



# L'énergie nucléaire : état de l'art, perspectives

*Bernard Bonin*

**CEA, Direction de l'Énergie Nucléaire**



## Les principes généraux

La réaction en chaîne et son contrôle

## Le nucléaire actuellement

Le cycle du combustible

Sûreté, risques

Le parc existant, son fonctionnement, ses performances

## Filières et générations de réacteurs

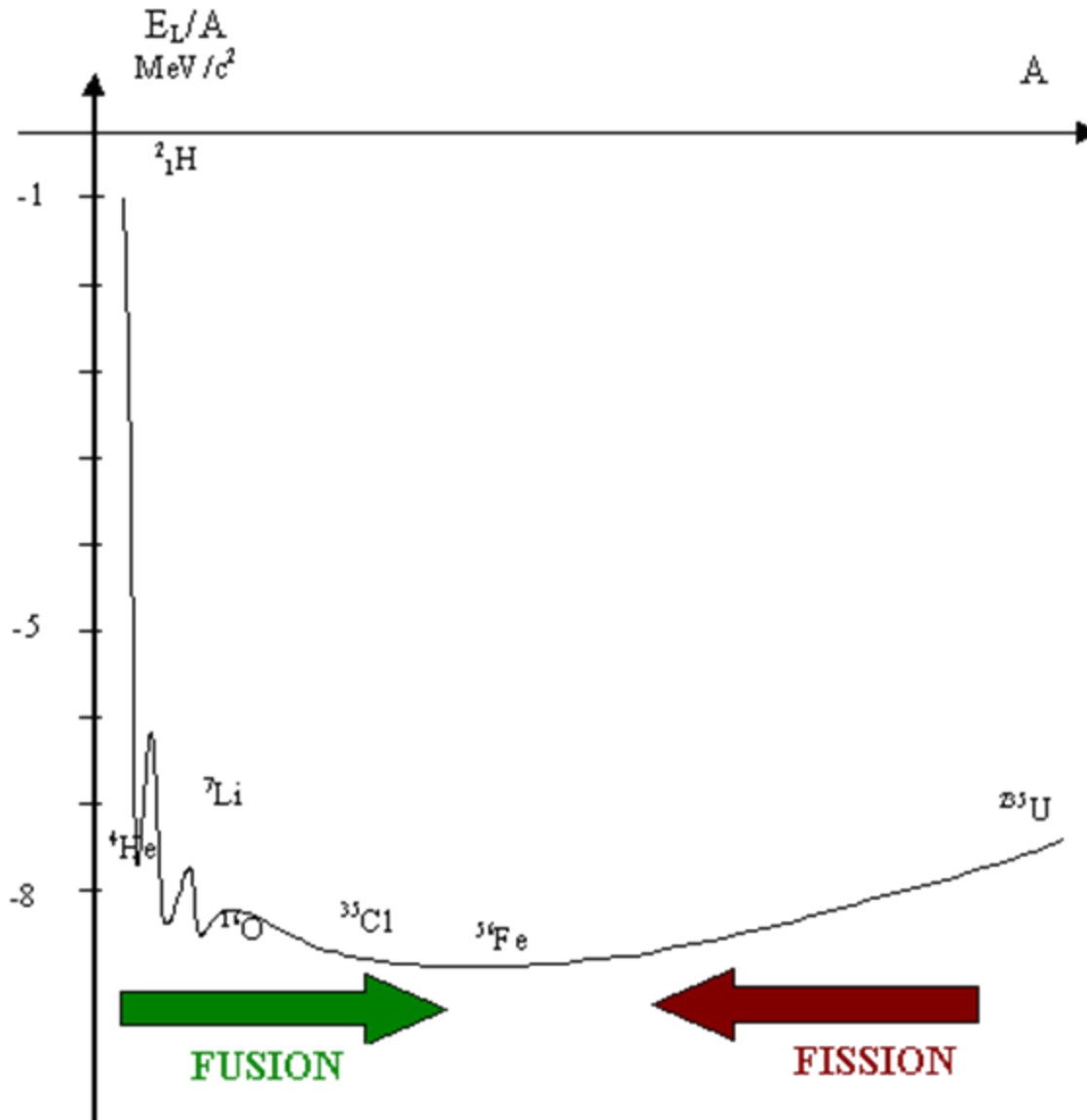
Les systèmes à neutrons lents vs rapides

## Le nucléaire du futur

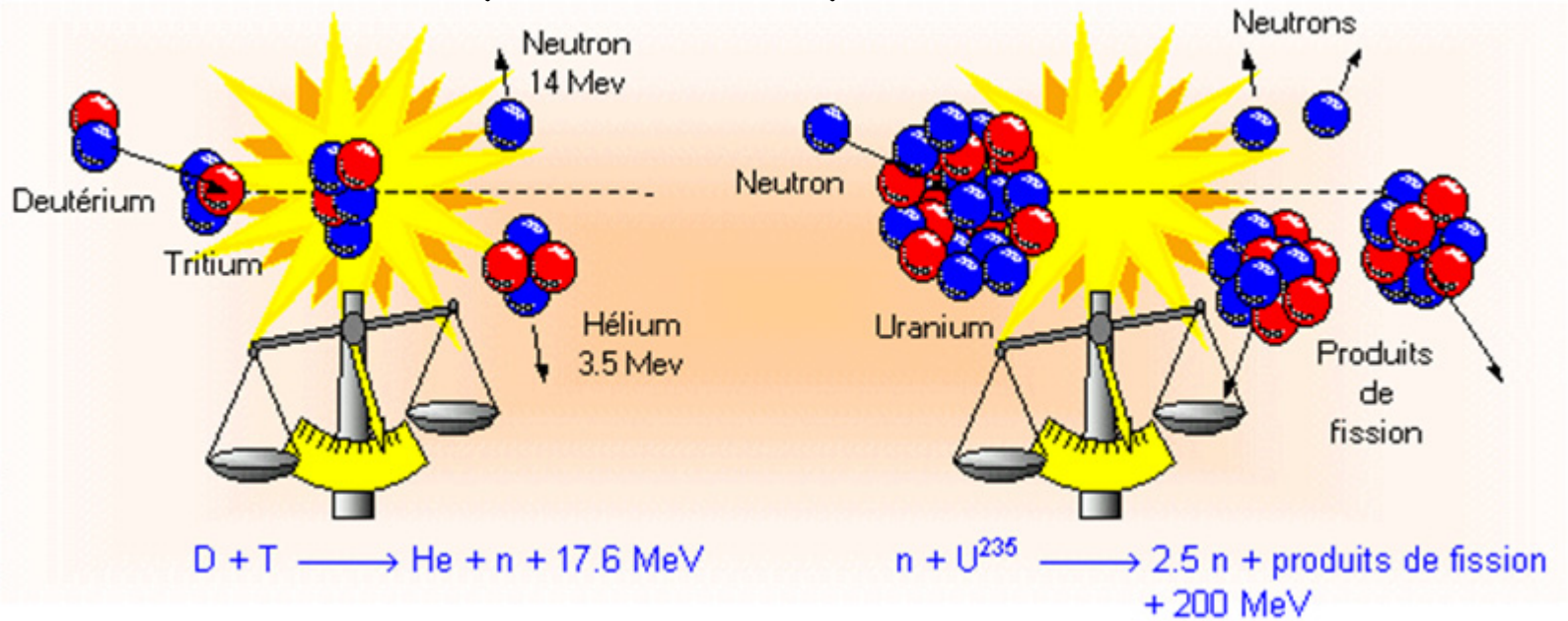
De nouveaux critères pour un nucléaire durable

Portrait des systèmes nucléaires du futur, ce qu'on peut en attendre, leurs perspectives de développement

# Energie de liaison nucléaire



# UN BILAN ÉNERGÉTIQUE FANTASTIQUE !



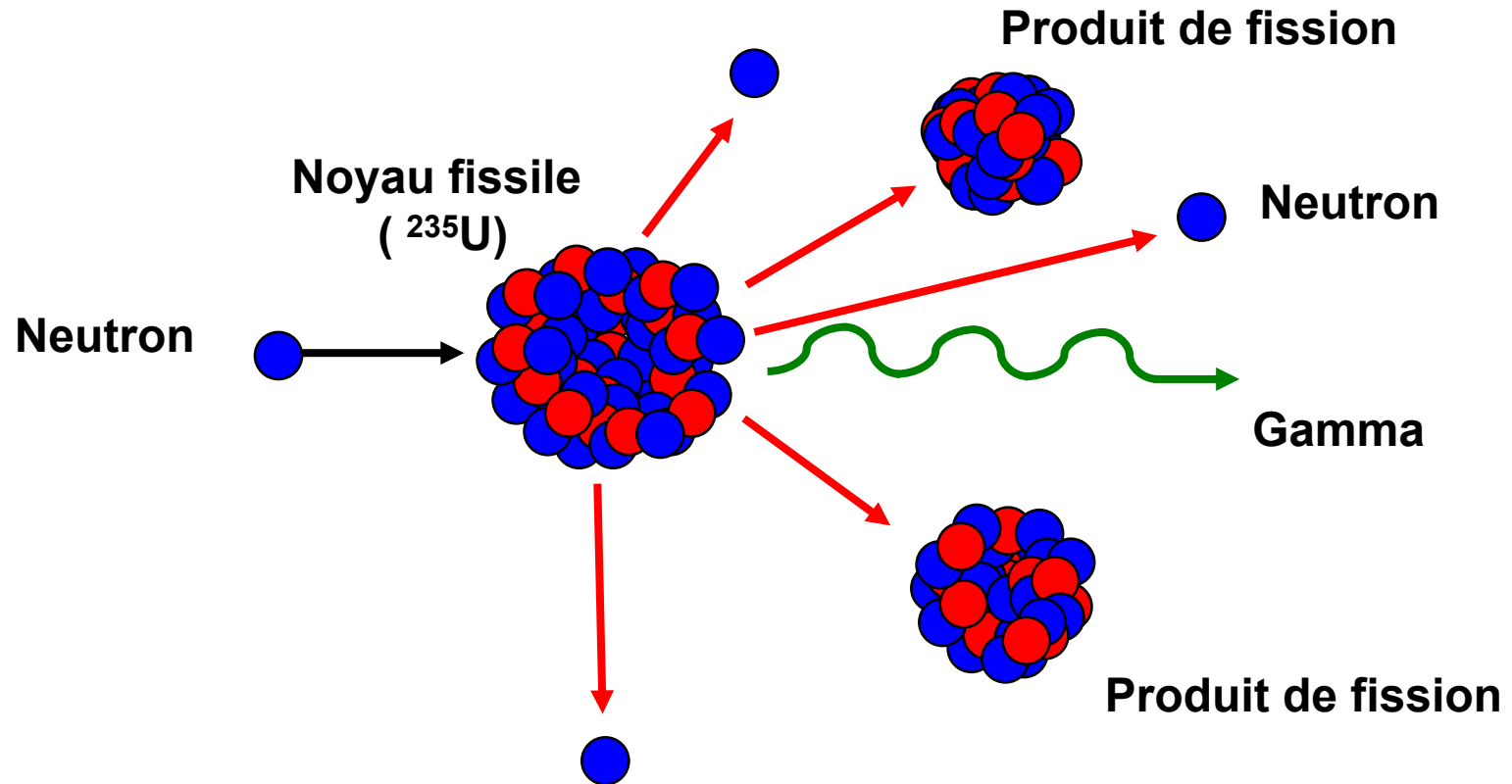
Fusion totale d'1 g de combustible: 330 GJ

Fission complète d'1 g  $U_{235}$ : 83 GJ

Combustion d'1tonne de pétrole : 42 GJ



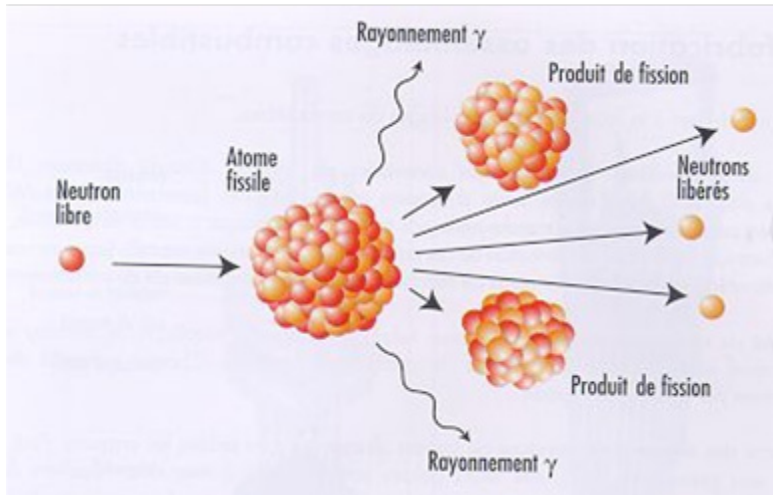
# La fission nucléaire



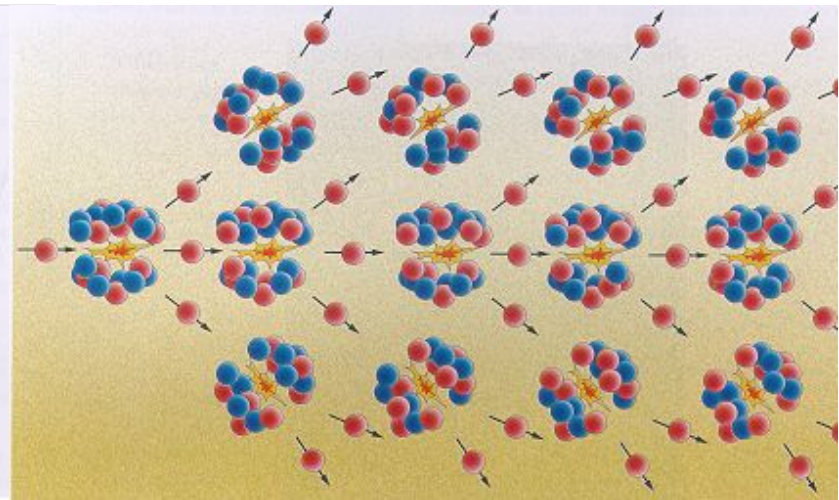
# Fission nucléaire et réaction en chaîne



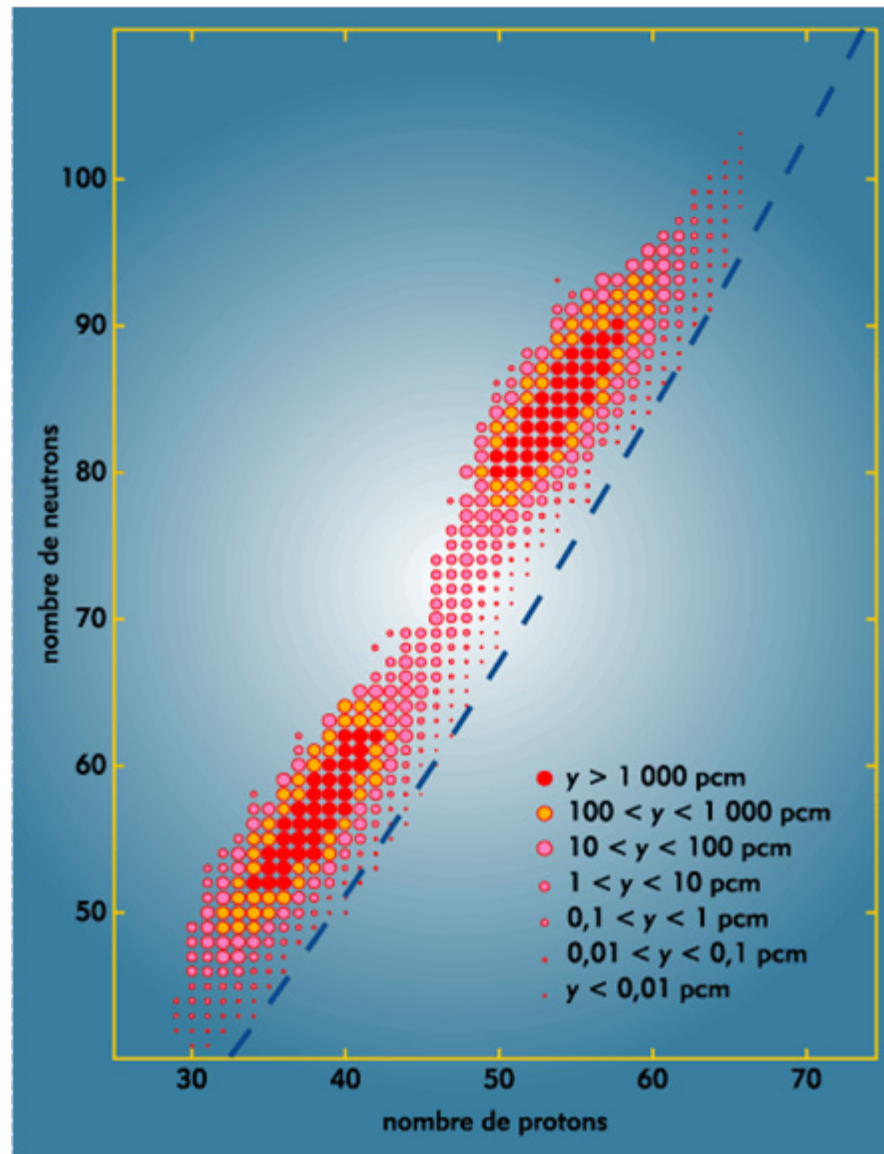
Fission nucléaire



Réaction en chaîne



# Les produits de fission





## Les principes de fonctionnement

**La réaction en chaîne et son contrôle**

Le cycle du combustible

## Le nucléaire actuellement

Le parc existant, son fonctionnement, ses performances

Sûreté, risques

## Filières et générations de réacteurs

Les systèmes à neutrons lents vs rapides

## Le nucléaire du futur

De nouveaux critères pour un nucléaire durable

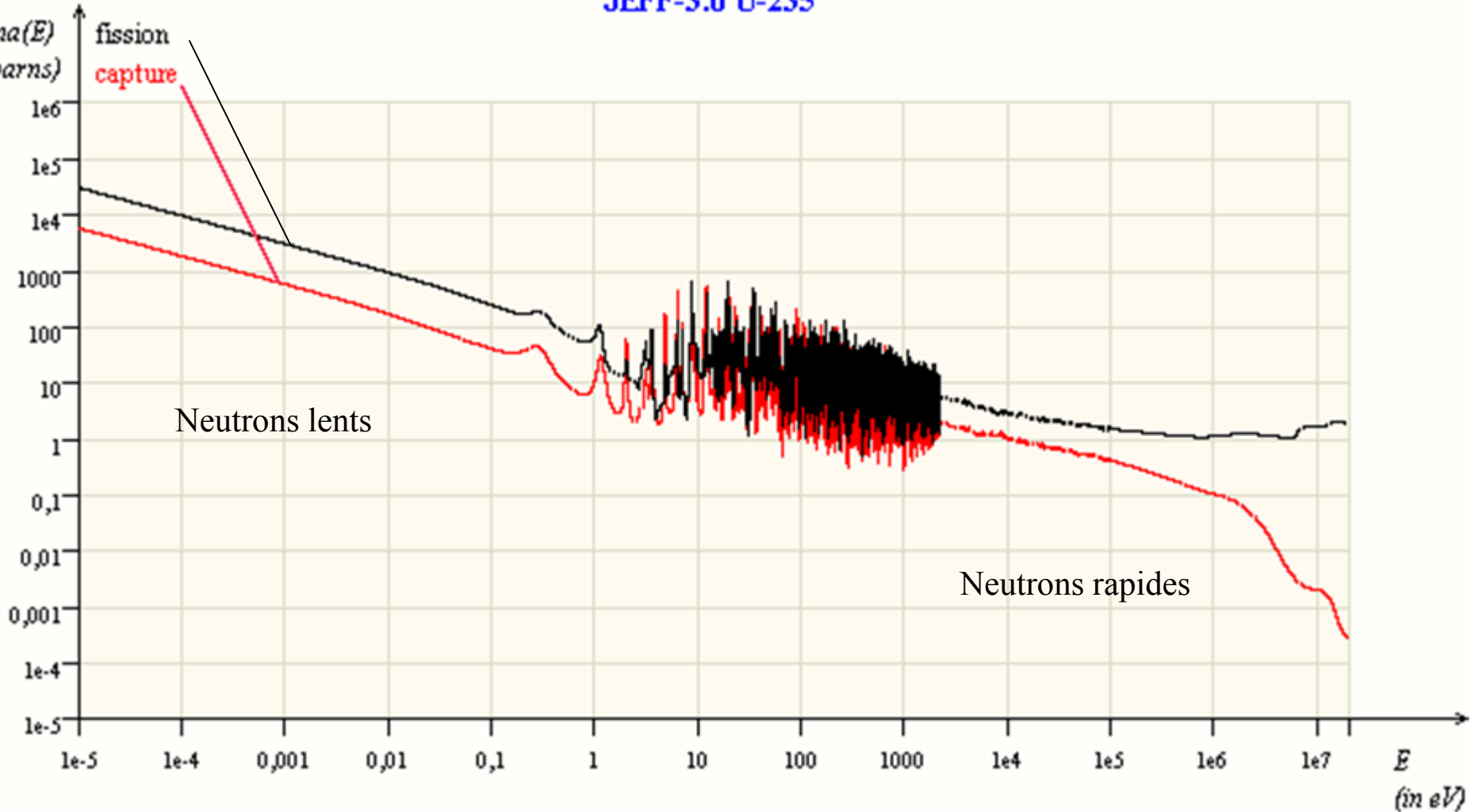
Portrait des systèmes nucléaires du futur, ce qu'on peut en attendre, leurs perspectives de développement

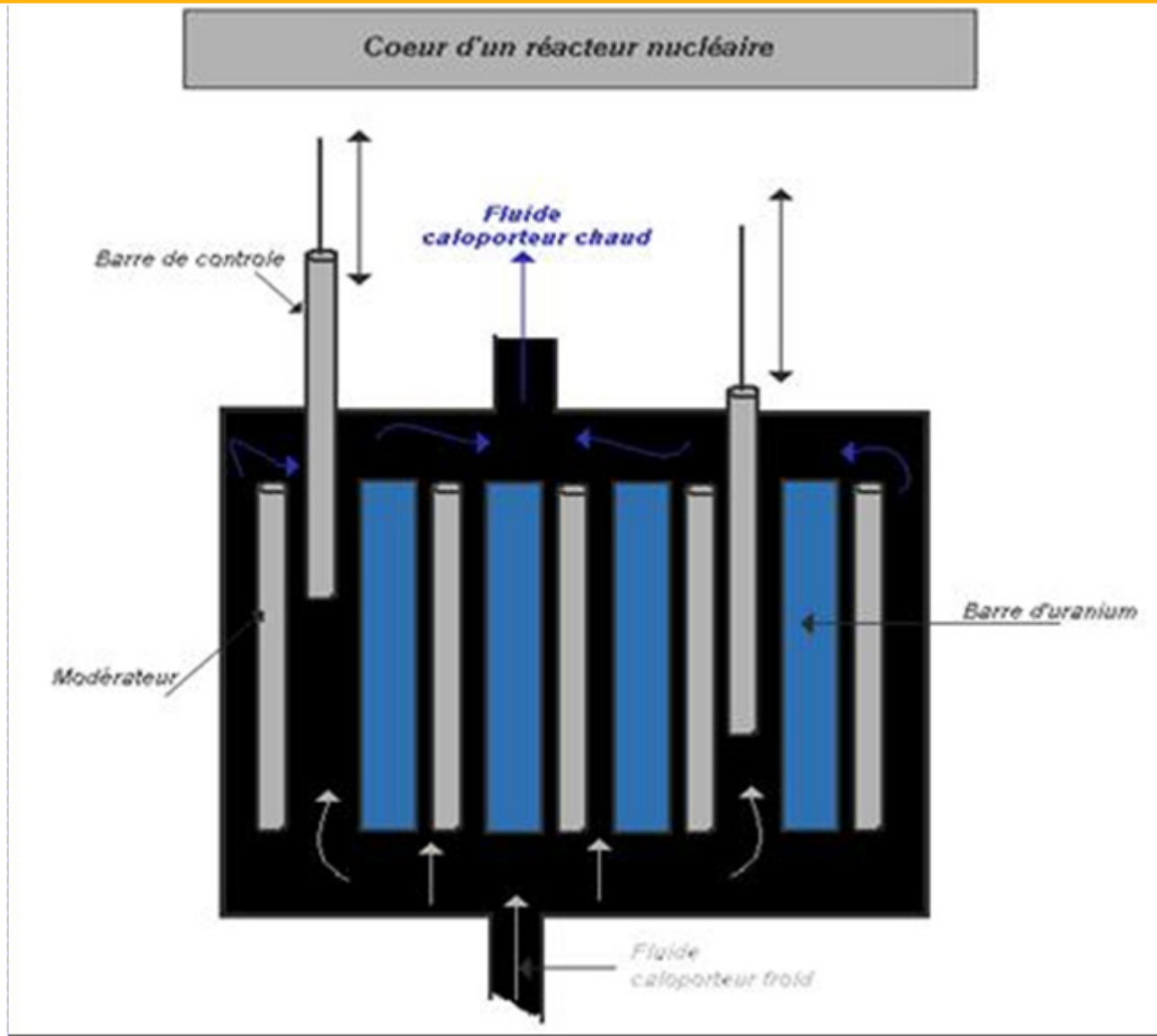


# Sections efficaces de l'uranium 235

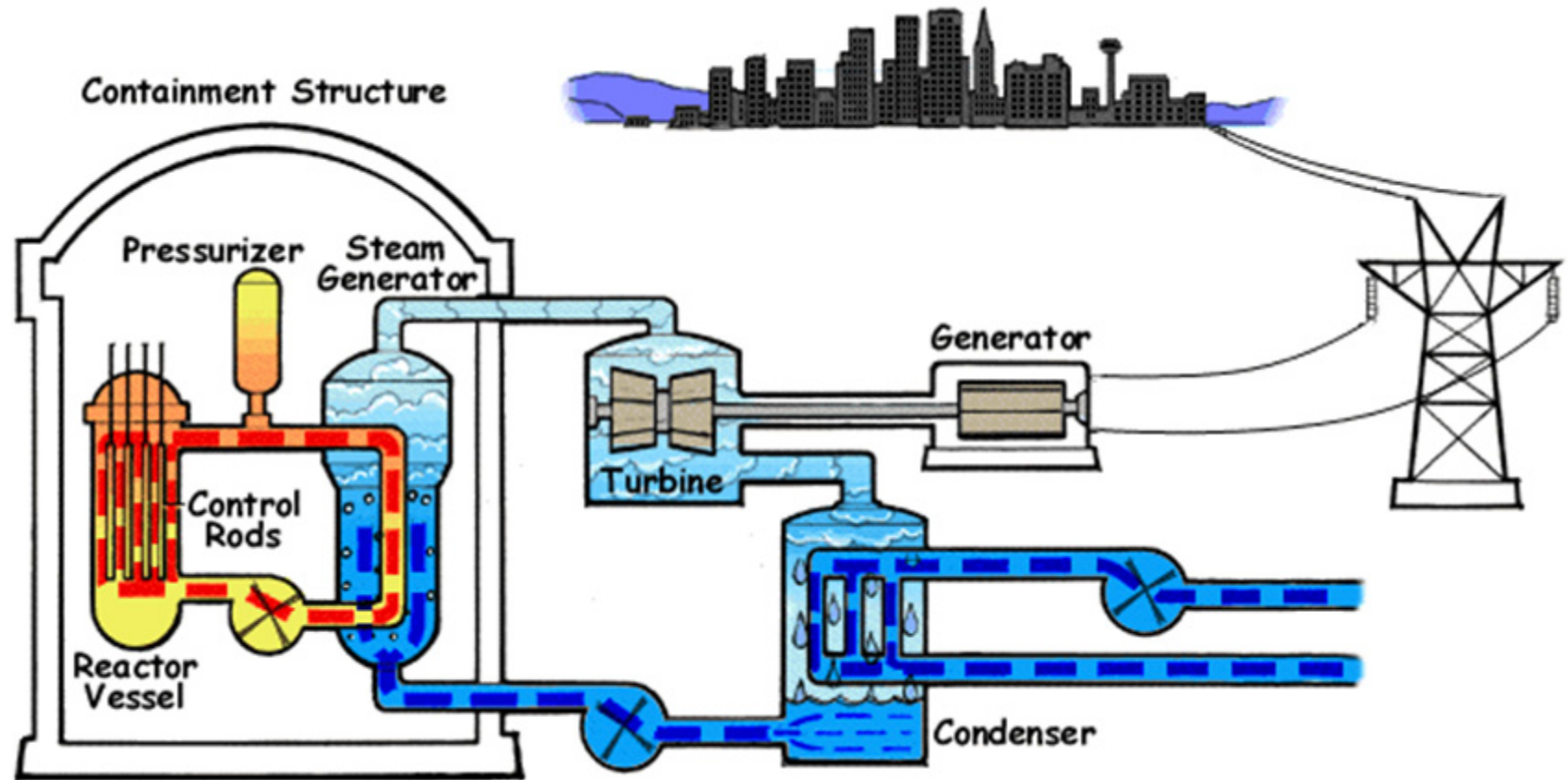


JEFF-3.0 U-235



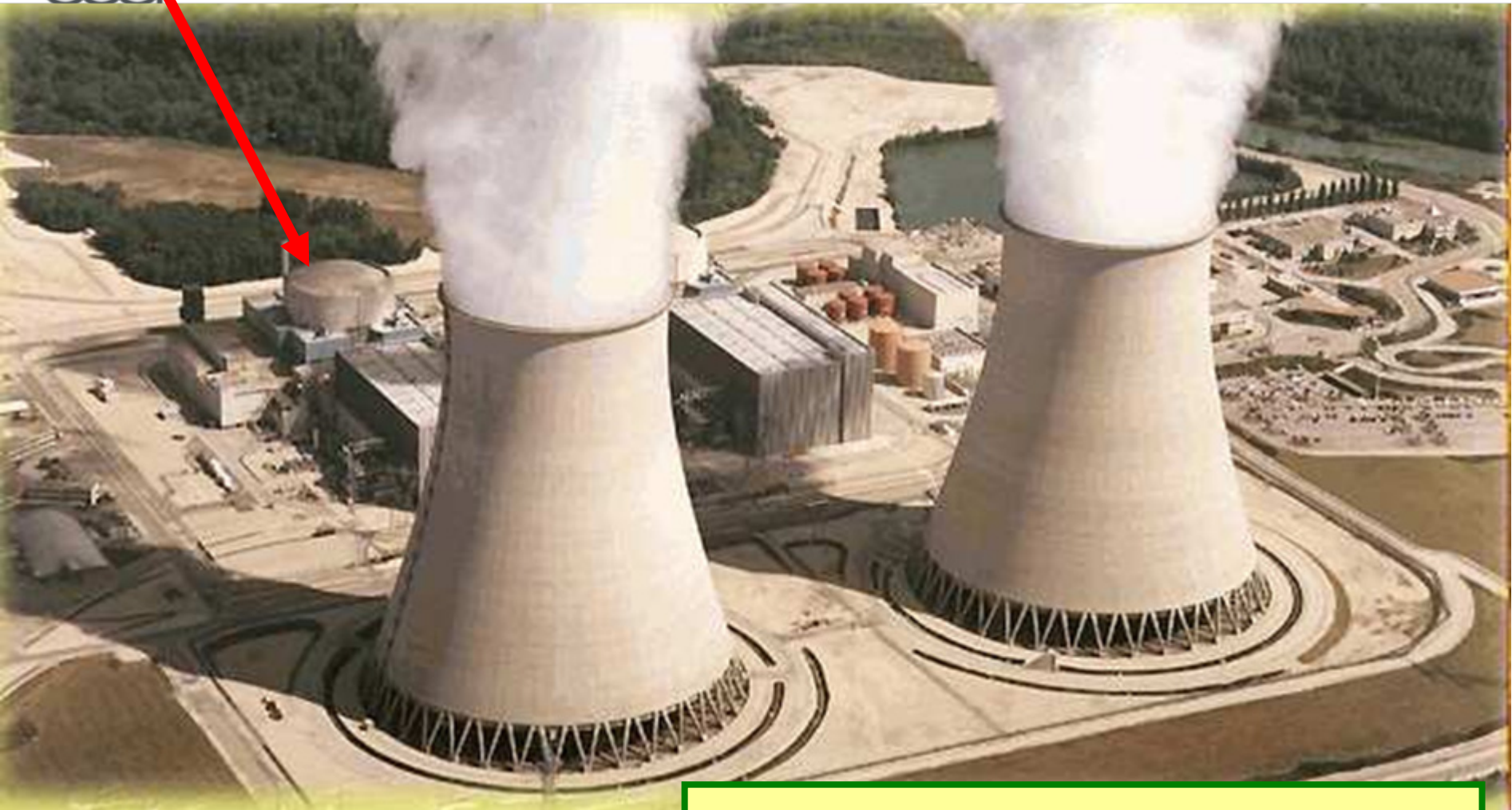


# Schéma d'une centrale REP



# ***Une centrale nucléaire***

Le réacteur est à l'intérieur de cette enceinte



***Nogent-sur-Seine, EDF, 1300 MWe***

---

# ARCHITECTURE DES RÉACTEURS À FISSION



CENTRALE NUCLÉAIRE N4 1450 MWe





# L'espèce dominante : les réacteurs à eau

---

cea



- ✓ 80% du parc mondial soit environ 400 réacteurs
- ✓ 17% d'électricité d'origine nucléaire
- ✓ 10 000 années.réacteurs d'expérience

**UN CONSTAT :  
LES REACTEURS A EAU EXISTANTS  
SERONT PREPONDERANTS  
JUSQU'EN 2020-2030**

# Les réacteurs nucléaires en France





## Les principes généraux

La réaction en chaîne et son contrôle

## Le nucléaire actuellement

**Le cycle du combustible**

Sûreté, risques

Le parc existant, son fonctionnement, ses performances

## Filières et générations de réacteurs

Les systèmes à neutrons lents vs rapides

## Le nucléaire du futur

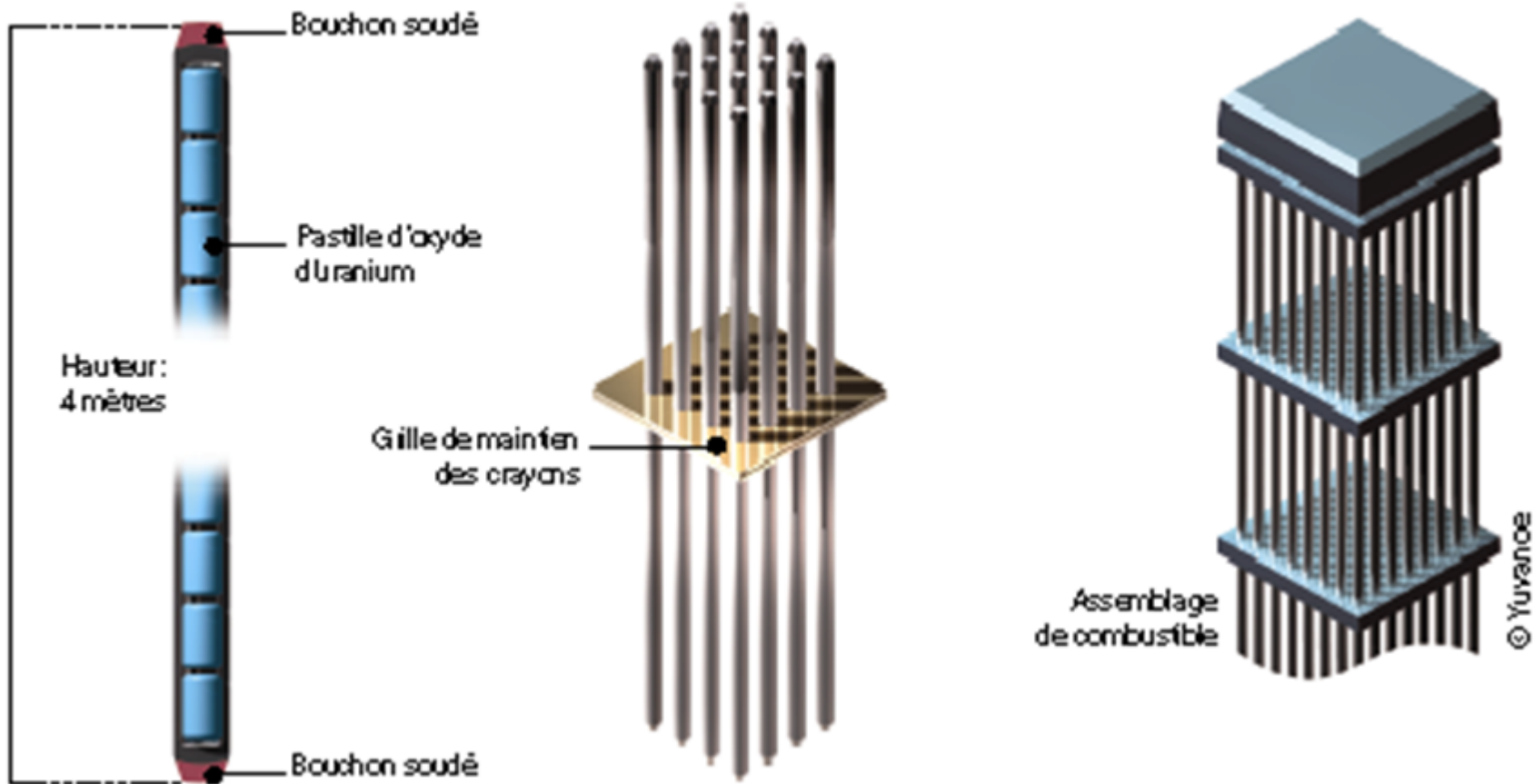
De nouveaux critères pour un nucléaire durable

Portrait des systèmes nucléaires du futur, ce qu'on peut en attendre, leurs perspectives de développement

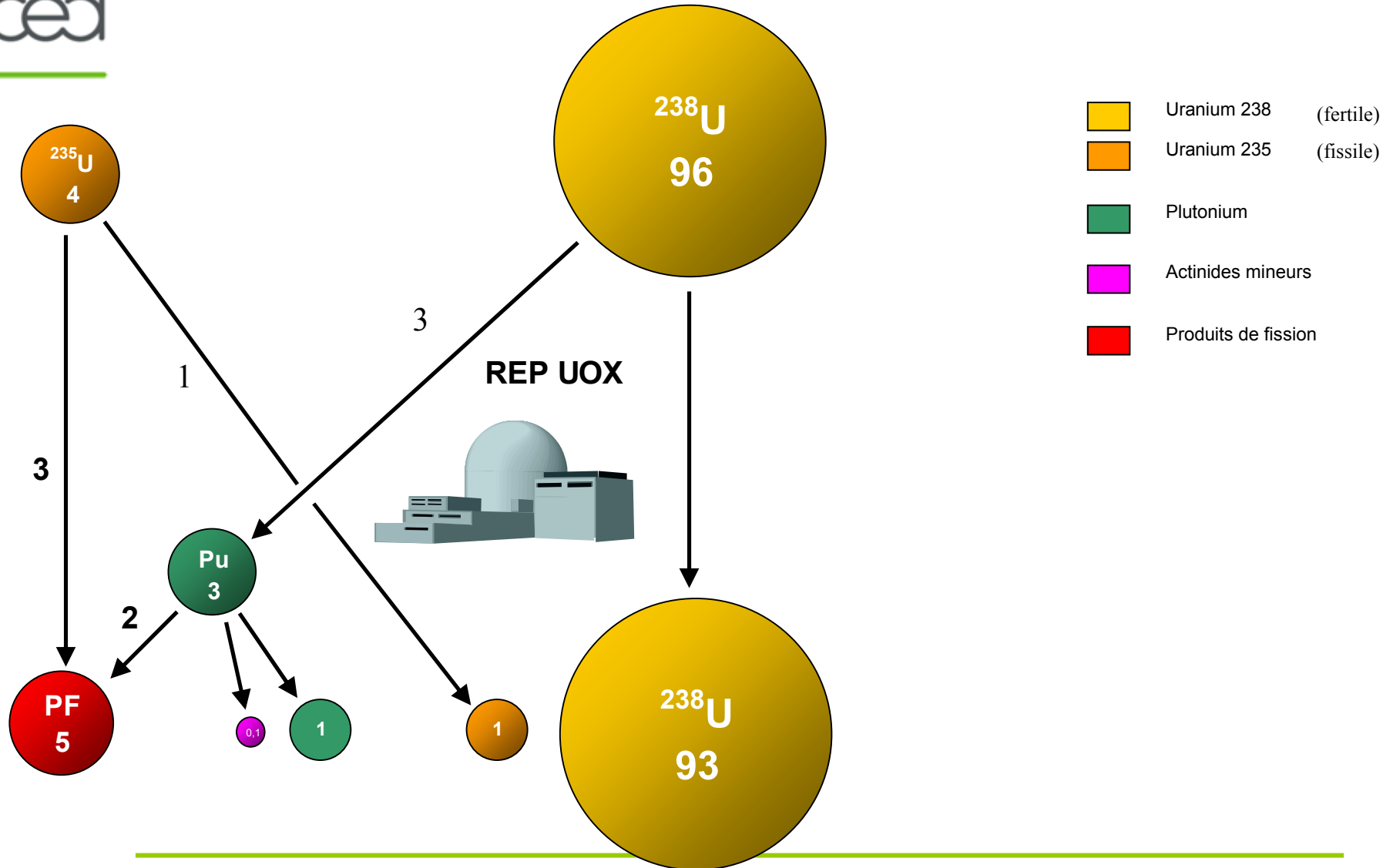


# UN COMBUSTIBLE DANS TOUS SES ÉTATS : DES "CRAYONS", DES "AIGUILLES", ...

## La préparation des assemblages de combustible



# Réactions au sein des assemblages combustibles standards dans les REP (45,000 MWj/t)



# L'entreposage du combustible usé

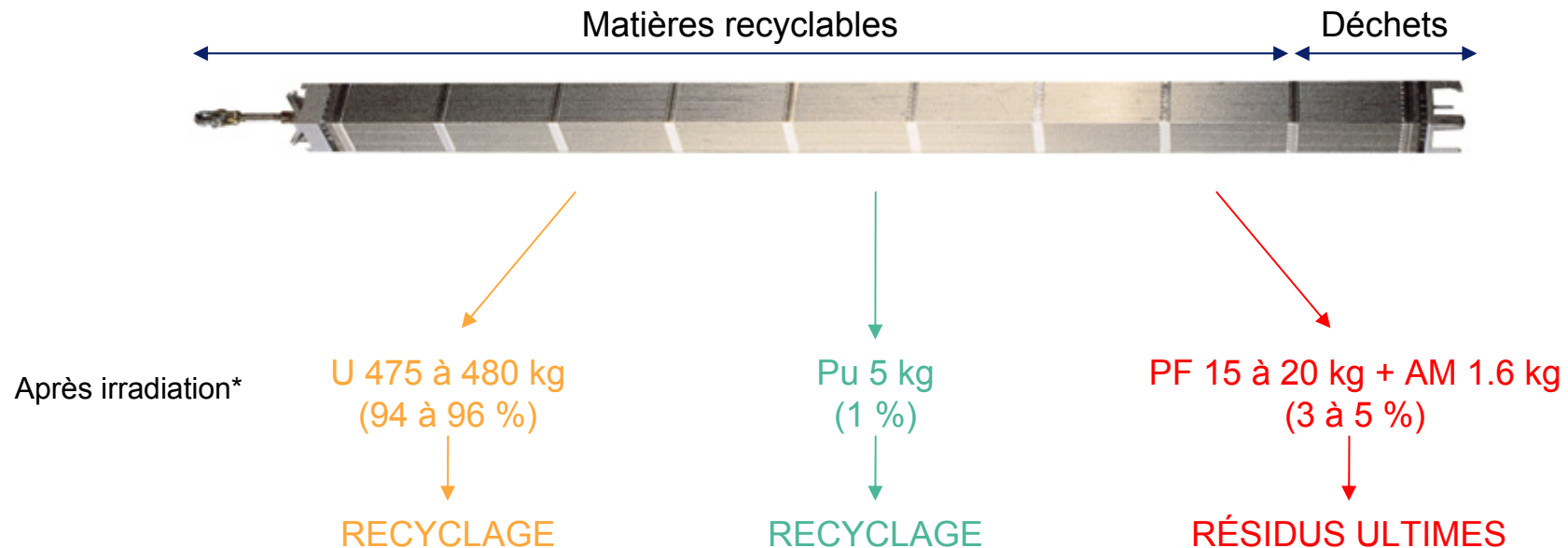
cea



# La finalité du retraitement du combustible



- Structure du combustible eau légère usé
  - 1 combustible eau légère = 500 kg d'uranium avant irradiation en réacteur



Après irradiation\*

U 475 à 480 kg  
(94 à 96 %)

RECYCLAGE

Pu 5 kg  
(1 %)

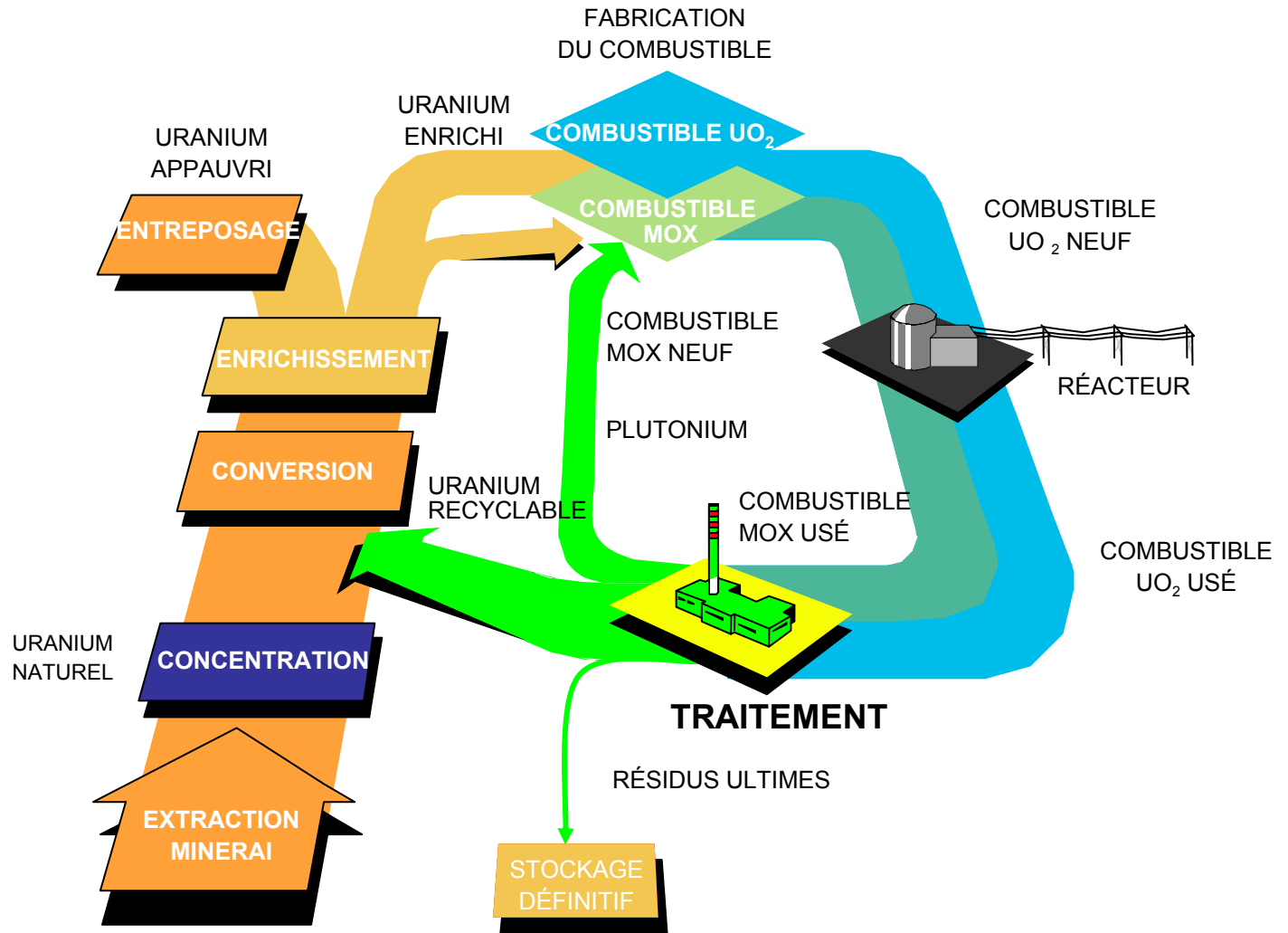
RECYCLAGE

PF 15 à 20 kg + AM 1.6 kg  
(3 à 5 %)

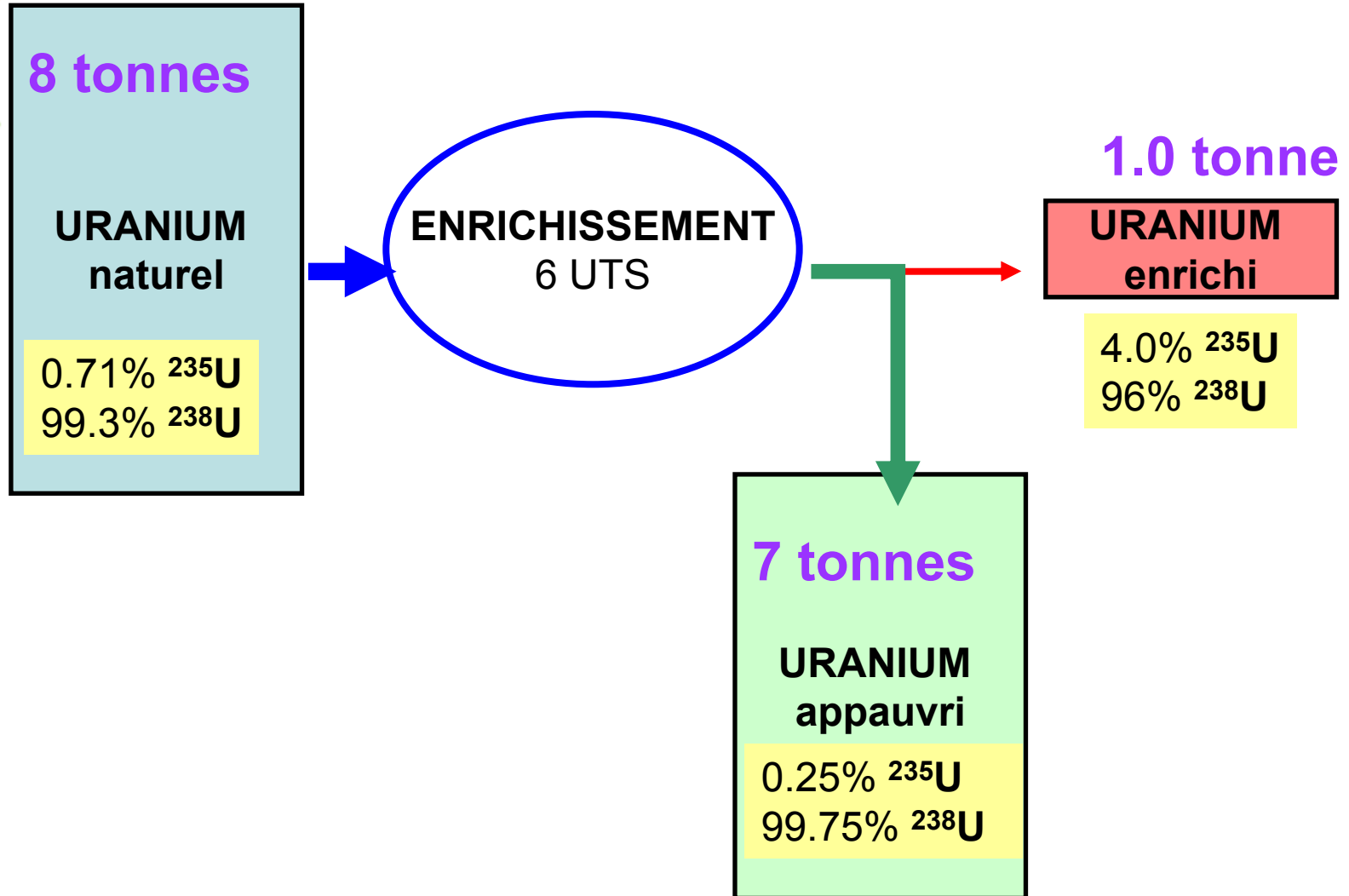
RÉSIDUS ULTIMES

\* pourcentage variable en fonction du taux de combustion

# Le cycle du combustible nucléaire



# L'enrichissement



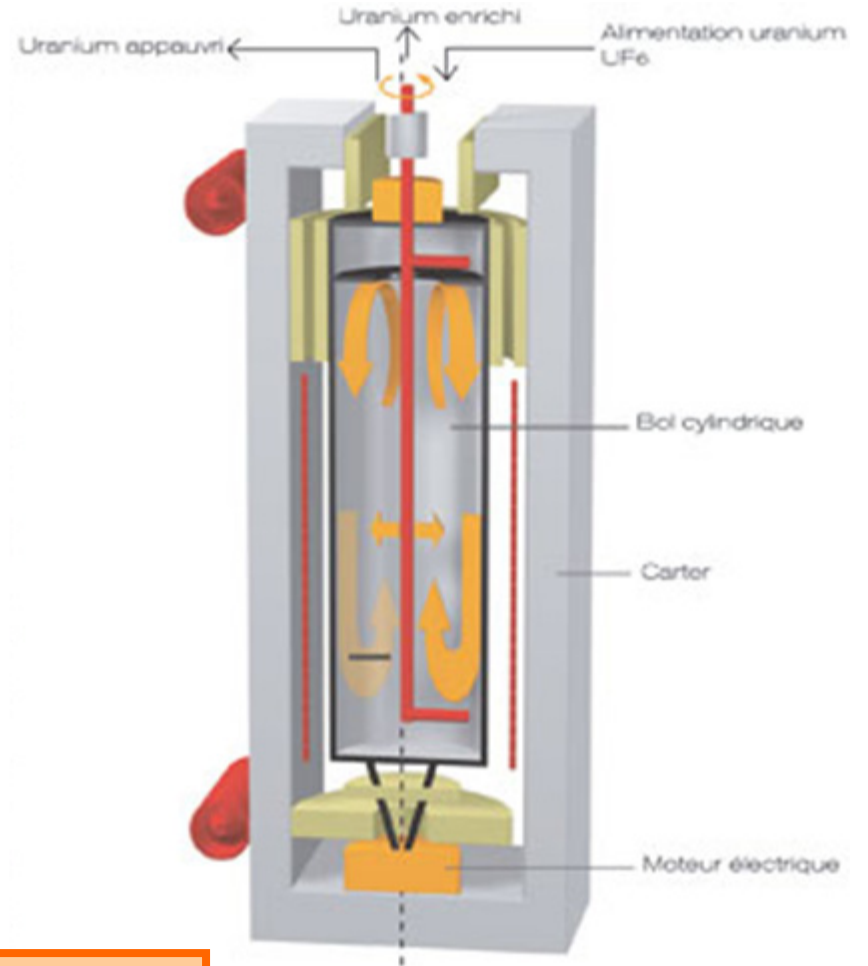


# L'enrichissement par ultracentrifugation

cea



Batterie de centrifugeuses



# L'usine Georges Besse, à Pierrelatte

---



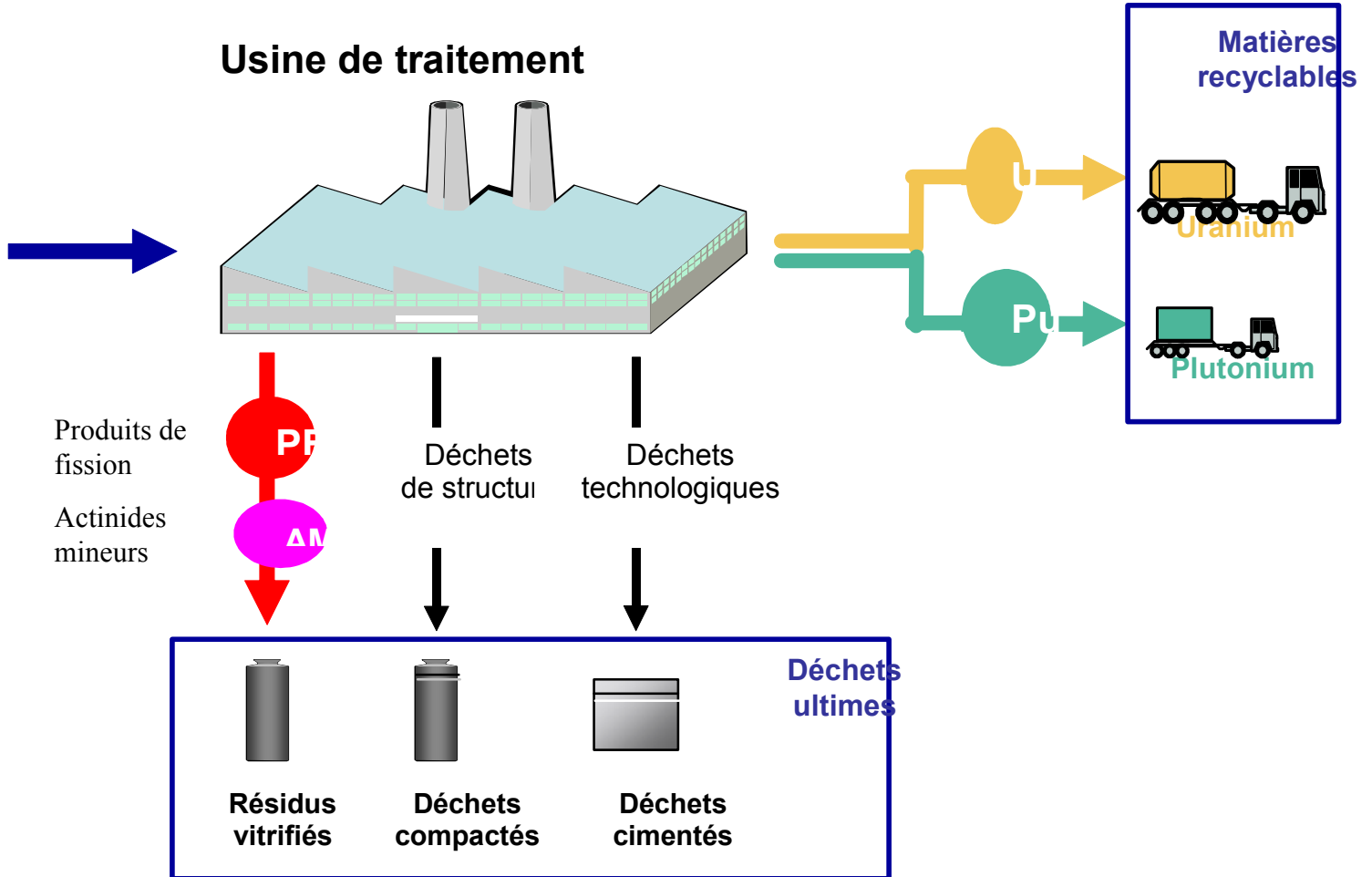


# Le site de COGEMA-La HAGUE

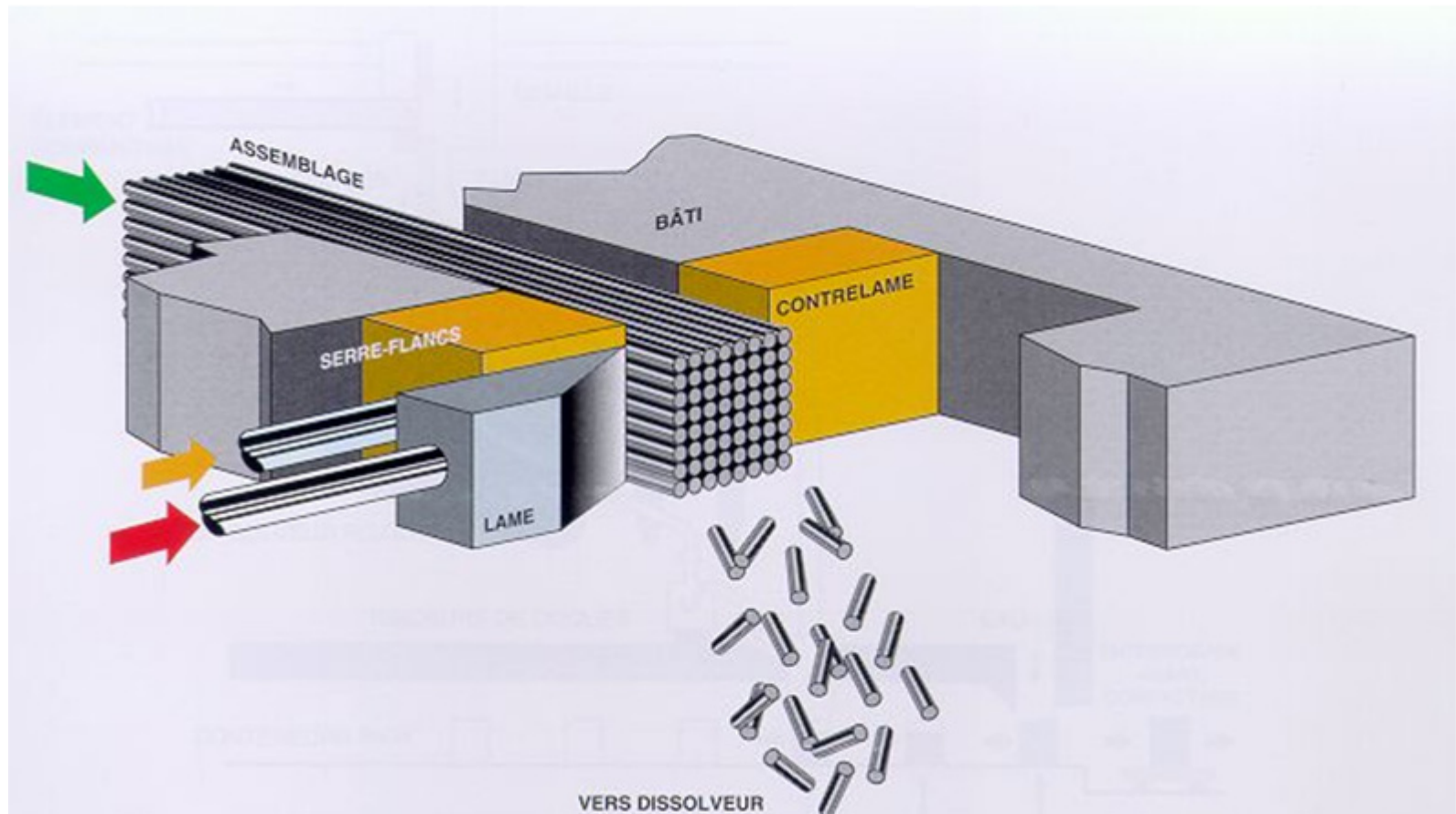
---



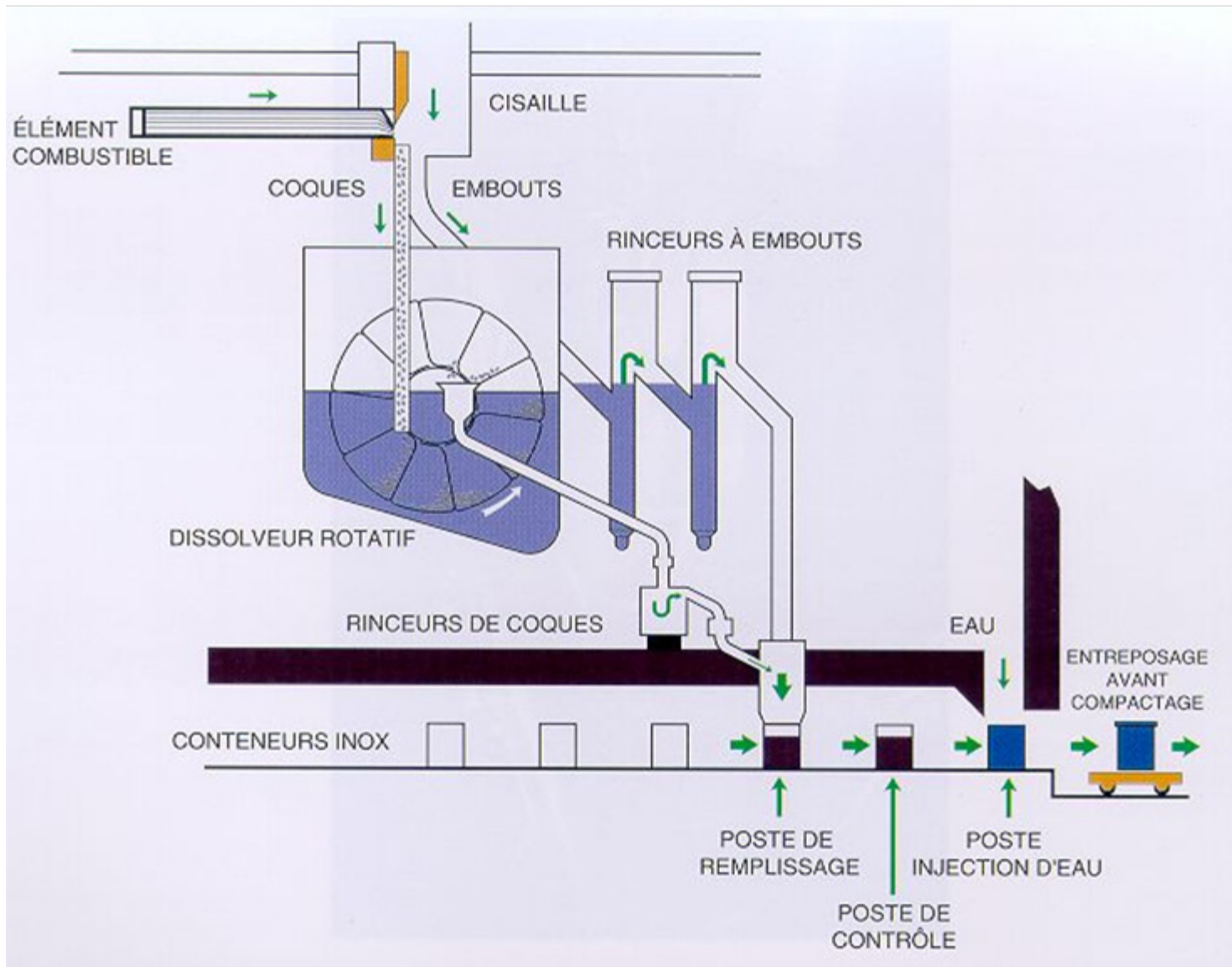
# Le traitement des combustibles usés



# Cisailage du combustible usé

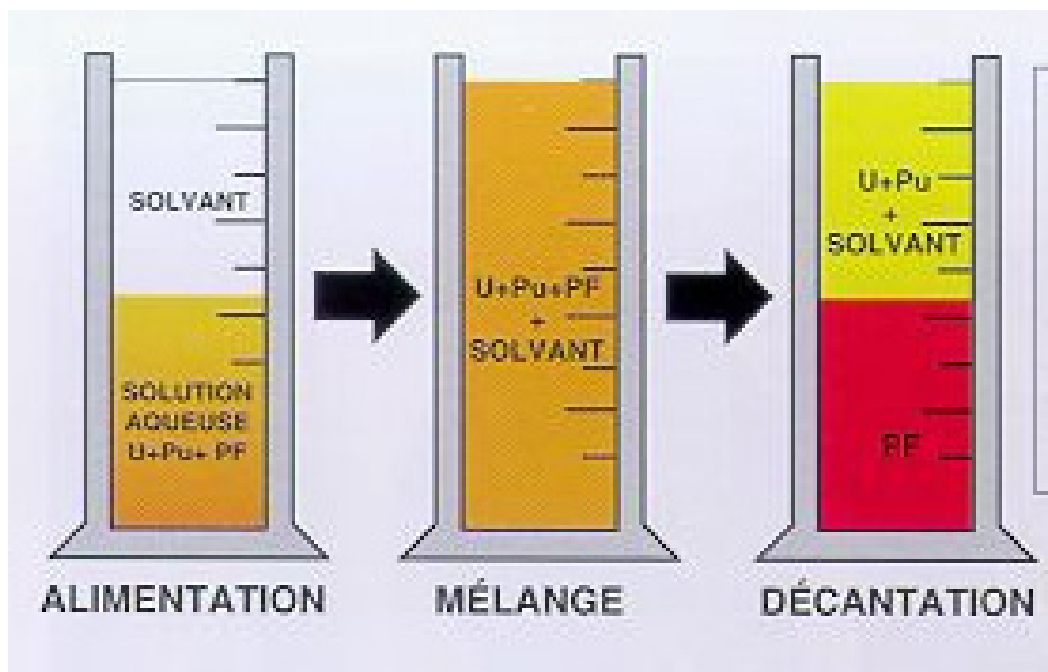


# Dissolution du combustible usé

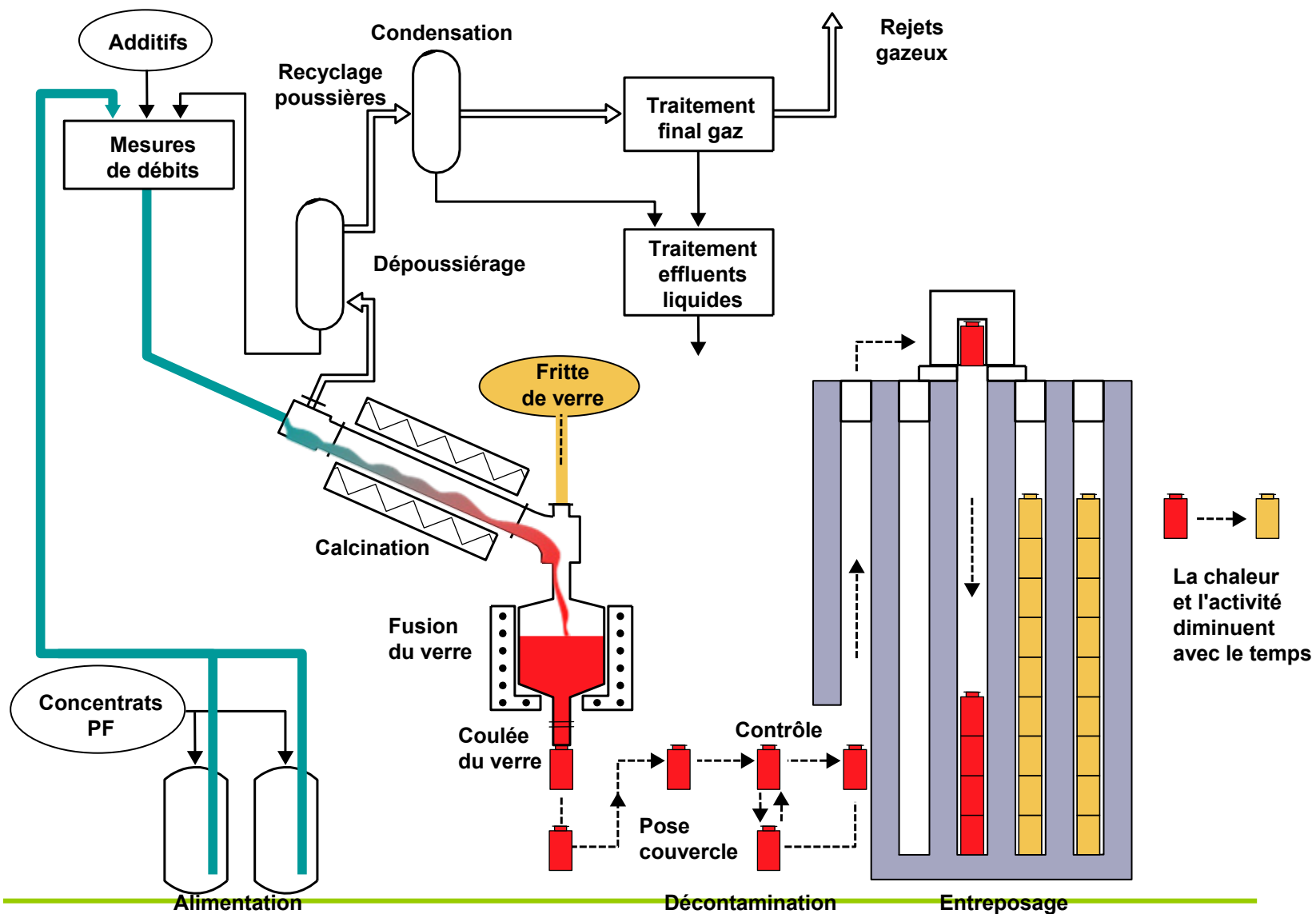




# Extraction par solvants

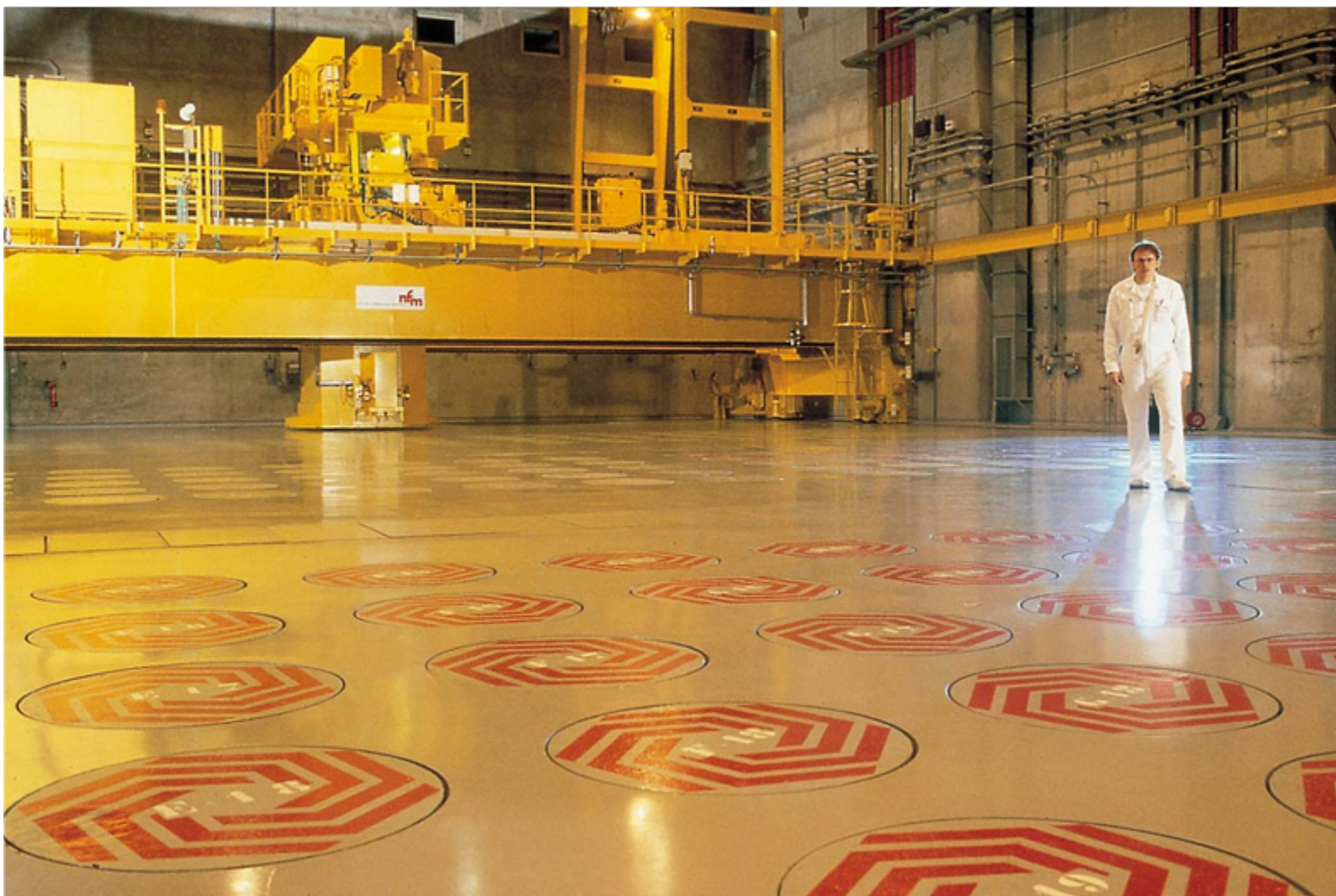


# Procédé français de vitrification



# Hall d'entreposage des résidus vitrifiés

cea





## Déchets : Quelques ordres de grandeur

Par habitant et par an , en France

Déchets inertes et ménagers	2200 kg
Déchets industriels	800 kg (100 kg à haute toxicité)
Déchets nucléaires	1 kg (10 g. à haute activité)





76-09 Production annuelle de déchets nucléaires en France

<b>FMA à vie courte</b>	<b>12 à 15 000 m<sup>3</sup> conditionnés</b>
<b>MA à vie longue</b>	<b>530 m<sup>3</sup> conditionnés</b>
<b>HA</b>	<b>130 m<sup>3</sup> conditionnés</b>

# Les déchets nucléaires



## Des solutions industrielles déjà mises en œuvre

	Vie courte période principaux éléments < 30 ans	Vie longue période principaux éléments > 30 ans
<p><b>Très Faible Activité (TFA)</b></p>	<p><b>Centre de Morvilliers</b></p> <p>Mise en sécurité à l'étude pour les résidus miniers</p>	
<p><b>Faible Activité (FA)</b></p>	<p>Stockage en surface (Centre de l'Aube)</p> <p>A l'étude pour les déchets tritiés</p>	<p>A l'étude :</p> <p>Déchets radifères      Déchets graphites</p>
<p><b>Moyenne Activité (MA)</b></p>	<p>A l'étude :</p> <p>les trois voies de recherche</p> <p>(loi du 30 décembre 1991)</p>	
<p><b>Haute Activité (HA)</b></p>	<p>Séparation - Transmutation</p> <p>Stockage géologique formations profondes</p>	<p>Entreposage longue durée en surface</p>



## Les principes généraux

La réaction en chaîne et son contrôle

## Le nucléaire actuellement

Le cycle du combustible

**Sûreté, risques**

Le parc existant, son fonctionnement, ses performances

## Filières et générations de réacteurs

Les systèmes à neutrons lents vs rapides

## Le nucléaire du futur

De nouveaux critères pour un nucléaire durable

Portrait des systèmes nucléaires du futur, ce qu'on peut en attendre, leurs perspectives de développement

# La sûreté: un objectif primordial

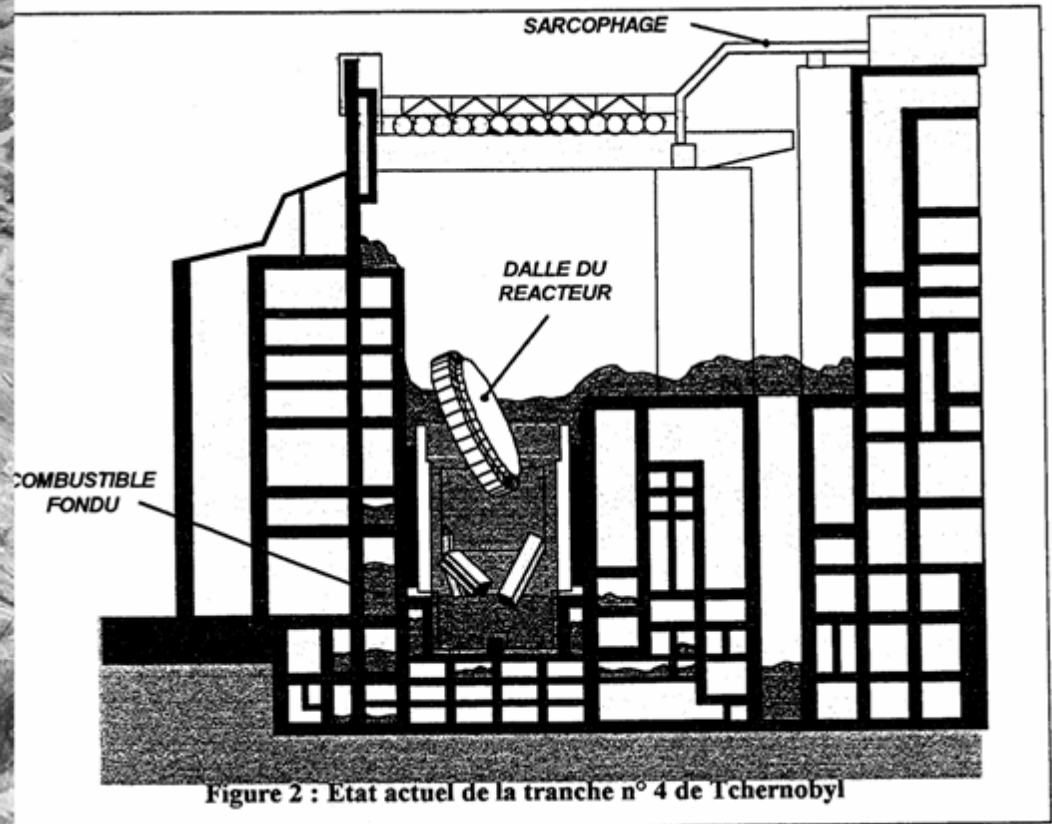
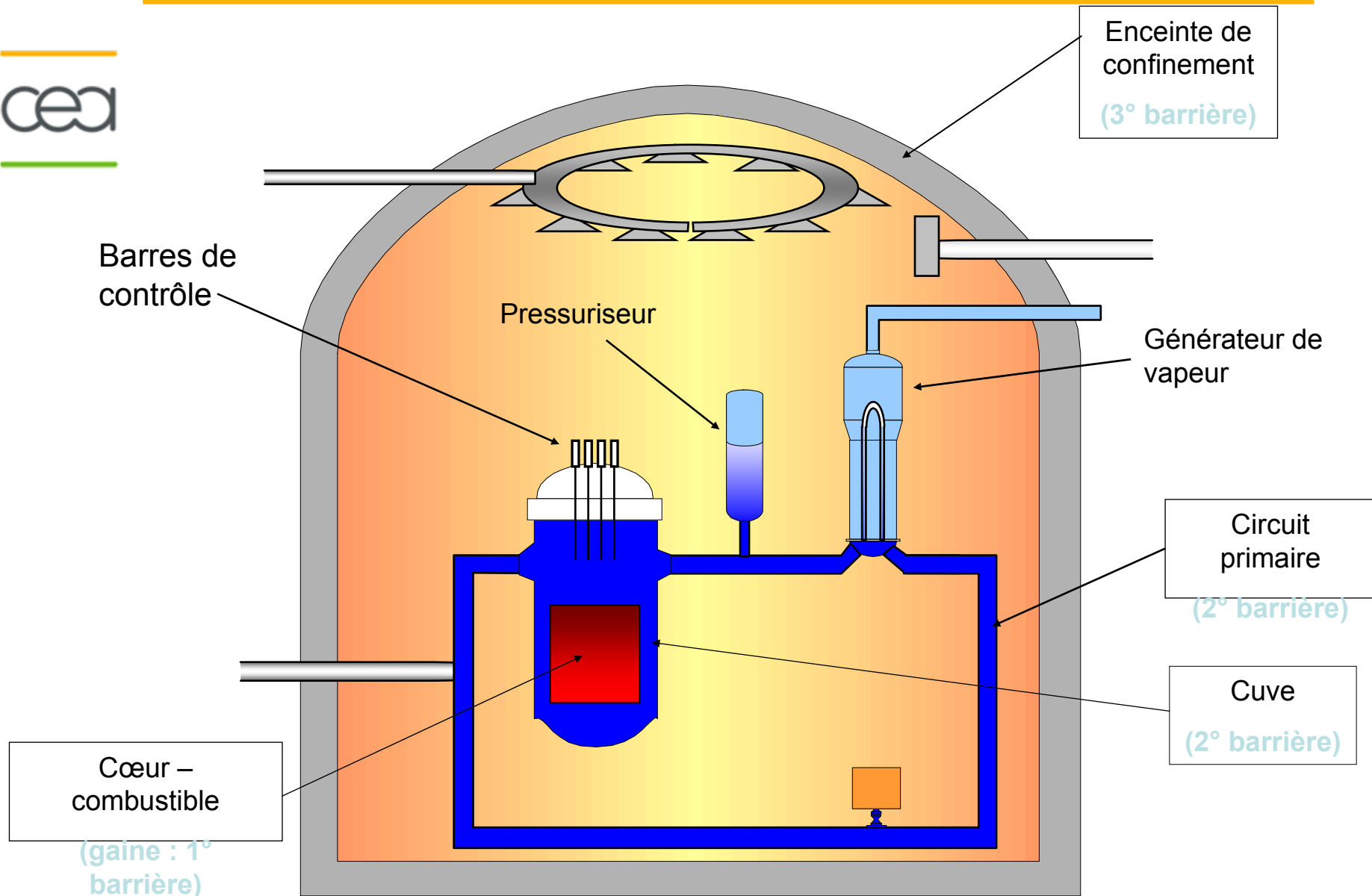


Figure 2 : Etat actuel de la tranche n° 4 de Tchernobyl

Source: B. Barré, AREVA


*Le réacteur de Tchernobyl après l'accident*


# Les 3 barrières du REP





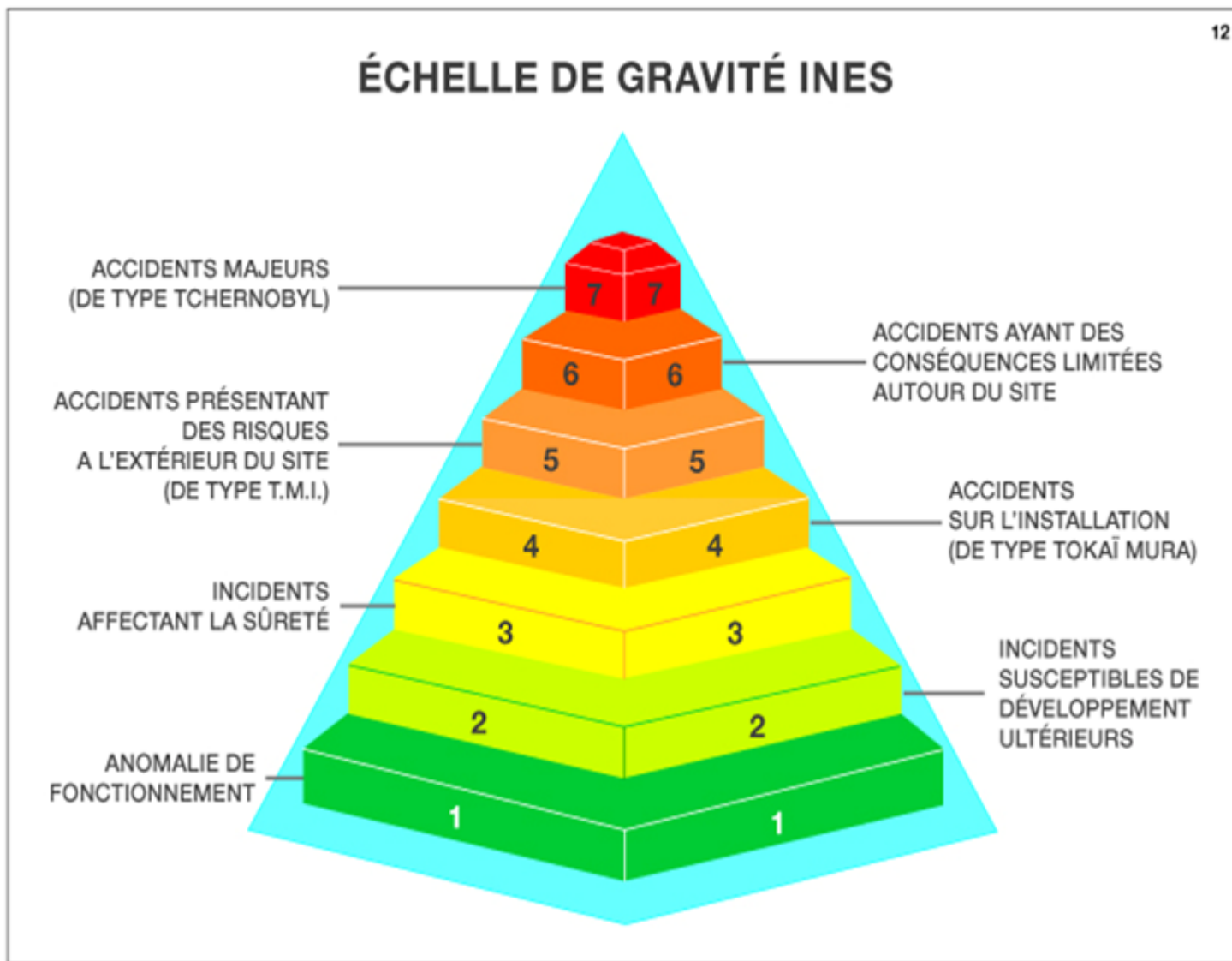
## PROBABILITÉ DE FUSION DU COEUR (RÉSULTATS 1990)

 EPS 900 MWe =  $5 \cdot 10^5$  PAR RÉACTEUR ET PAR AN

 EPS 1300 MWe =  $1 \cdot 10^{-5}$  PAR RÉACTEUR ET PAR AN

- SI L'ON CONSIDÈRE 50 RÉACTEURS \* 40 ANS  
= 1 "CHANCE" SUR 10
- LA FUSION DU COEUR NE PROVOQUE PAS  
SYSTÉMATIQUEMENT DES REJETS IMPORTANTS
- IL FAUT CONTINUER A PROGRESSER

# L'échelle internationale des événements nucléaires



➡ Aucun accident classé supérieur à 4 en France (site internet de l'ASN)



## Les principes généraux

La réaction en chaîne et son contrôle

## Le nucléaire actuellement

**Le cycle du combustible**

Sûreté, risques

**Le parc existant, son fonctionnement, ses performances**

## Filières et générations de réacteurs

Les systèmes à neutrons lents vs rapides

## Le nucléaire du futur

De nouveaux critères pour un nucléaire durable

Portrait des systèmes nucléaires du futur, ce qu'on peut en attendre, leurs perspectives de développement

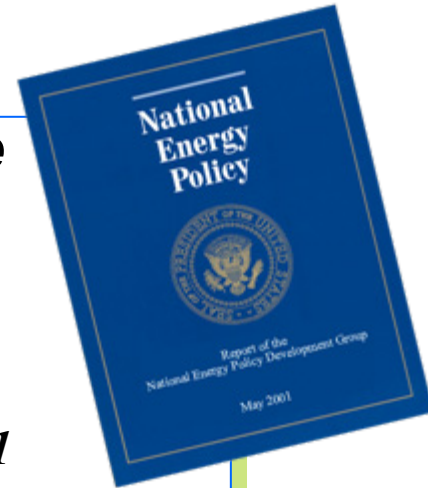


# Nucléaire : le redémarrage



**USA** : *“The NEPD Group recommends that the President support the expansion of nuclear energy in the United States as a major component of our national energy policy.”*

*Report of the National Energy Policy Development Group, May 2001*



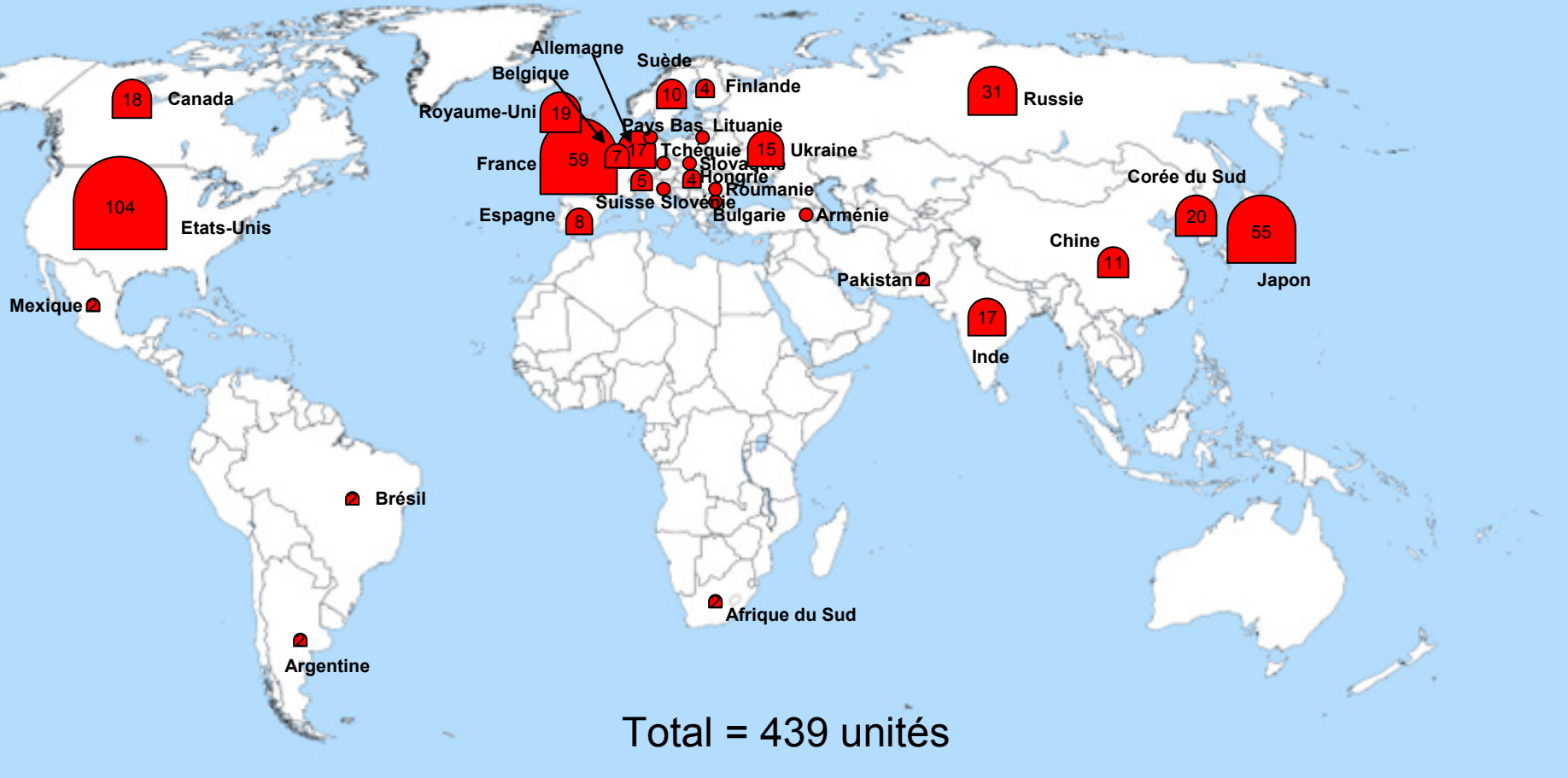
**Europe** « ... nécessité de maintenir le nucléaire en Europe »

*European Parliament resolution, Novembre 2001*

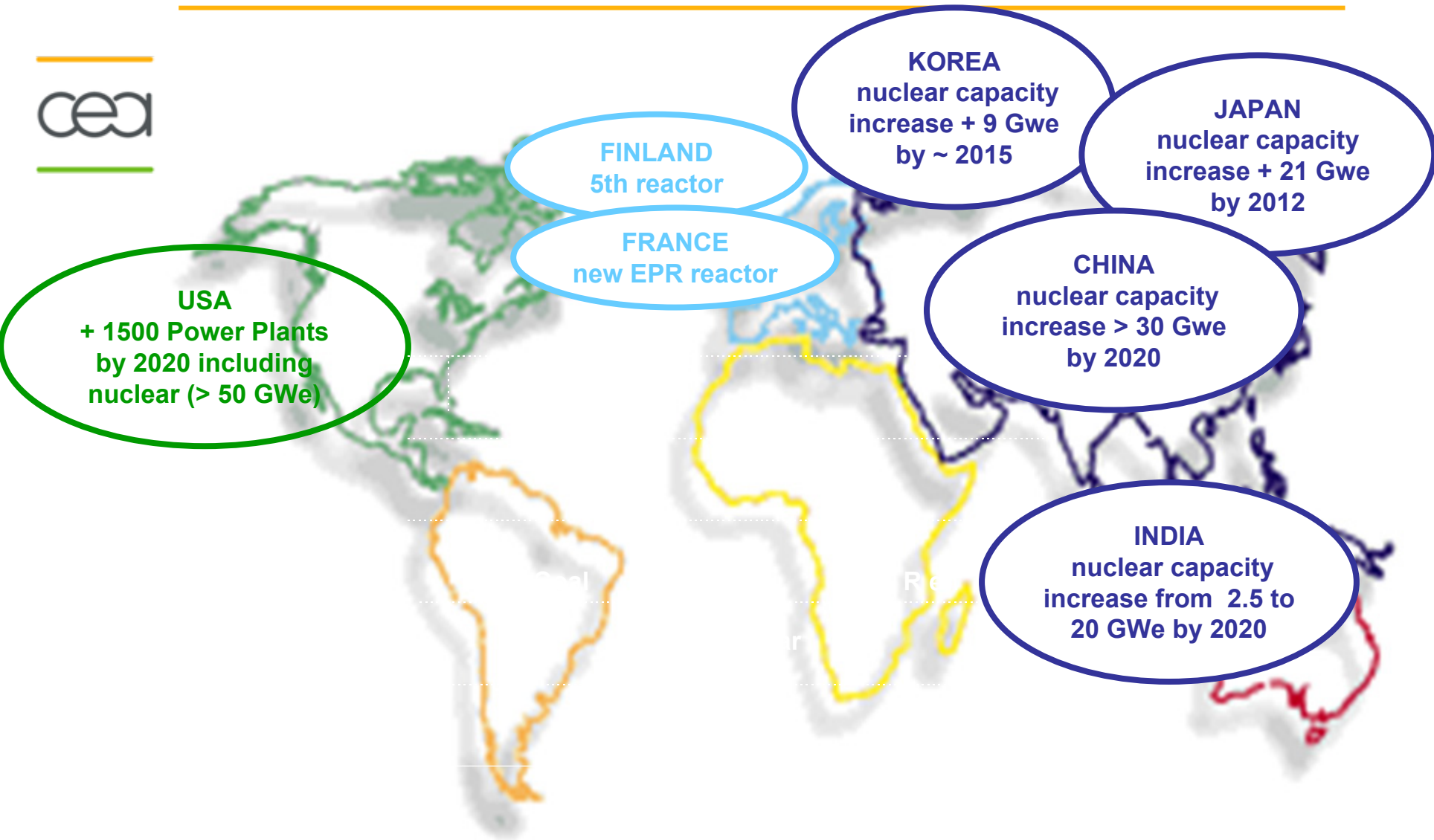
# Les Centrales Nucléaires dans le Monde



Carte des réacteurs nucléaires dans le monde en 2007



# Des perspectives importantes au plan mondial

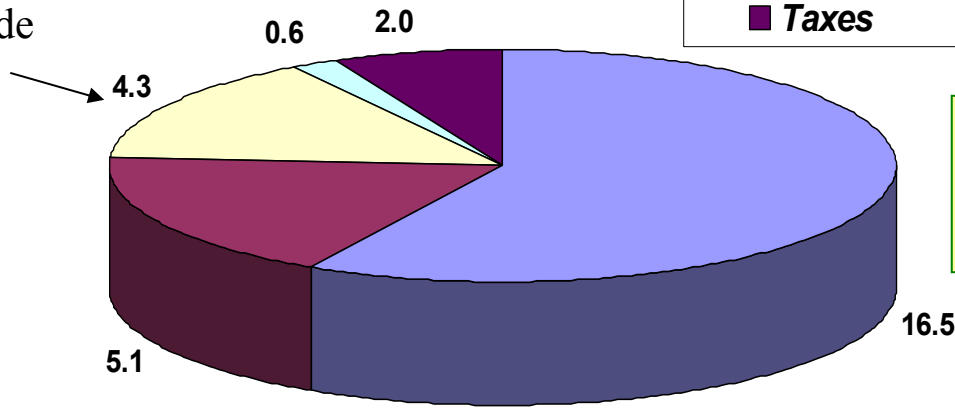


Source : TotalFinaElf

# Le coût du MWh nucléaire

Coût moyenné sur le parc EDF  
63 GW, 426 TWh/an

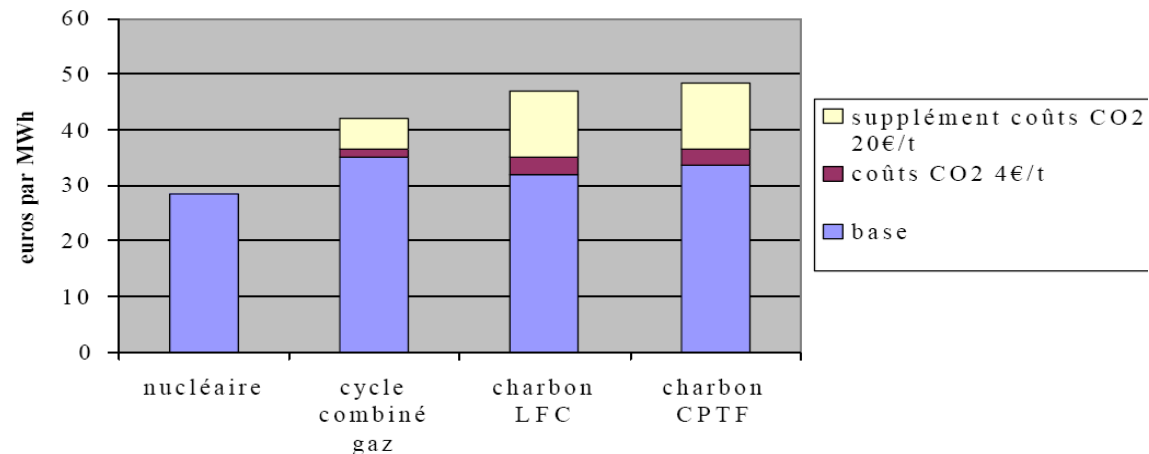
Cf exposé de  
Sondes  
Kahouli



Source: "Coûts de référence de la production électrique", DGEMP/DIDEME, Décembre 2003

**TOTAL = 28.4 €/MWh** coût TTC 2015 avec coûts CO2 actualisation 8%

Le MWh nucléaire est compétitif !!



# Nucléaire : les défis

---

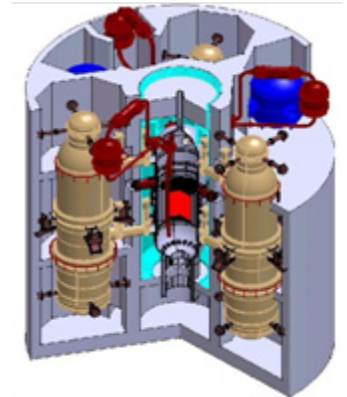


- Soutenir **l'industrie nucléaire actuelle**



- Apporter des solutions efficaces et acceptables au problème de la **gestion des déchets** à haute activité et à vie longue,  
et mieux comprendre l'impact des activités nucléaires sur l'homme et son environnement

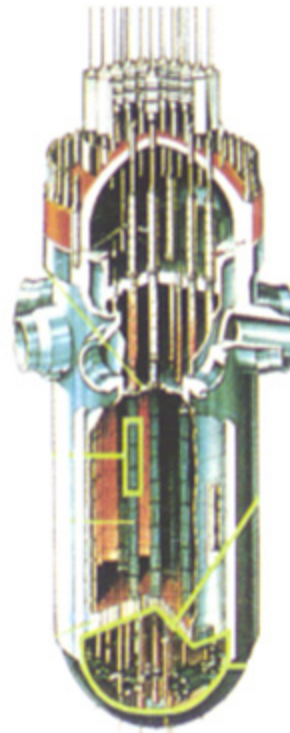
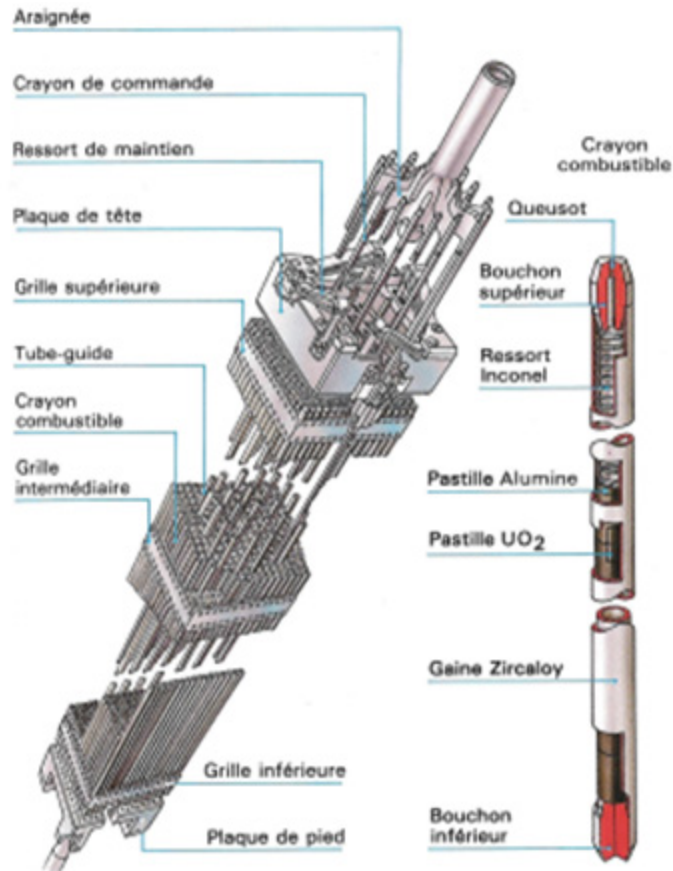
- Concevoir et évaluer de **nouvelles générations** de systèmes nucléaires (réacteur et cycle)





- **Allongement de la durée de vie**

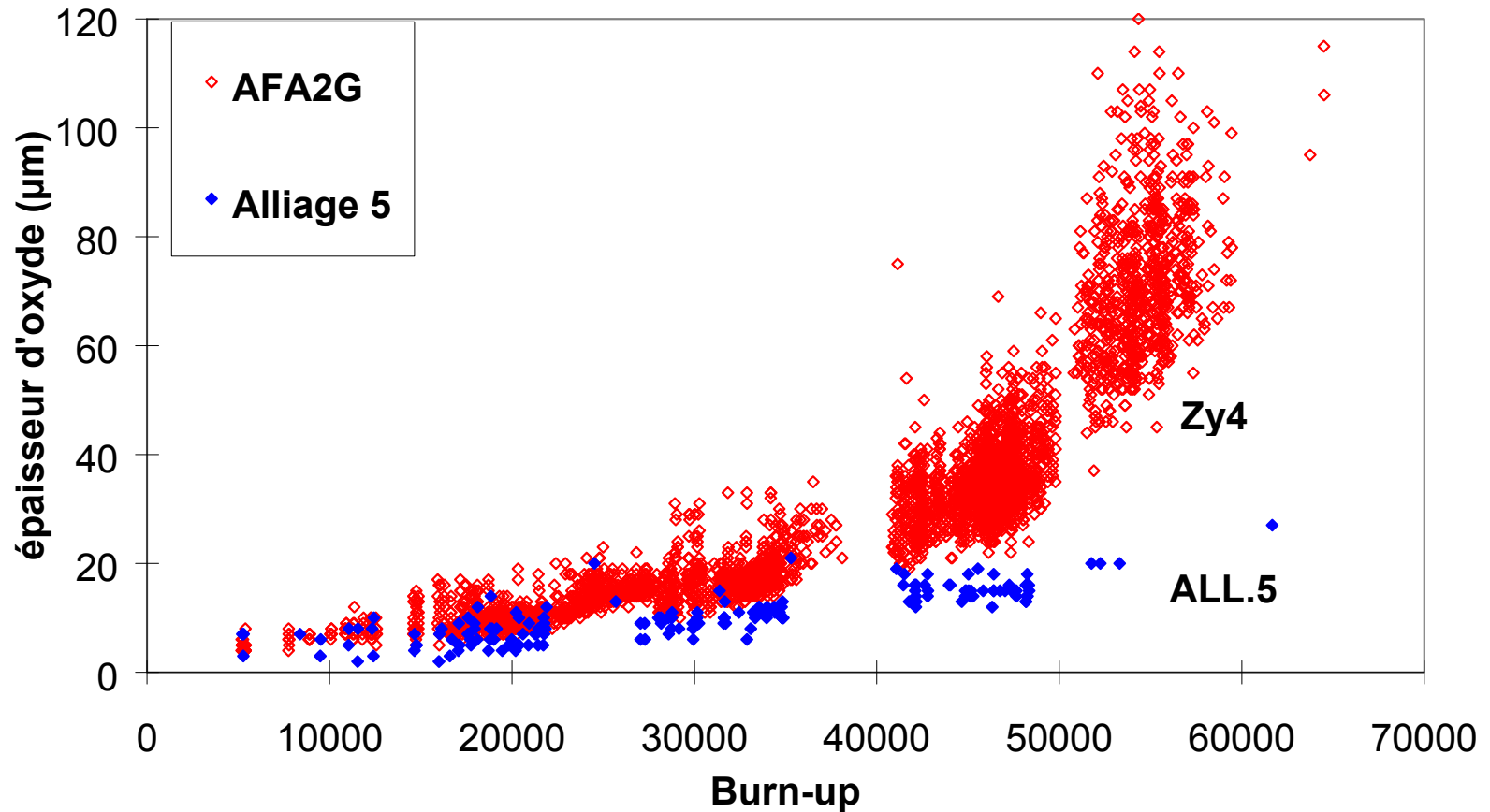
- **Amélioration des performances des combustibles**



# Améliorer les performances du combustible REO



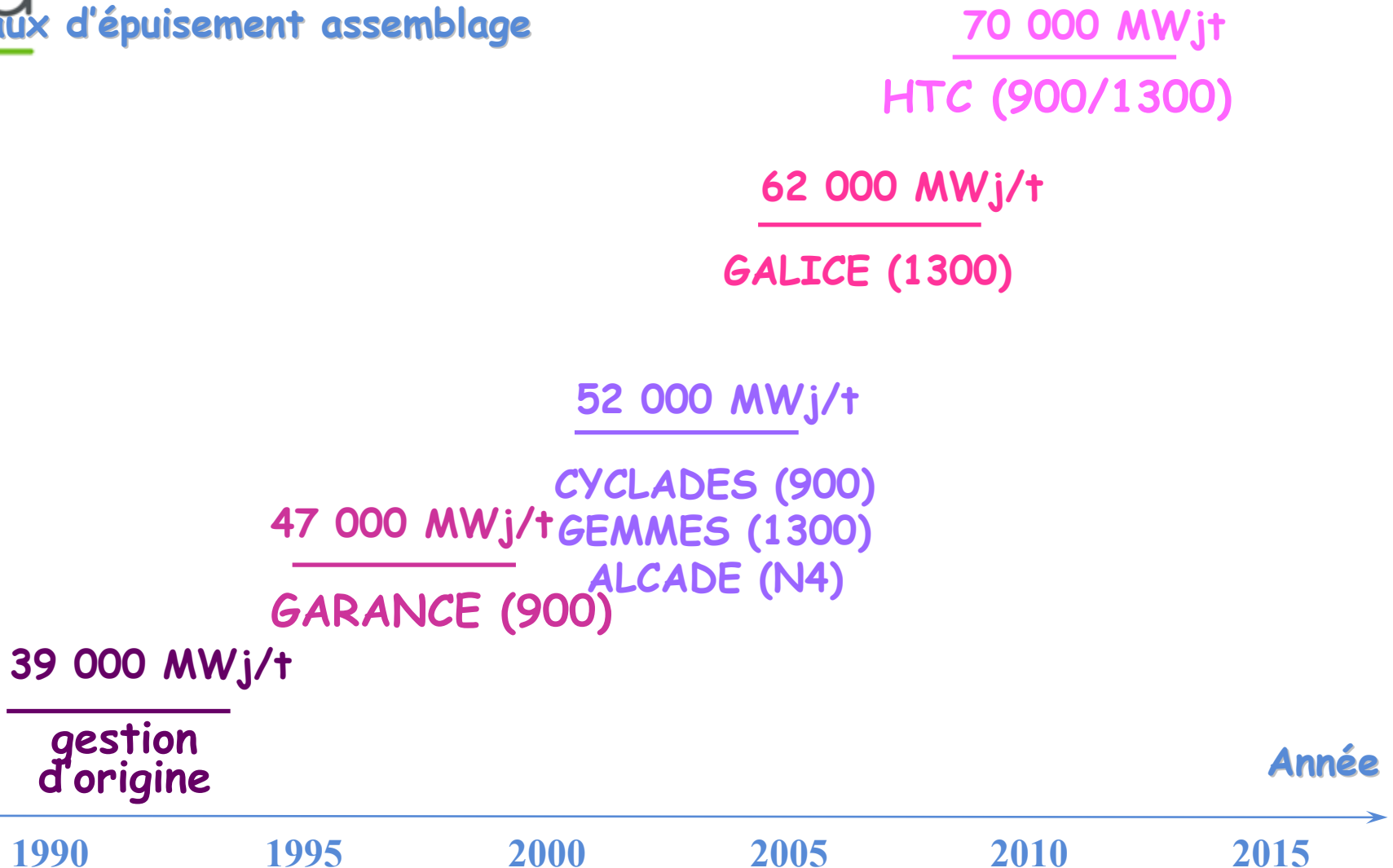
## REX FRAMATOME



# L'évolution des gestions de coeur implique des recherches sur le comportement du combustible à fort taux de combustion

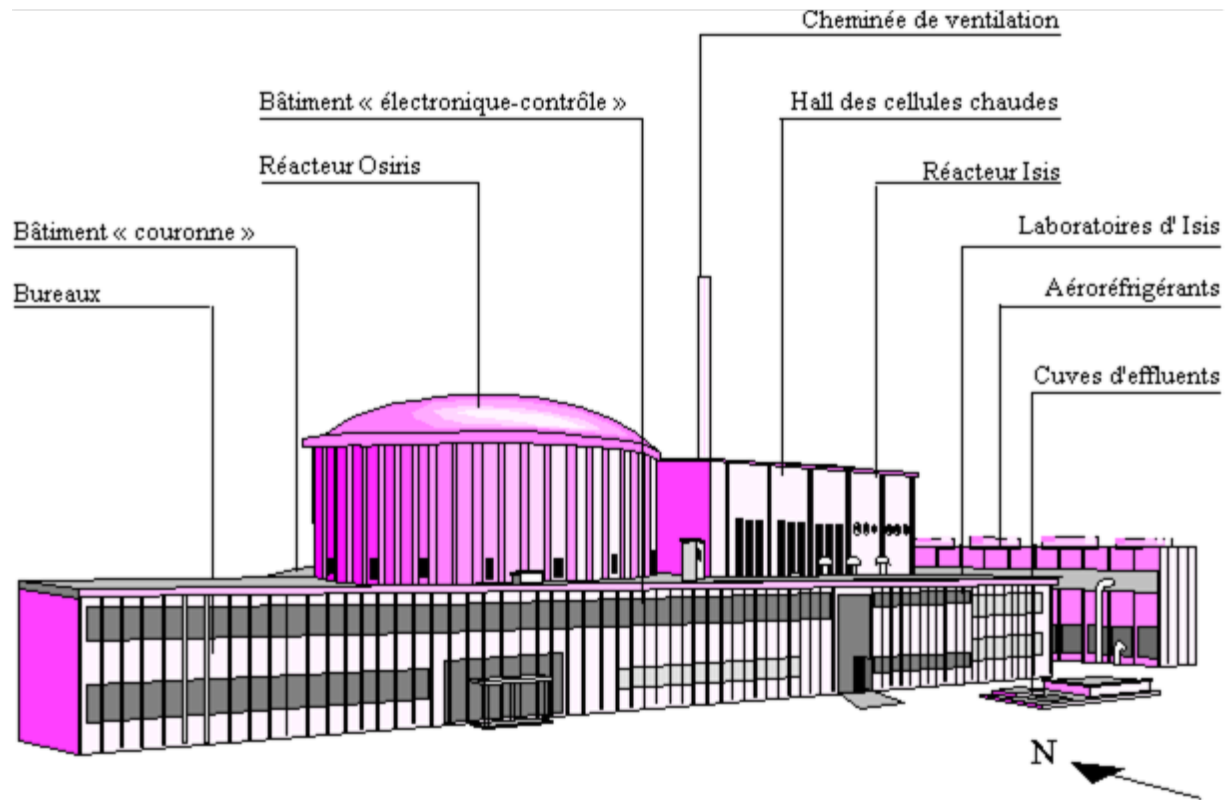


Taux d'épuisement assemblage



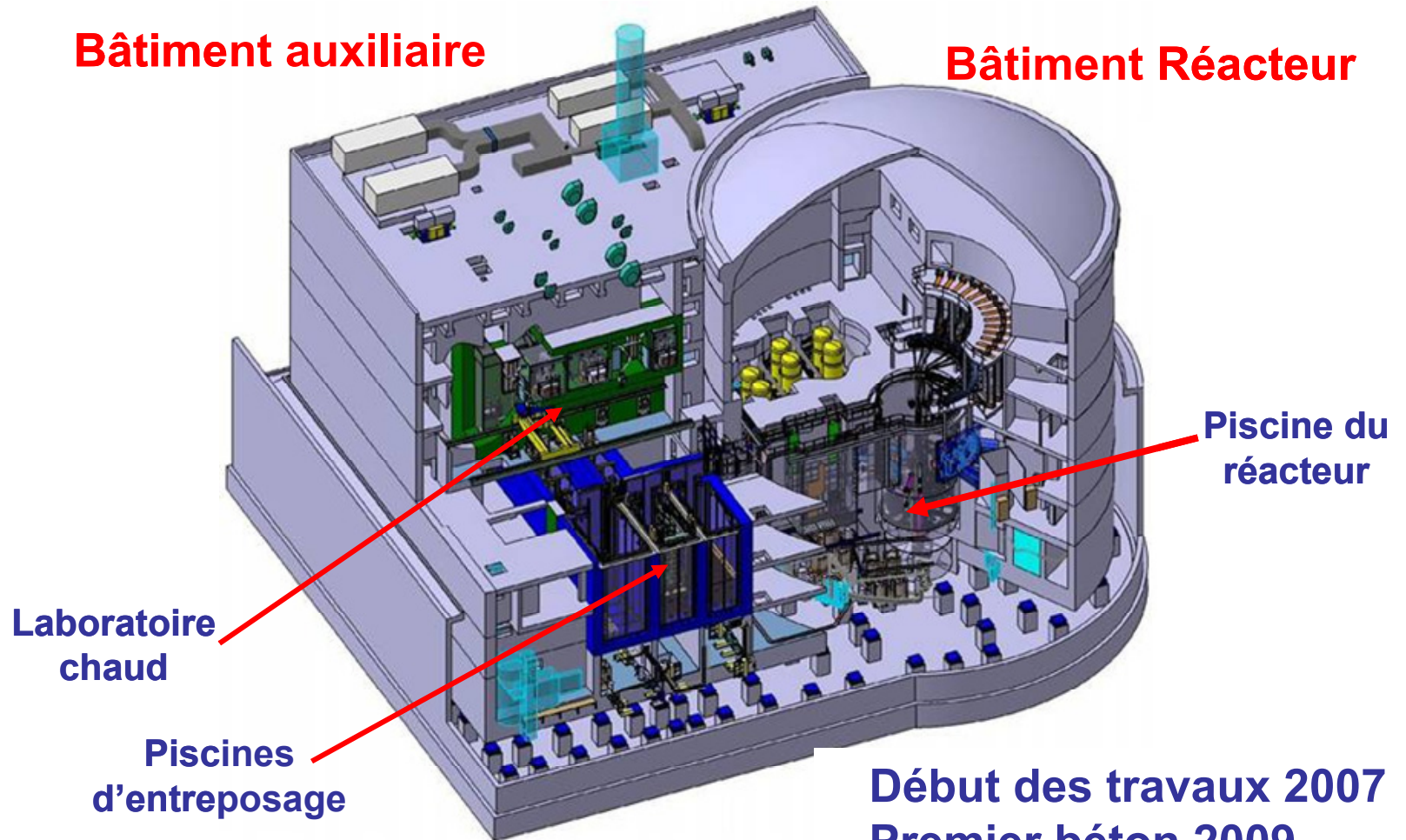


# Réacteurs expérimentaux : OSIRIS



# Un nouveau réacteur de recherche à Cadarache

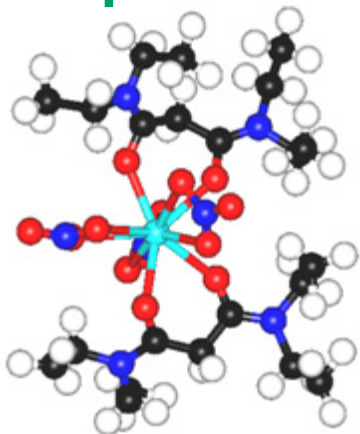
## Le Réacteur Jules Horowitz (RJH)



# Proposer des solutions pour la gestion des déchets

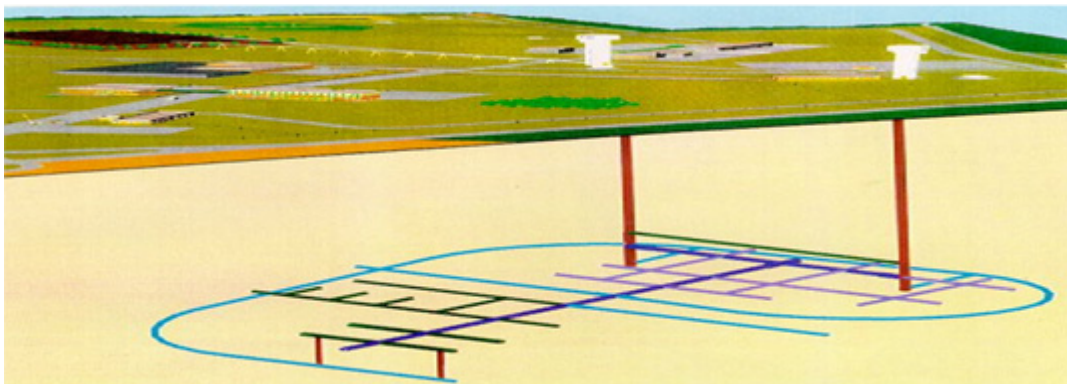
cea

## ➤ Séparation poussée



## ➤ Transmutation

## ➤ Stockage réversible



## ➤ Conditionnement

## ➤ Entreposage de longue durée



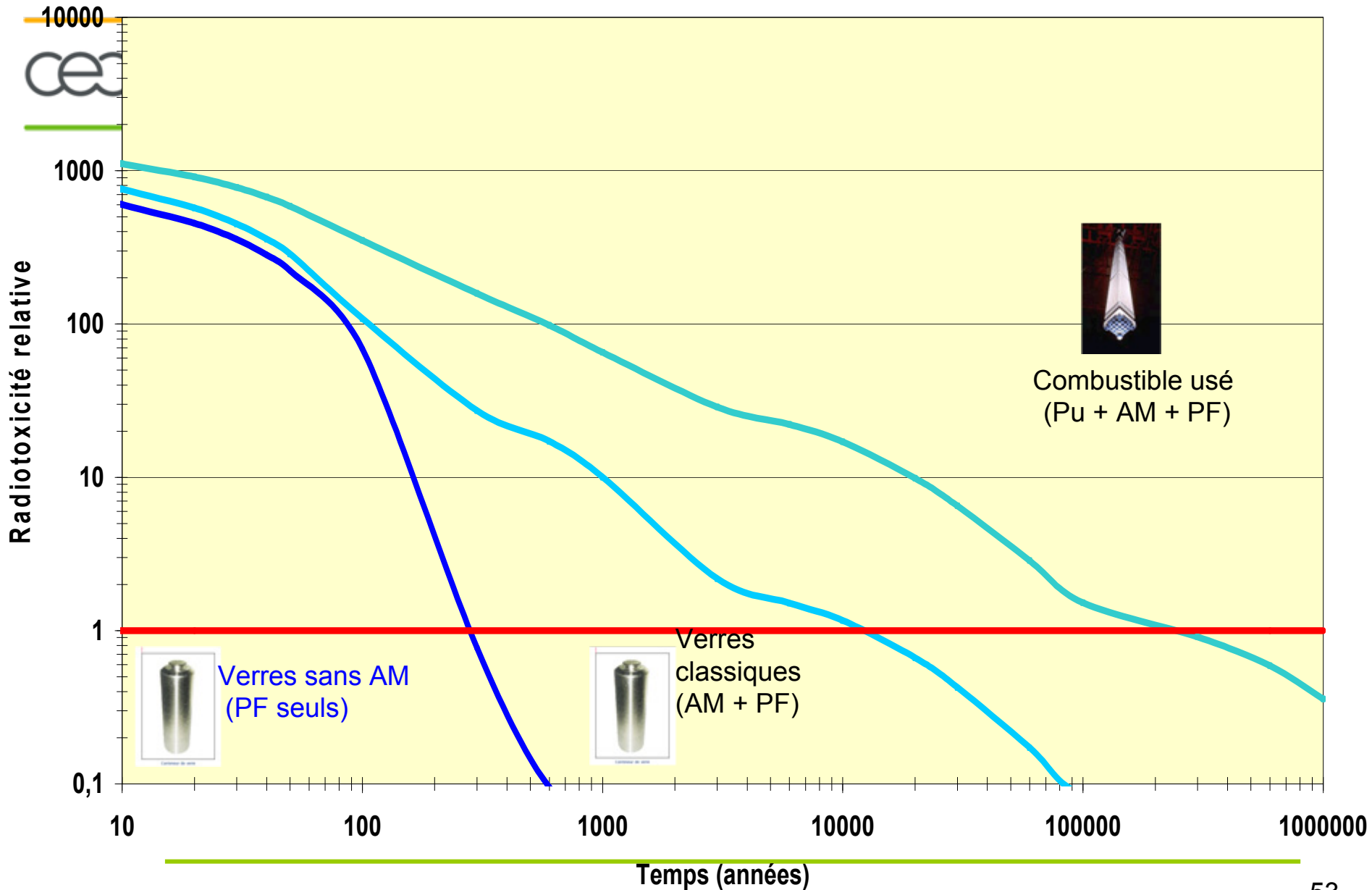
# Séparation-transmutation : les enjeux

---

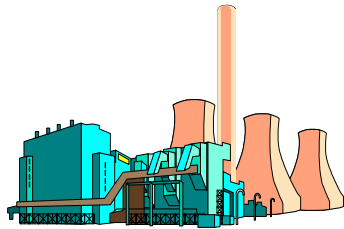


- Idée générale : séparer les radionucléides transmutables des autres, séparer les radionucléides à vie longue des autres, pour gérer ces différentes catégories de déchets de façon optimisée.
- Bonnes perspectives de transmuter les actinides dans les Réacteurs à Neutrons Rapides (cf ci-dessous). Ce qu'on gagnerait : un facteur important sur la radiotoxicité des déchets et sur la chaleur qu'ils dégagent (facteur dimensionnant d'un stockage profond).
- Avant de les transmuter, encore faut-il pouvoir les séparer et les entreposer.

# Radiotoxicité potentielle des déchets en fonction du temps



# Le traitement des combustibles usés

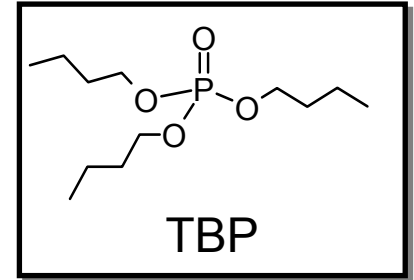


**Combustible usé**

**Uranium et  
Plutonium**

***PUREX***

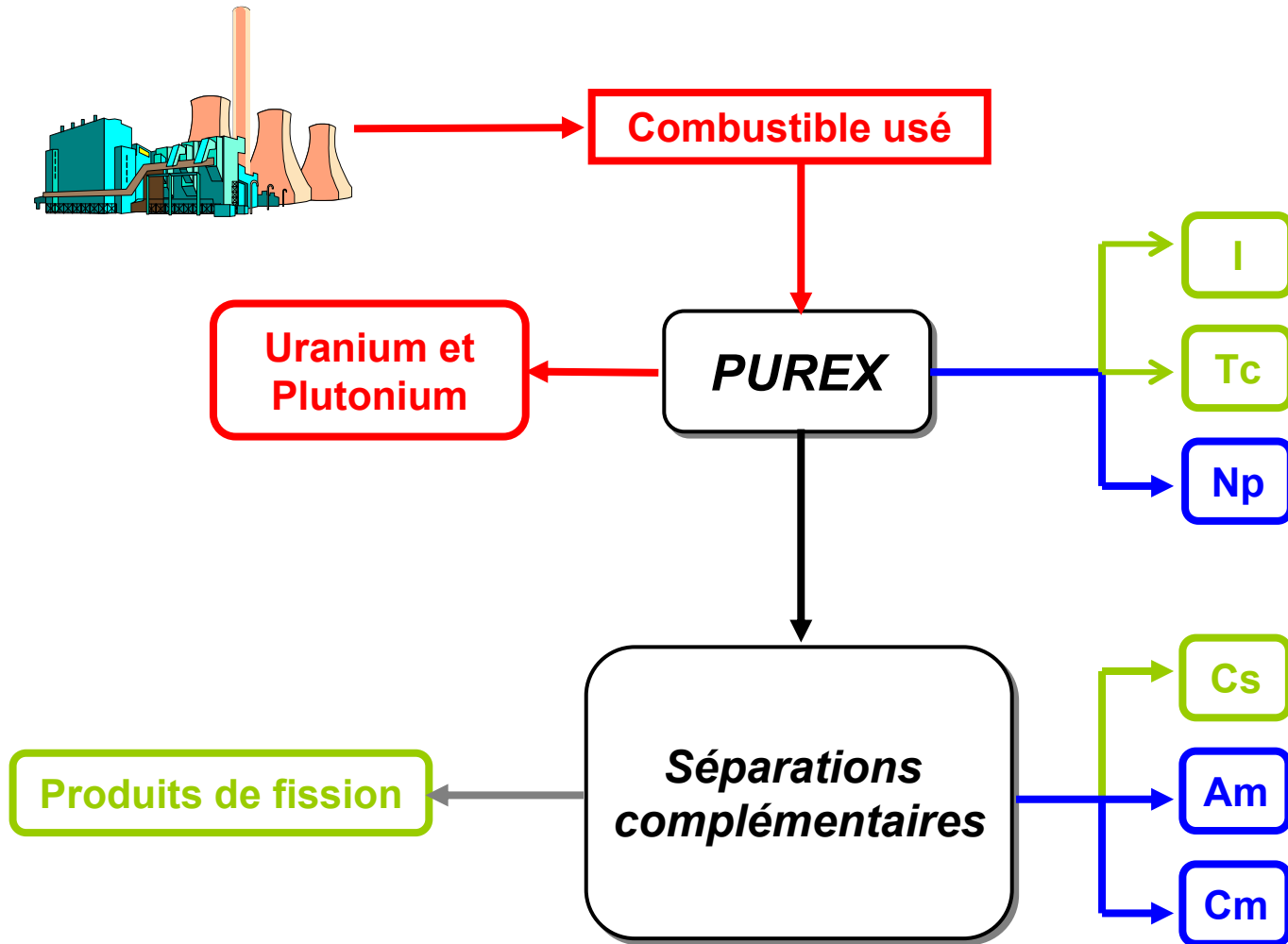
***Produits de fission  
et Actinides mineurs***





# La séparation poussée

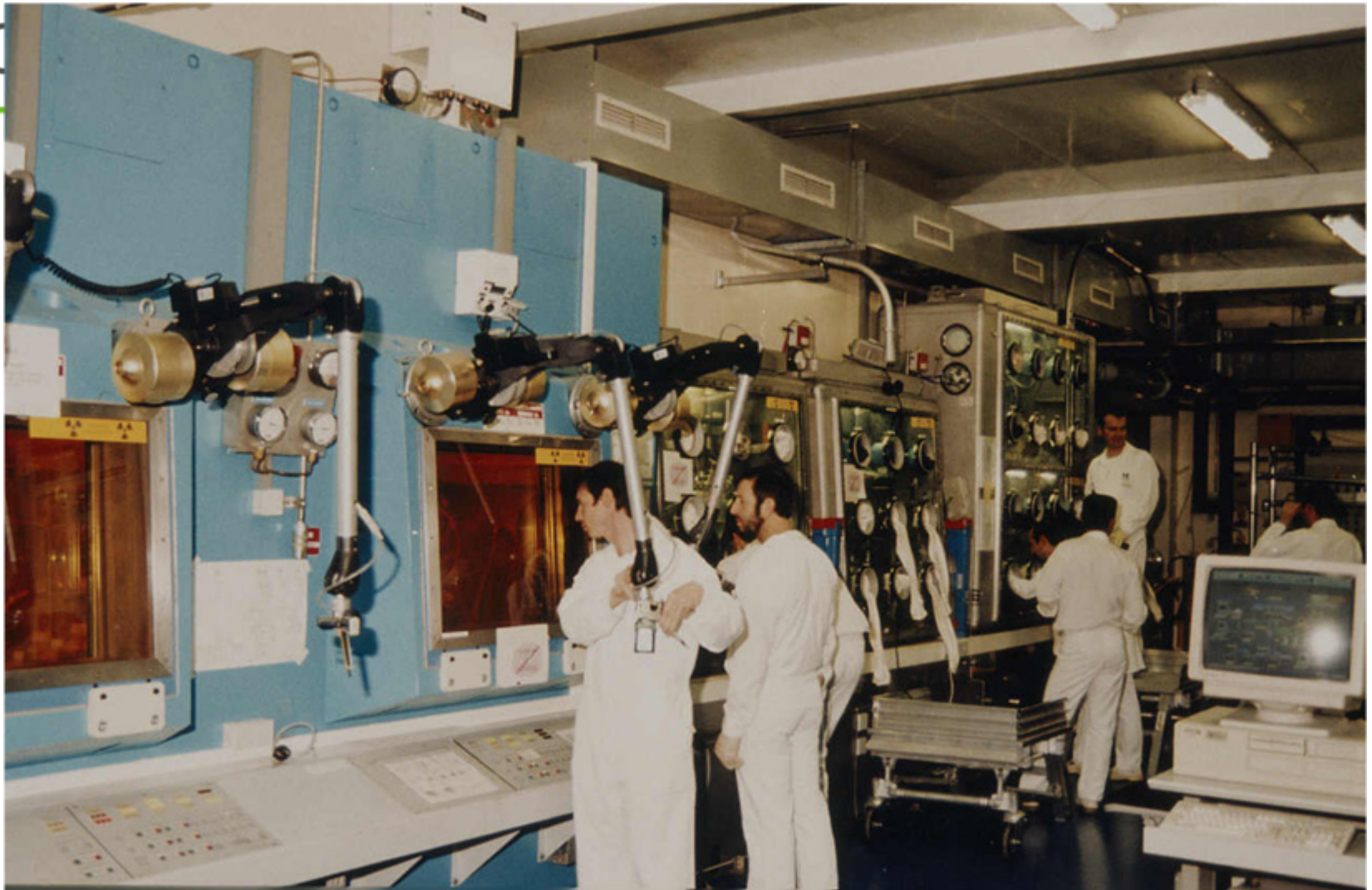
cea



# Le laboratoire Atalante

---

cea



# Gestion des actinides : les acquis

---



- On saura séparer les actinides (procédés hydrométallurgiques DIAMEX, SANEX, GANEX)
- On saura les entreposer
- On saura les transmuter : les actinides sont fissiles aux neutrons rapides, et seront recyclables dans les réacteurs de quatrième génération ... quand ces derniers seront déployés.

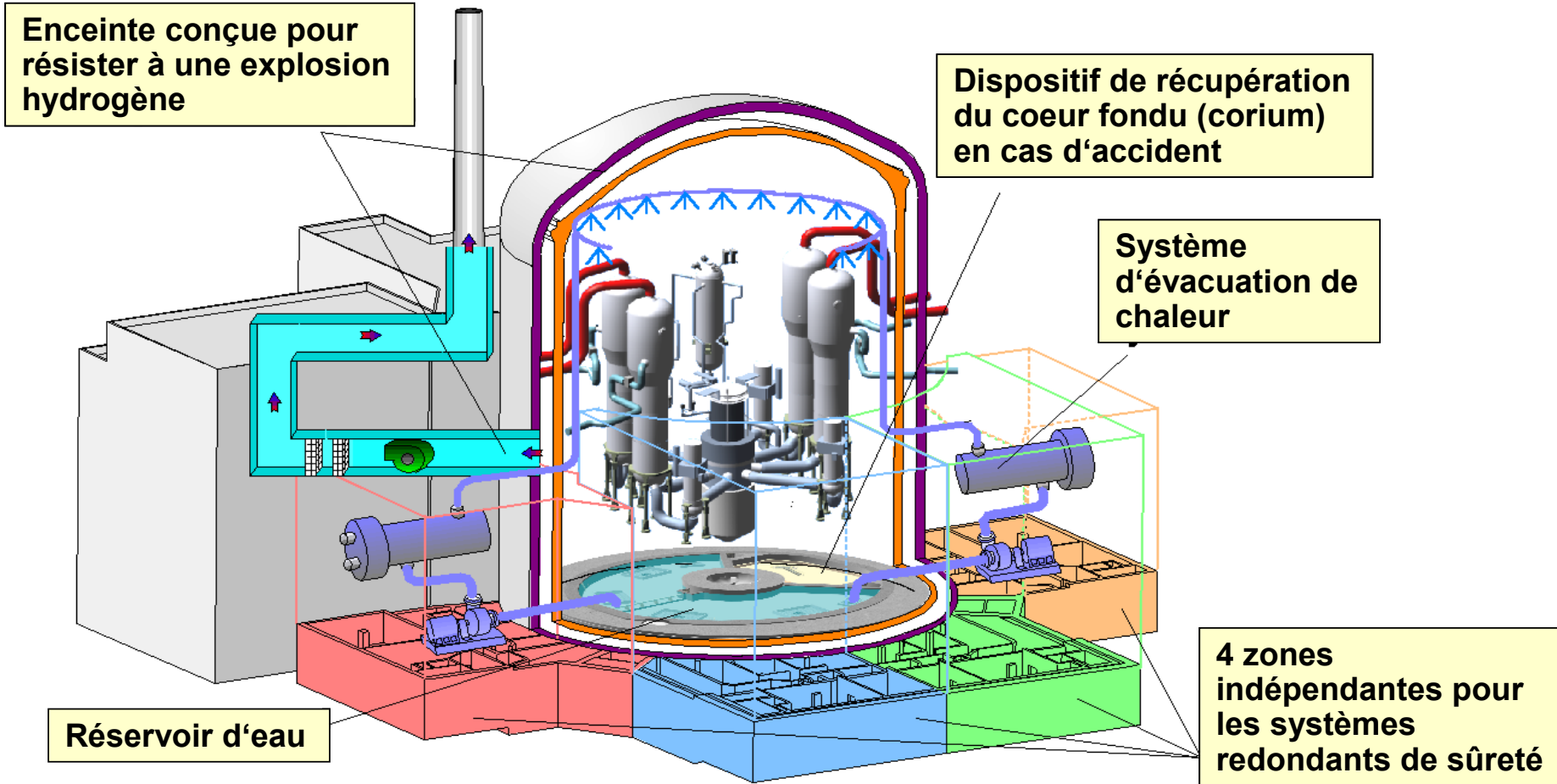


Concevoir et évaluer de **nouvelles générations** de systèmes nucléaires (réacteur et cycle)

# La 3<sup>ème</sup> génération : de nouvelles avancées en Sûreté



## Le projet EPR : un concept évolutionnaire basé sur un large retour d'expérience des REP



## *Caractéristiques de l'EPR*

- Améliorations importantes de la **sûreté**
- Durée de vie technique allongée à **60 ans**
- Rendement thermodynamique élevé **36.7%**
- Taux de combustion élevé (**60 GWj/t - U enrichi à 5%**)
- Possibilité d'utilisation du combustible MOX
- Marges prises sur composants



# L'EPR: un réacteur de 3<sup>ème</sup> génération

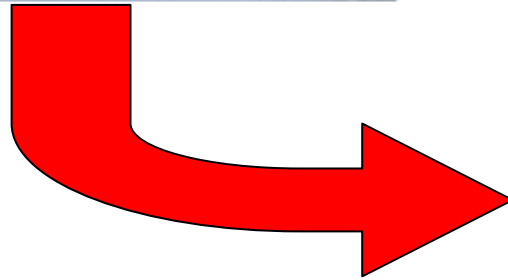


# La matière première: le minerai d'uranium



Certaines mines (Cigar lake, Canada) contiennent jusqu'à 20% d'uranium dans le minerai.

Les mines françaises ne sont plus exploitées (0.1% à 0.4%).



Yellowcake



L'uranium est très répandu sur terre.

# La matière première: le minerai d'uranium

## *Exploitation d'une mine au Niger*

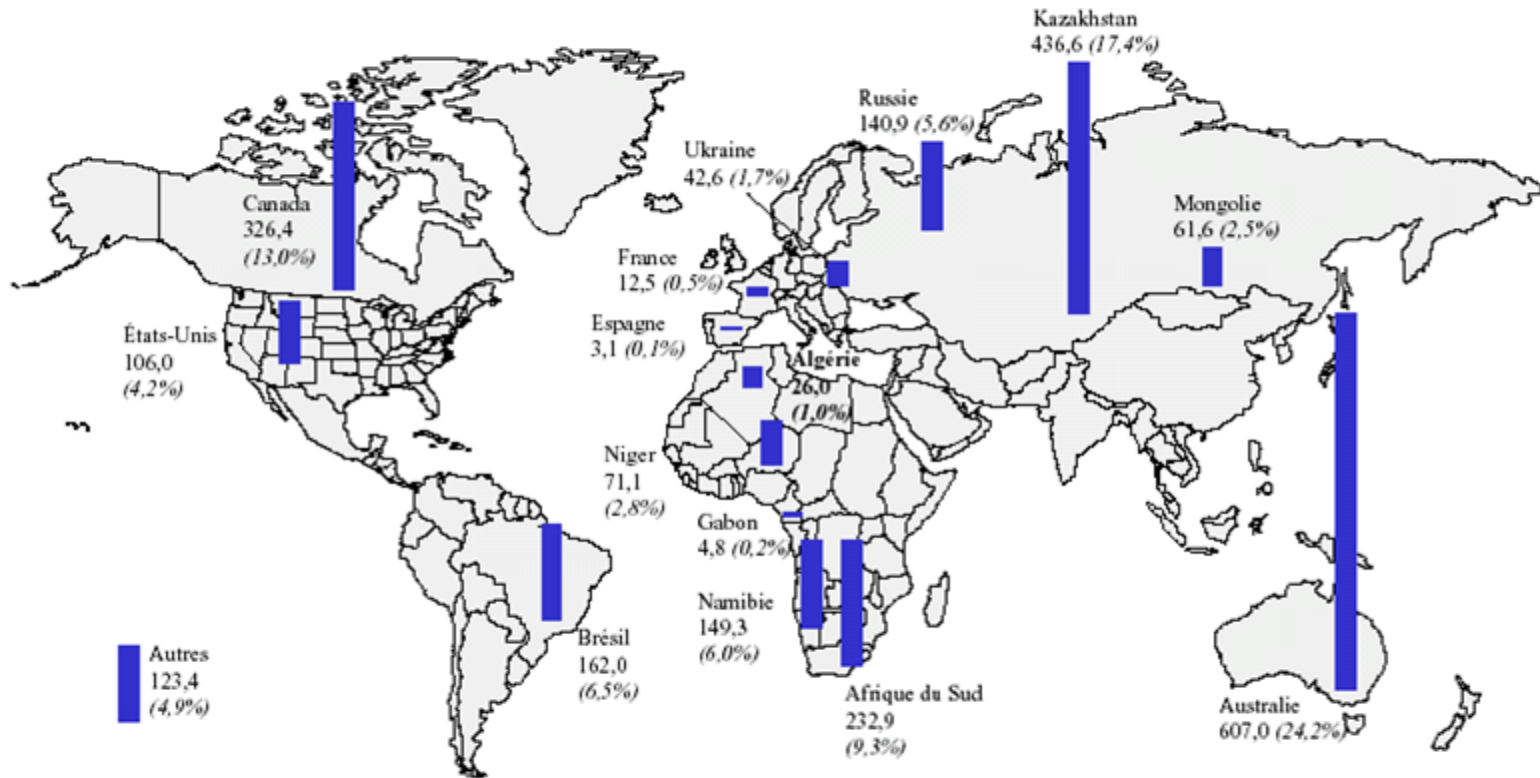


Certaines mines (Cigar lake, Canada) renferment plus de 20% d'uranium dans le minerai. Les mines françaises ne sont plus aujourd'hui exploitées (0.1% à 0.4%).

## Réserves mondiales prouvées d'uranium\* (1. 1. 1999)



Unité : Milliard de tep



Total monde : 2 506,2 milliers de tonnes (hors Chili et Chine)

(\*) ressources raisonnablement assurées récupérables à moins de 80\$/kg U

Source : Observatoire de l'énergie d'après CEA/DSE et AIE/OCDE

*Attention, ne comprend pas tout*

**Ressources classiques connues**

≤ 130 \$/kg d'U	3954 kt
≤ 80 \$/kg d'U	3002 kt
≤ 40 \$/kg d'U	1254 kt

**Ressources raisonnablement assurées**

≤ 130 \$/kg d'U	2964 kt
≤ 80 \$/kg d'U	2274 kt
≤ 40 \$/kg d'U	916 kt

**Ressources supplémentaires estimées**

≤ 130 \$/kg d'U	990 kt
≤ 80 \$/kg d'U	728 kt
≤ 40 \$/kg d'U	338 kt

*Besoins annuels :  
environ 60 kt*

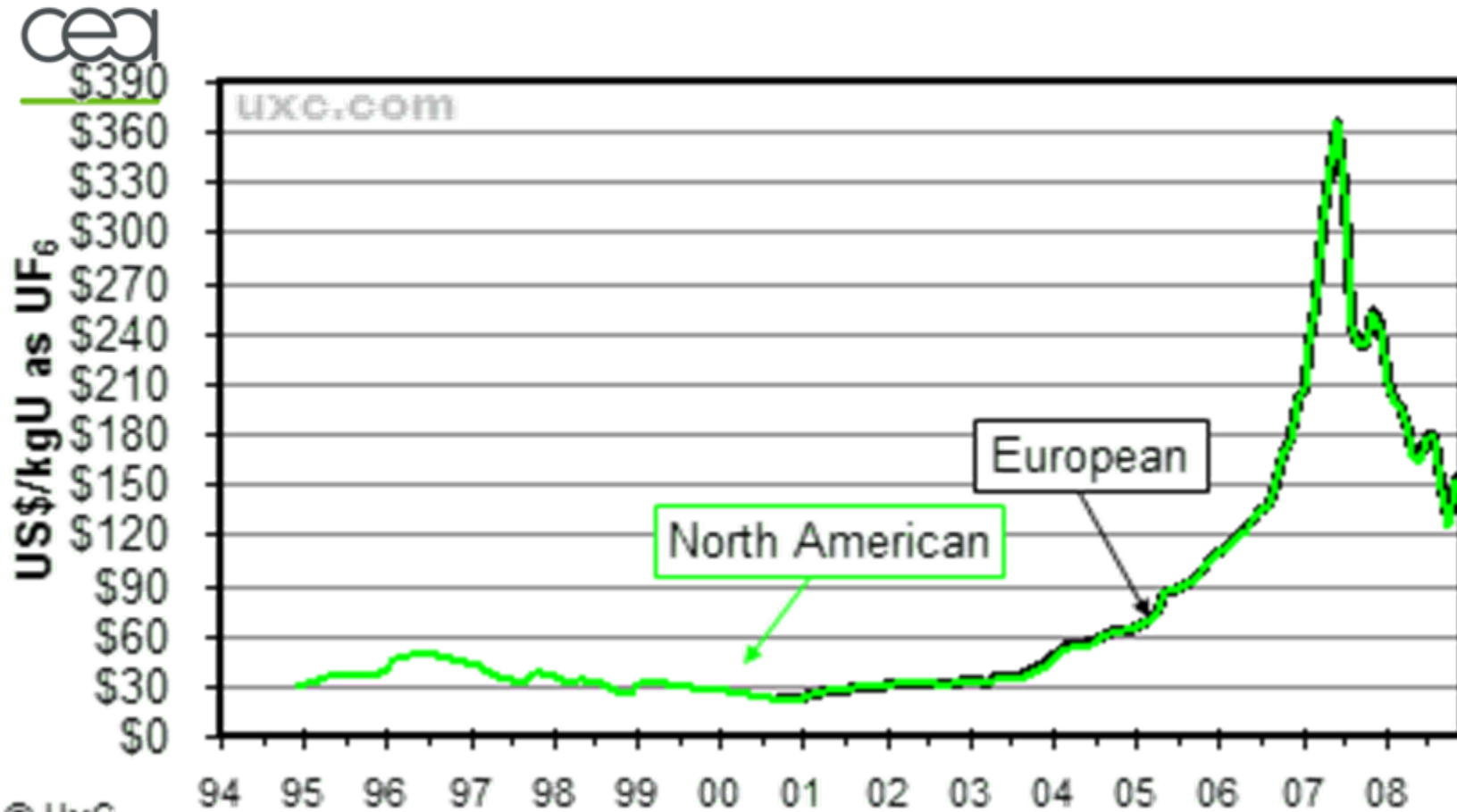
*A moins de 80\$/kg, une centaine  
d'années avec la technologie  
actuelle*

*Plus de 10 000 ans avec des  
réacteurs à neutrons rapides*



# Le prix de l'uranium

Cf exposé de Sondes Kahouli



Le prix de l'uranium a été multiplié par 10 en 4 ans !!





## Les principes généraux

La réaction en chaîne et son contrôle

## Le nucléaire actuellement

**Le cycle du combustible**

Sûreté, risques

Le parc existant, son fonctionnement, ses performances

## Filières et générations de réacteurs

Les systèmes à neutrons lents vs rapides

## Le nucléaire du futur

De nouveaux critères pour un nucléaire durable

Portrait des systèmes nucléaires du futur, ce qu'on peut en attendre, leurs perspectives de développement

# Le bouillonnement créateur des années 50

CRCE • THRTS • LOFT • HTREI • ZPPR • FRAN • SUSIE • EBR • BORAX-I • BORAX-II • ASFR • SPERT-I • SPERT-II • SPERT-III • SPERT-IV • BORAX-V •

• EBOR • EOCR • MLI • AIW • BORAX-IV • ETR • MTR • ATR • EBRII • SIW • ATRC • OMRE •

**NATIONAL REACTOR TESTING STATION**  
 largest complex of nuclear reactors in the world...  
 50 reactors built since 1949

TREAT • HOTCE • BORAX-III • SNAPTRAN • 10A • S5G

• BORAX-I • BORAX-II • ASFR • SPERT-I • SPERT-II • SPERT-III • SPERT-IV • BORAX-V •

(Coffee Shop à Idaho Falls, 1973)

# Les filières nucléaires

## Critères de sélection

- ✓ **Choix du spectre de neutrons**  
Thermique, Epithermique ou Rapide
- ✓ **Choix du combustible**  
Uranium, taux d'enrichissement, autres  
Forme : oxyde, nitrure, métallique, etc...
- ✓ **Choix du modérateur**  
Pouvoir de modération ( $Z$  faible), faible absorption neutronique,  
Large choix de modérateurs  
*(voir tableau des modérateurs)*
- ✓ **Choix du caloporteur**  
Bon conducteur thermique, grande capacité calorifique,  
transparence aux neutrons.  
Large choix de caloporteurs  
*(voir tableau des caloporteurs)*



# Des UNGG aux REP : Le Bugey

---

CEA





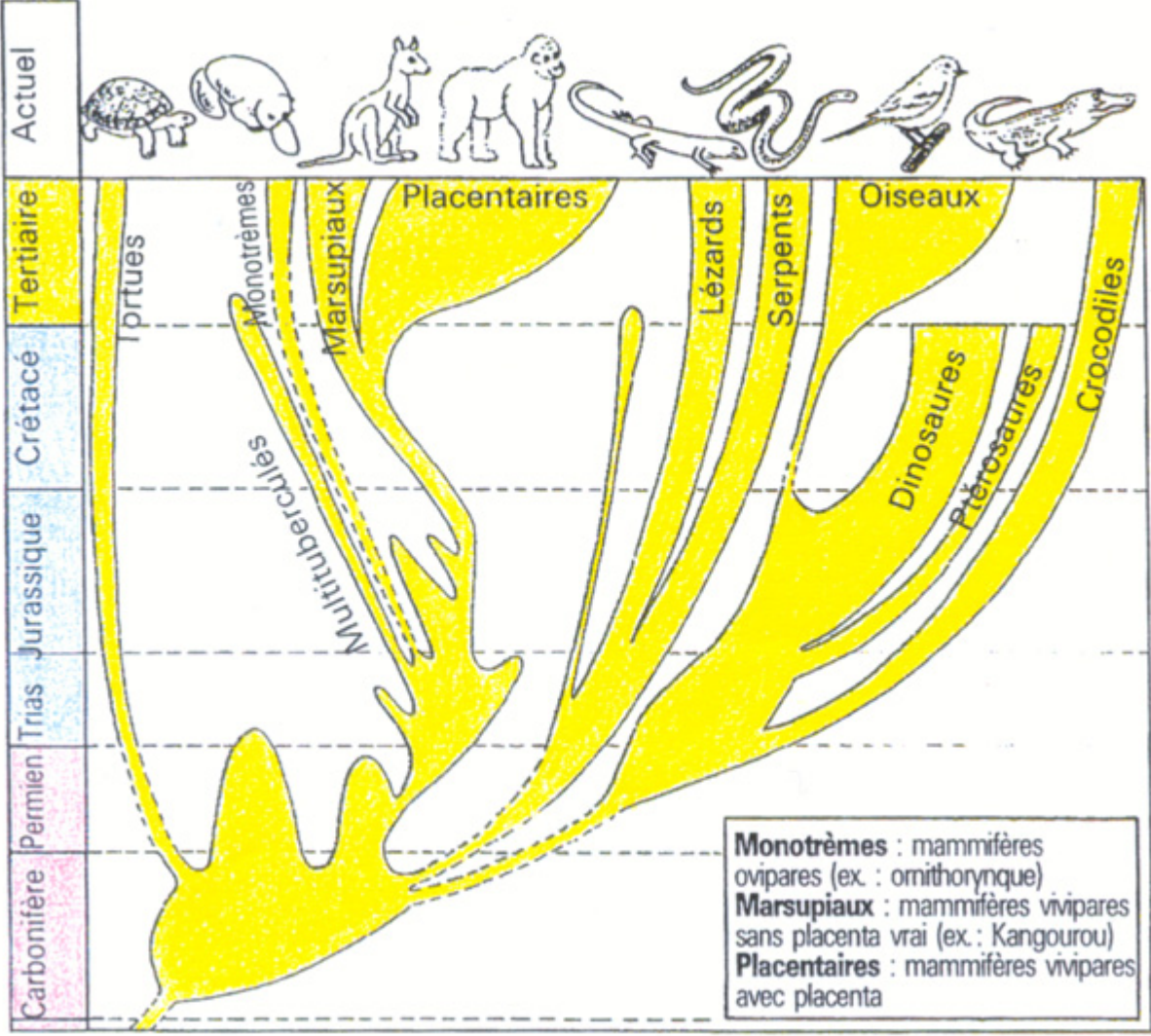
---

*Les réacteurs à eau bouillante (REB)*



*Brunswick, GE, 820 MWe*

# Analogie Paléontologique





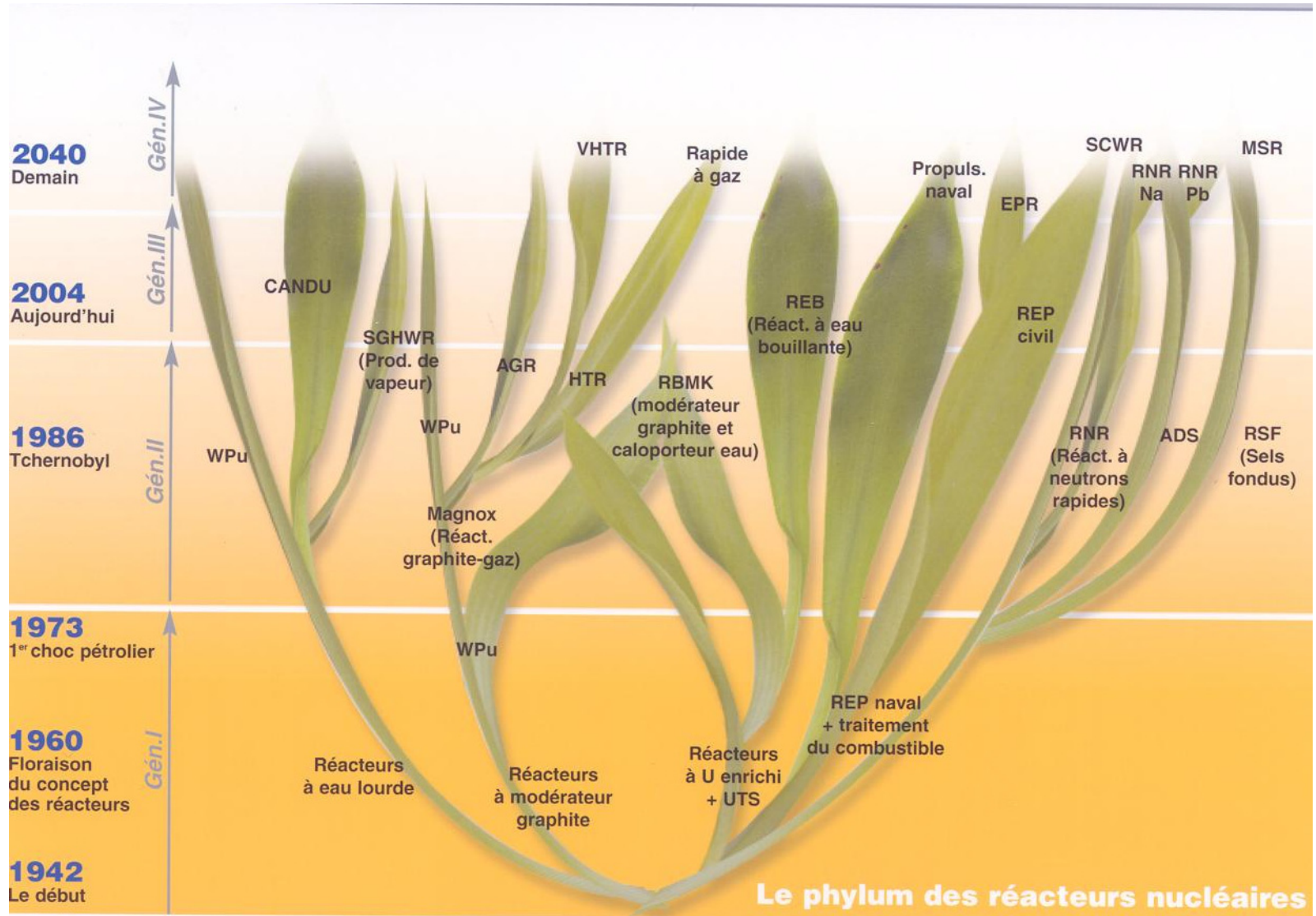


**« If any species does not become modified and improved in a corresponding degree with its competitors, it will soon be exterminated »**

*Charles Darwin. The origin of species, 1859*

**« Si une espèce ne se modifie pas et ne s'améliore pas au même degré que ses concurrents, elle sera rapidement exterminée »**

# Le phylum des réacteurs nucléaires





## Les principes généraux

La réaction en chaîne et son contrôle

## Le nucléaire actuellement

**Le cycle du combustible**

Sûreté, risques

Le parc existant, son fonctionnement, ses performances

## Filières et générations de réacteurs

Les systèmes à neutrons lents vs rapides

## Le nucléaire du futur

De nouveaux critères pour un nucléaire durable

Portrait des systèmes nucléaires du futur, ce qu'on peut en attendre, leurs perspectives de développement

# Neutrons rapides vs neutrons thermiques

---

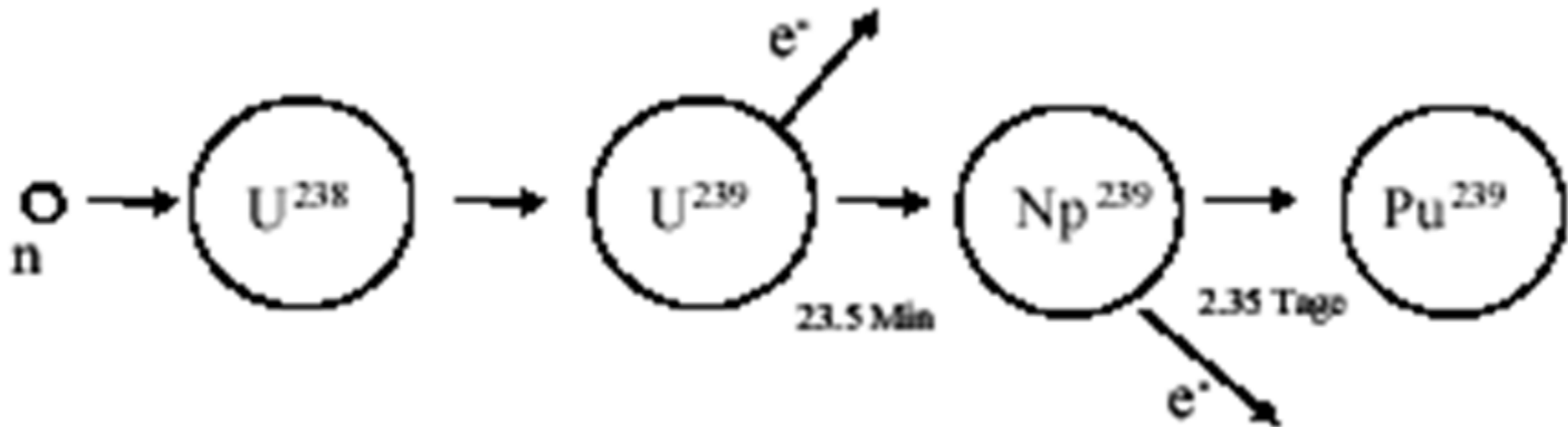
— Les Réacteurs à Neutrons Rapides :



- **Pour une ressource inépuisable** (le ratio capture/fission est plus favorable pour des neutrons rapides, d'où possibilité de régénérer de la matière fissile en spectre rapide).
- **Pour réduire les déchets par transmutation des actinides** (les actinides sont fissiles aux neutrons rapides)

## Principe de la régénération de matière fissile :

 Formation d'un noyau de plutonium 239 (fissile) par capture d'un neutron sur l'uranium 238 (fertile).

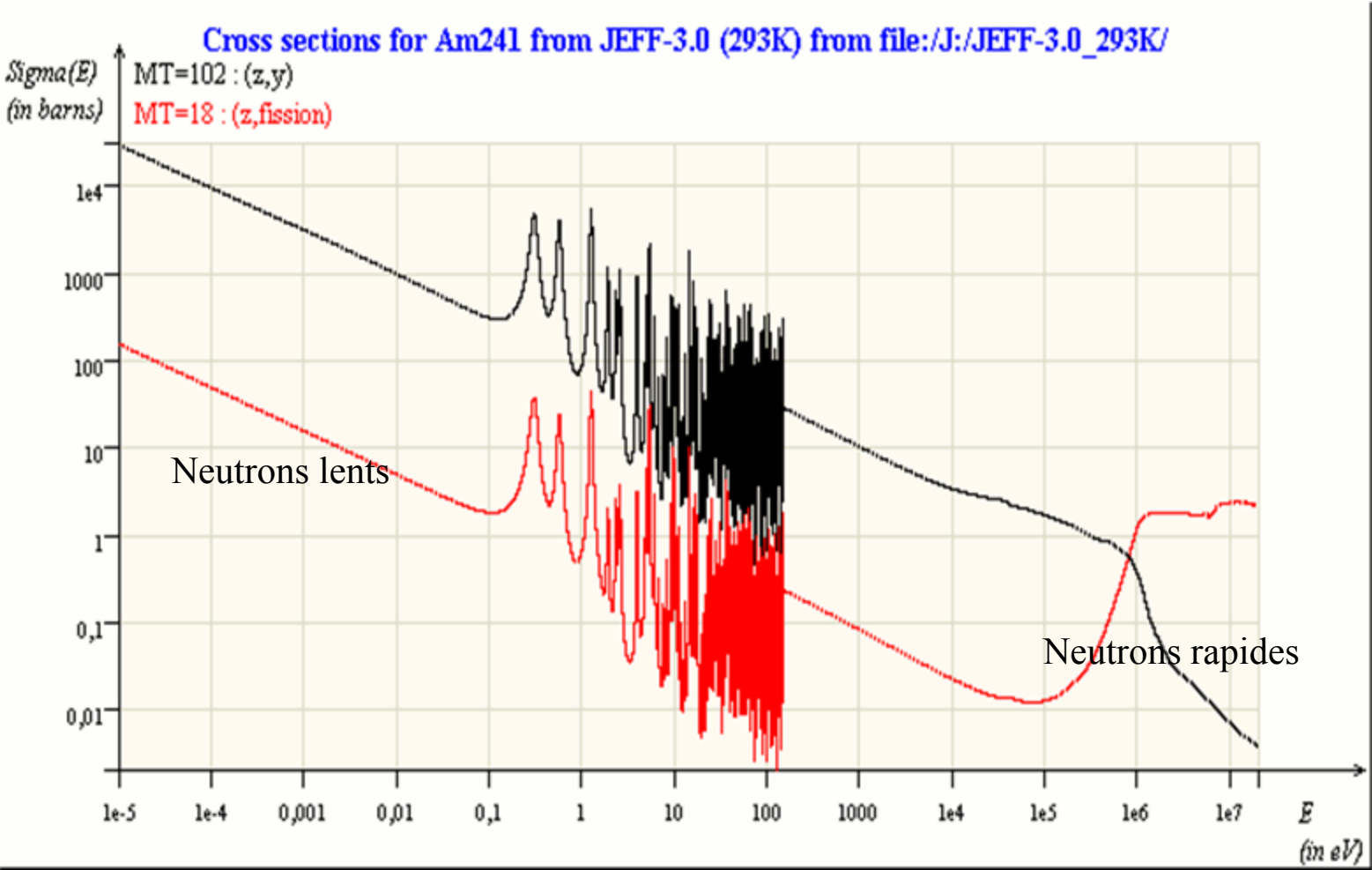


*NB : A côté du cycle U238 (fertile) – Pu 239 (fissile), il existe un autre cycle du combustible envisageable : Th 232 (fertile) – U 233 (fissile). Cf exposé de Perrine Guillemin)*


# Influence du spectre de neutrons sur la transmutation des actinides



**<sup>241</sup>Am**



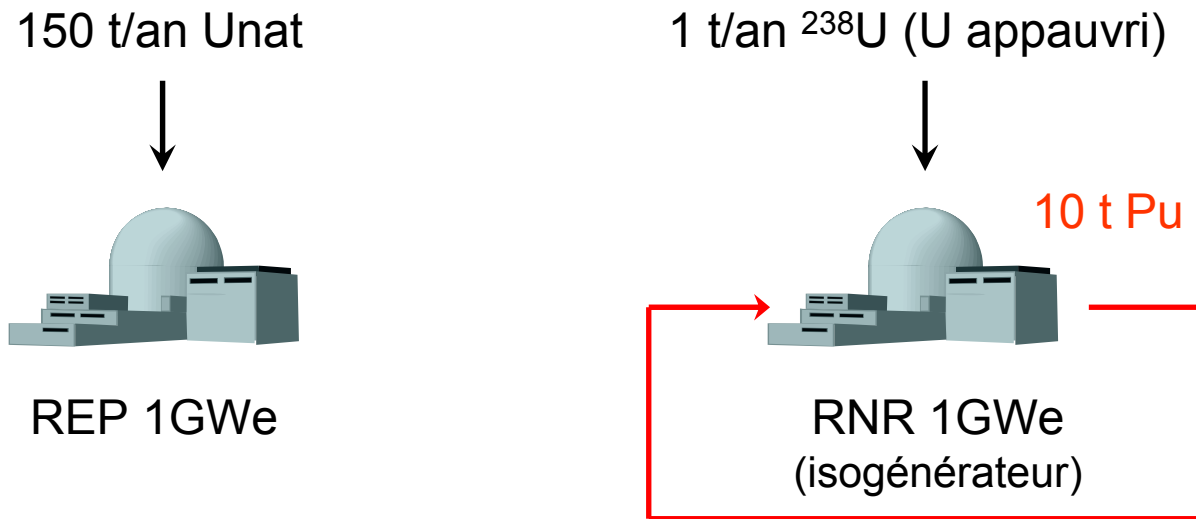


 Un REP-UOX typique (1GWé) a besoin de **150 t** d'uranium naturel par an et produit 0.25 t de plutonium par an.

Un RNR régénérateur de même puissance aurait besoin de 15 t de Pu (constamment régénérés), et **consommerait seulement ~ 1 à 2 tonnes d'Uranium naturel par an.**

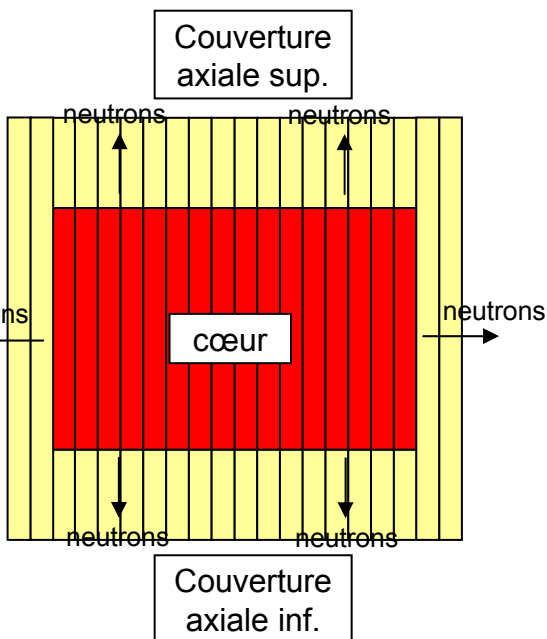
**Avec des RNR, le nucléaire peut être durable!**

# Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) pour l'économie des ressources



Une fois constitué le stock opératoire de Pu, les RNR se satisfont d'un appoint de  $^{238}\text{U}$  et peuvent se passer totalement d'uranium naturel

# Régénération de matière fissile dans les réacteurs à neutrons rapides



## Réacteur de type Superphénix

**Pu consommé :**

cœur : 800 kg/an

**Pu formé :**

cœur : 640 kg/an

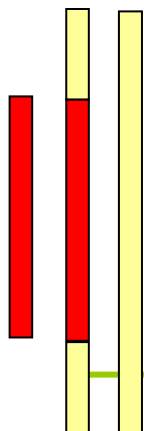
CAI+CAS : 160 kg/an


CR : 160 kg/an

$$\text{Taux de régénération} = \frac{640}{800} = 0,8$$

Réacteur **sur**régénérateur

Risque de prolifération croissant



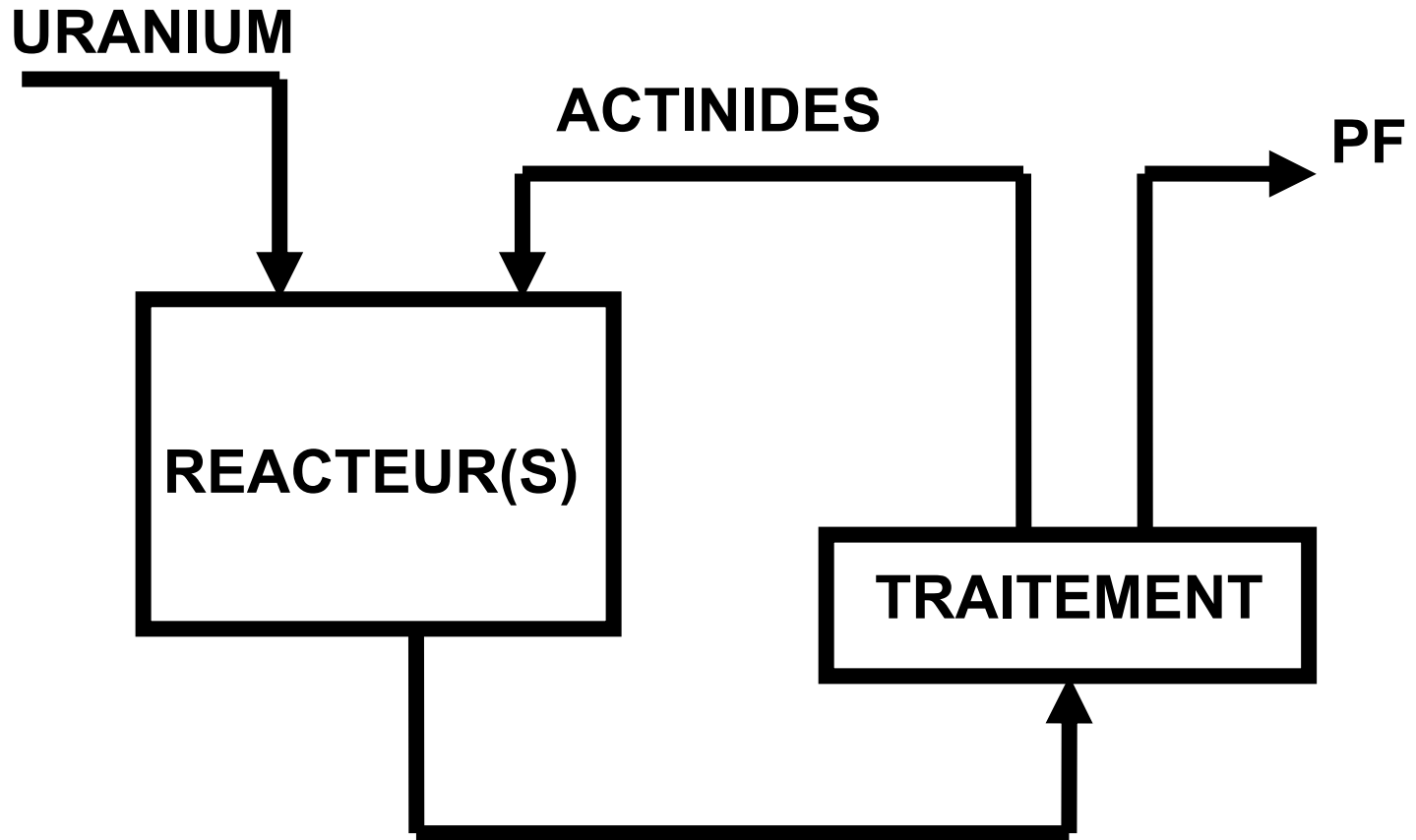
 Un REP-UOX typique (1GWé) produit 210 Kg de plutonium par an, et 16 kg d'actinides. Le recyclage du Pu sous forme de MOX permet de stabiliser l'inventaire Pu, mais les actinides ne sont pas brûlés et s'accumulent.

Un RNR régénérateur de même puissance peut consommer les actinides qu'il produit.

**Avec des RNR, le nucléaire peut être plus propre!**

---

## Schéma de principe du cycle « RNR »





## Les principes généraux

La réaction en chaîne et son contrôle

## Le nucléaire actuellement

**Le cycle du combustible**

Sûreté, risques

Le parc existant, son fonctionnement, ses performances

## Filières et générations de réacteurs

Les systèmes à neutrons lents vs rapides

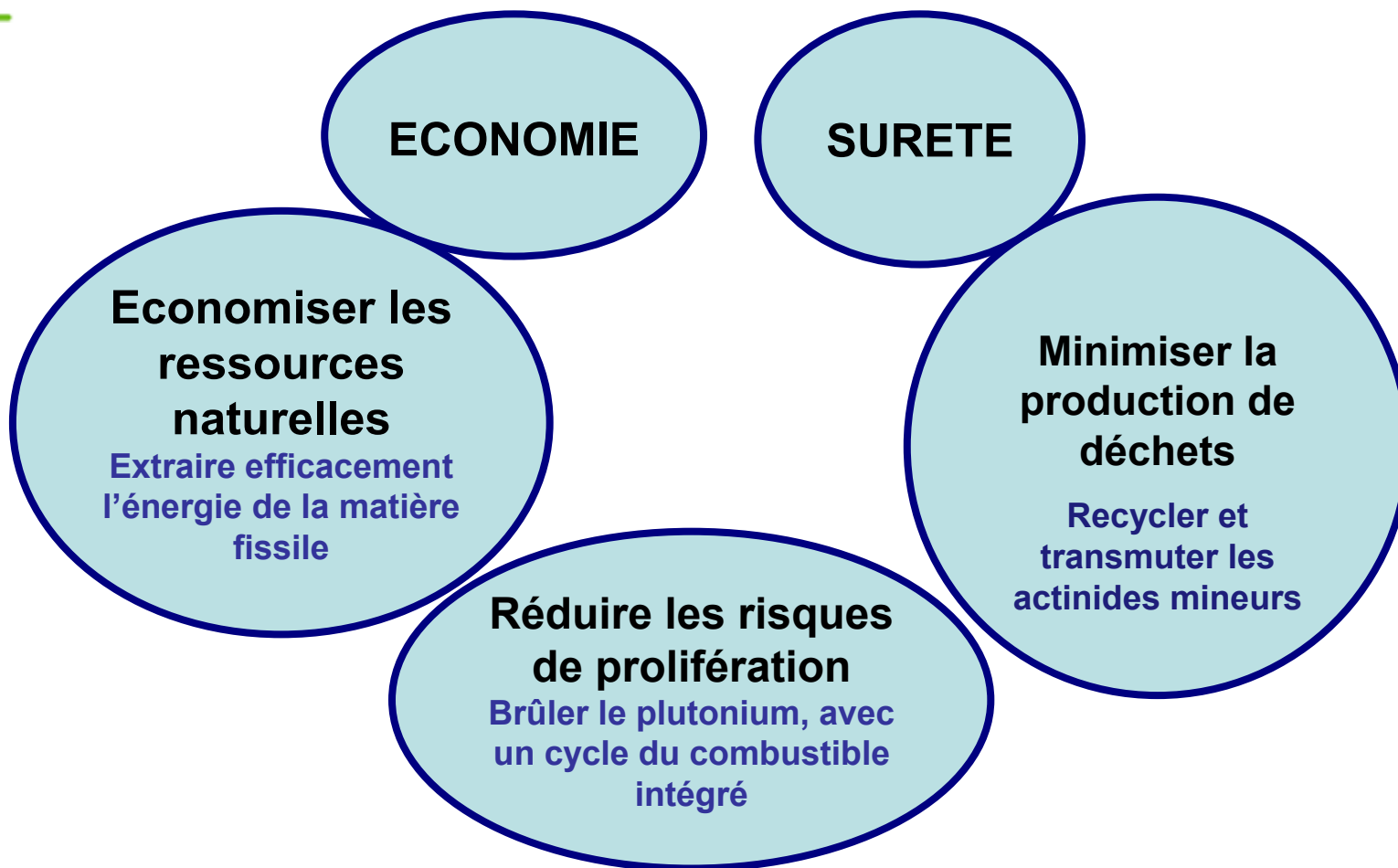
## Le nucléaire du futur

**De nouveaux critères pour un nucléaire durable**

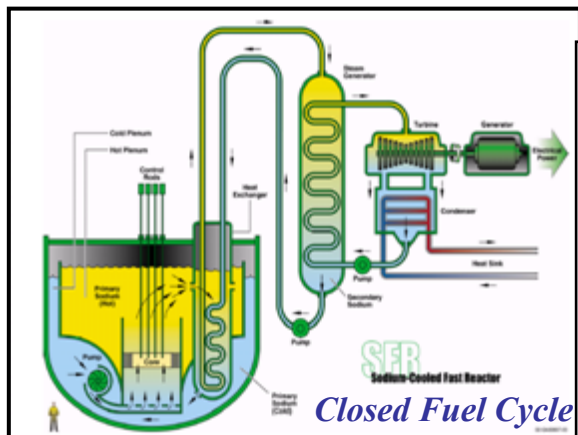
Portrait des systèmes nucléaires du futur, ce qu'on peut en attendre, leurs perspectives de développement



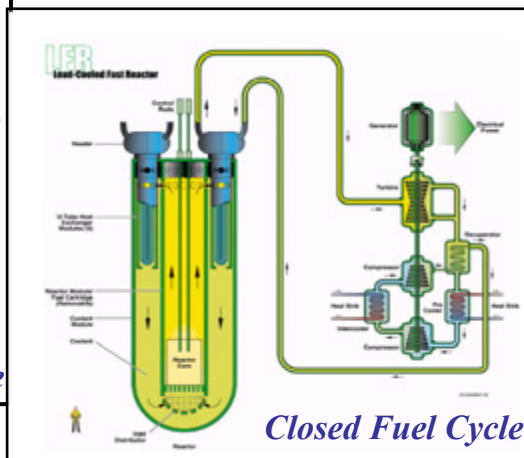
## 5 critères fondamentaux



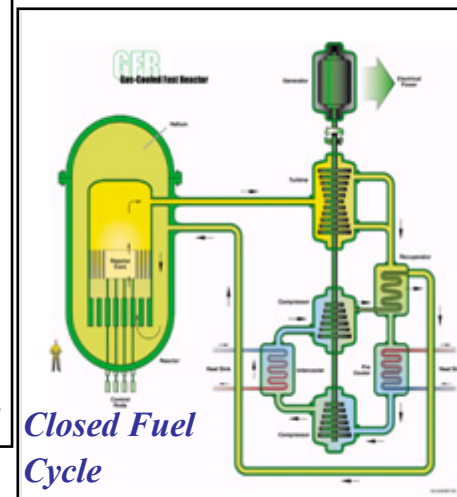
# 6 concepts innovants à l'étude



*Sodium Fast reactor*

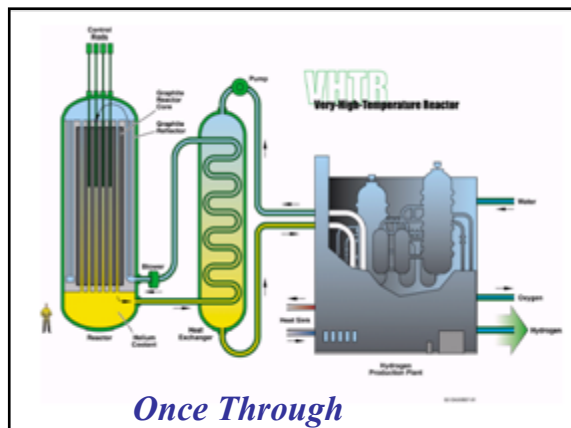


*Lead Fast Reactor*



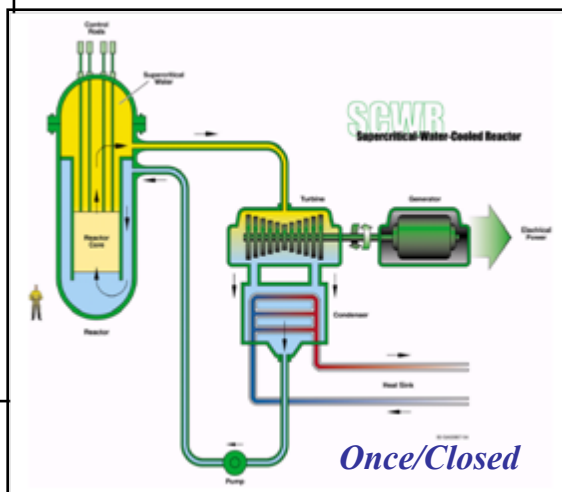
*Closed Fuel Cycle*

*Gas Fast Reactor*



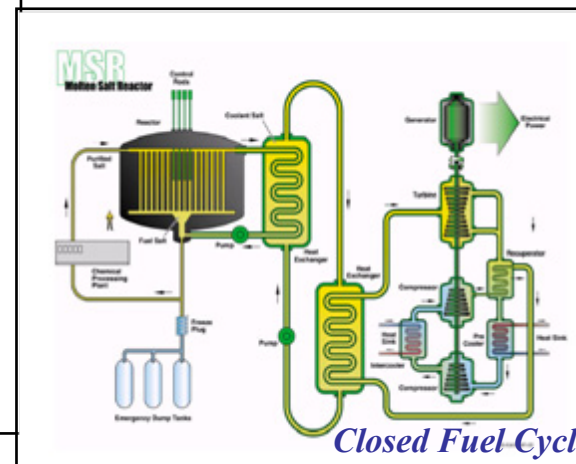
*Once Through*

*Very High Temperature Reactor*



*Once/Closed*

*Supercritical Water Reactor*



*Closed Fuel Cycle*

*Molten Salt Reactor*



## Les principes généraux

La réaction en chaîne et son contrôle

## Le nucléaire actuellement

**Le cycle du combustible**

Sûreté, risques

Le parc existant, son fonctionnement, ses performances

## Filières et générations de réacteurs

Les systèmes à neutrons lents vs rapides

## Le nucléaire du futur

De nouveaux critères pour un nucléaire durable

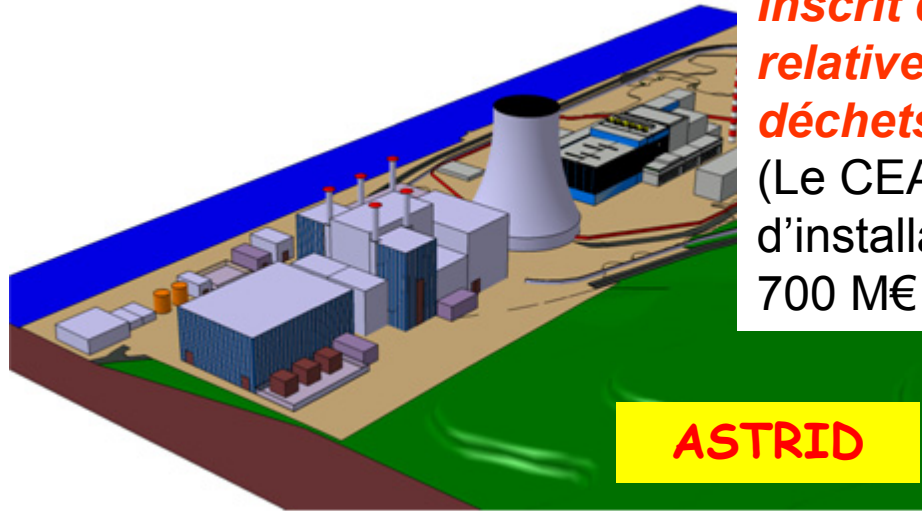
**Portrait des systèmes nucléaires du futur, ce qu'on peut en attendre, leurs perspectives de développement**

5 janvier 2006

Mais nous devons prendre, en attendant, de nouvelles initiatives : de nombreux pays travaillent sur la nouvelle génération de réacteurs, celle des années 2030-2040, qui produira moins de déchets et exploitera mieux les matières fissiles. J'ai décidé de lancer, dès maintenant, la conception, au sein du Commissariat à l'énergie atomique, d'un prototype de réacteur de 4ème génération, qui devra entrer en service en 2020.



# Le prototype de 4<sup>ème</sup> génération



**Inscrit dans la Loi de programme du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs (Article 3)**

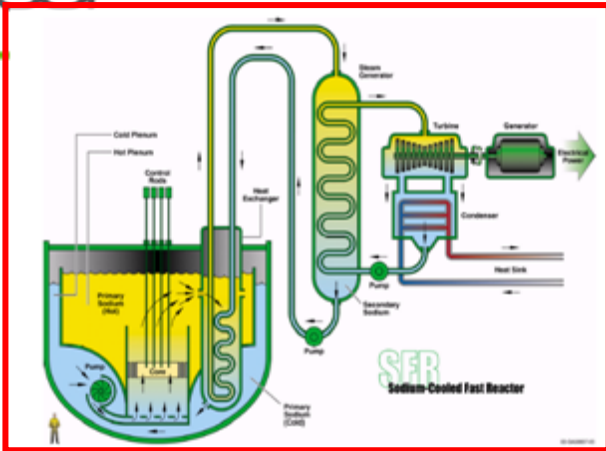
(Le CEA doit) ... mettre en exploitation un prototype d'installation avant le 31 décembre 2020;  
700 M€ du grand emprunt

Advanced Sodium Test Reactor for Industrial Developments

## Enjeux du prototype:

- ✓ Un réacteur capable de transmuter les actinides mineurs (*loi du 28 juin 2006*)
- ✓ Un réacteur sûr, économique, facile à exploiter et capable de fonctionner à partir de l'uranium appauvri (*4<sup>ème</sup> Génération*)
- ✓ Disposer d'un produit compétitif et innovant pour le marché futur (*leadership international et crédibilité nationale*)

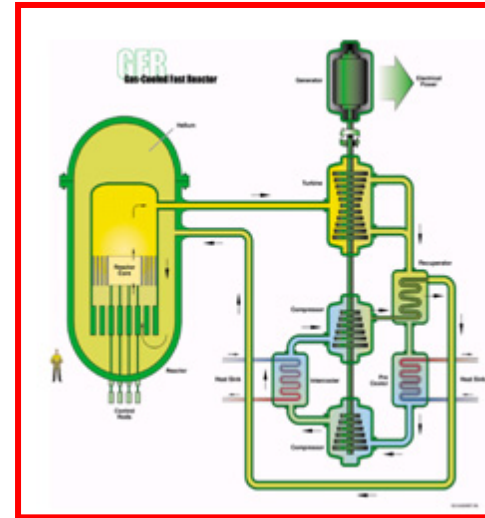
## Deux filières RNR à l'étude en France



*Réacteur rapide Sodium*

- Plus mature
- Appelle des améliorations techniques substantielles (sûreté, opérabilité, compétitivité économique)

**OPTION DE REFERENCE**



*Réacteur rapide à gaz*

- Appelle des ruptures technologiques et des progrès plus importants (combustible, matériaux, sûreté)
- Techno plus incertaine
- Plus prometteuse

**OPTION ALTERNATIVE**

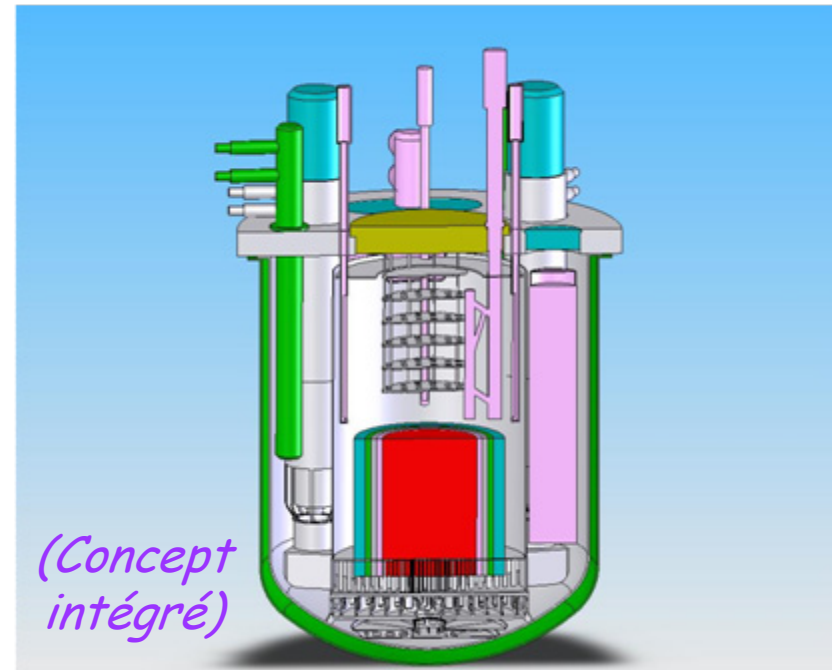
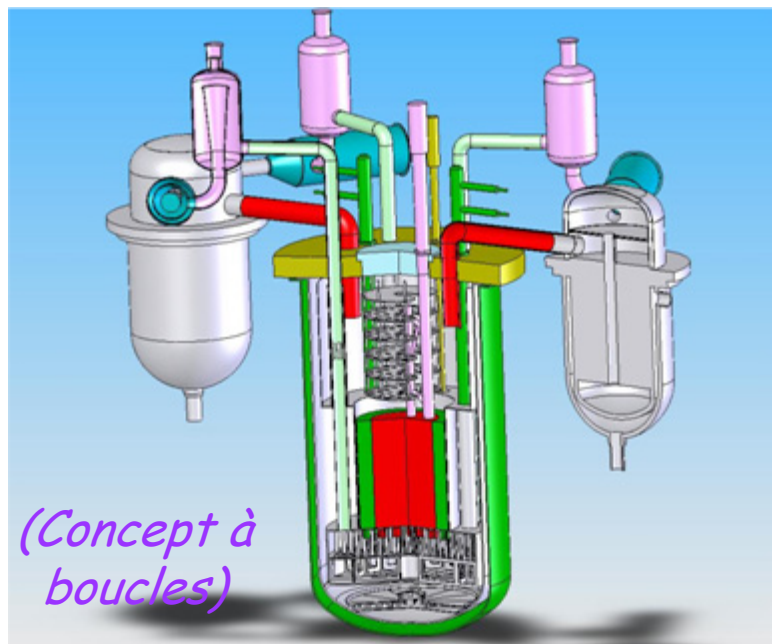


# Un réacteur de 4<sup>ème</sup> génération: le SFR

*(Rapide refroidi au sodium liquide)*

## Etude de concepts innovants:

- **Système** architecture, conversion, cycle direct ou combiné.
- **Inspection et maintenance** instrumentation spécifique
- **Matériaux** combustible, gaines et structures
- **Sûreté** criticité (coefficient de vide)



# Phenix

cea



# Le calendrier des générations nucléaires



Premières réalisations



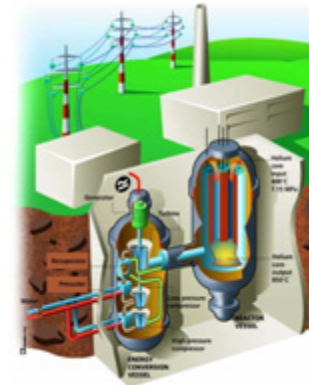
Réacteurs actuels



Réacteurs avancés



Systemes du futur



1950 1970 1990 2010 2030 2050 2070 2090



Generation I

UNGG  
CHOOZ

Generation II

REP 900  
REP 1300

N4

Generation III

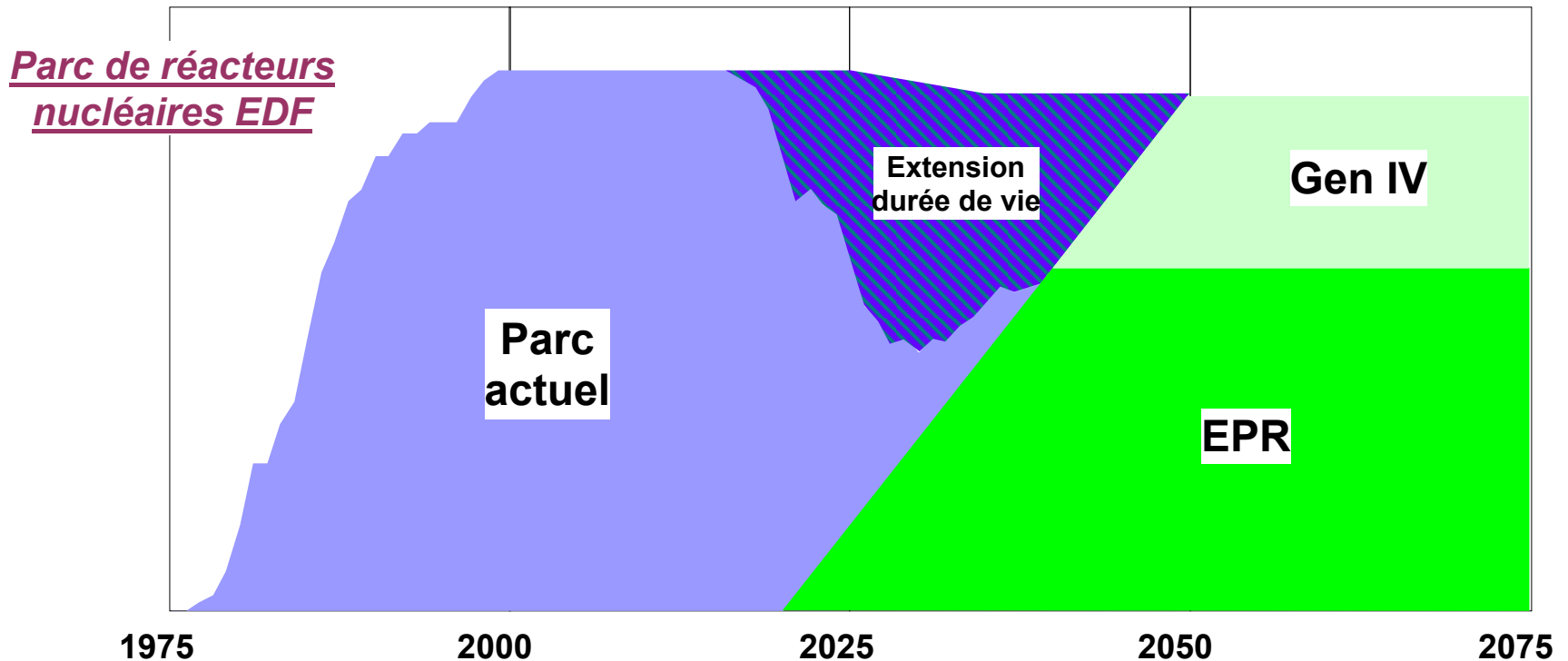
EPR

Generation IV

# La stratégie du développement nucléaire français



1. Etendre la durée de vie du parc actuel (*Gen II*)
2. Remplacer les réacteurs actuels par des EPR (*Gen III*)
3. Introduire progressivement des réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération (*Gen IV*)



# Avantages-inconvénients de l'énergie nucléaire

---



<b>Avantages du nucléaire</b>	<b>Inconvénients du nucléaire</b>
Indépendance énergétique Ressource à long terme Découplage des prix des matières premières Protection de l'environnement globale Localisation des emplois Balance des paiements Exportations	Lourds investissements Peur des radiations (faibles doses) Sûreté-accidents graves Gestion des déchets ultimes Non-prolifération

# Conclusion

---



- **L'énergie nucléaire se développe (on a besoin de tout!)**
- **Un nucléaire durable, économique, propre et sûr est possible**

<b>2010</b>	→	<b>2040</b>
<b>Gen III</b>	→	<b>Gen IV</b>

- **Les systèmes Gen IV à n rapides et cycle fermé**
  - **Permettront de minimiser les déchets**
  - **Résoudront le problème des ressources**
  - **Allègeront les problèmes de prolifération**
- **De nouvelles applications de l'énergie nucléaire sont envisageables**
- **L'énergie nucléaire est jeune (50 ans). De grands progrès sont possibles**
- **Il faut du temps et de la recherche (internationale!)**