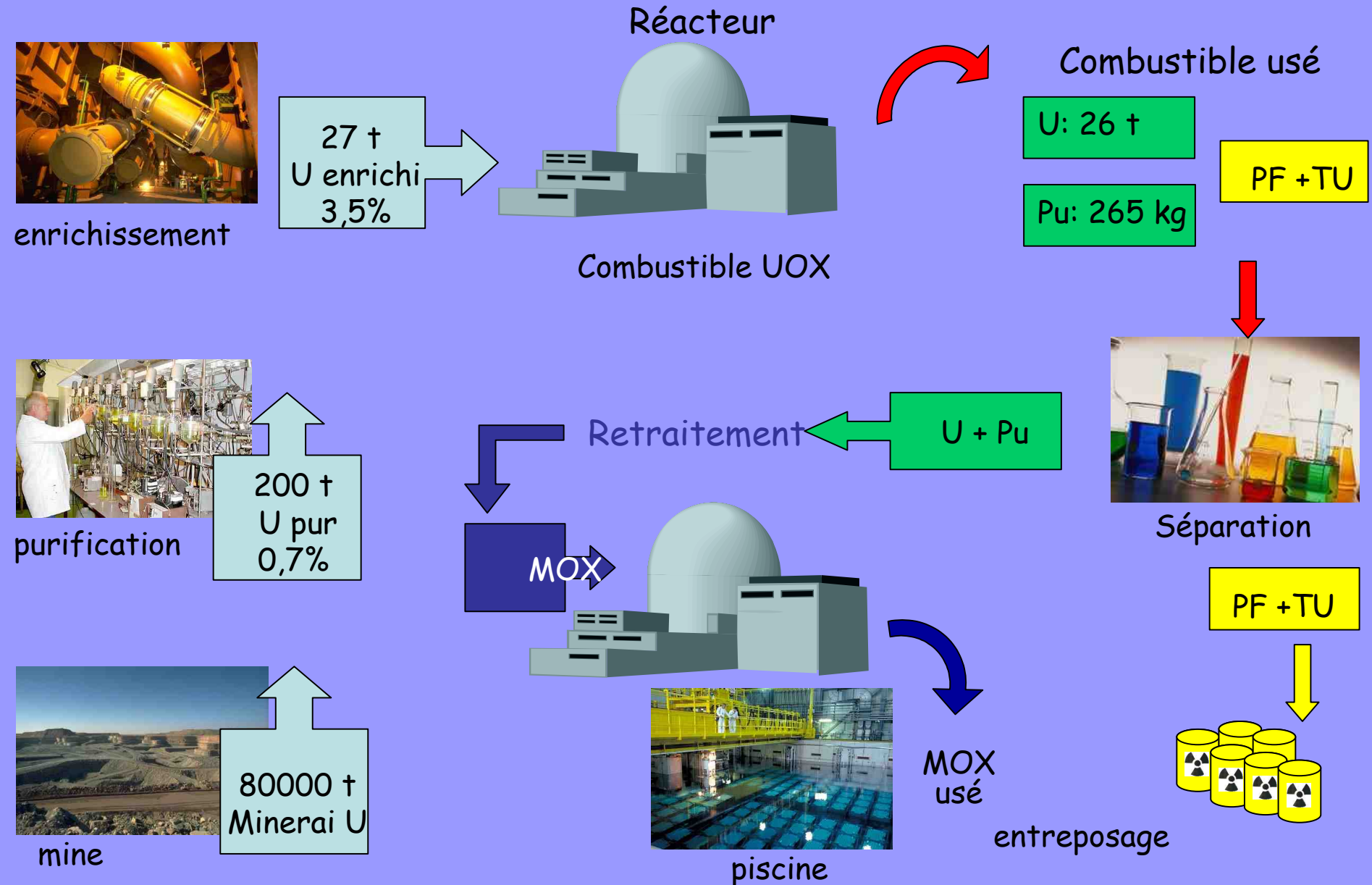
^{235}U fissionne en libérant de l'énergie. Les débris, plus légers que ^{235}U , sont les cendres de la réaction. On les appelle:

PRODUITS DE FISSION

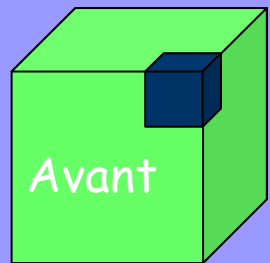
^{238}U fissionne peu mais il absorbe les neutrons. Cela conduit à la création d'éléments chimiques nouveaux, radioactifs, plus lourds que ^{238}U . On les appelle:

TRANSURANIENS: Np, Pu, Am, Cm

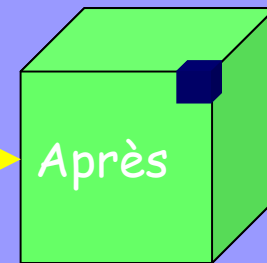
Cycle annuel du combustible nucléaire pour un réacteur REP de 1000 MWe



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



Production d'électricité
(3 ans)



^{235}U : 100 kg
 ^{238}U : 9430 kg

^{235}U : 350 kg
 ^{238}U : 9650 kg

■ Produits de fission
350 kg (PFVL 20 kg)

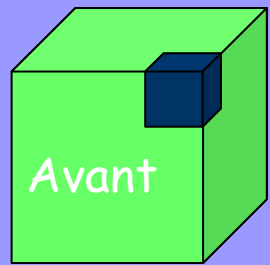
■ Transuraniens
Pu: 100 kg
Np, Am, Cm: 7kg

En FRANCE

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

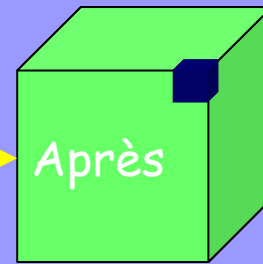
~ 12 t de Plutonium
~ 1 t (Np, Am, Cm)
~ 3,5 t de PFVL

Inventaire des déchets d'un réacteur 1000MWe



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

Production d'électricité
(3 ans)



^{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 toxique
- ❑ Ménagers: 0,8 tonne
- ❑ Dioxyde de carbone CO₂ : 6 tonne
- ❑ 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 utilisé (Suède, Etats-Unis)
- ❑ Retraitement du combustible utilisé en vue du recyclage de U et de Pu (France La Hague , Japon, Russie, Grande Bretagne)

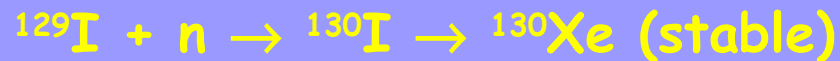
D'autres voies sont à l'étude

- 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%

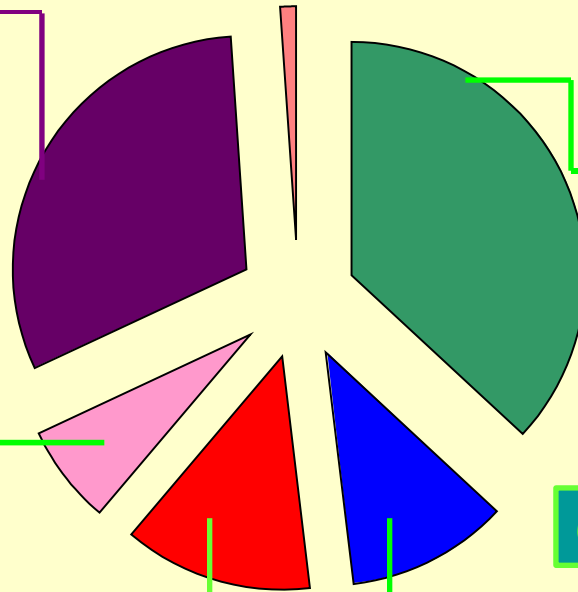
Divers 1%



Diagnostics et
traitements
médicaux 31%



Radon 37%



Corps humain 7%



Terrestre 13%



Cosmique 11%

Origine naturelle 68%

Exemples de radioactivité naturelle

1 Bq = 1 désintégration par seconde

Granite: 8000 Bq/kg

Lait: 40 Bq/l

Pommes de terre: 150 Bq/kg

Corps humain (^{40}K) 4000 Bq

- ✓ 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