

Centrales et combustible nucléaires
Université Populaire de Lyon
Thème « Pouvoirs et contestations »

17 janvier 2012

D. Hertz

dominique.hertz@areva.com

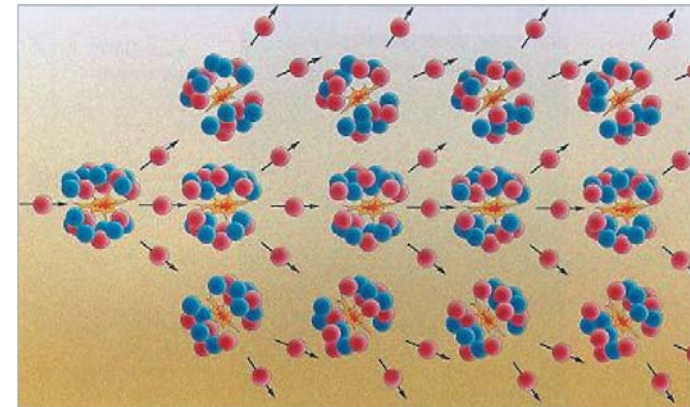
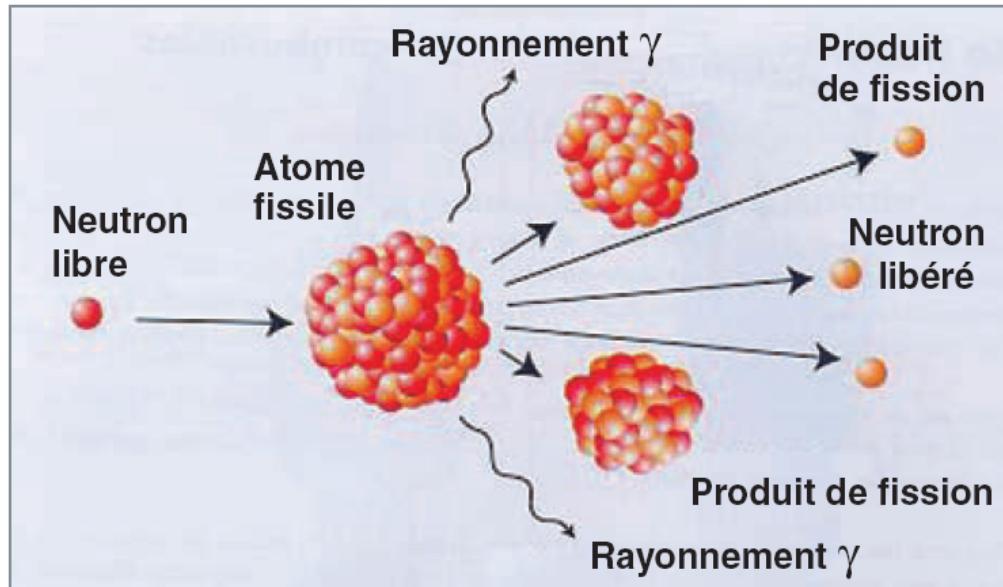
Energie nucléaire

- Introduction
- Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire
- Différents types de centrales (I et II, III)
- Génération IV et surgénérateurs
- Cycle du combustible

Equivalence des différentes sources d'énergie

- Pour produire 1 000 Mwe/an il faudrait (sachant qu'il faut >60 fois cette énergie pour satisfaire la consommation d'électricité de la France) :
 - 24 tonnes d'uranium (enrichi en U^{235} à 4 % environ) (2 camions)
 - 1,7 millions de tonnes de pétrole (7 pétroliers)
 - 2,7 millions de tonnes de charbon (675 trains de 100 wagons)
 - 4 milliards de m^3 de gaz naturel
 - 8,3 millions de tonnes d'ordures ménagères. (500000 camions)
 - 365 éoliennes de 5MW (Mat de 130m, Φ 130m, 2000h/an) sur 365km²
- 7g d' UO_2 contient autant d'énergie que 1 t de charbon
- 1 g de Pu peut produire autant d'énergie que 1 tonne de pétrole
- La fusion d'1 mg d'isotopes de H_2 équivaut à la fission d'1 g d'U

Principes de la réaction nucléaire

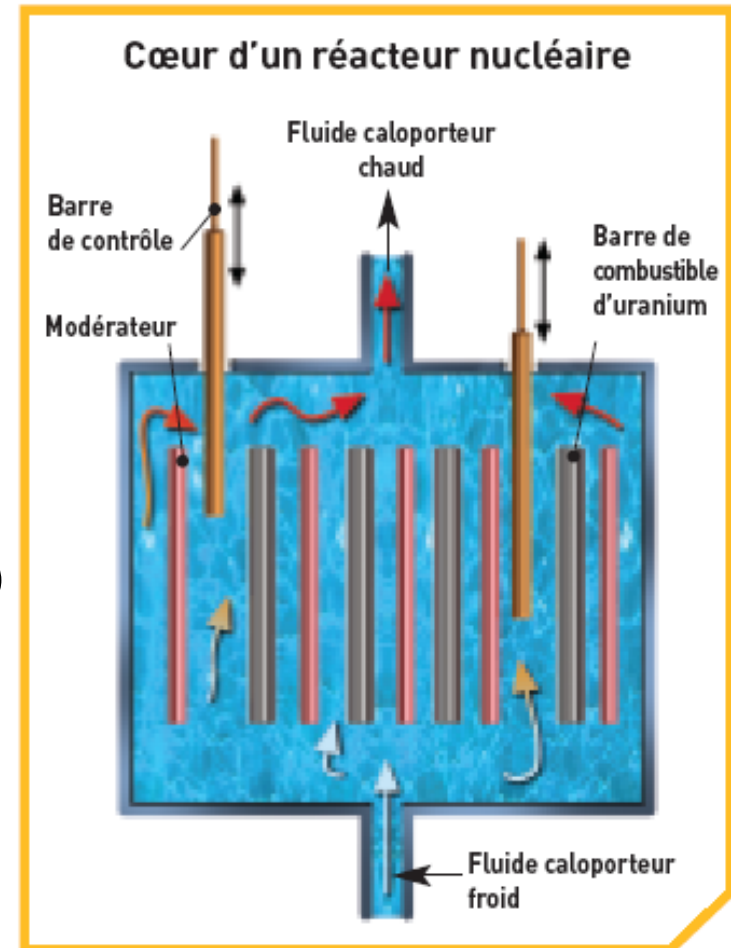


- Le noyau des atomes « fissiles » peut se casser sous le choc d'un neutron d'énergie adaptée
- Les produits de fission sont libérés avec une grande énergie cinétique ($\sim 8000\text{km/s}$) qu'ils perdent en la transformant en chaleur
- En outre l'énergie de cohésion du noyau est aussi libérée
- Une fission entraîne la libération de nouveaux neutrons ($\sim 20000\text{km/s}$)

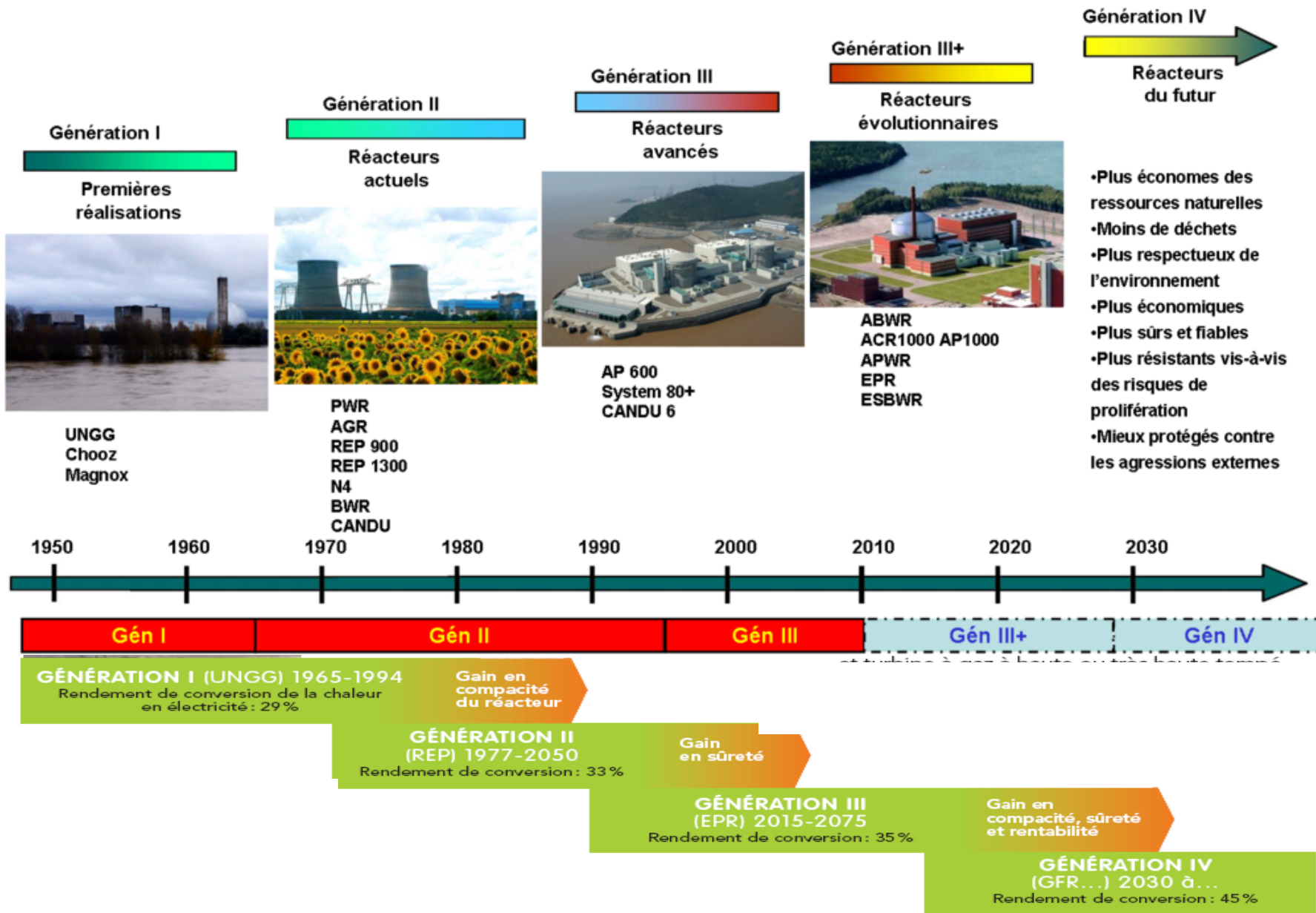
Principes de la réaction nucléaire (2)

- Dans un réacteur nucléaire, la réaction en chaîne est maîtrisée afin de maintenir un rythme de fission constant

- 4 éléments essentiels
 - Le combustible (^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{233}U)
 - Les barres de contrôle (Hf, AIC, B_4C)
 - Le caloporteur (eau, gaz)
 - Le modérateur (ralentisseur de neutrons)
carbone, eau, eau lourde



Différentes générations de réacteurs



Les générations I et II

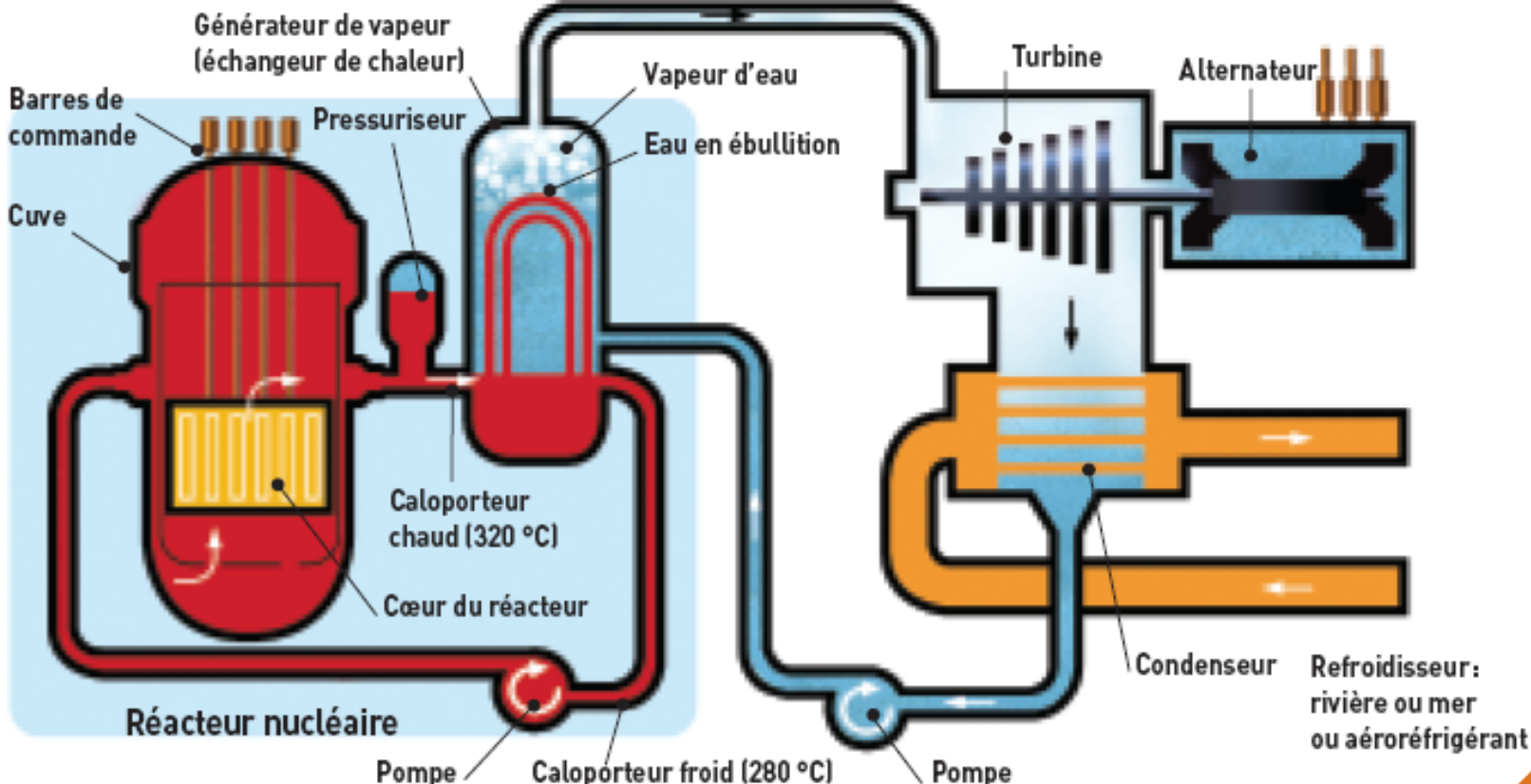
Filière	Combustible	Modérateur	Caloporteur
UNGG (uranium naturel-graphite-gaz) France 1954-1994	U nat (0.7% ^{235}U)	Carbone (graphite)	Gaz carbonique
CANDU Canada	U nat (0.7% ^{235}U)	Eau lourde (D_2O)	Eau lourde sous pression
RBMK (Reactor Bolchoe Molchnastie Kiplachie ou « Réacteur Bouillant de Grande Puissance ») 40% des réacteurs ex-URSS	U enrichi (1.8% ^{235}U)	Carbone (graphite)	Eau bouillante
REB, BWR (Réacteur à eau Bouillante) USA, Japon, Allemagne, Suède, ...	U enrichi (3-5% ^{235}U)	Eau entrant en ébullition dans le cœur (modérateur et caloporteur)	
REP, PWR, VVER (Réacteur à eau Pressurisée)	U enrichi (3-5% ^{235}U) MOX (Unat+ Pu)	Eau sous pression maintenue à l'état liquide (modérateur et caloporteur)	
RNR (Réacteur à neutrons rapides) Phenix, Superphenix	U enrichi ou Pu	Aucun	Sodium liquide

Répartition des types de réacteurs en 2010

TYPE	Number of Units	Total Capacity [MWe]
BWR	92	83,548
FBR	1	560
GCR	18	8,949
LWGR	15	10,219
PHWR	46	22,840
PWR	266	245,611
TOTAL	438	371,727

Source: PRIS, IAEA, 2010

Schéma de principe d'un réacteur à eau sous pression



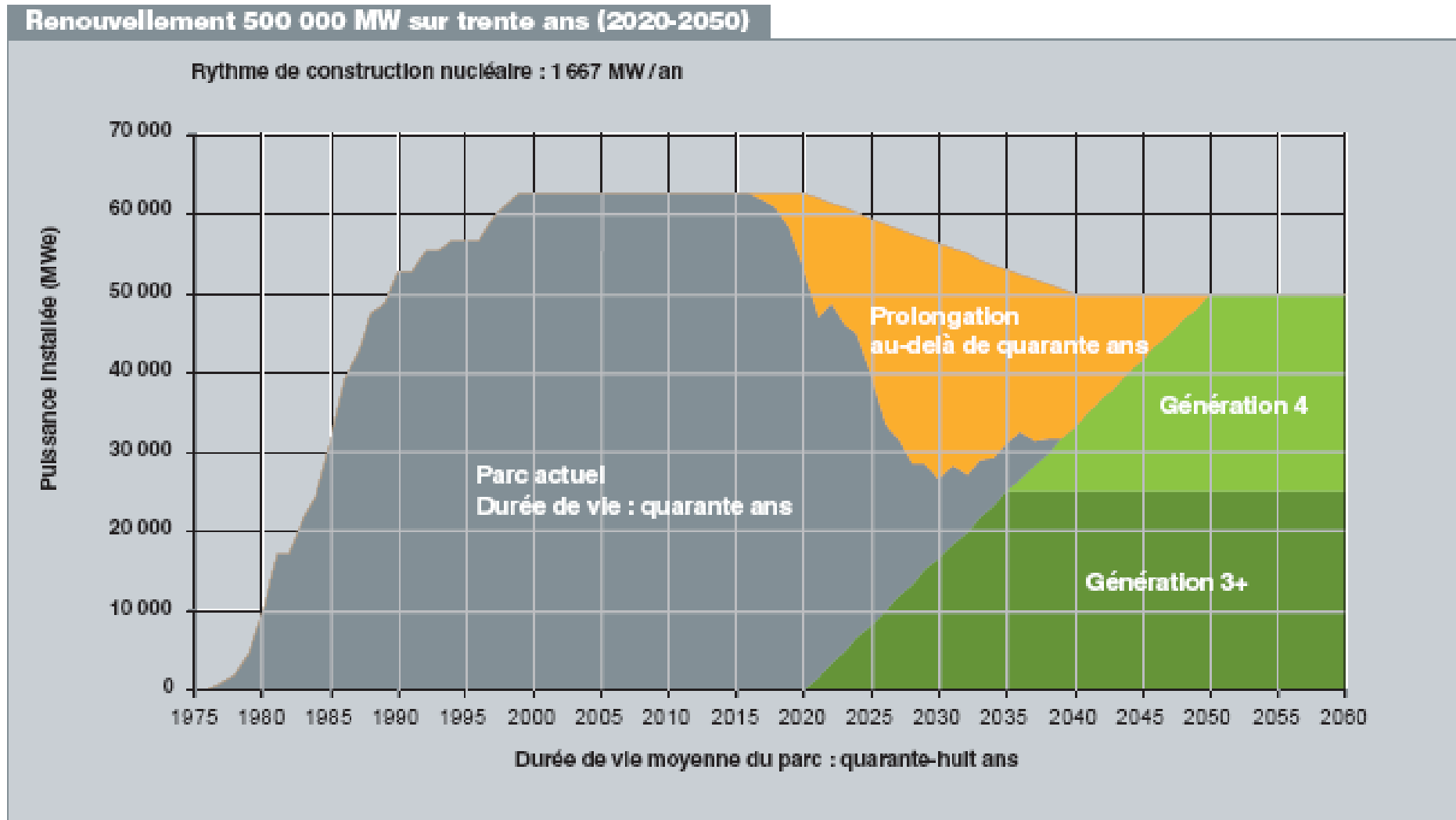
La 3^{ème} génération : des réacteurs évolutifs

- Économiser les ressources naturelles
- Augmenter la sûreté
- Diminuer le prix du kWh

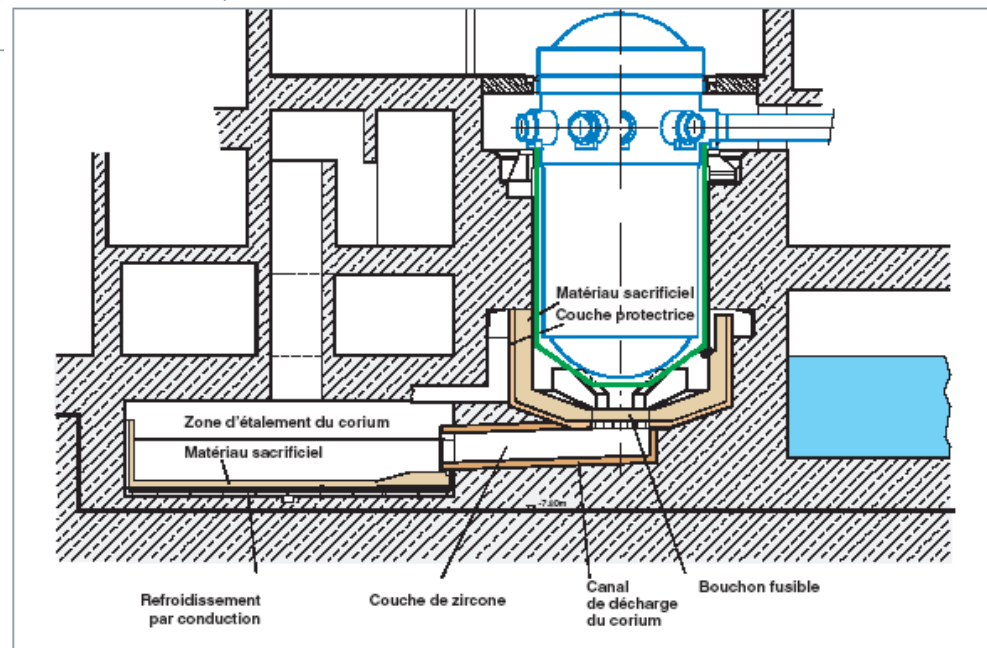
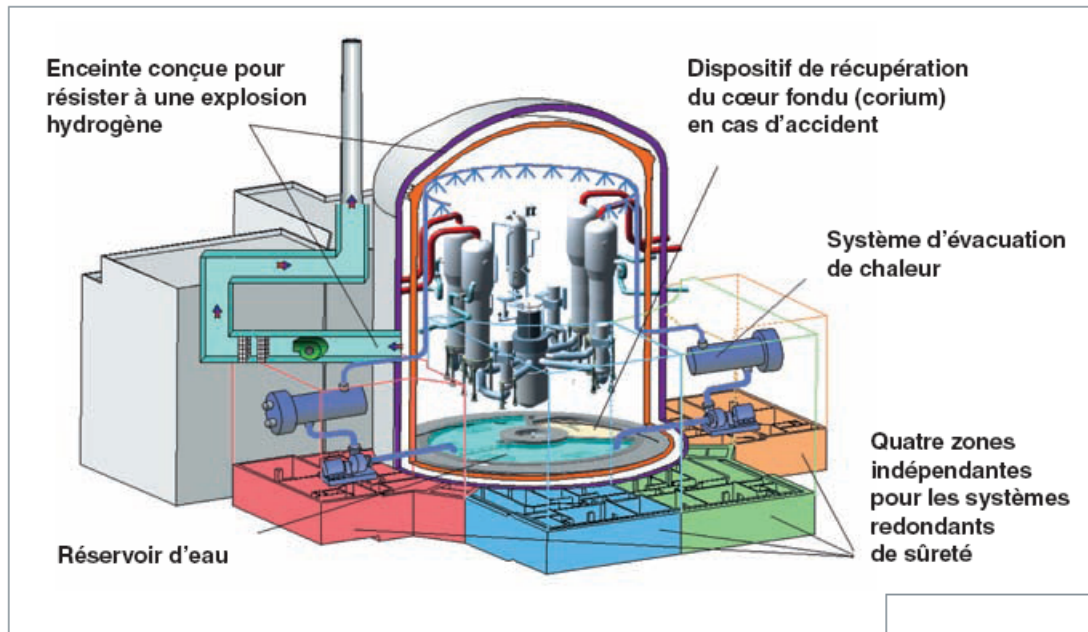
Les différents types de réacteur de troisième génération...

- **Réacteurs avancés à eau pressurisée**
AP 600, AP 1000, APR1400, APWR+, EPR
- **Réacteurs avancés à eau bouillante**
ABWR II, ESBWR, HC-BWR, SWR-1000
- **Réacteur avancé à eau lourde**
ACR-700 (Advanced CANDU Reactor 700)
- **Réacteurs intégrés de petites et moyennes puissances**
CAREM, IMR, IRIS, SMART
- **Réacteurs modulaires, haute température, à gaz**
GT-MHR, PBMR

Perspectives de renouvellement du parc EDF (2005)



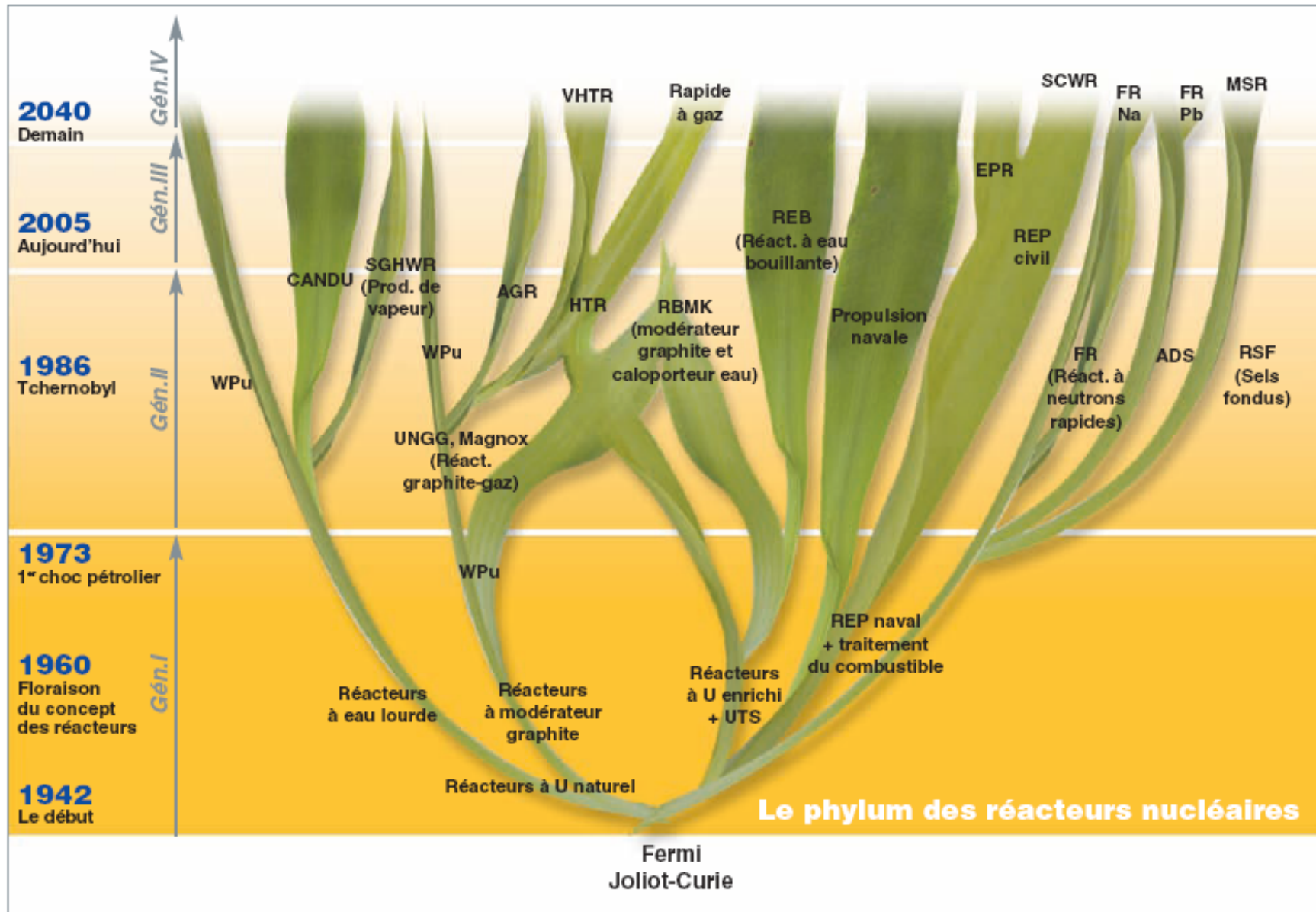
L'augmentation de la sûreté dans l'EPR



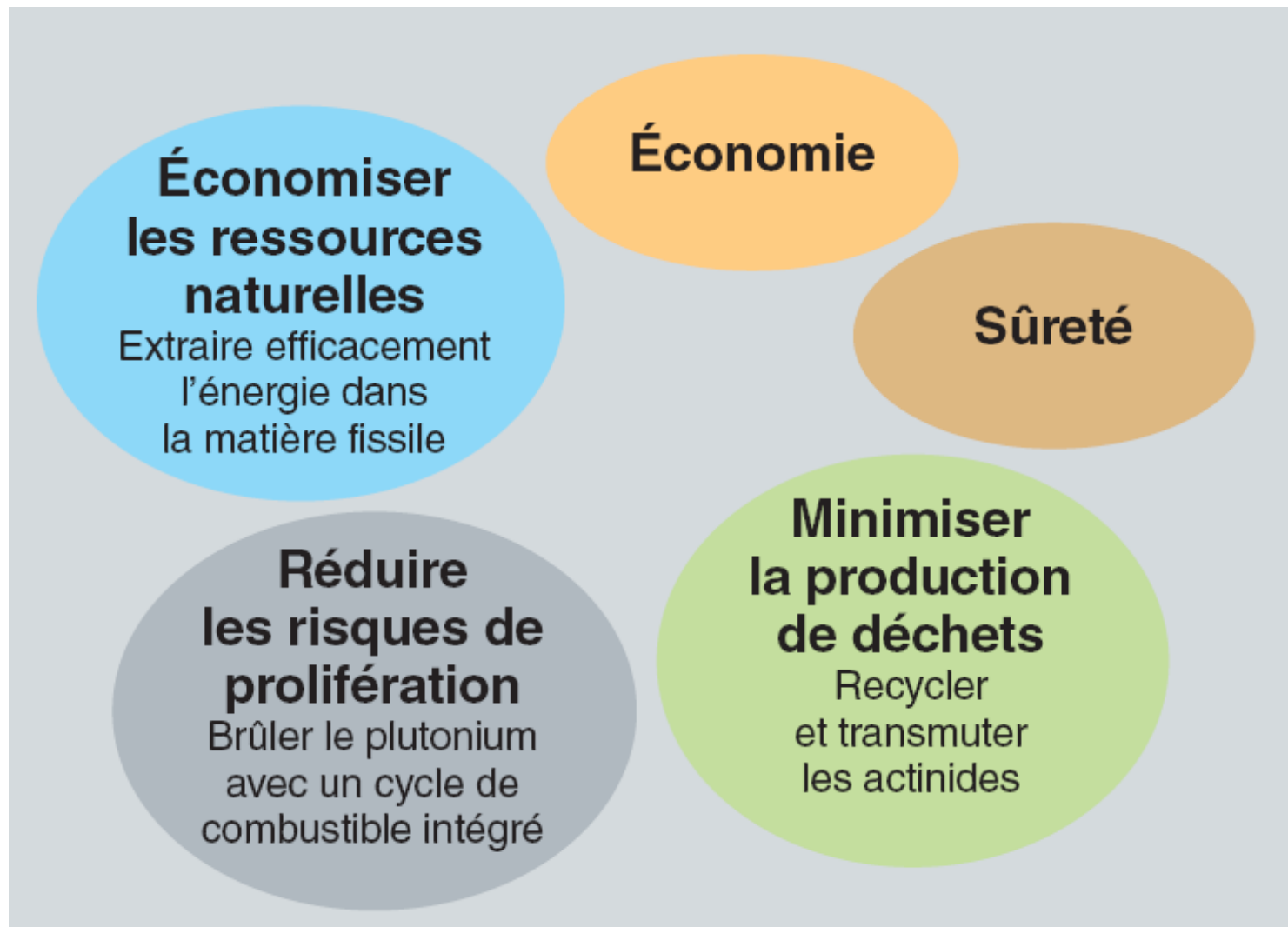
Les réacteurs Gen III+

- EPR (AREVA) , REP 1600MWe
 - 4 en construction Finlande, France, Chine
- ATMEA (AREVA-MHI), REP 1100MWe
 - Reprend des éléments de l'EPR,
 - Certification attendue incessamment sous peu
- KERENA (AREVA), REB 1250MWe
 - Nombreux dispositifs de sureté passifs (en complément des actifs)
- AP1000 (Westinghouse-Toshiba), REP 1100MWe
 - Certification US acquise, dispositifs de sureté passifs
- ABWR (General Electric-Hitachi-Toshiba) REB 1300MWe
 - Japon Kashiwasaki 2004, Taiwan 2005
- APWR (KHNP-Kepco), REP
 - Corée 2004-2010
- ...

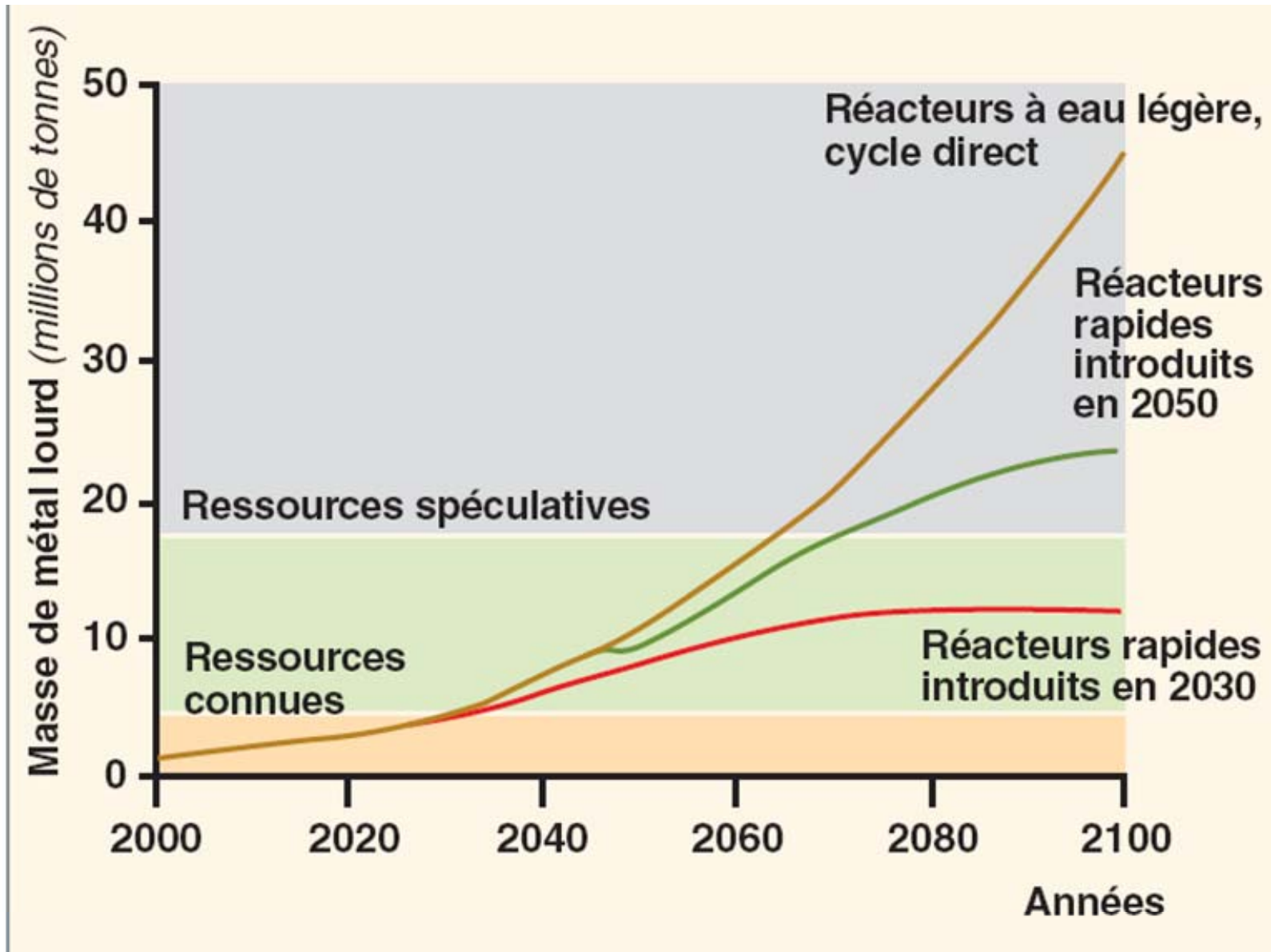
Les différentes évolutions de réacteurs



Les systèmes nucléaire du futur : les cinq critères fondamentaux



Besoins en uranium dans le monde



Génération IV



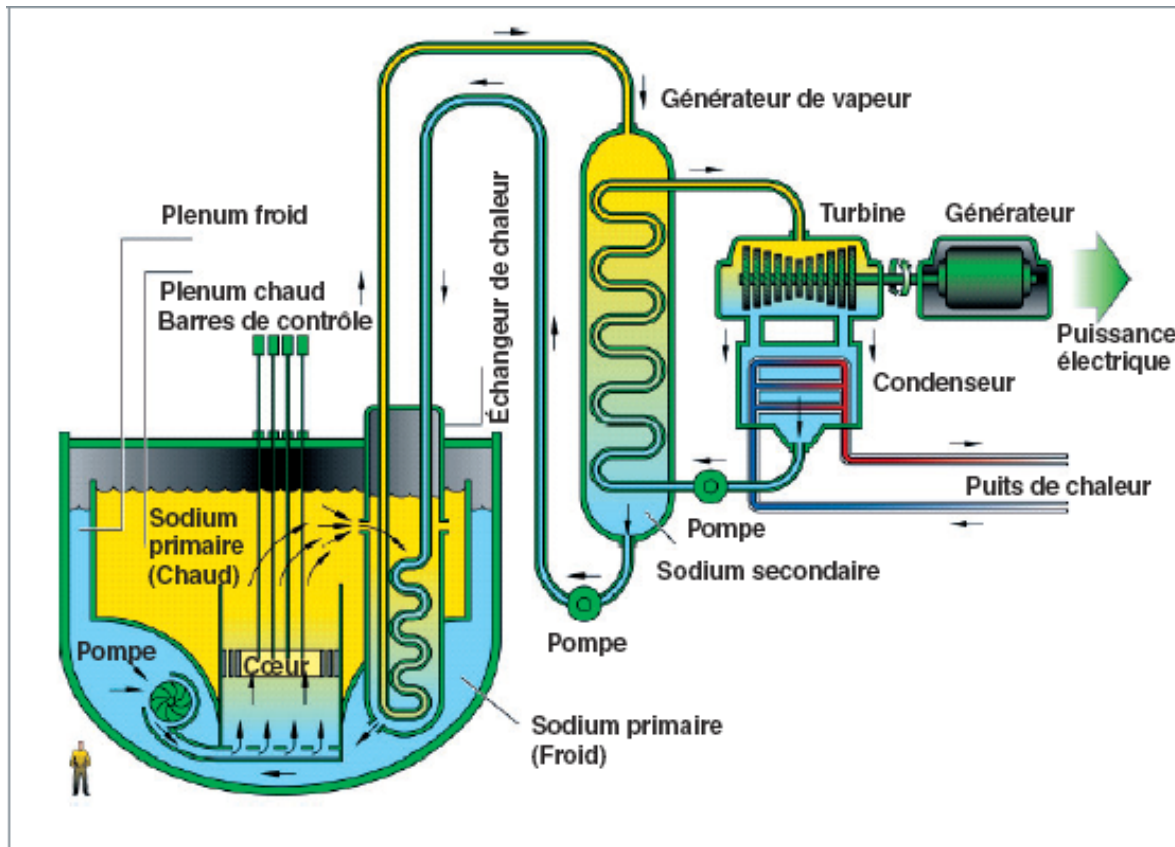
- Chine
- Russie

Filières nucléaires

selon la nature du **combustible** :

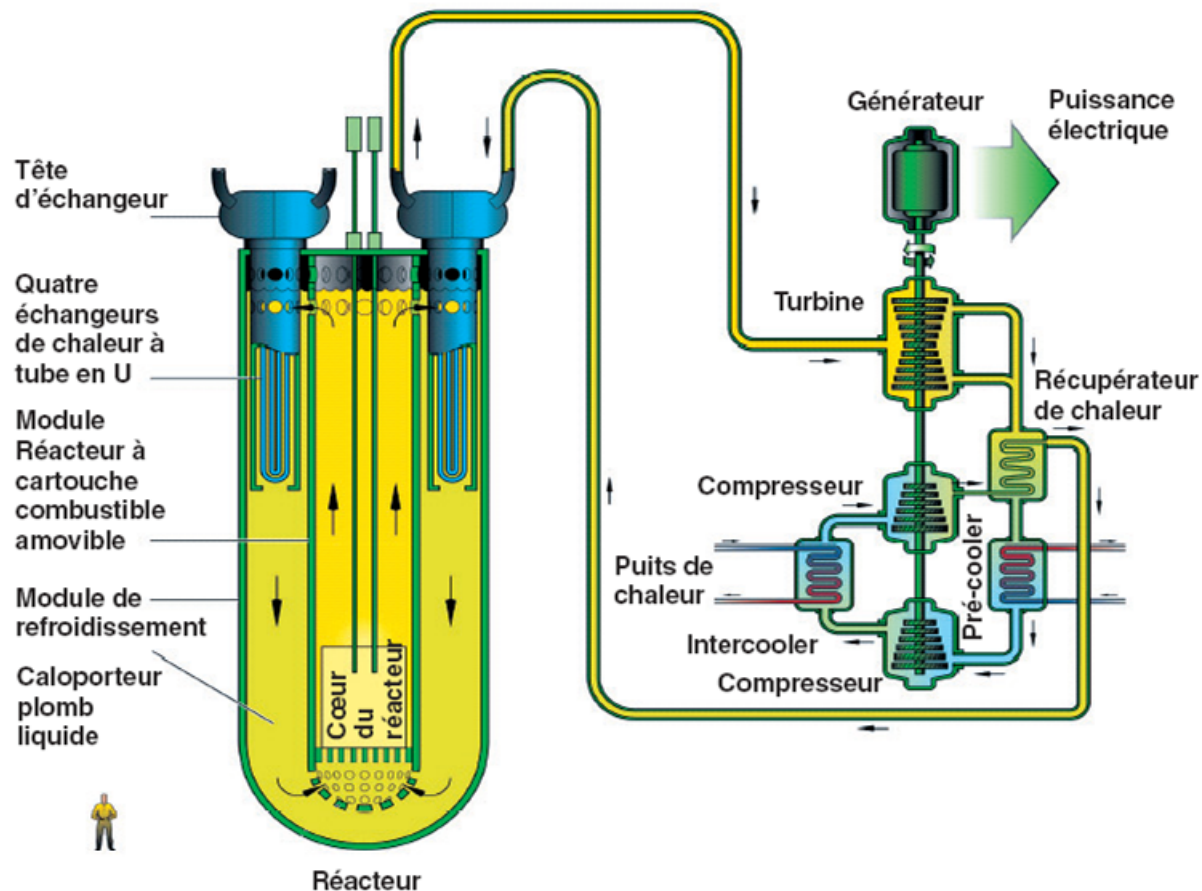
- oxyde d'uranium naturel, plus ou moins enrichi,
- mélange d'oxydes uranium-plutonium,
- thorium, etc.
- selon la nature du **modérateur** pour les réacteurs à neutrons thermiques :
 - eau,
 - eau lourde,
 - graphite
 - ou de son absence dans le cas d'un réacteur à neutrons rapides,
- selon la nature du **fluide caloporteur** :
 - eau pressurisée,
 - eau bouillante,
 - gaz,
 - métal liquide (sodium)
 - ou sels fondus.

SFR : le sodium amélioré



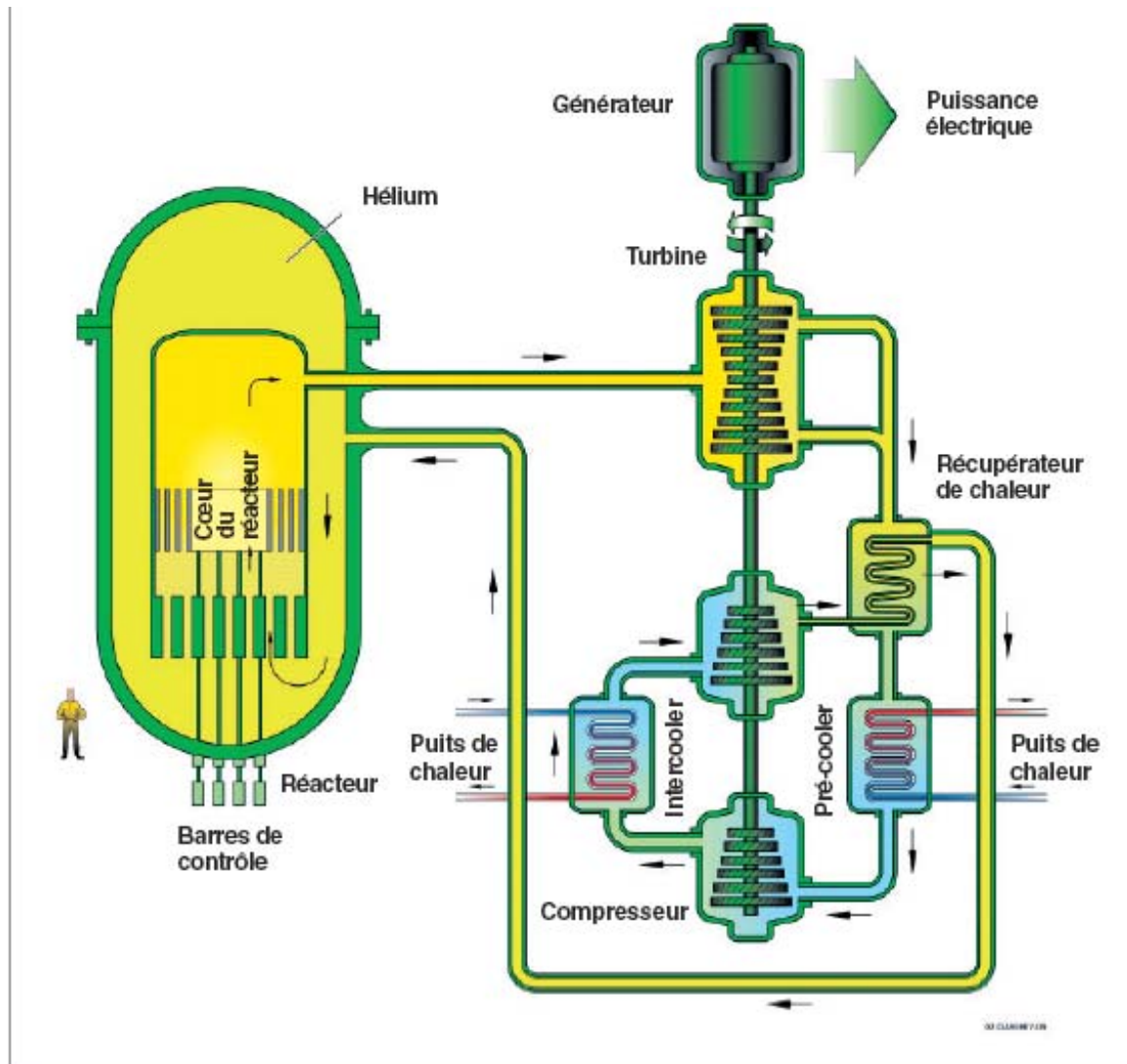
- Réacteur rapide
- Refroidissement sodium
- Recyclage actinides
- Multi-recyclage du plutonium
- Compatible avec objectif 2040
- Prototype ASTRID (AREVA-CEA)

LFR : un concept en plomb



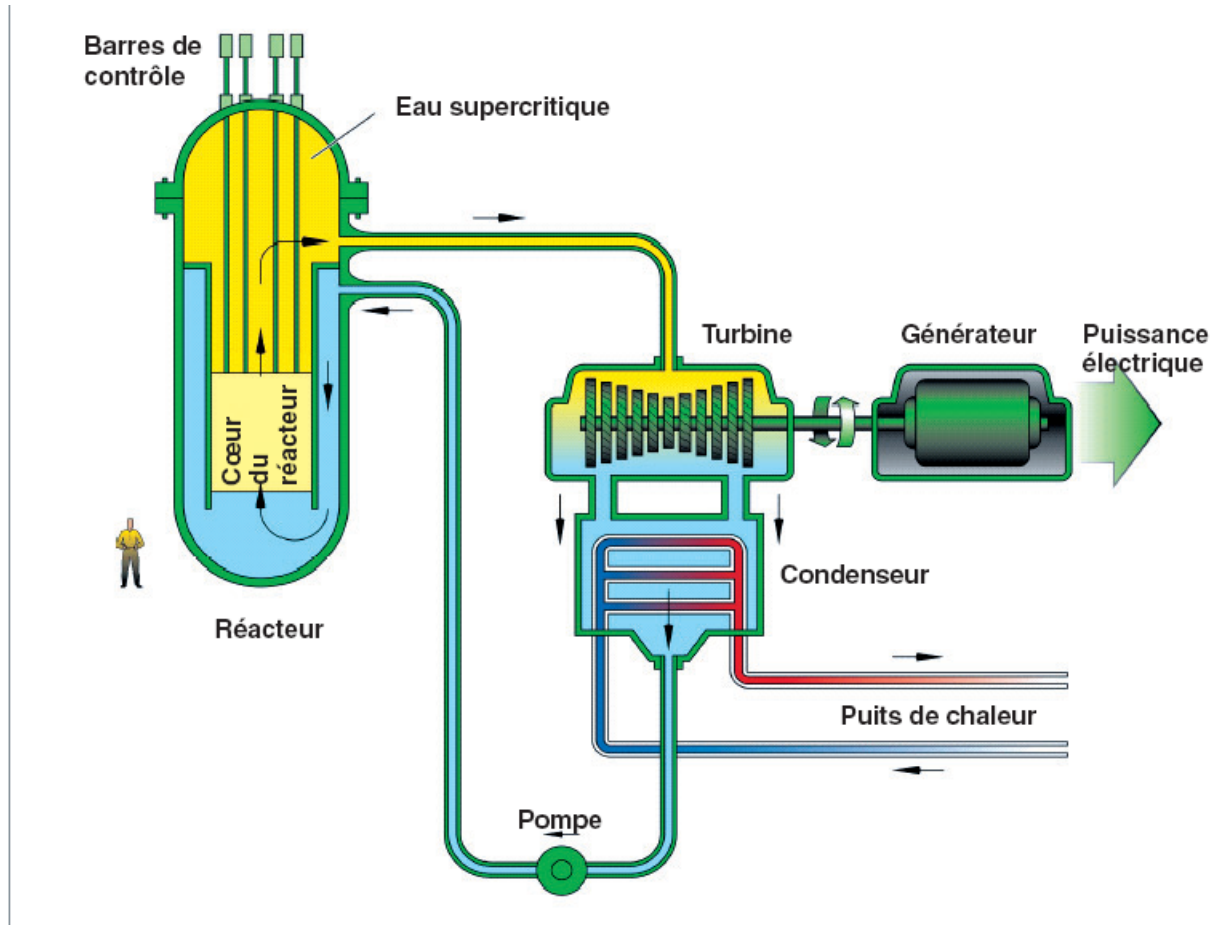
- Réacteur rapide
- Refroidi au plomb (Pb-Bi)
- « Compatibilité » du plomb avec eau et air
- Générateur vapeur dans la cuve

GFR : Du gaz rapide



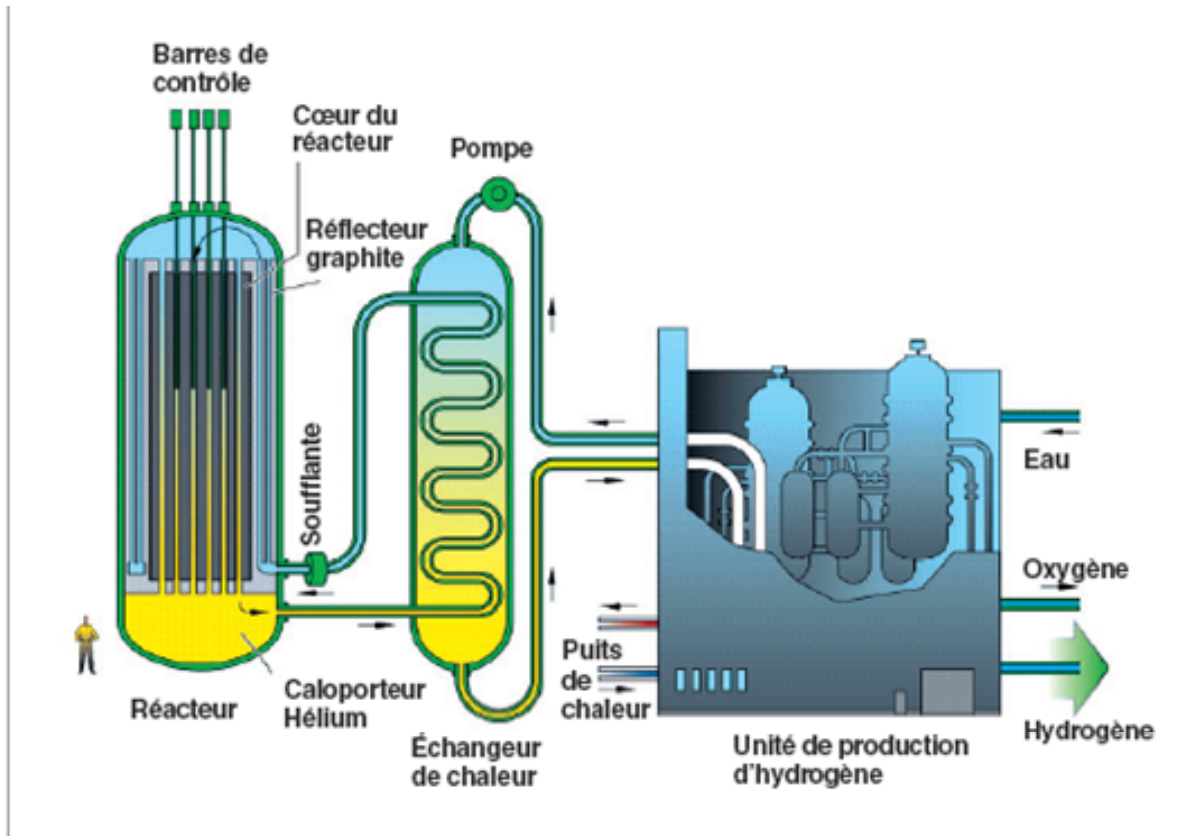
- Réacteur rapide
- Refroidi au gaz hélium
- Rendement $\geq 48\%$
- Haute température 850°C
- Dans la lignée des GT-MHR et PMBR
- Programme recherche Allegro (CEA)

SCWR: de l'eau mais supercritique



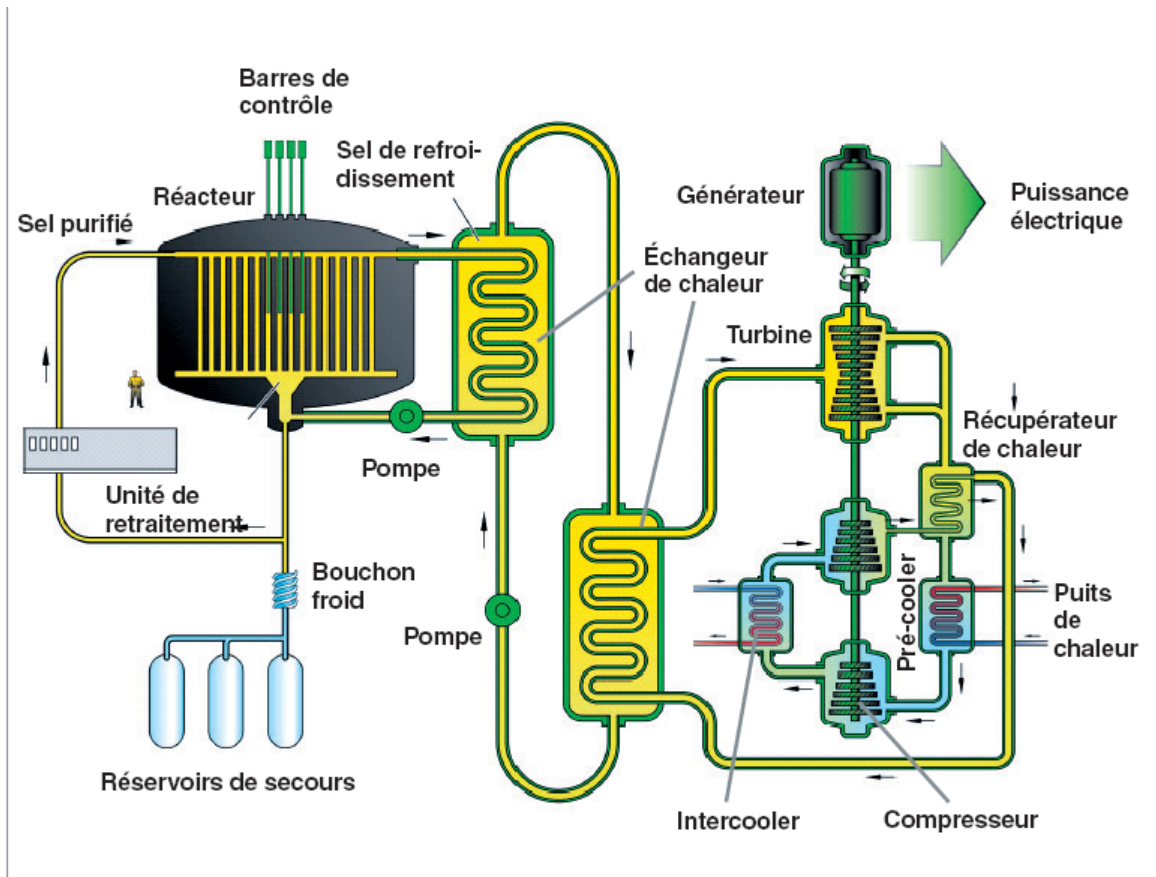
- Réacteur thermique
- Fonctionnement similaire à REB
- Utilisation de l'eau supercritique en tant que modérateur et fluide réfrigérant
 - Température 550°C
 - Pression 250 bars
 - Rendement 44%
- Compétitivité élevée

VHTR : objectif production d'hydrogène



- Réacteur thermique
- Caloporteur hélium
- Très haute température ($>1000^{\circ}\text{C}$)

MSR : système 2 en 1

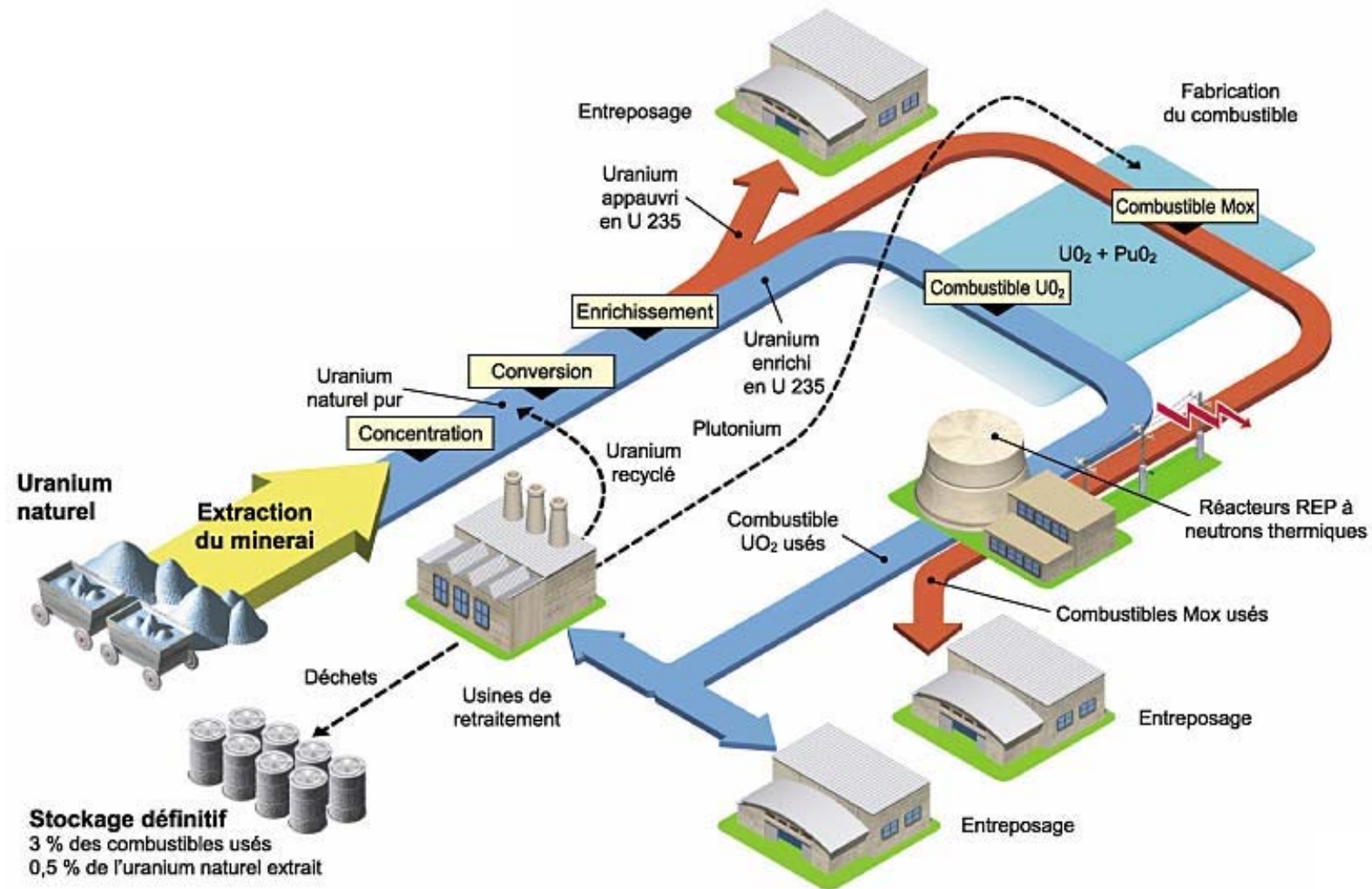


- Sels fondus contenant le combustible et servant de caloporteur
- 700°C
- Réacteur modéré au graphite
- Recyclage en ligne du combustible
- Pourrait fonctionner au thorium

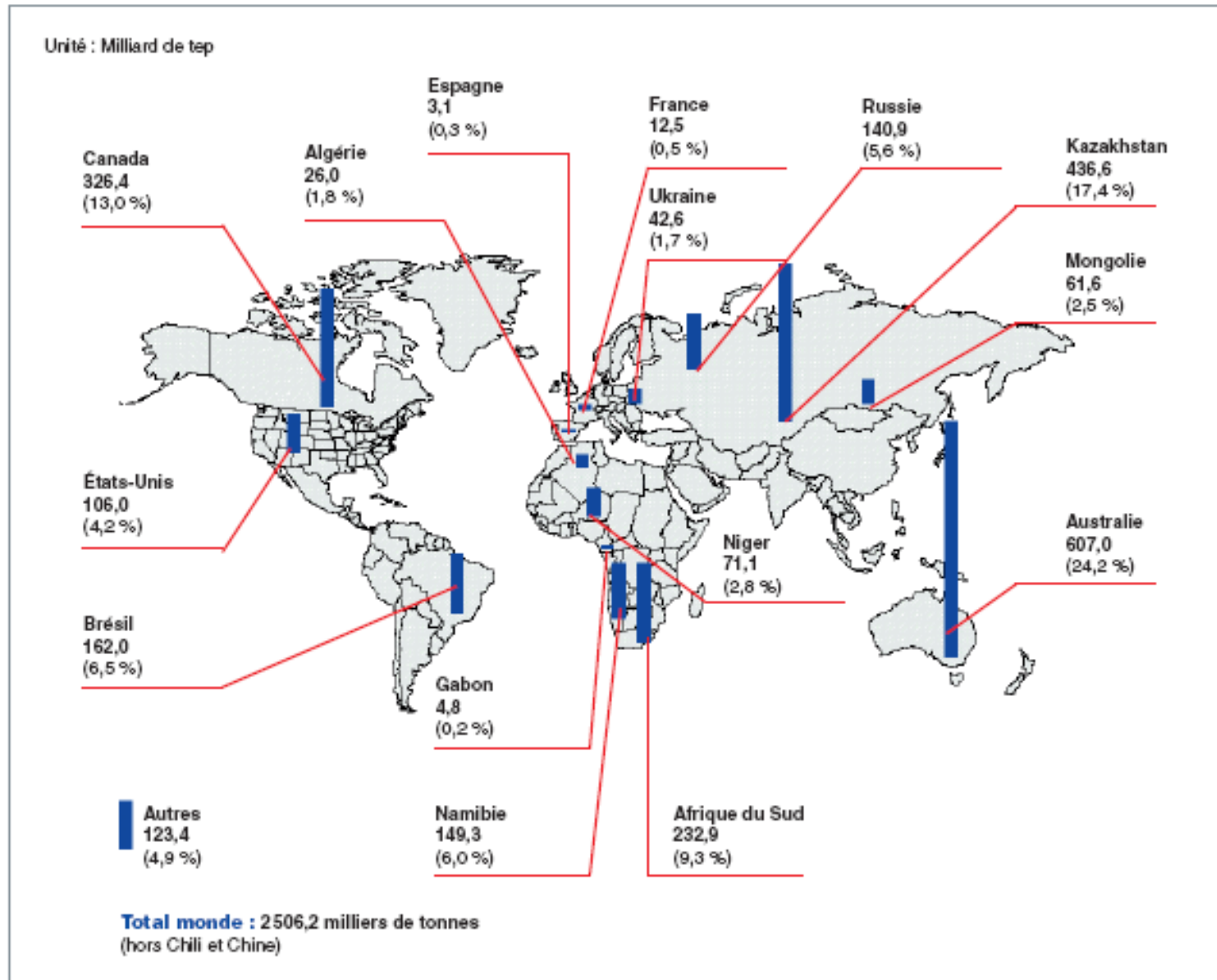
Sans oublier :

- Les économies d'énergie
- Le mix énergétique (renouvelables, ...)
- Les recherches sur le stockage d'énergie
- Le recyclage (y compris du CO₂)

Cycle du combustible



Localisation des ressources en Uranium (réserves prouvées 1999 à <80\$/kg U)



L'extraction de l'uranium du minerai

- U est présent dans la croûte terrestre (~3g/tonne)
 - 50 fois plus que Hg
 - 1000 fois plus que Au
- Minerai exploitable: 1-3 kg/tonne
(28-210kg/tonne au Canada)
- Mines à ciel ouvert ou galeries
 - Terrassement, lixiviation
- AREVA extrait ~20% de l'U dans le monde



La Crouzille.
Site minier du
Puy de l'Age
avant et après
son
réaménagement



La concentration et le raffinage de l'uranium

- Concassage, broyage des roches contenant U (0.1 à 0.5%)
- Extraction U par procédés physiques et chimiques



Pâte à ~75% d'oxyde d'uranium (Yellow cake)

- Expédition



- Purification (élimination impuretés)
- Conversion en tetrafluorure (UF_4) puis hexafluorure gazeux (UF_6)

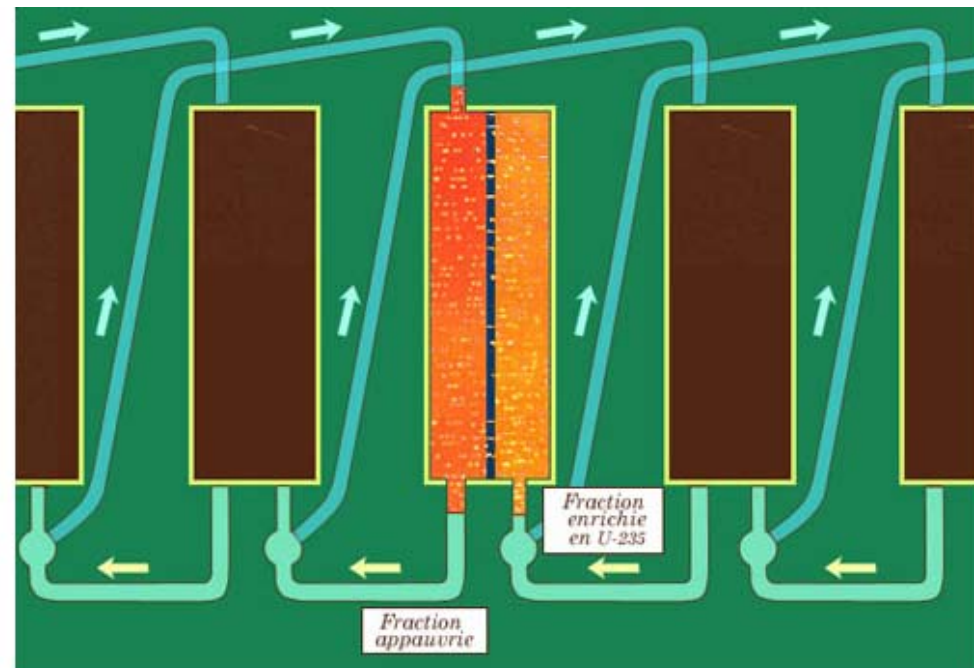
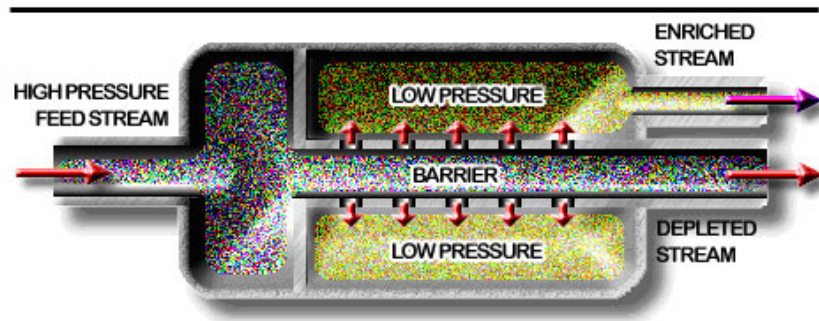
L'enrichissement de l'uranium

- Pour alimenter les REP, il faut disposer d'un combustible dont la proportion d' ^{235}U se situe entre 3 et 5 %, car seul cet isotope de l'uranium peut subir la fission nucléaire libératrice d'énergie
- Or, dans 100 kg d'uranium naturel, il y a 0,7 % seulement d' ^{235}U fissile. L'opération consistant à augmenter la proportion d' ^{235}U est appelée enrichissement.
- L'enrichissement pour augmenter la teneur en ^{235}U est une opération difficile car l' ^{235}U et l' ^{238}U se ressemblent beaucoup et ont quasiment les mêmes propriétés chimiques
- Cependant, il est possible de les différencier grâce à leur légère différence de masse. En effet, l' ^{235}U est un tout petit peu plus léger que l' ^{238}U
- C'est pourquoi, actuellement, l'enrichissement de l'uranium est basé sur la différence de mobilité due à cette faible différence de masse. De tous les procédés d'enrichissement étudiés jusqu'à présent, deux ont été développés à l'échelle industrielle: la diffusion gazeuse et l'ultracentrifugation.

Enrichissement par diffusion gazeuse

Le procédé par diffusion gazeuse consiste à faire passer l' UF_6 à l'état gazeux à travers une multitude de "barrières" qui sont des membranes percées de trous minuscules.

- Les molécules d'hexafluorure d' ^{235}U , plus légères que celles d'hexafluorure d' ^{238}U , traversent un peu plus rapidement chaque barrière, ce qui permet d'enrichir peu à peu l'uranium.
- Mais étant donné la masse très voisine des deux isotopes, le ralentissement de l' ^{238}U est très faible par rapport à celui de l' ^{235}U .

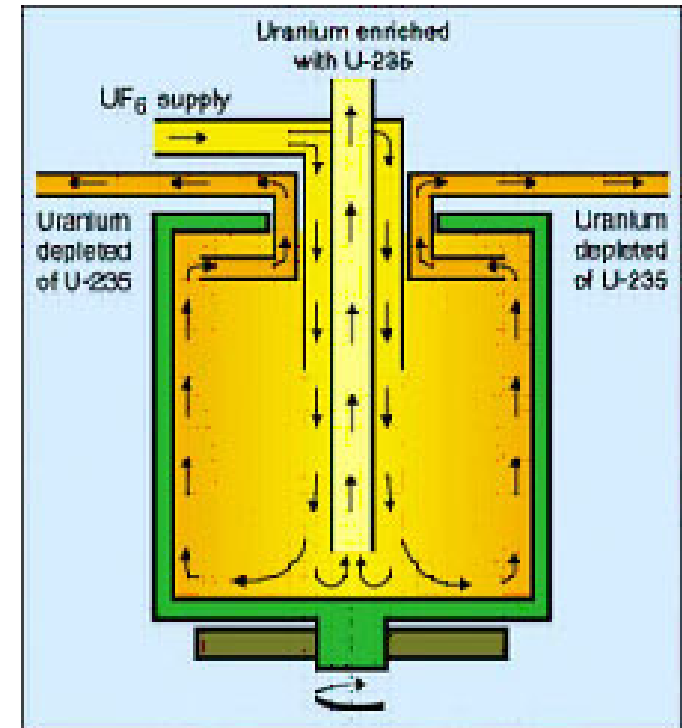


L'uranium est injecté sous forme d'hexafluorure d'uranium gazeux. Les molécules d'hexafluorure doivent traverser des membranes très fines percées de milliards de pores au cm^2 . Les molécules plus légères contenant l'isotope-235 franchissent un tout petit peu plus rapidement ces barrières. Au bout de 1400 barrières à l'usine Georges-Besse), on obtient le taux d'enrichissement d'environ 4%.

Enrichissement par ultracentrifugation

Procédé d'enrichissement de l'uranium utilisé à moins grande échelle par le groupe européen Urenco (Allemagne, Pays-Bas, Grande-Bretagne) et par AREVA (Georges Besse II).

- Ce principe de séparation utilise une centrifugeuse qui, telle une essoreuse à salade tournant à grande vitesse, projette plus vite à sa périphérie l' $^{238}\text{UF}_6$ que l' $^{235}\text{UF}_6$.
- La très légère différence de masse entre les deux molécules permet ainsi d'augmenter petit à petit la concentration en uranium 235.



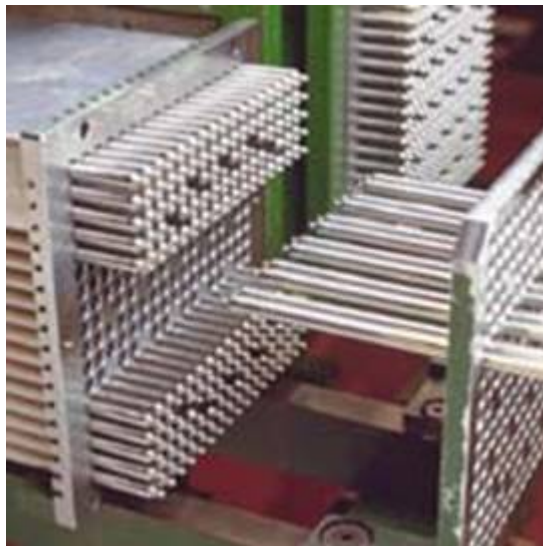
La préparation des assemblages de combustible

- Après enrichissement, l' UF_6 est converti en UO_2 sous la forme d'une poudre noire (**conversion**).
- UO_2 est comprimé puis fritté ($\sim 1700^\circ\text{C}$) en pastilles ($\Phi \sim 8.5\text{mm}$ et $\sim 13\text{mm}$ de long) (**pastillage**). Chaque pastille, qui ne pèse que 7 g, peut libérer autant d'énergie qu'une tonne de charbon (1 million de grammes).
- Les pastilles sont enfilées dans des gaines (4 m de long en alliage de zirconium) dont les extrémités sont bouchées de manière étanche pour constituer les "crayons" de combustible (**crayonnage**).
- Les crayons de combustible sont réunis en assemblages de combustible de section carrée (**assemblage**). Chaque assemblage contient 264 crayons. Le chargement d'un réacteur nucléaire de 900 mégawatts (millions de watts) nécessite 157 assemblages contenant en tout plus de 40 000 crayons 11 millions de pastilles.

Les étapes de la fabrication du combustible



Des crayons...

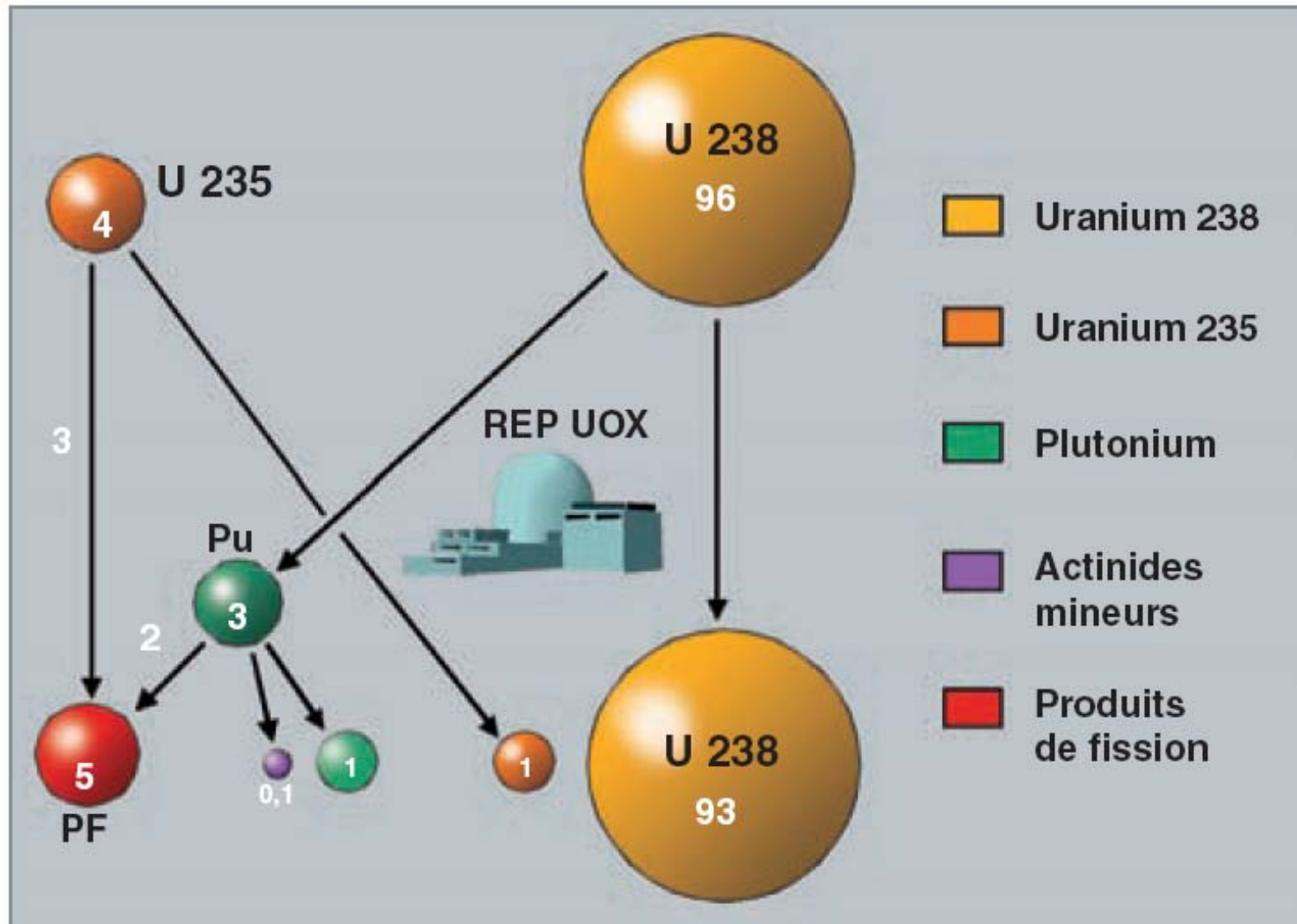


...insérés dans un
squelette...

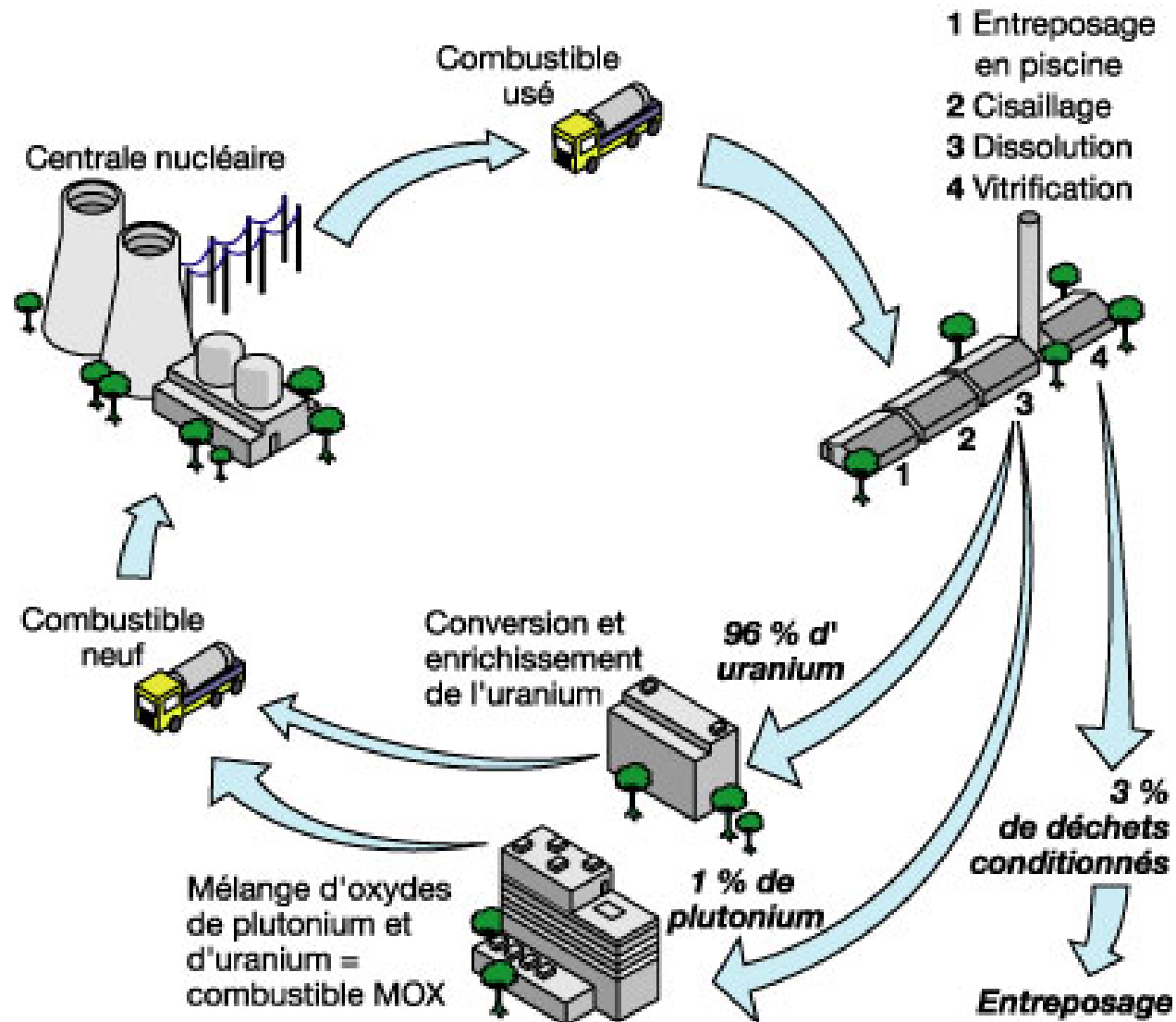
...forment un assemblage
de combustible!



Transformation dans un assemblage AFA pendant son séjour dans le réacteur (taux de combustion 45 GWj/tU)



Le traitement-recyclage du combustible



Comment gère-t-on le combustible au coeur du réacteur ?

- Les assemblages de combustible forment le coeur du réacteur où ils séjournent 3 ou 4 ans.
- A chaque inter cycle, ils sont redistribués dans le cœur pour prendre en compte leur épuisement progressif.
- Lorsqu'il est trop "usé" pour produire de l'énergie de manière performante, le combustible est retiré du coeur du réacteur et remplacé par du combustible neuf.
- Un réacteur du parc français consomme ainsi environ 27 tonnes d'uranium enrichi par an.



Le refroidissement du combustible

- Le combustible doit donc être retiré du réacteur même s'il contient encore des quantités importantes de matières énergétiques récupérables, notamment l'uranium et le plutonium. Ce combustible usé est également très radioactif en raison de la présence des produits de fission.
- Les rayonnements émis par ces atomes radioactifs dégagent beaucoup de chaleur et, après son utilisation, le combustible usé est donc entreposé dans une **piscine de refroidissement près du réacteur pendant trois ans** pour laisser diminuer son activité

Les objectifs du retraitement

- **Récupérer la matière encore utilisable, le plutonium et l'uranium**, pour produire à nouveau de l'électricité. C'est le recyclage des matières énergétiques contenues dans les combustibles usés .
- **Trier les déchets radioactifs non récupérables.**
 - Pays ayant opté pour le retraitement : Les pays ayant choisi d'avoir une usine de retraitement sont la France, la Grande-Bretagne, la Russie et le Japon. D'autres pays comme l'Allemagne, la Suisse et la Belgique font retraiter dans d'autres pays (notamment en France).
 - Certains pays n'ont pas opté pour le retraitement, par exemple, la Suède et les États-Unis. Dans ce cas, les combustibles usés sont considérés comme des déchets et sont directement stockés après leur retrait du réacteur.

L'extraction des produits de fission

- Entreposage en piscine des assemblages de combustible usés lors de leur arrivée dans l'usine de retraitement.
- Cisailage en petits tronçons, après separation des embouts
- Dissolution du combustible dans HNO_3 qui dissout le combustible mais laisse intacts les morceaux métalliques (gainés...). Ceux-ci seront compactés et stockés comme déchets nucléaires.
- Séparation par traitements chimiques successifs du plutonium, de l'uranium et des produits de fission. Ces derniers seront intégrés dans des verres spéciaux (vitrification) et stockés comme déchets nucléaires.
- Le plutonium et l'uranium (encore enrichi à $>1\%$) sont ensuite extraits de ce jus par des méthodes chimiques analogues à la séparation de l'huile et du vinaigre dans la vinaigrette. Ici, c'est le tributyl-phosphate (TBP) qui joue le rôle de l'huile et qui concentre l'uranium et le plutonium.

Le recyclage des matières combustibles

- De nouveaux combustibles composés d'un mélange d'oxyde d'uranium et oxyde de plutonium (appelés Mox, de l'anglais "*Mixed Oxides*") sont déjà utilisés dans certains réacteurs (REP) d'EDF.
 - Le MOX est une céramique faite d'oxydes d'uranium et de plutonium. Le combustible MOX, utilisable à la place de l'uranium enrichi, permet de brûler une partie du plutonium produit par le 1er passage du combustible uranium dans le réacteur.
 - Le recyclage du plutonium dans du MOX permet de mieux utiliser le contenu énergétique du combustible. Les dépenses liées aux opérations de traitement sont compensées par les économies de combustible liées au recyclage.
- L'uranium récupéré au cours du retraitement et qui est encore légèrement plus riche que l'uranium naturel (environ 1 % d'²³⁵U) pourra être à nouveau enrichi à plus de 3 % et suivre une voie analogue à celle d'un combustible ordinaire. (uranium de retraitement : URT)

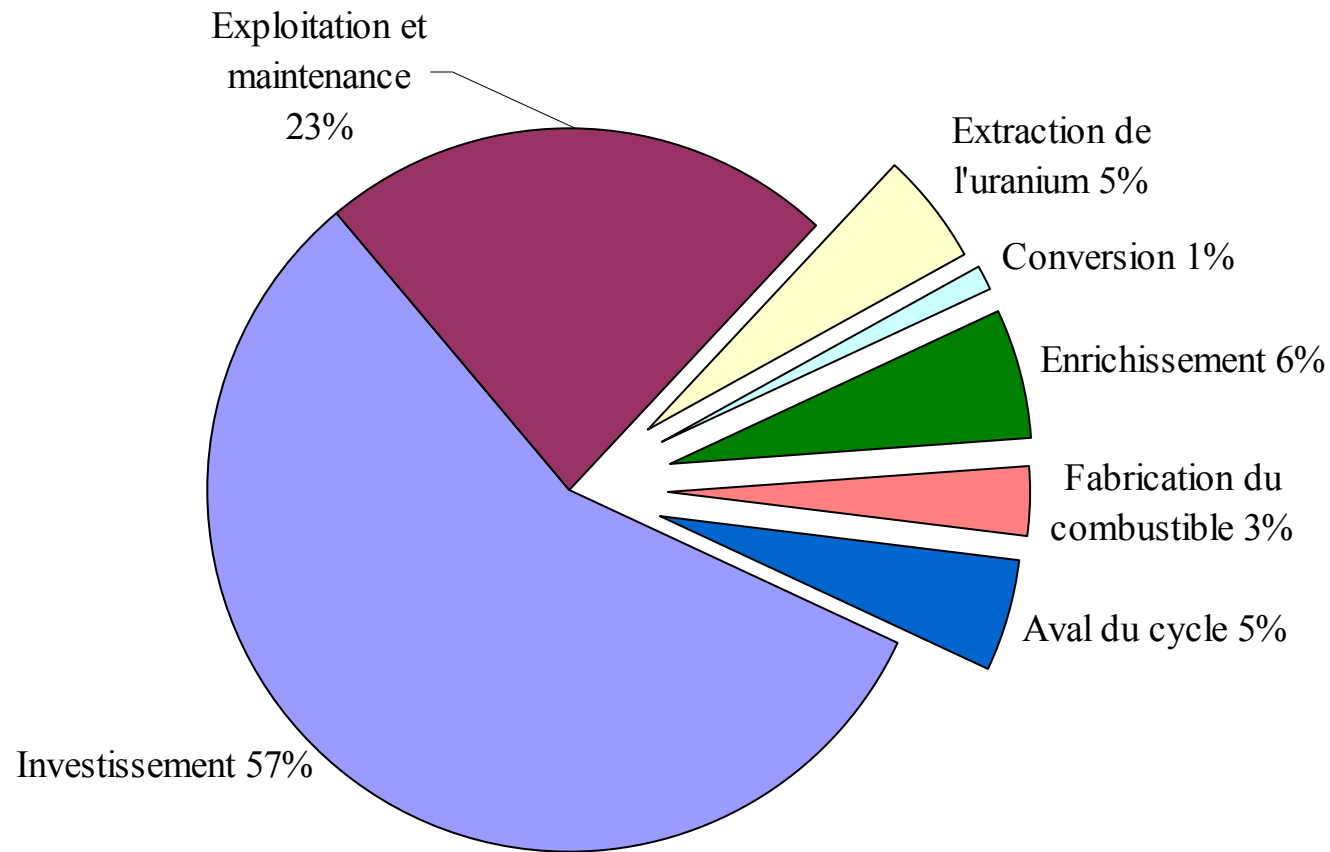
Récupération du Pu comme combustible

- Le Pu est un poison (mais pas plus que la nicotine ou que les botulines issues de la nourriture avariée) Sa toxicité chimique impose (dans une mise en œuvre nucléaire) de le manipuler dans des enceintes isolées étanches, appelées boîtes à gants.
- Le Pu est radioactif (pas plus que ce qu'on malheureusement disséminé dans l'atmosphère les essais d'armes atomiques)
- 1 g de Pu peut produire autant d'énergie que 1 tonne de pétrole
- Il y a dans le monde ~1250 tonnes de Pu (205 t issu de retraitement, 250 t dans les armes, ~800 t non séparé dans le combustible usé) soit 1000 millions de t de pétrole ou 6 milliards de barils ou 10 ans de consommation française de pétrole

Recyclage de l'uranium militaire

- Américains et Russes se sont mis d'accord pour reconvertir 500 tonnes d'uranium hautement enrichi (sur 20ans)
- 500 t ^{235}U enrichi à 90% + 14759 t ^{235}U enrichi à 1.5%
→ 15259 t ^{235}U enrichi à 4.4% (économie de 152000 t U nat)
- De quoi alimenter 636 réacteurs de 1000MWe durant 1 an

Ventilation des coûts de production de l'électricité nucléaire



L'électronucléaire ...

- protège de l'augmentation de l'effet de serre
- n'engendre aucun polluant atmosphérique
- dégage moins de 0.1% de la radioactivité reçue par l'homme
- ne produit que ~1% des déchets industriels toxiques
- a doublé l'indépendance énergétique française
- évite l'épuisement des réserves fossiles
- procure en Europe ~400 000 emplois directs dans une technologie de pointe
- rapporte à la France quelques 5 G€ par an à l'exportation

Sûr, économique, écologique!