



RadioProtection Cirkus

Le cycle du combustible nucléaire

Nom de l'auteur : Marc AMMERICH

N° chrono : DOC-FO-22_1

Version du : 11 juin 2018

Le portail de la RP pratique et opérationnelle
www.rpcirkus.org - www.forum-rpcirkus.com

LE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

SOMMAIRE

- Introduction
- L'amont du cycle nucléaire
- Le passage en réacteur nucléaire
- L'aval du cycle nucléaire
- Les déchets nucléaires



LE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

REMERCIEMENTS

Etienne VERNAZ :

Directeur de Recherches au CEA Marcoule

Lionel BION

CEA Saclay - INSTN/UEINE

Pour leurs illustrations

Ainsi que les grands exploitants nucléaires :

ANDRA, CEA, EDF, ORANO



LE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

SOMMAIRE

- **Introduction**
- L'amont du cycle nucléaire
- Le passage en réacteur nucléaire
- L'aval du cycle nucléaire
- Les déchets nucléaires



INTRODUCTION

Le combustible est une matière qui fournit de l'énergie en brûlant.

L'uranium utilisé dans les centrales est appelé combustible nucléaire.

L'énergie est produite par la **FISSION**.



INTRODUCTION

L'uranium est un métal relativement répandu dans l'écorce terrestre.

Comme la plupart des métaux, il se trouve dans les roches combinés à d'autres éléments chimiques.

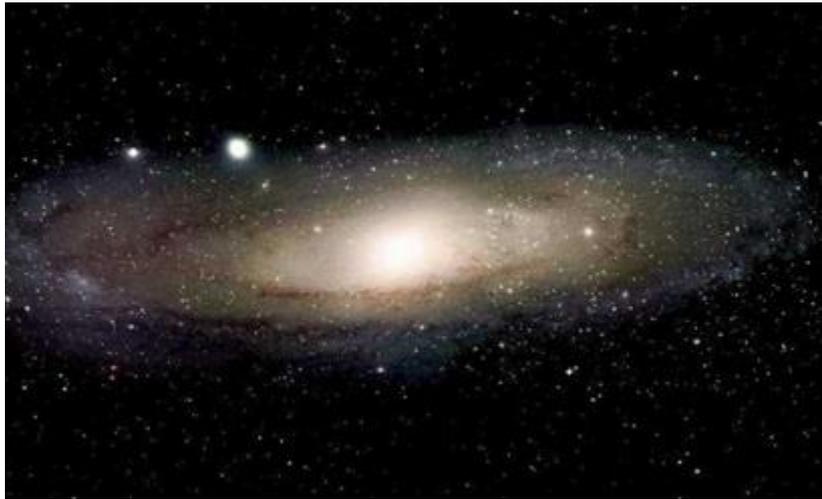
Ainsi, le sous-sol d'un jardin sur un carré de 10 m de côté peut-il en contenir, sur une profondeur de 10 m (soit 1000 m³), environ 5 kg, ce qui fait de l'ordre du millier de milliards de tonnes rien que pour l'écorce terrestre, sans compter le manteau.



INTRODUCTION

D 'ou vient-il ?

De la mort d'autres étoiles, comme tous les autres éléments chimiques, même ceux qui VOUS composent.



Voir la vidéo

(<http://irfu.cea.fr/Phoceae/Video/index.php?id=160>)



INTRODUCTION

« ...Nous sommes tous de la poussière d'étoiles... »



Le Soleil est un énorme réacteur à fusion thermonucléaire incontrôlée. La fusion s'accompagne d'un fort dégagement d'énergie. Les noyaux d'hydrogène se collent entre eux pour donner des noyaux d'hélium.



INTRODUCTION

L'étoile va évoluer de stade en stade en collant les atomes d'hélium puis de carbone, etc...

L'atome le plus stable de l'univers en matière de cohésion est celui du fer possédant 26 protons et 30 neutrons, le fer-56.

La mort des étoiles provoque ensuite la dispersion de ces atomes légers.

Mais une autre possibilité est observable : une supernova. Les atomes de toutes dimensions se collent les uns aux autres et c'est ainsi qu'apparaissent les atomes lourds comme l'uranium.



INTRODUCTION

Isotopes

Atomes de constitution différente appartenant au même élément chimique

Exemple de proportions pour l'uranium naturel :

235

U

92

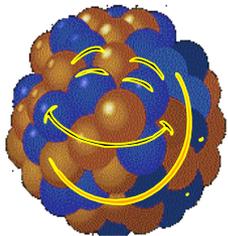
0,7 %

238

U

92

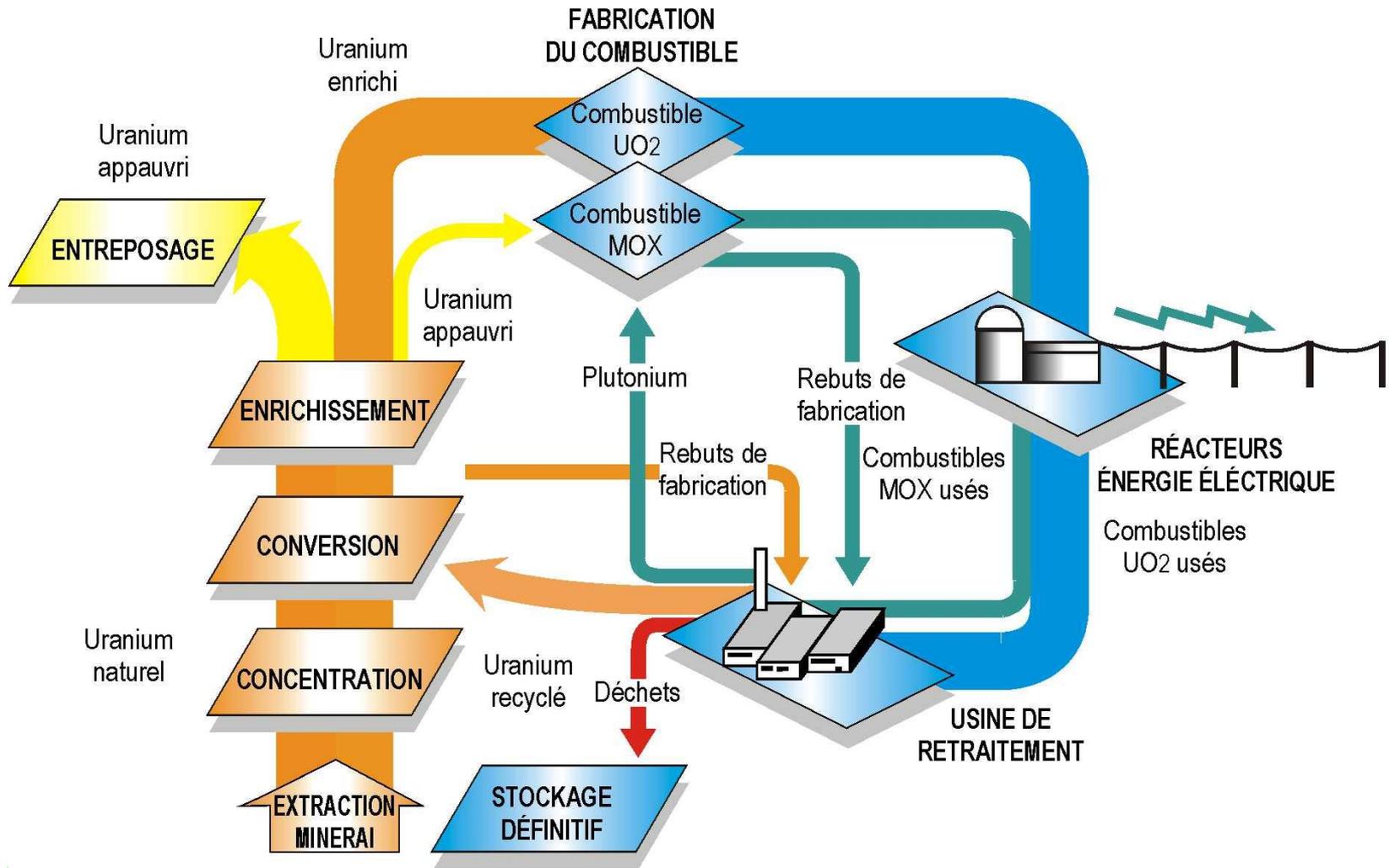
99,3%



Famille de l'uranium



INTRODUCTION



INTRODUCTION

Le transport dans le cycle du combustible

Concentré d'uranium naturel

Nitrate d'uranyle

UF₄

UF₆

Combustibles UO₂

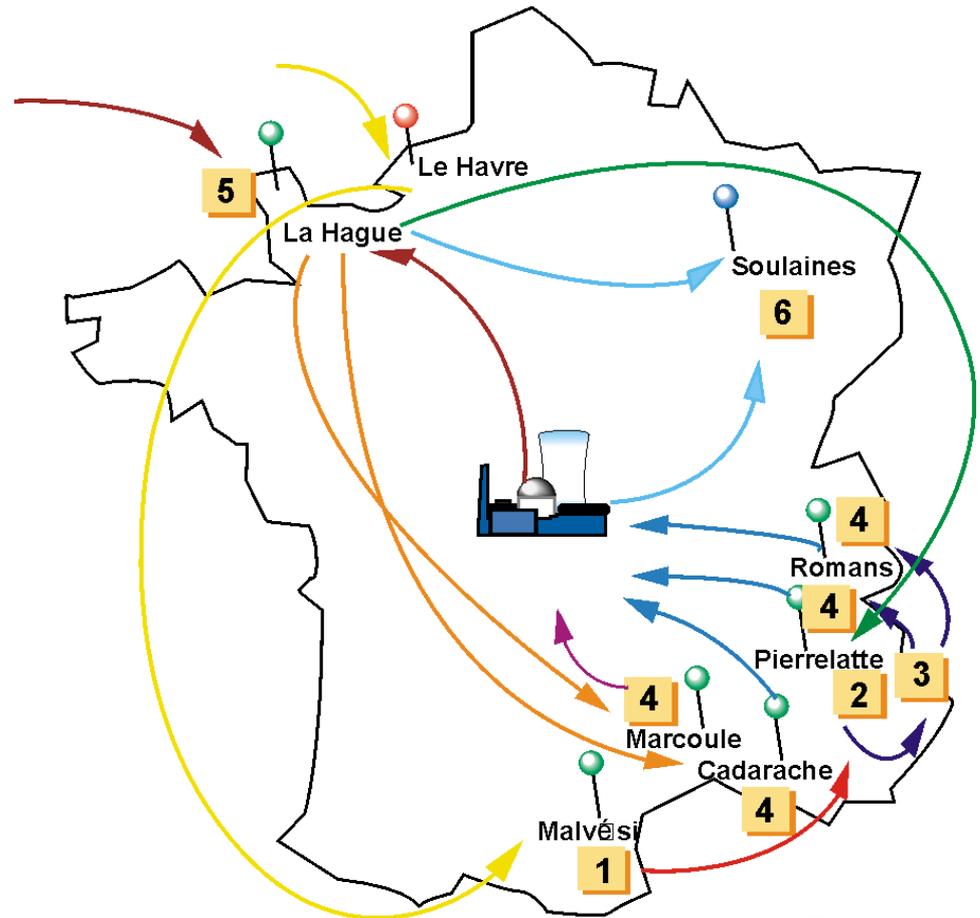
PuO₂

Combustibles MOX neufs

Combustibles irradiés

Déchets

- 1 Transformation
- 2 Conversion
- 3 Enrichissement
- 4 Fabrication
- 5 Retraitement
- 6 Stockage de surface, déchets FA/MA



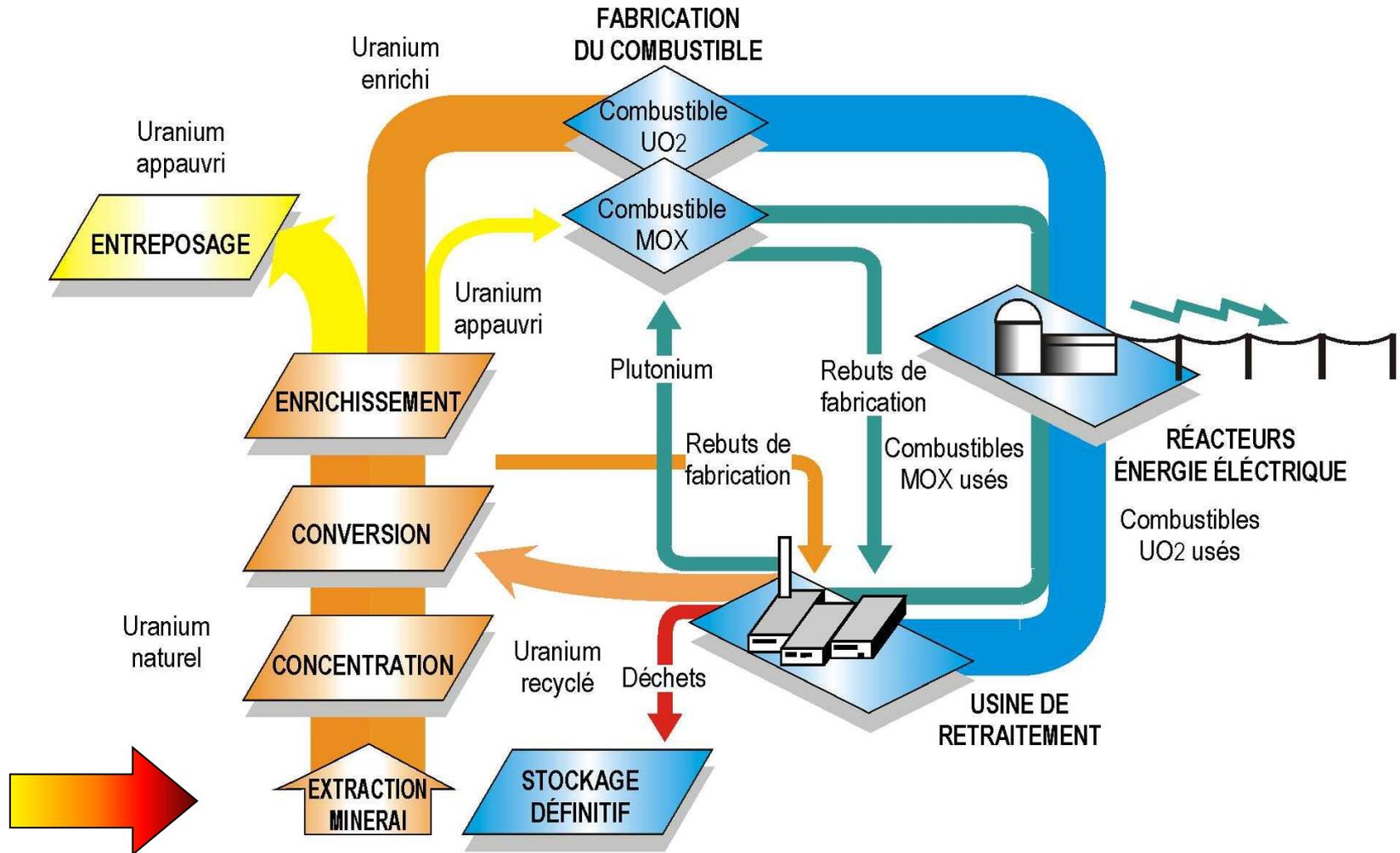
LE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

SOMMAIRE

- Introduction
- **L'amont du cycle nucléaire**
- Le passage en réacteur nucléaire
- L'aval du cycle nucléaire
- Les déchets nucléaires



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

Il va donc falloir casser des cailloux pour pouvoir extraire l'uranium des roches.

C'est la première phase : la mine

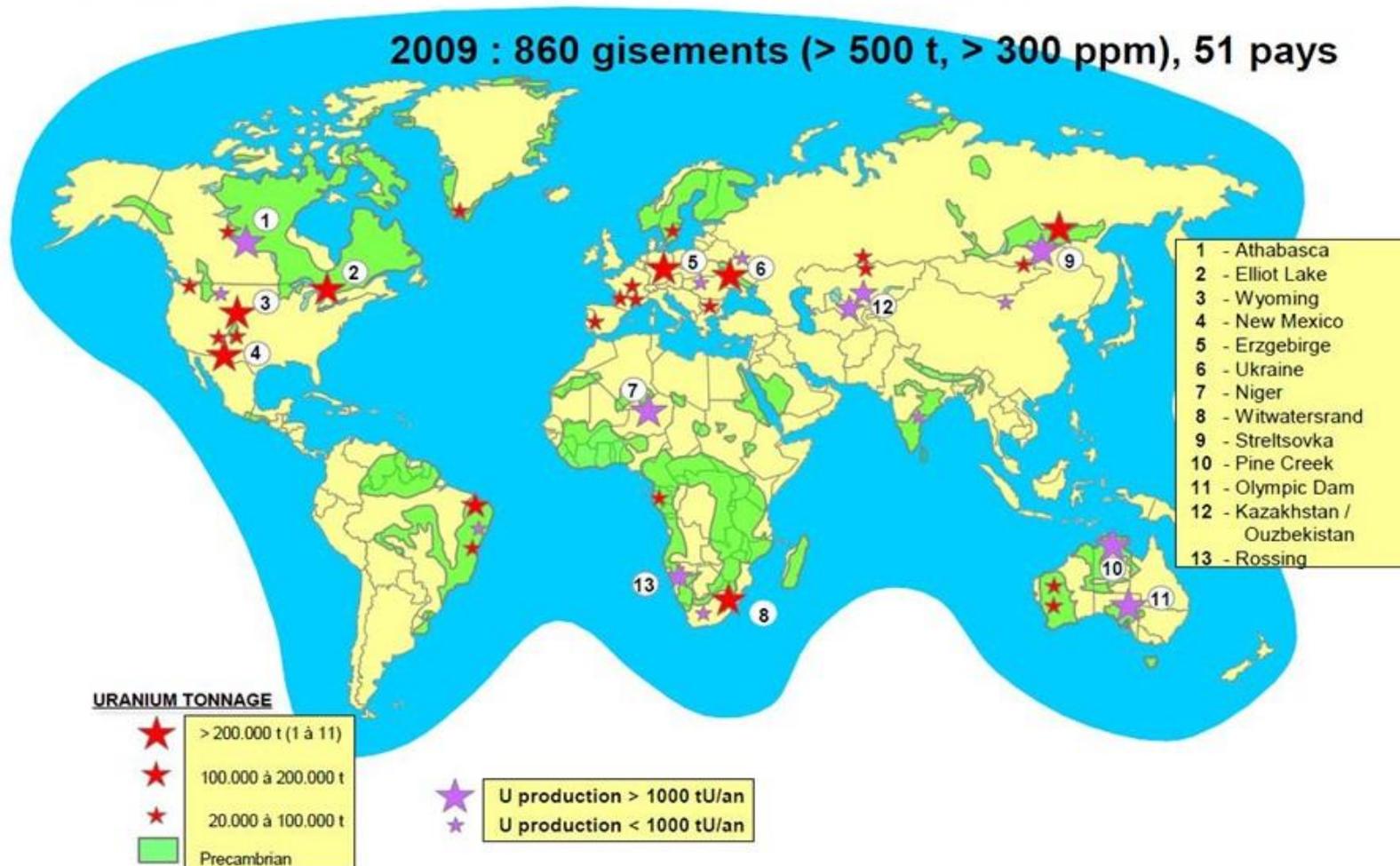
Les principaux gisements se trouvent :



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

Les minerais d'uranium : principales régions uranifères

2009 : 860 gisements (> 500 t, > 300 ppm), 51 pays



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

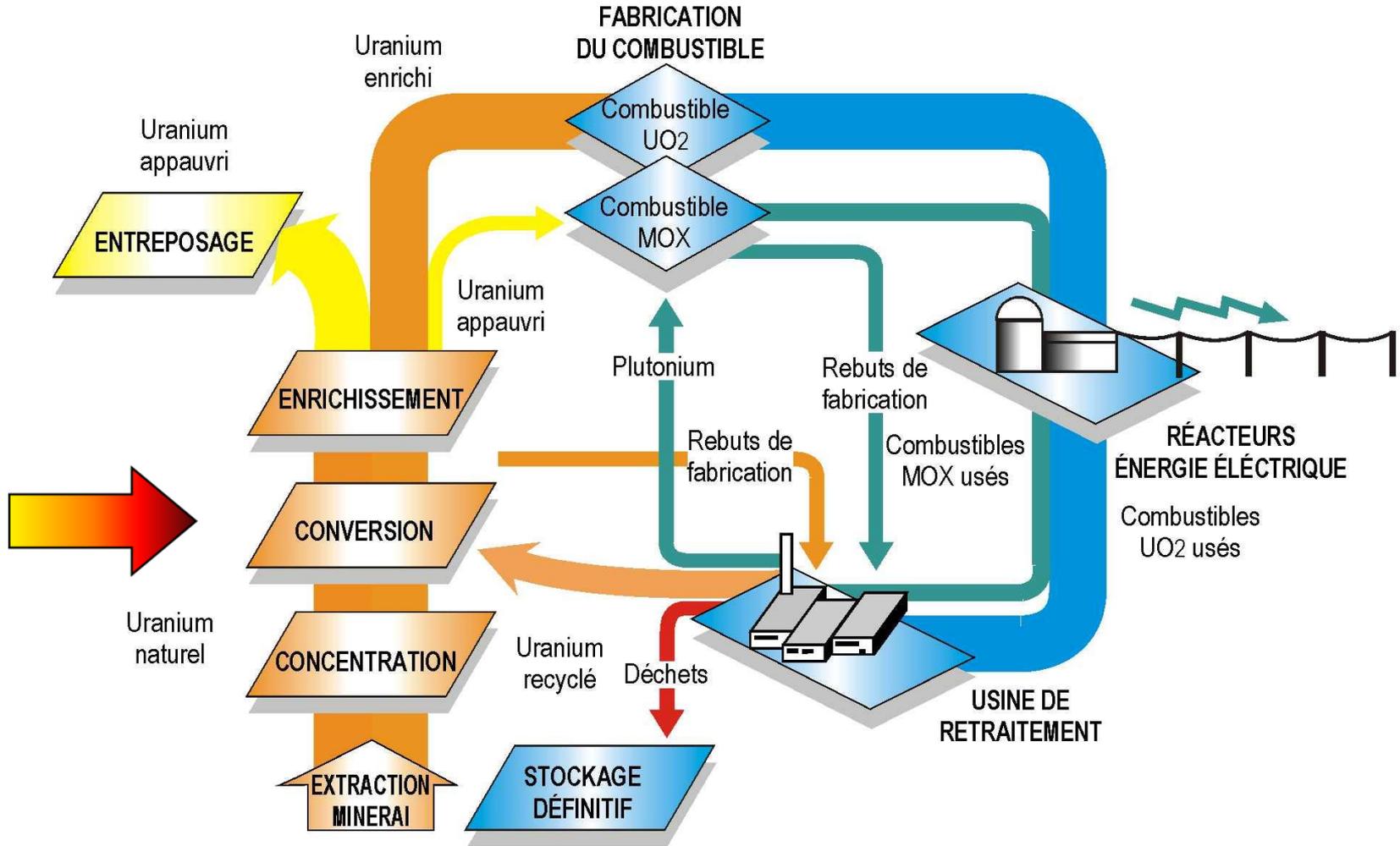
La mine

à ciel ouvert



en sous-sol

L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

Or, l'isotope utile pour le « combustible nucléaire » c'est l'uranium-235.

Il faut donc d'abord concentrer le minerai.

Après un tri mécanique des broyeurs transforment le minerai en sable, qui après traitements chimiques à base d'acides devient un concentré qu'on appelle

«yellow cake» U_3O_8



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

Yellow Cake
fabriqué à Malvésès
(près de Narbonne)



Entreprise : **COMURHEX**

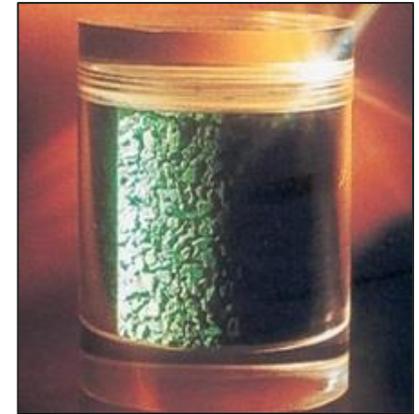
Installation Nucléaire de Base (INB)



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

On traite ensuite le « yellow cake » avec une phase de purification.

Transformation en UF_4
(granulé vert).



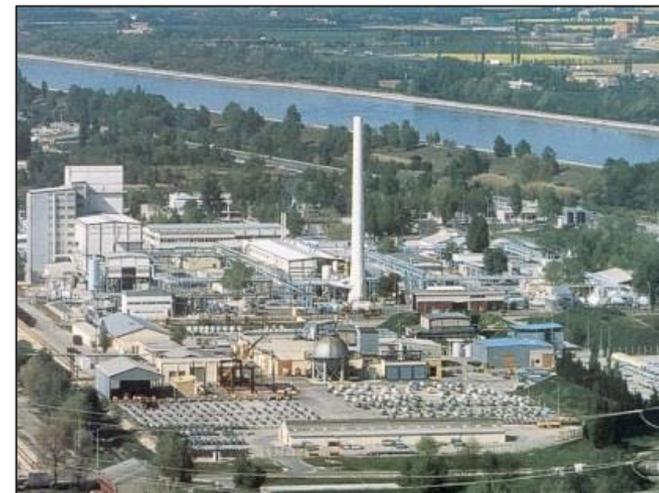
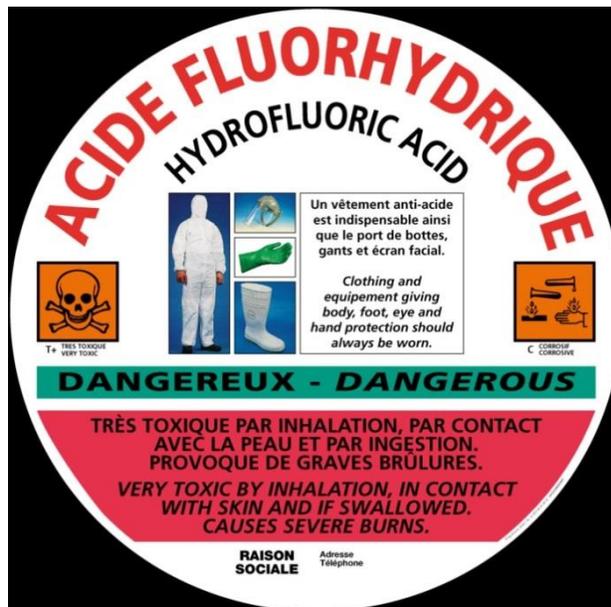
Préparé à Malvesi

Puis de transformation
en hexafluorure
d'uranium UF_6 solide
Préparé à Pierrelatte

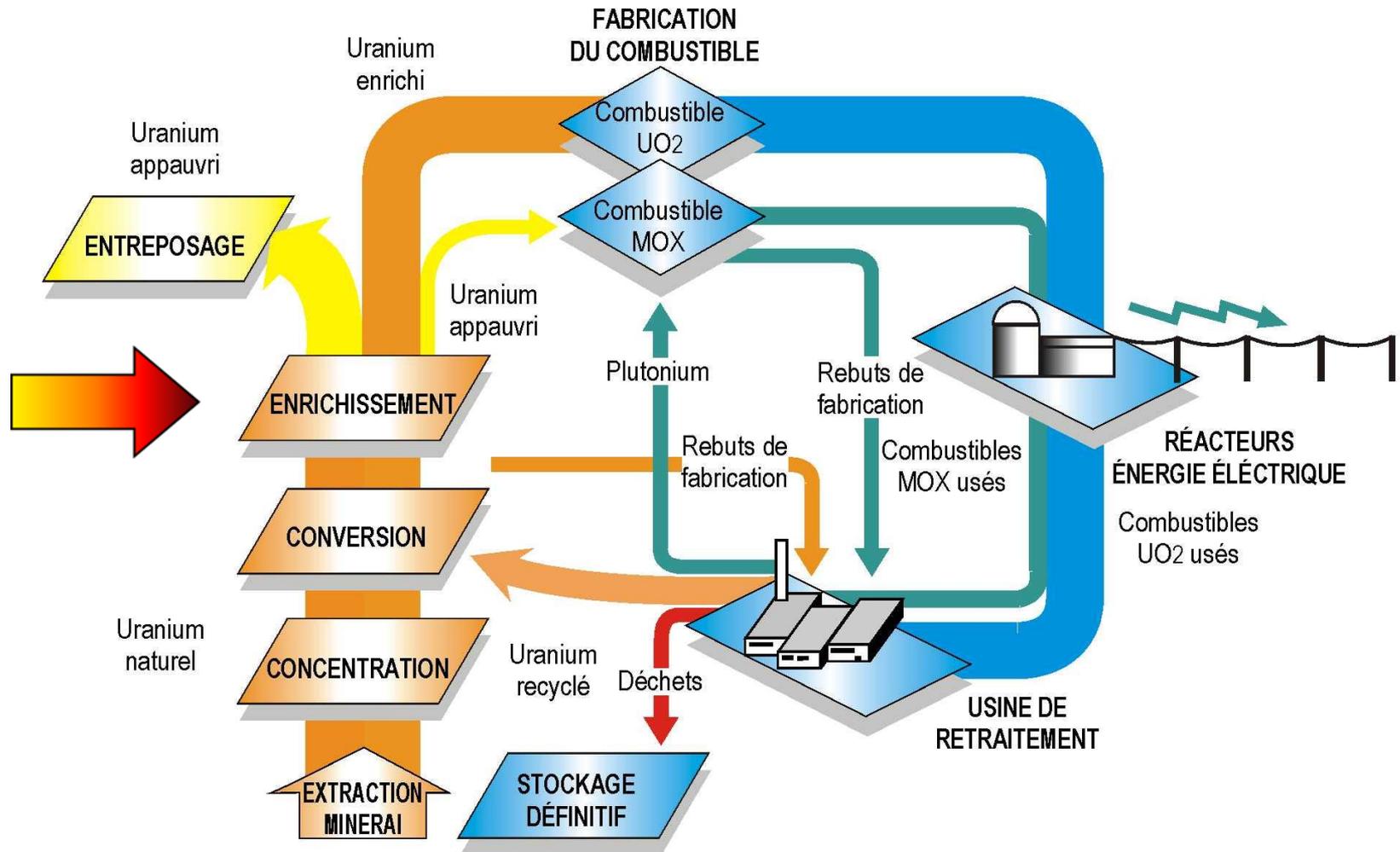


L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

Utilisation d'acide fluorhydrique.
Le risque chimique est alors
largement supérieur
au risque radiologique



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

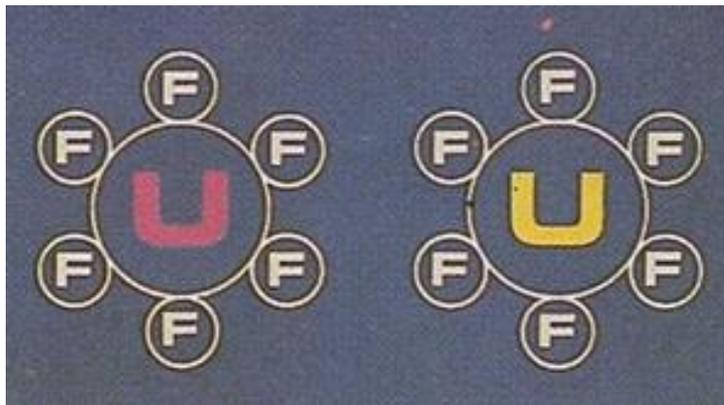
Passage de l'hexafluorure d'uranium sous forme solide en phase gazeuse pour procéder à l'enrichissement en uranium-235.

Entreprise : **EURODIF**
Lieu : **Usine G. BESSE II**
INB



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

On utilise la différence de masse entre les molécules pour les séparer.



238

235

protons et neutrons

Fluor 19 protons et neutrons



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

Jusqu'il y a peu de temps, l'enrichissement était réalisé par diffusion gazeuse. Il fallait deux tranches nucléaires pour faire fonctionner l'usine d'enrichissement.



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

Le démantèlement et l'assainissement de cette usine nucléaire a commencé en 2017.

Tous les ensembles seront considérés comme des déchets de faible ou très faible activité. Ils seront stockés temporairement sur place puis transférés au site de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) à Morvilliers (Aube), qui sera bientôt saturé.

Il va se poser un vrai problème concernant les déchets de très faible activité. Nous y reviendrons dans la partie « déchets ».

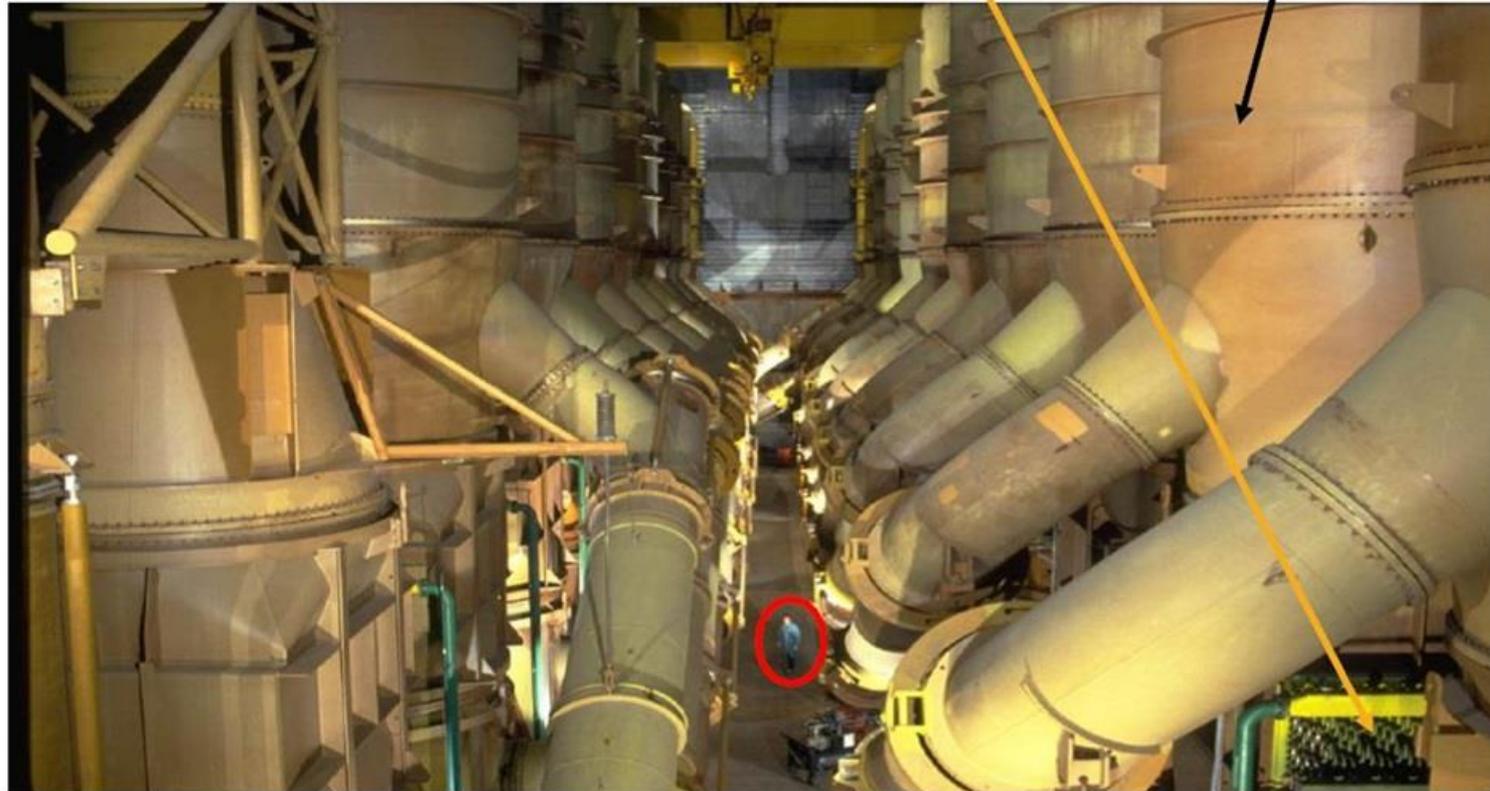


L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

C'est plus de 1400 diffuseurs qu'il va falloir démonter.

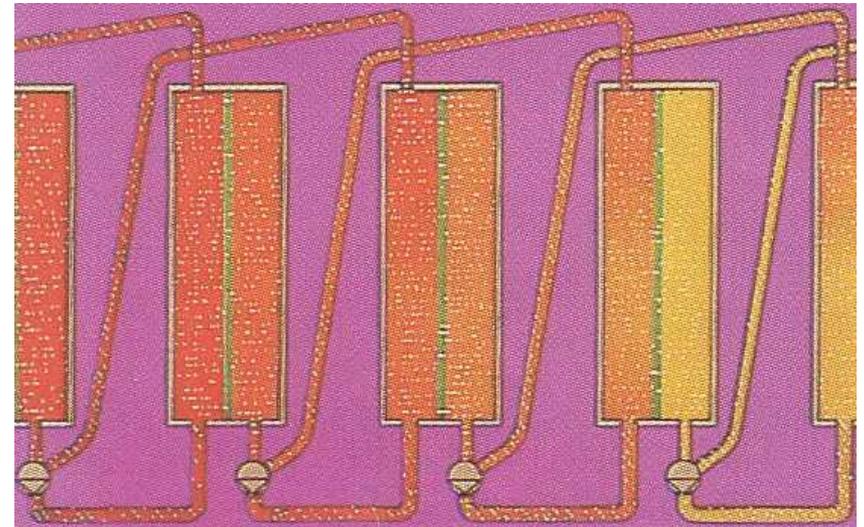
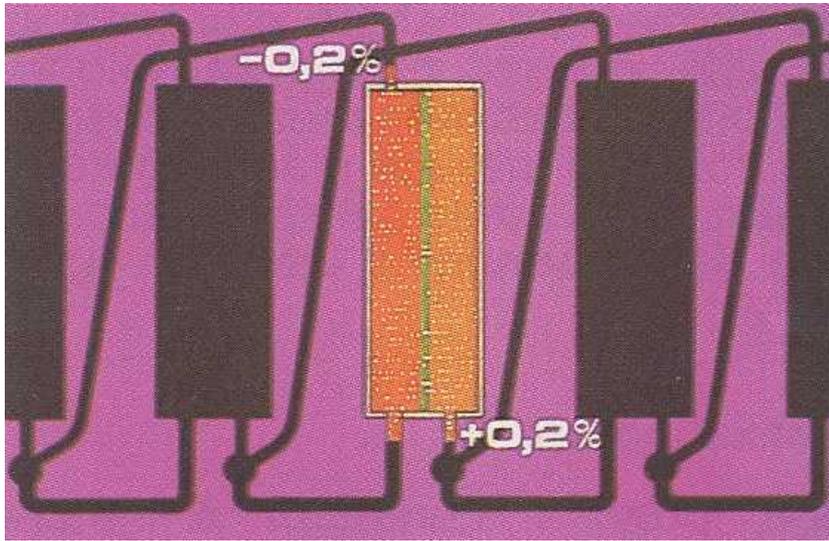
échangeur

diffuseur



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

Le principe était le suivant :

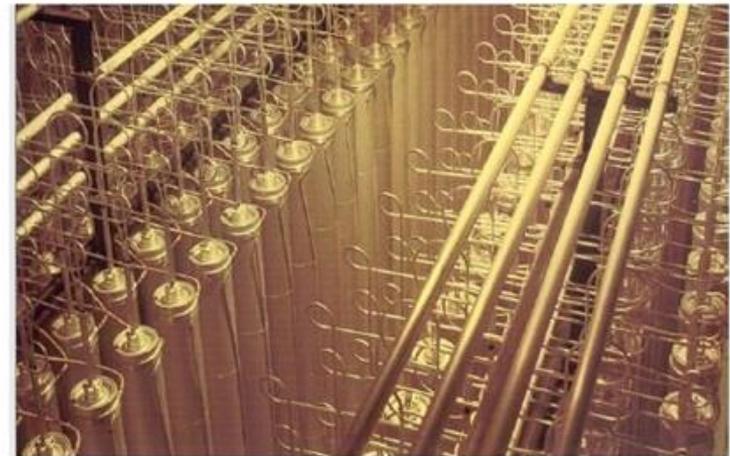
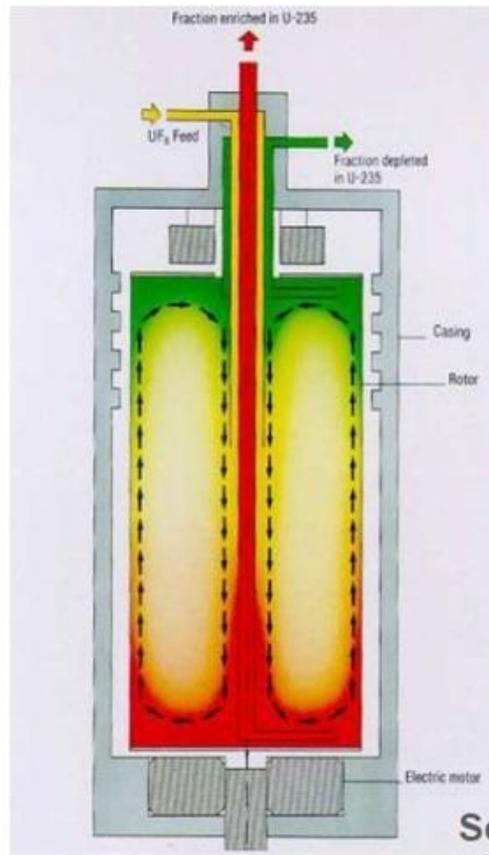


Les diffuseurs étaient montés en grandes séries, chaque passage dans le diffuseur suivant apportant un faible enrichissement en isotope 235.

L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

Usine G. BESSE II

Nouveau procédé : Ultracentrifugation



Centrifugeuses URENCO

Schéma de principe
d'une centrifugeuse

L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

Pour rappel :

Activité massique de l'uranium-238

37 milliards de becquerels pour **3 tonnes**.

Activité massique de l'uranium-235

37 milliards de becquerels pour **4,6 kilogrammes**.

A noter qu'il y a des enrichissements différents pour les militaires ou les réacteurs de recherche du CEA.

On a donc pour les réacteurs de puissance :

235

U

3,25 %

92

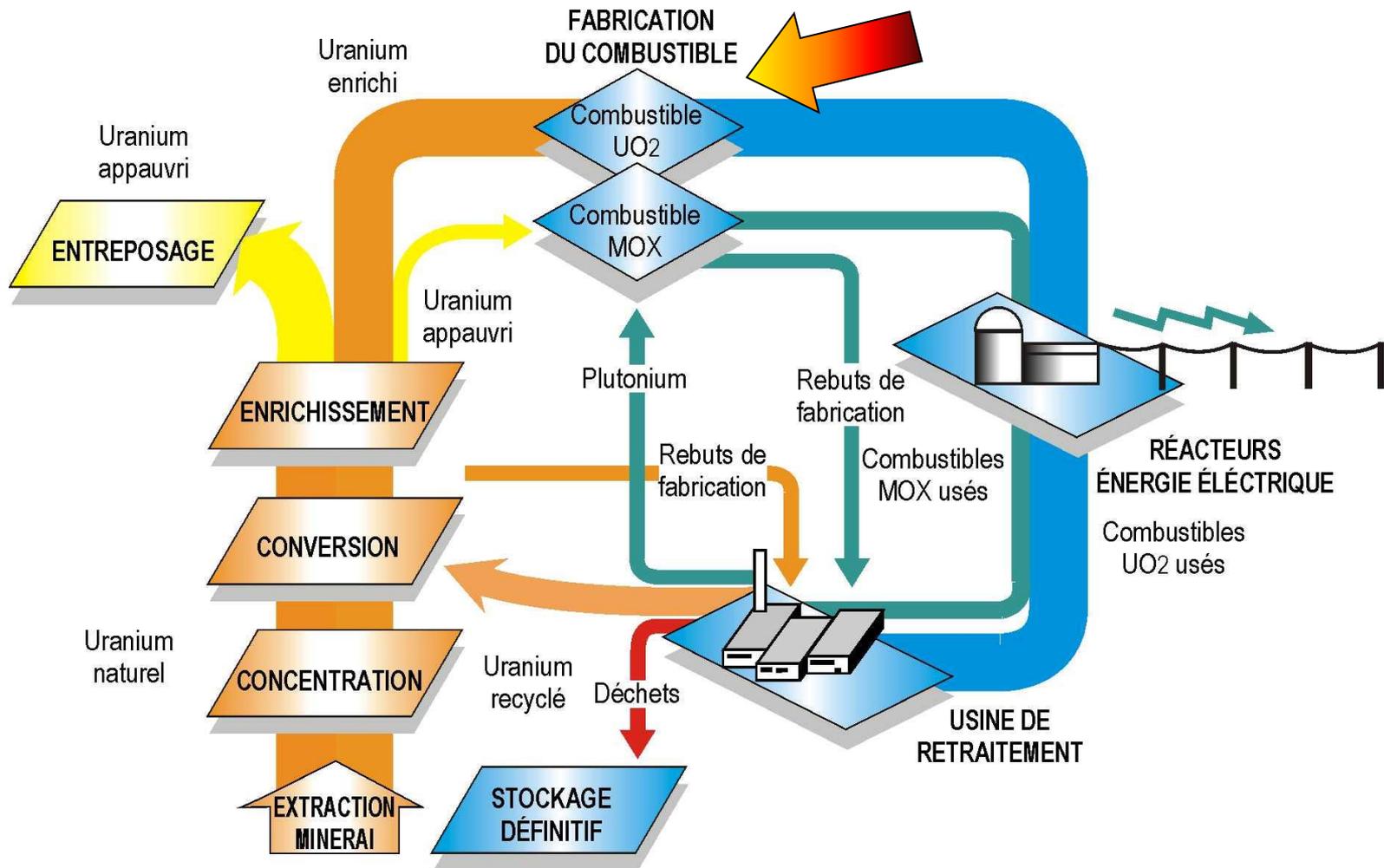
238

U **96,75%**

92



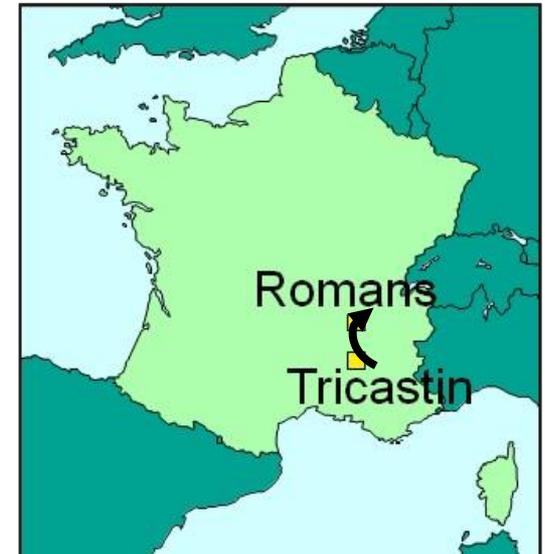
L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

L'hexafluorure d'uranium UF_6 gazeux va être transformé en solide pour la transformation en oxyde UO_2 . L'oxyde est UO_2 fabriqué à Romans-sur-Isère.

Entreprise : **FBFC**
INB



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

L'oxyde d'uranium se présente alors sous forme de petites pastilles de 8 mm de diamètre.



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

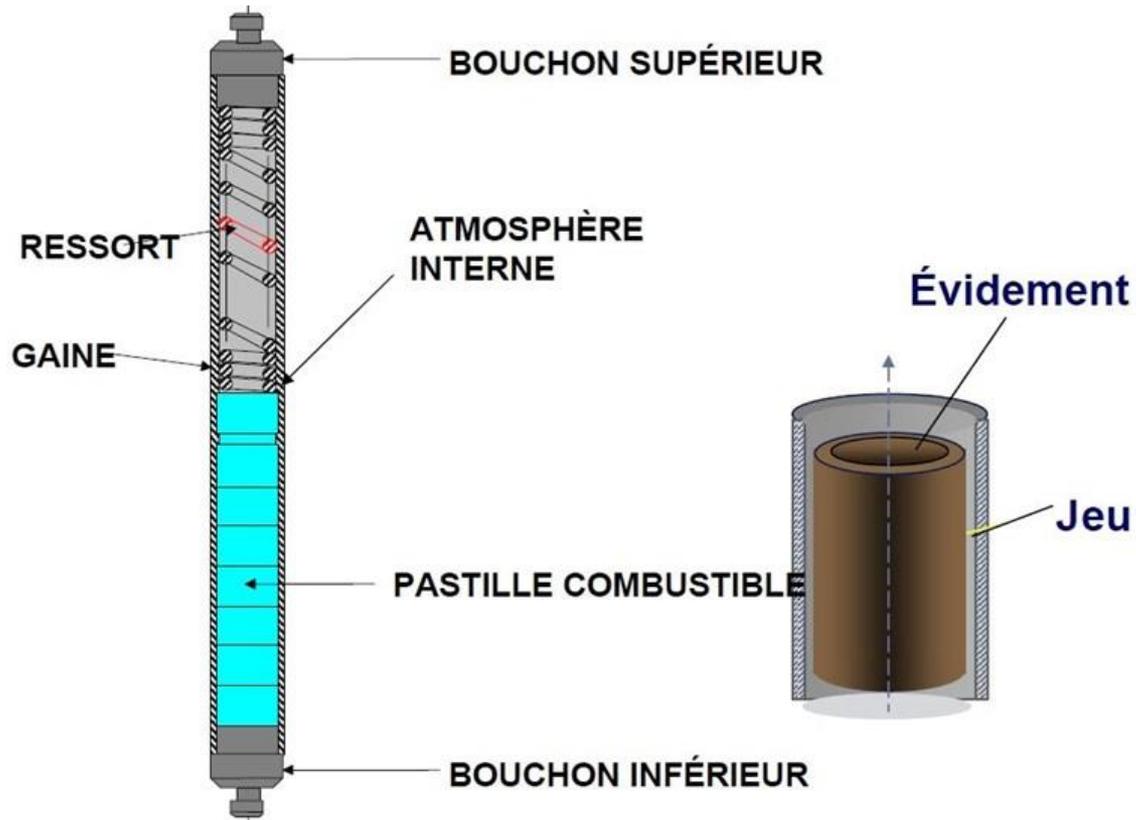
Les pastilles vont être placées dans un tube en zirconium que l'on appelle **CRAYON**.

Il faut plus de 11 000 000 de pastilles pour faire le cœur d'une centrale de 900 MW électrique.



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

Il existe un espace entre le combustible et la gaine en zirconium. On ajoute également de l'hélium.



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

Un crayon a une longueur de :

- 4 m pour les réacteurs de 900 Mwe
- 4,8 m pour les réacteurs de 1300 Mwe

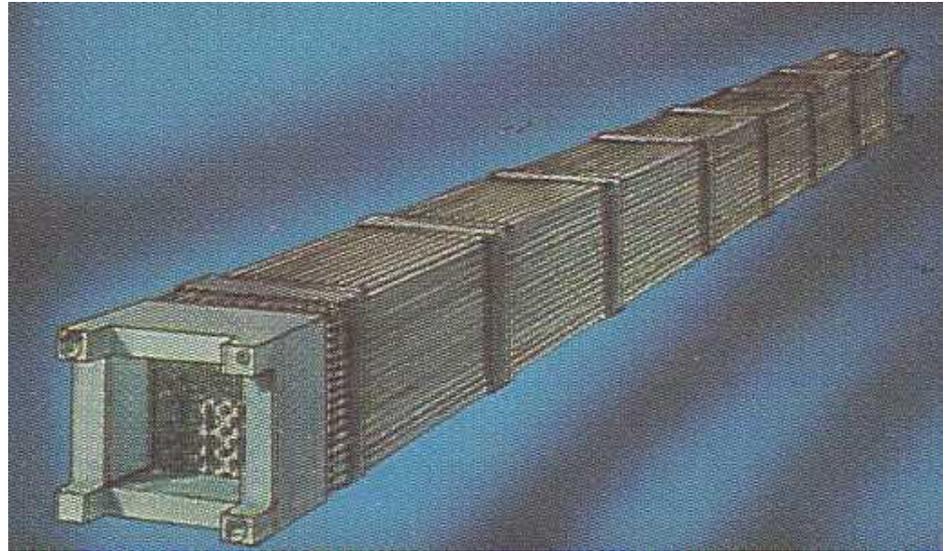
Il faut 264 crayons pour faire ce que l'on appelle un
ASSEMBLAGE COMBUSTIBLE.



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

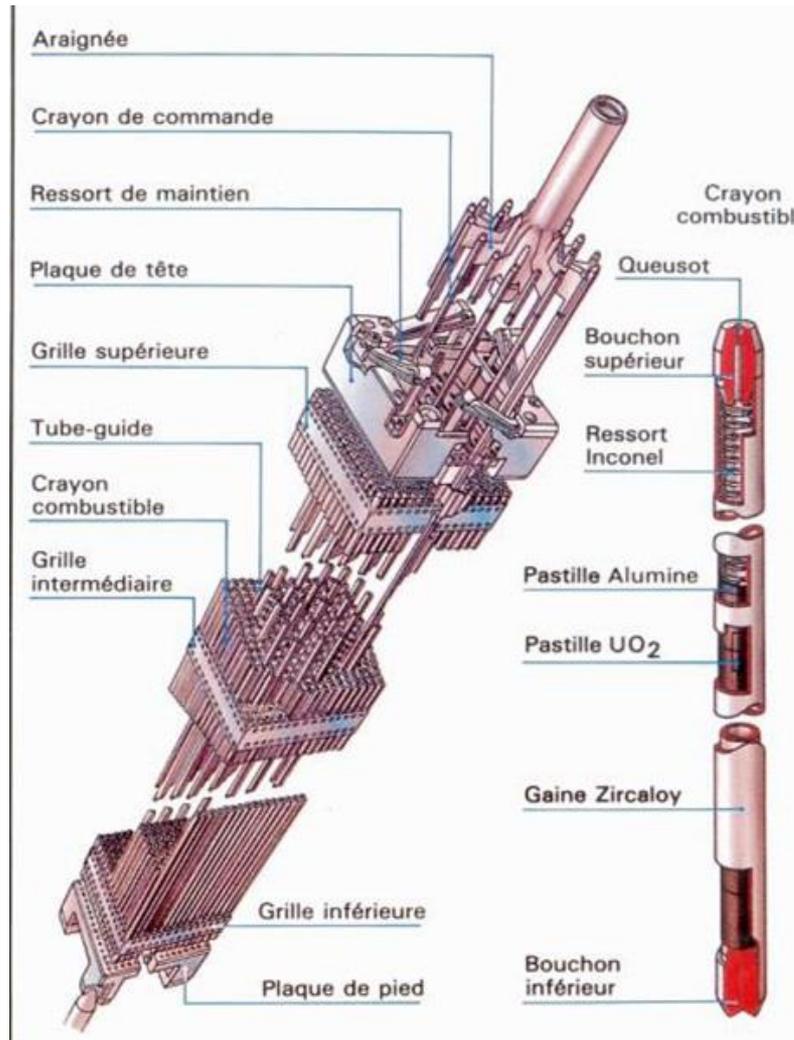
Un **ASSEMBLAGE COMBUSTIBLE** pèse environ 650 kg, ce qui représente plus de 80 tonnes d'uranium pour un réacteur de 900 MWe.

L'activité
d'un assemblage
neuf, avant passage
en réacteur,
est d'environ

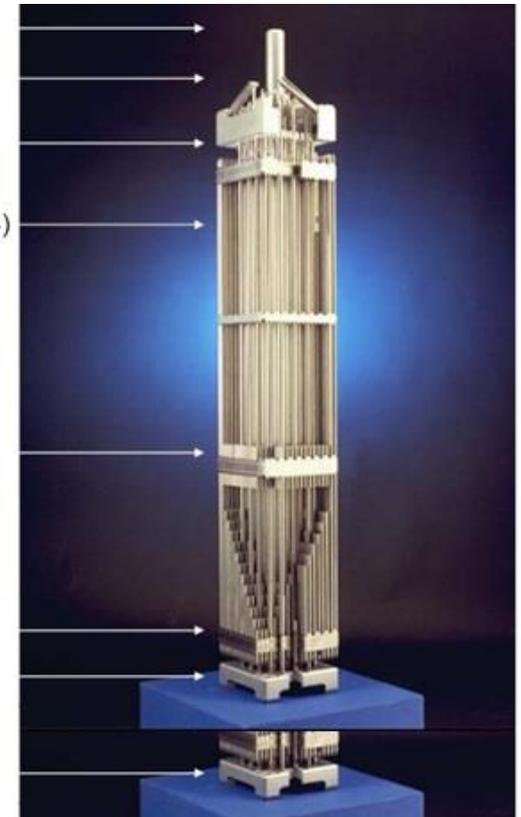


1 000 000 000 Bq = 1 GBq

L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

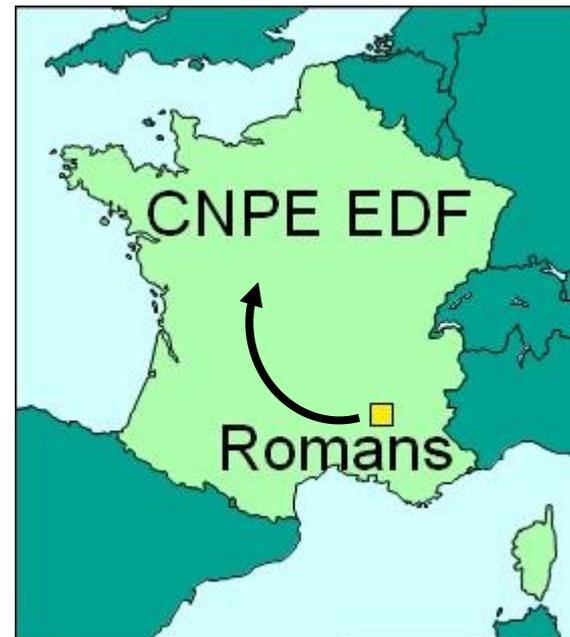


Araignée de grappe
 Ressorts de maintien (4)
 Embout supérieur
 Tubes guides (24)
 Grille de mélange (6 à 8)
 Grille de maintien
 Embout inférieur
 Ressort de maintien
 Embout inférieur



L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

Les assemblages combustibles sont alors acheminés vers les réacteurs de puissance d'EDF qu'on appelle aussi, **C**entre **N**ucléaire de **P**roduction **É**lectrique : **CNPE**.



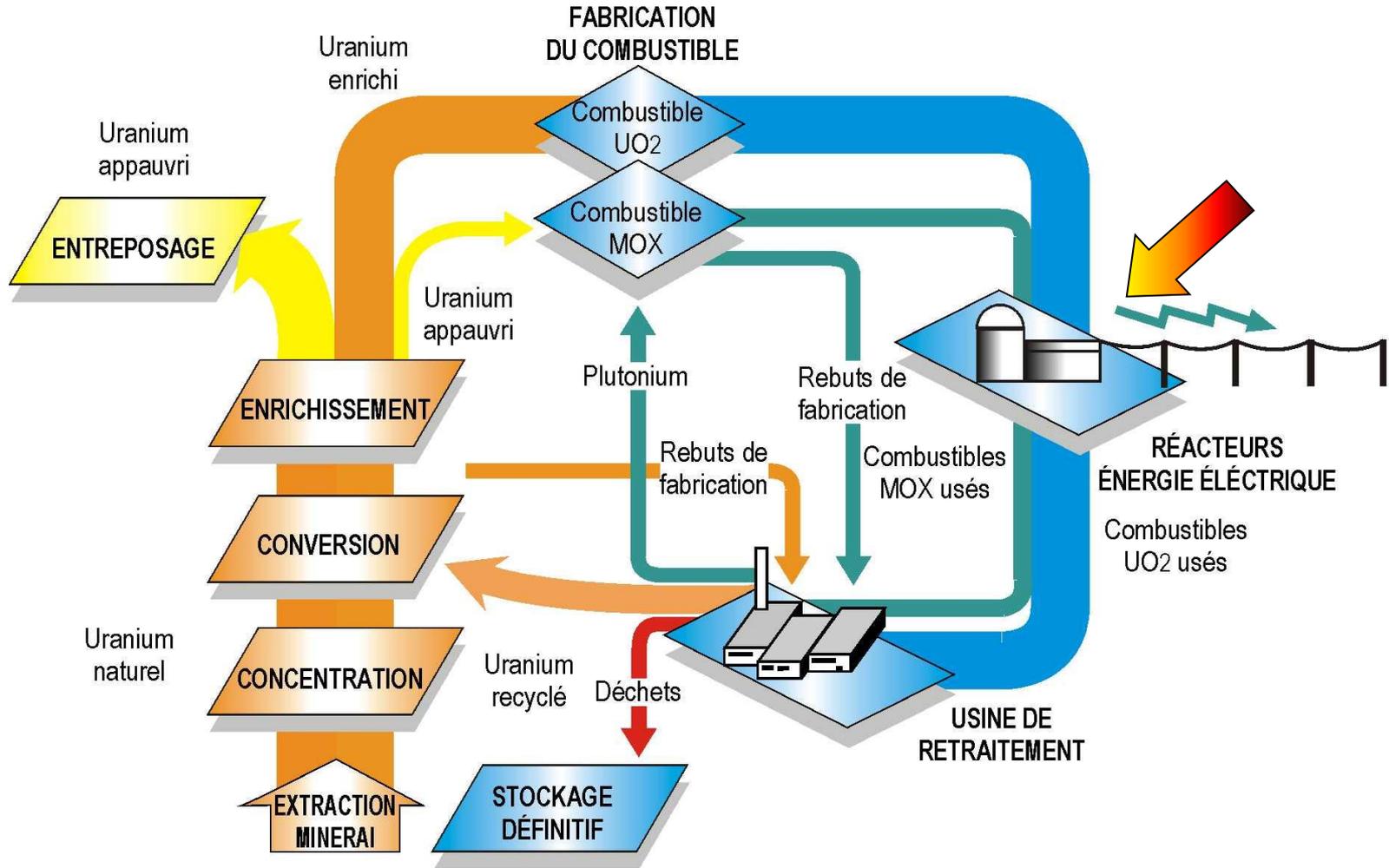
LE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

SOMMAIRE

- Introduction
- L'amont du cycle nucléaire
- **Le passage en réacteur nucléaire**
- L'aval du cycle nucléaire
- Les déchets nucléaires



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Installations
Nucléaires
de Base



Site de Paluel

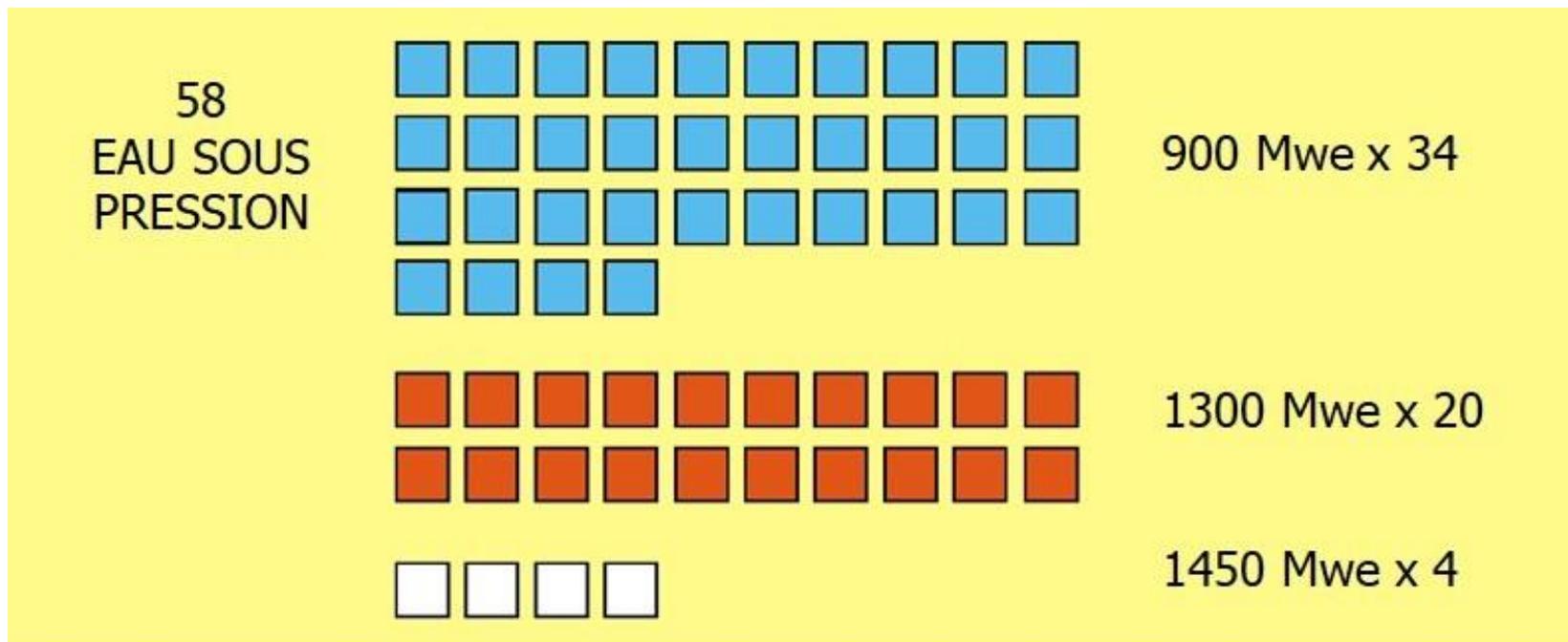


Site de Belleville



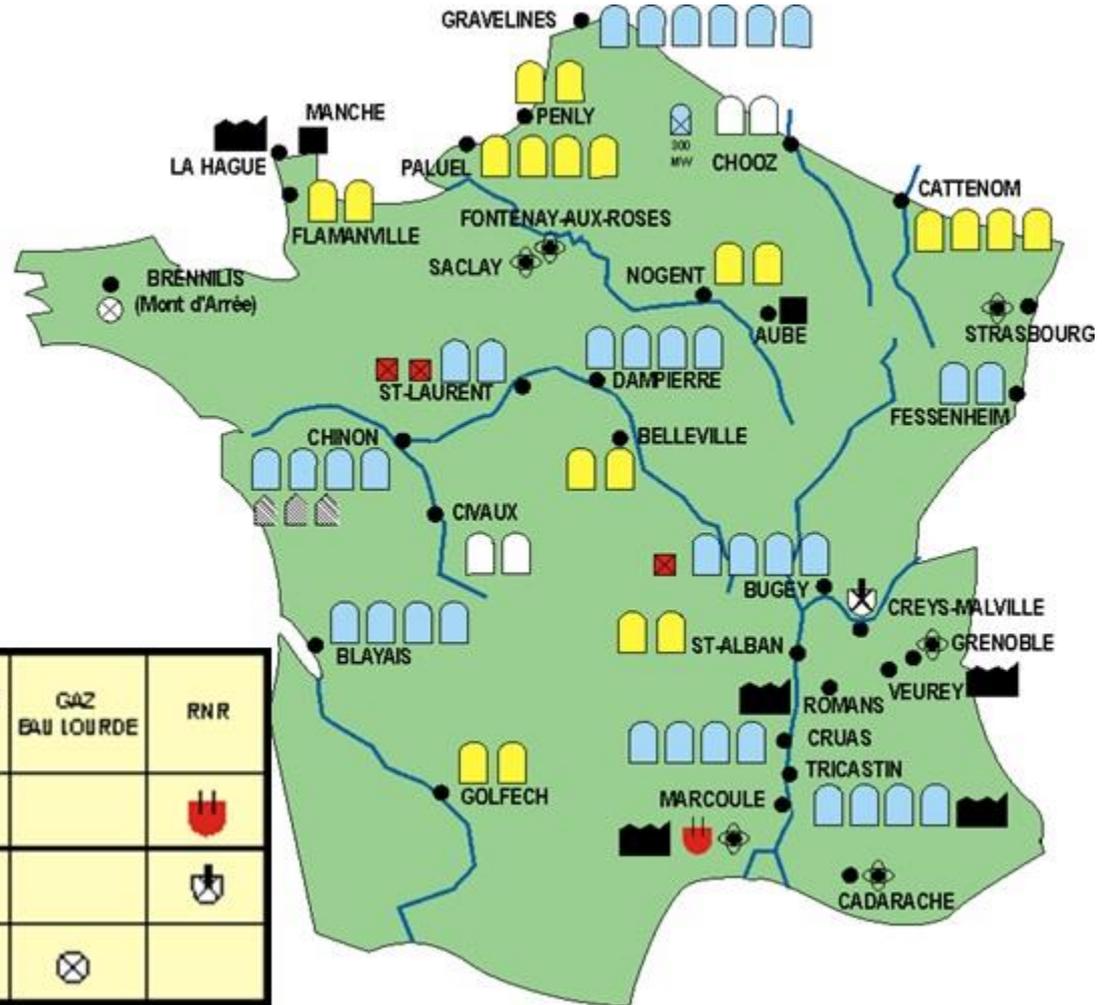
Site de Gravelines

LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

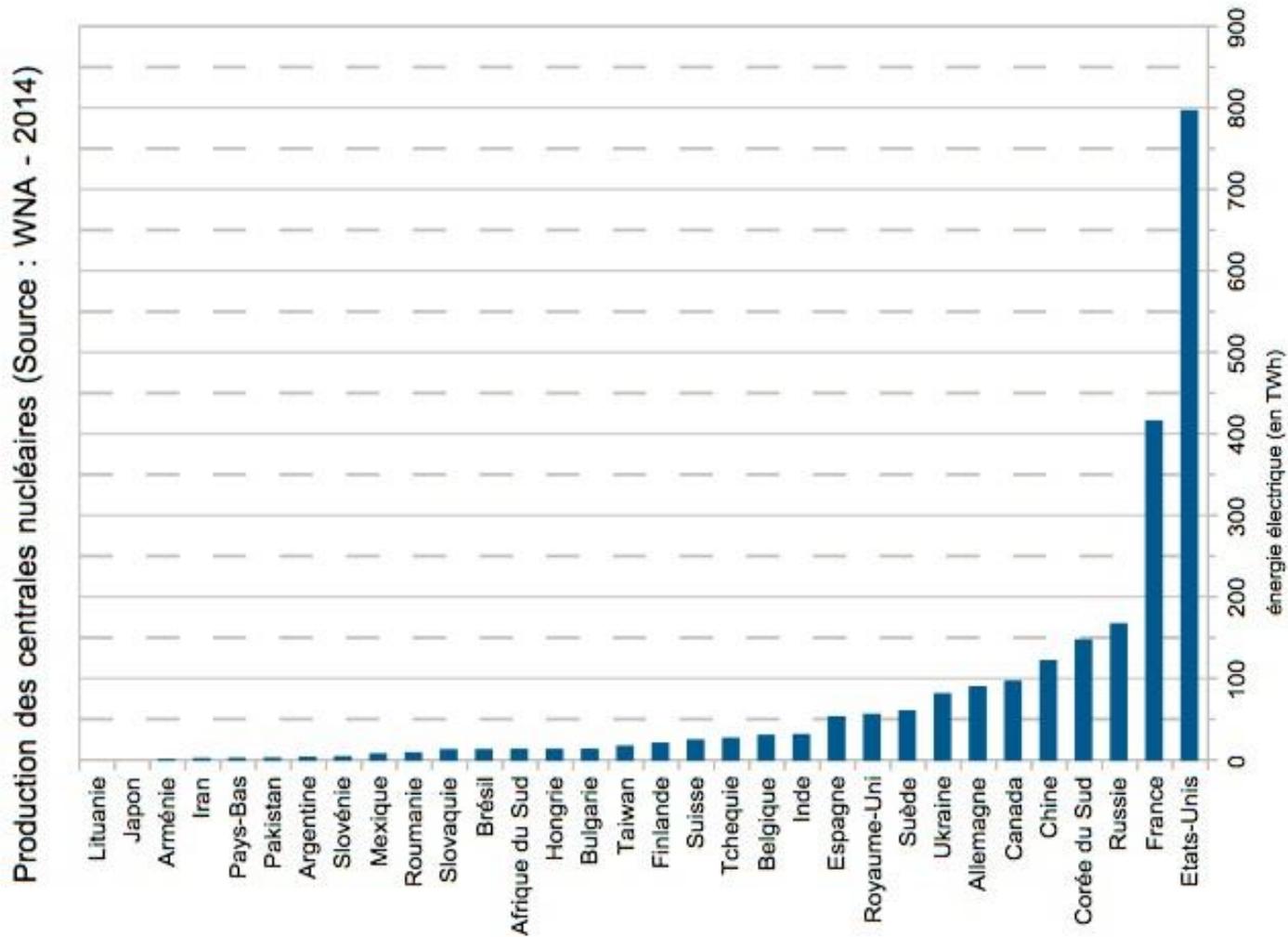
 USINES DU CYCLE DU COMBUSTIBLE (enrichissement, fabrication, retraitement)
 STOCKAGES DE DÉCHETS
 CENTRES D'ÉTUDES ET DE RECHERCHES
 RÉACTEURS



RÉACTEURS	R E P			GRAPHITE GAZ	GAZ EAU LOURDE	RNR
	900 M·e	1300 M·e	1450 M·e			
EN EXPLOITATION						
À L'ARRÊT						
EN DÉMANTÈLEMENT						

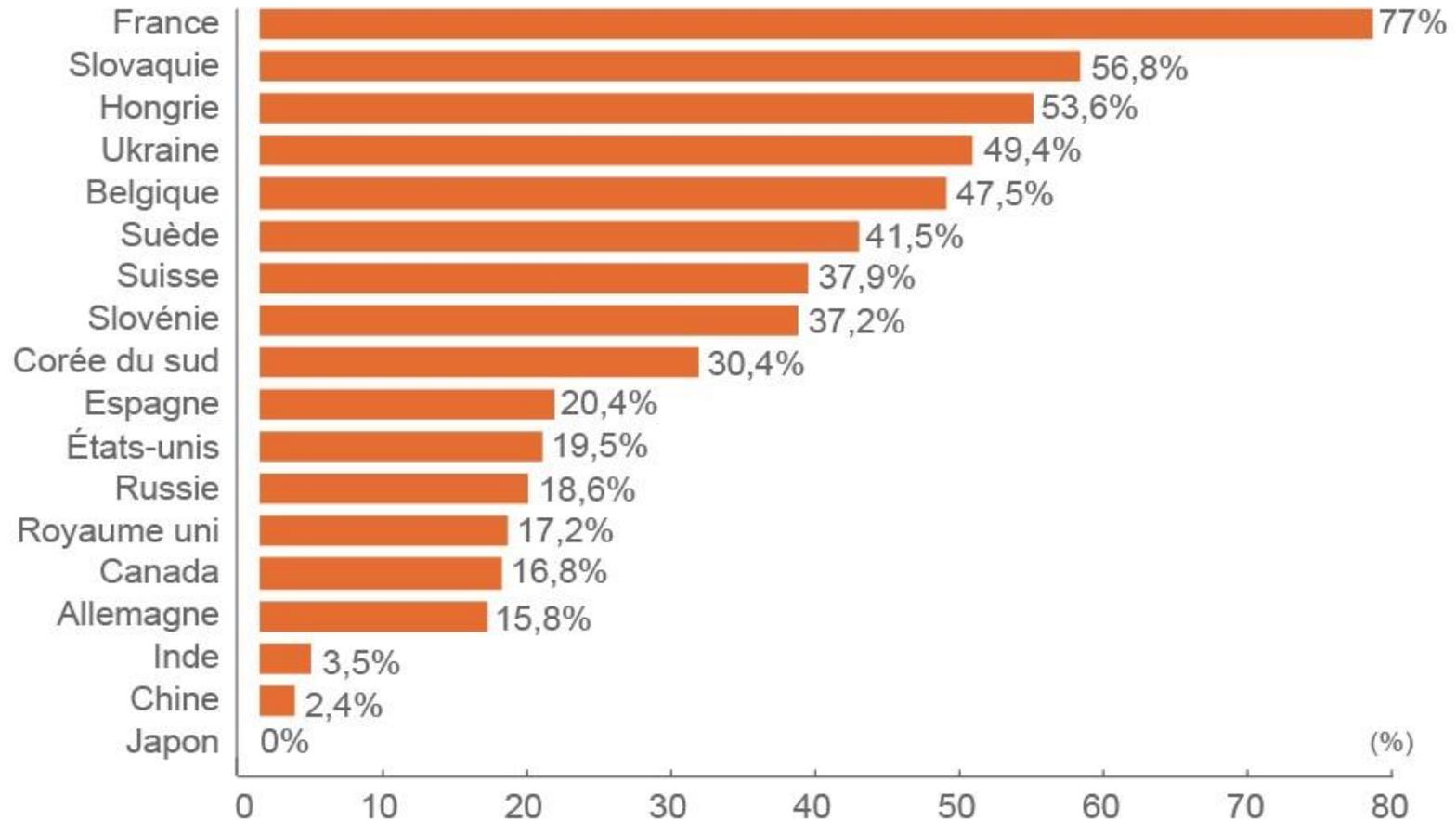


LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE



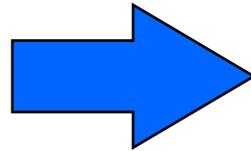
LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Part du nucléaire dans la production d'électricité en 2014



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

FISSION

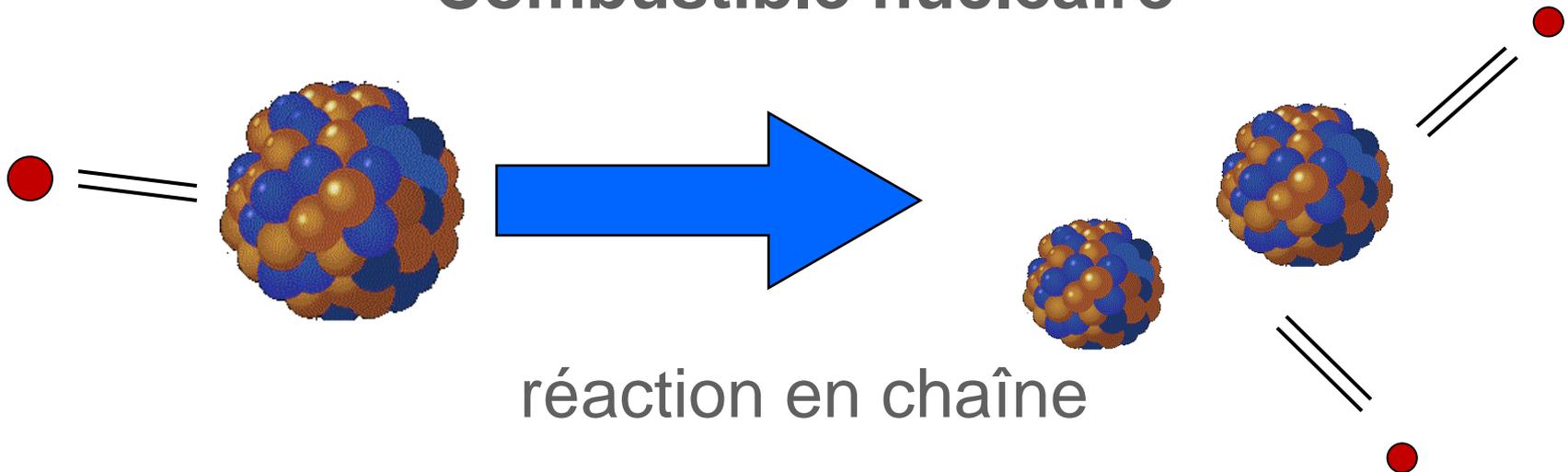


2 à 3 neutrons

^{235}U ou ^{239}Pu

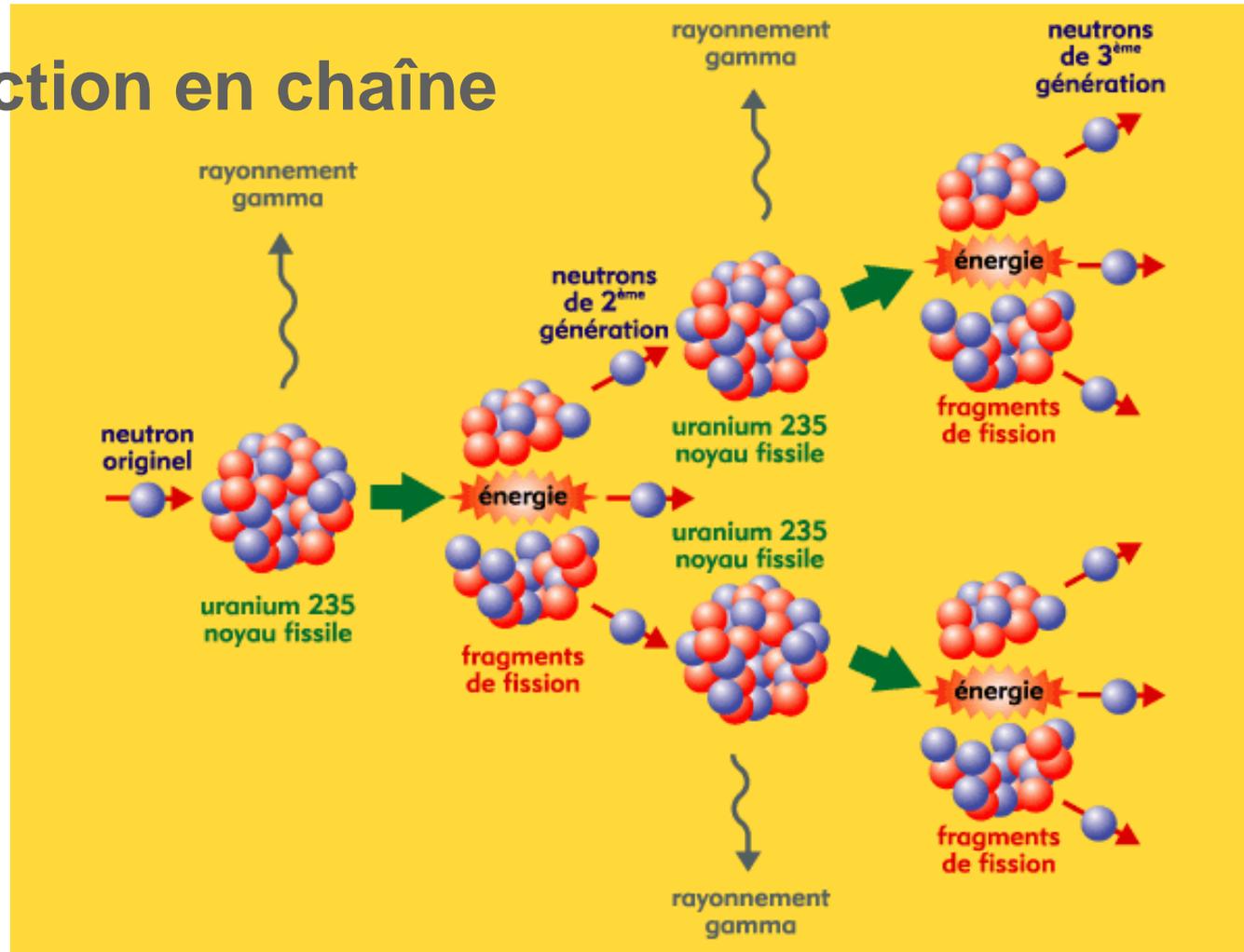
+ 2 isotopes radioactifs

Combustible nucléaire



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Réaction en chaîne



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Comment se fait l'émission du premier neutron ?

L'uranium a la propriété de fissionner spontanément, mais avec une très faible intensité ($5,4 \times 10^{-5} \%$). C'est donc la masse mise en jeu qui fait que la réaction va devenir « critique » ou pas.

Au dessus d'une certaine masse (il en faut encore moins avec de l'uranium-235) **la réaction démarre spontanément.**



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Dans l'industrie on qualifie cette réaction « **d'accident de criticité** ».

Pour faire démarrer les premiers cœurs de réacteurs (de puissance ou de recherche) on utilise maintenant des sources de démarrage émettant des neutrons :

Californium-252 ou source Américium-Béryllium avec une réaction (α , n).



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Illustration d'un « accident de criticité ».

30 septembre 1999 – Tokai-Mura - Japon

L'accident s'est déroulé dans un atelier spécialisé dans la production de composés d'uranium enrichi en isotope 235, destiné à la fabrication de combustible pour réacteurs de recherche. Il s'agissait lors de l'accident d'un nitrate d'uranyle enrichi à 18,8% pour le réacteur expérimental Joyo.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

30 septembre 1999 – Tokai-Mura - Japon

Pour élaborer le nitrate d'uranyle à 18,8% d'isotope 235, il fallait suivre plusieurs étapes.

Schématiquement, il s'agissait d'abord de dissoudre de l'oxyde d'uranium dans un "dissolveur" dit de géométrie sûre : sa forme et ses dimensions excluent le risque de criticité.

Puis, le liquide obtenu devait passer dans des récipients intermédiaires qui permettaient un contrôle de la masse d'uranium en jeu avant transfert de la solution dans une cuve de précipitation, qui n'est pas de géométrie sûre.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

30 septembre 1999 – Tokai-Mura - Japon

Enfin, après avoir été calciné, le composé obtenu devait être à nouveau dissous dans le dissolvant de géométrie sûre puis homogénéisé dans l'un des récipients intermédiaires. Or ces étapes n'ont pas été respectées.

En réalité, il semble **que l'habitude avait été prise** de ne pas utiliser le dissolvant de géométrie sûre à la seconde dissolution : cette étape était effectuée dans des seaux de 10 litres et le liquide obtenu était directement injecté dans la ligne de traitement.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

30 septembre 1999 – Tokai-Mura - Japon

Le 30 septembre, pour gagner du temps et obtenir un produit final plus homogène, le contenu des seaux a été déversé directement dans la cuve de précipitation. La cuve a servi à la fois à homogénéiser le composé et à l'entreposer, ce qui n'était pas son utilisation normale.

La veille de l'accident, 9,2 kg d'uranium avaient déjà été versés par charges unitaires de 2,3 kg et le jour de l'accident, trois nouvelles charges ont été ajoutées..



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

30 septembre 1999 – Tokai-Mura - Japon

A 10h35, heure locale, la réaction en chaîne a démarré, dégageant d'intenses rayonnements gamma et des neutrons.

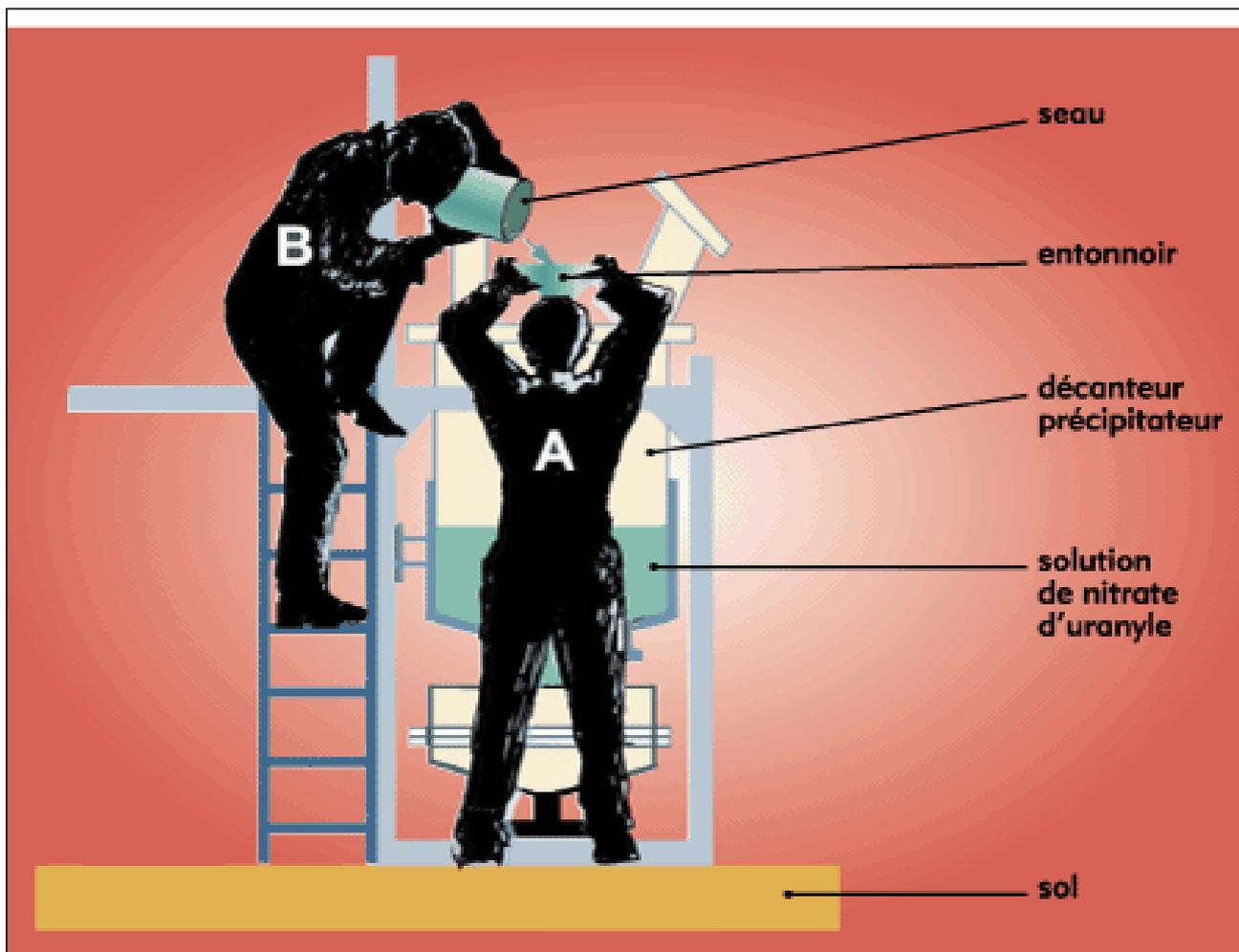
La puissance dégagée a atteint un pic puis a rapidement décru à un niveau plus faible qui s'est maintenu pendant plusieurs heures.

Etant donné les conditions de l'accident, il a fallu intervenir pour stopper la réaction.

Ils ont ainsi estimé que les trois opérateurs avaient reçu respectivement (A) environ 9 grays, (B) environ 5 grays et (C) un peu plus de 1,2 grays.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

30 septembre 1999 – Tokai-Mura - Japon

6 mois après l'accident les deux opérateurs les plus exposés sont décédés, malgré un effort important au niveau médical.

Près de deux cent médecins géreront la sur exposition de ces personnes.

Reprenons le cas du fonctionnement normal d'un réacteur nucléaire.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire.

Énergie de fission de	Énergie MeV	% Énergie totale	Commentaire
Énergie cinétique des fragments de fission	166,2	82,0	énergie instantanée localisée
Énergie cinétique des neutrons de fission	4,8	2,4	énergie instantanée délocalisée
Énergie des γ de fission	8,0	3,9	
Énergie des neutrinos/antineutrinos	9,6	4,7	énergie instantanée perdue
Total	188,6	93,0	énergie instantanée
Énergie de radioactivité β des produits de fission	7,0	3,5	
Énergie de radioactivité γ des produits de fission	7,2	3,5	énergie différée
Total	14,2	7,0	
Énergie totale libérée lors de la fission	202,8	100,0	dont 9,6 MeV non récupérable



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Sachant que la puissance thermique d'un réacteur est de 3000 MW (pour une puissance électrique de 1000 MW), quel est le nombre de fissions produit par seconde au niveau du cœur du réacteur.

On rappelle qu'une fission dégage une énergie moyenne de 200 MeV.

$$3000 \text{ MW} = 3 \cdot 10^9 \text{ J/s}$$

$$1 \text{ fission} = 200 \text{ MeV} = 200 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

Le nombre de fissions sera donc égal à

$$\text{Nb fissions} = (3 \cdot 10^9) / (3,2 \cdot 10^{-11}) =$$

$$0,93 \cdot 10^{20} \text{ fissions/seconde}$$



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Sachant qu'une fission produit en moyenne 2,5 neutrons, le flux neutronique (en neutrons de fissions) du réacteur est égal à :

$$\text{Nb neutrons} = 0,93 \cdot 10^{20} \text{ fissions} \cdot 2,5 =$$

$$2,33 \cdot 10^{20} \text{ neutrons/seconde}$$

Il faudra éviter que le nombre de neutrons soit trop important et il sera nécessaire de contrôler cette réaction en chaîne.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Quelle masse d'atomes d'uranium-235 (fissile) a-t-elle fissionné en une seconde ?

Même question en 500 jours, correspondant environ à la durée d'un cycle de fonctionnement du réacteur.

Dans 235 g d'uranium-235 il y a $6,02 \cdot 10^{23}$ atomes

Sachant qu'il y a eu $0,93 \cdot 10^{20}$ fissions/seconde, il y a eu $0,93 \cdot 10^{20}$ atomes qui ont disparu.

La masse est alors de

$$m = (0,93 \cdot 10^{20} / 6,02 \cdot 10^{23}) \cdot 235 = 0,036 \text{ g}$$

soit 3,6 mg par seconde



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

$$m \text{ cycle} = 0,036 \times (3600 \times 24 \times 500) =$$

1550 kilogrammes soit 1,5 tonnes.

Sur environ 80 tonnes d'uranium au départ, il y a 3,25 % d'uranium-235, soit 2,6 tonnes. Il ne reste plus que 0,9 tonnes soit 34 % de la masse.

Si on compare à la masse totale il reste un peu plus de 1% d'uranium-235.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Pour que la fission s'opère, il va être nécessaire de ralentir les neutrons. Leur énergie initiale est comprise entre 3 et 6 MeV.

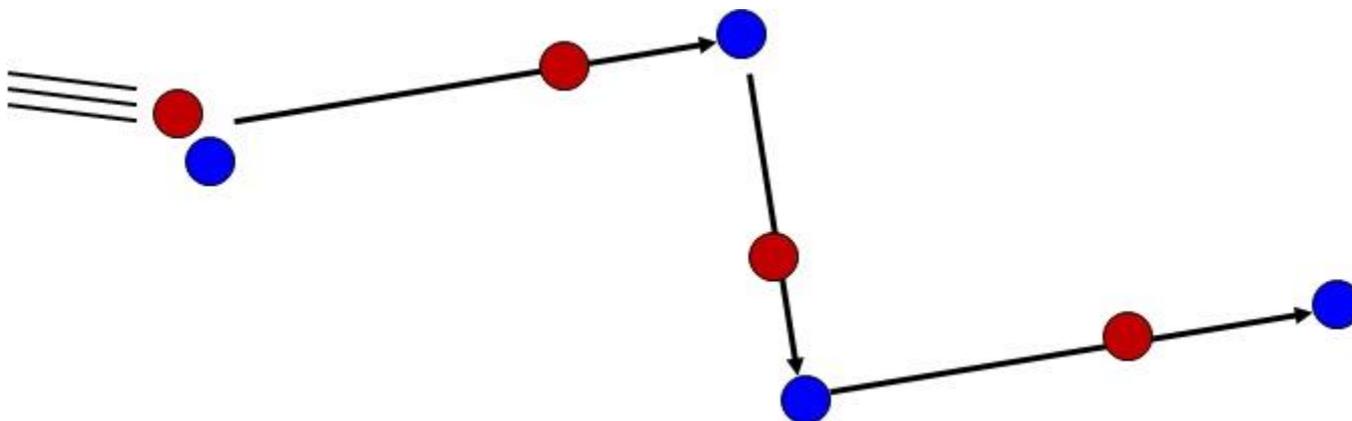
Pour que la fission se produise il faut que le neutron ait une énergie de 0,025 eV, soit une division de l'énergie par un peu plus de 10^8 .

On va utiliser la cession d'énergie par chocs élastiques en utilisant un atome ayant à peu près la même taille : l'hydrogène.



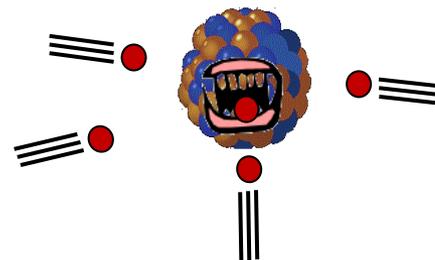
LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Hydrogène que l'on va trouver dans la molécule d'eau.
L'eau va donc servir de modérateur pour les neutrons et
de liquide pour évacuer la chaleur produite par les
fissions.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

La réaction en chaîne se produit.
Pour la contrôler il va être
nécessaire d'avoir des
matériaux neutrophages.



On utilise dans les réacteurs de puissance des barres de
contrôles au [cadmium](#).

On peut également réguler le nombre de neutrons en
ajoutant sous forme liquide du bore ([acide borique](#)).

La perte de contrôle de la réaction en chaîne a entraîné
en 1986, l'accident de criticité de **Tchernobyl**.

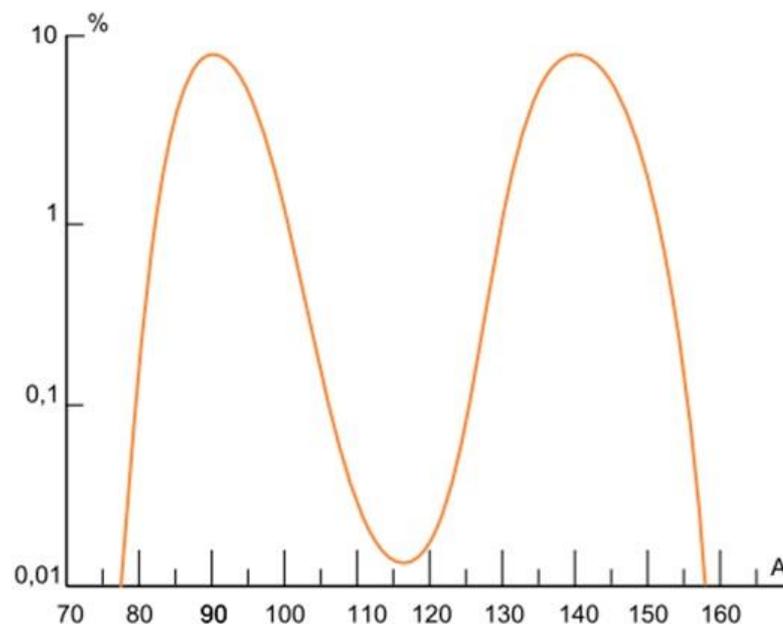


LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Les fragments de fission obtenus sont généralement de taille différente (un gros et un petit).

Ci-dessous, la courbe de probabilité de production de ces fragments de fission.

Courbe en forme de bosses



Distribution des produits de fission de l'uranium-235

Axe Y: échelle logarithmique



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

On remarque que les éléments chimiques les plus probables produits après la fission, sont :

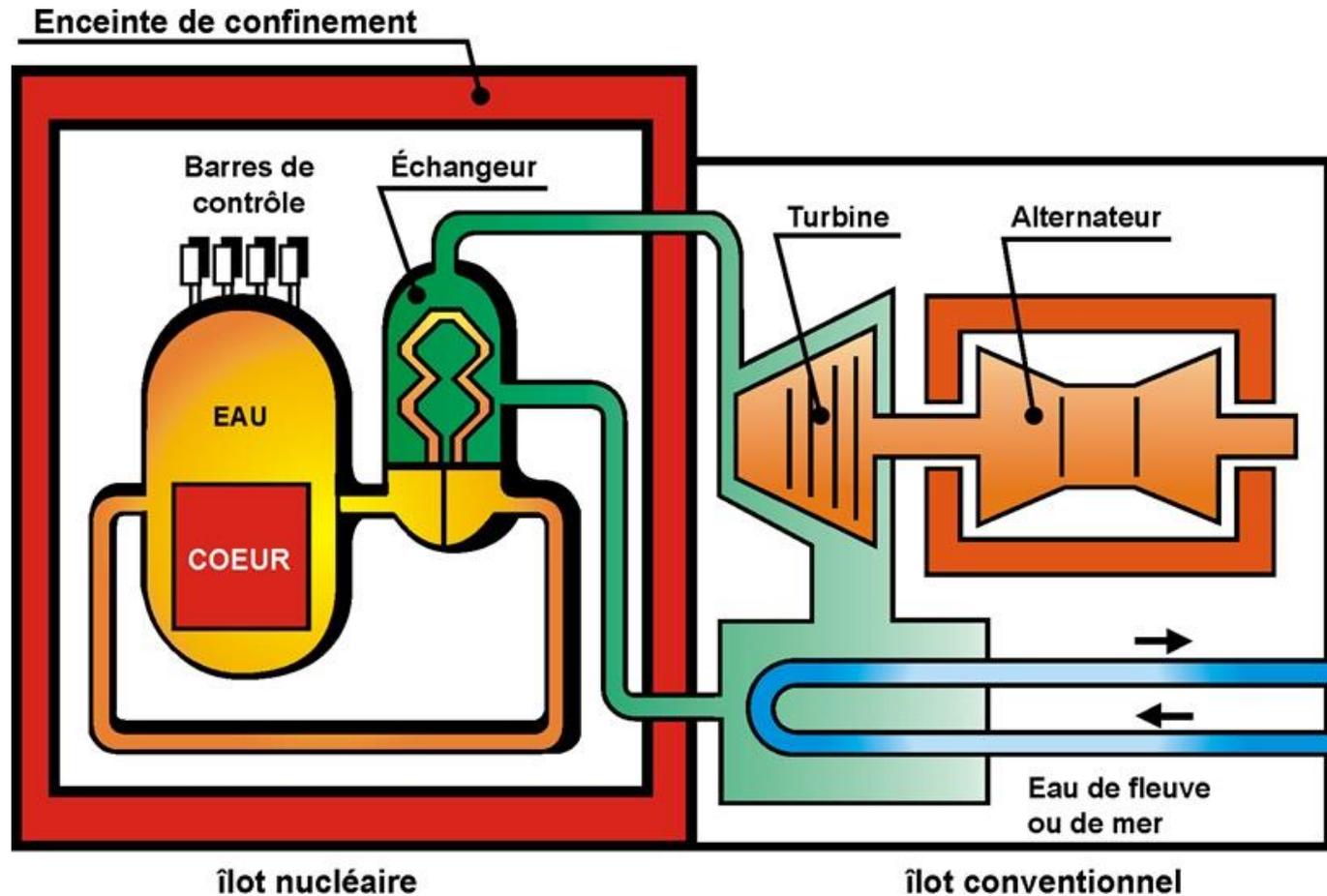
- Première bosse : Strontium, Yttrium, Krypton
- Deuxième bosse : Césium, Iode, Xénon, Baryum

Ceci explique pourquoi lors d'accidents nucléaires, on observe si facilement les iodes et les césiums, qui sont en plus très volatils, de part leur forme physico-chimique.



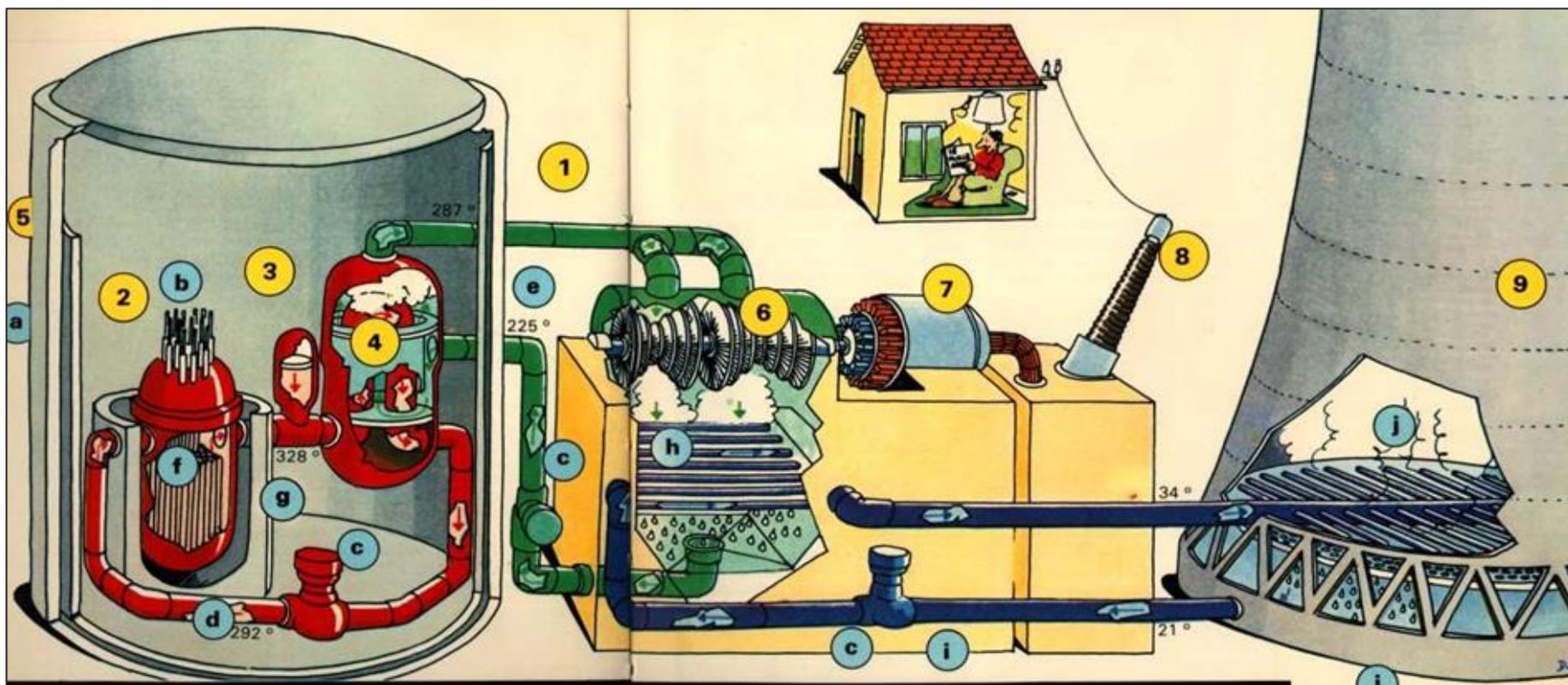
LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Schéma d'un réacteur à eau pressurisée



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Schéma d'un réacteur à eau pressurisée



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Quelques chiffres concernant les éléments d'un réacteur à eau pressurisée :

Dimensions d'un 900 Mwe

hauteur bâtiment : 51 m

diamètre : 37 m

Cuve du réacteur : 12 m

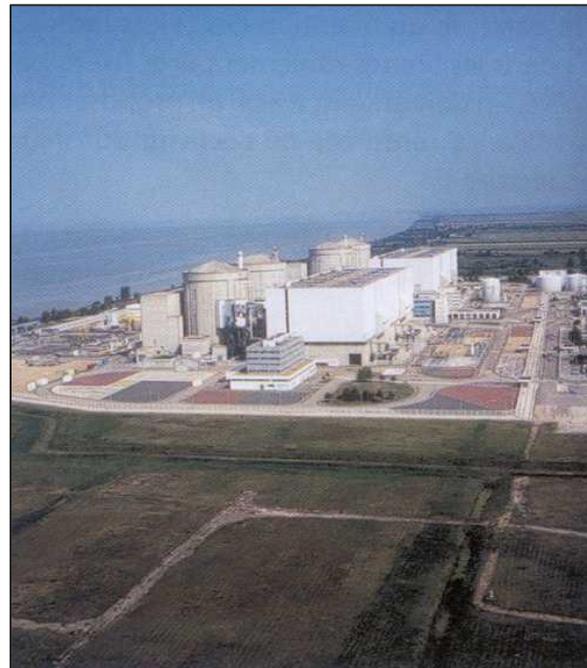
épaisseur : 20 cm

masse cuve : 330 tonnes

157 assemblages = 82 tonnes

enrichissement max : 3,5 %

barres de contrôles en cadmium: 61



Centrale du Blayais



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Le renouvellement du combustible est effectué par tiers enrichissement variant de 2,1 à 3,25 %



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Quelques autres données:

Température du combustible : 1300 °C

Circuit Primaire

température entrée : 286 °C

température sortie : 328 °C

Volume d'eau : 274 m³

débit : 64 000 m³/h

épaisseur tuyauterie : 6 à 8,5 cm

Pression : 155 bars



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

A noter qu'il faut refroidir en permanence le combustible nucléaire, car une fois les réactions de fission démarrées, la chaleur doit être évacuée.

Et même si le réacteur est à l'arrêt.

Ce point critique particulier entrainera l'accident de **Fukushima** en 2011 sur un réacteur à eau bouillante.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Générateur de vapeur

hauteur : 20 m

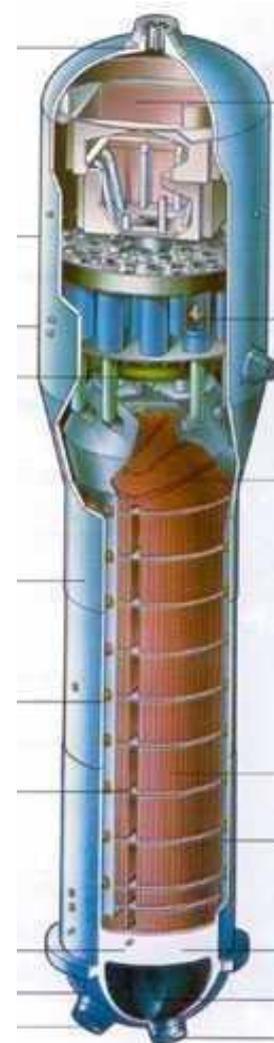
masse en charge : 500 tonnes

surface échange : 4700 m²

débit pression

vapeur : 1810 tonnes/h

pression : 56 bars

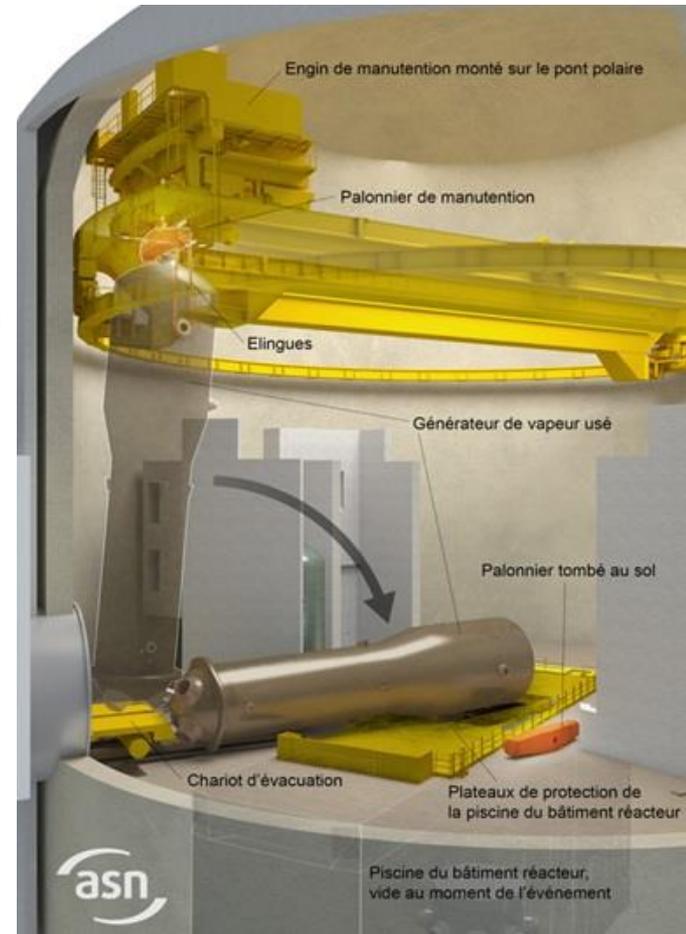


LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Générateur de vapeur

Son remplacement est une opération de grosse manutention. Et ça peut tomber !!

Incident à Paluel 2 - 31 mars 2016



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Le générateur a finalement été sorti le 28 janvier 2017.
Redémarrage du réacteur prévu en juin 2018.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Préssuriseur

masse à vide : 79 tonnes

Pompe primaire

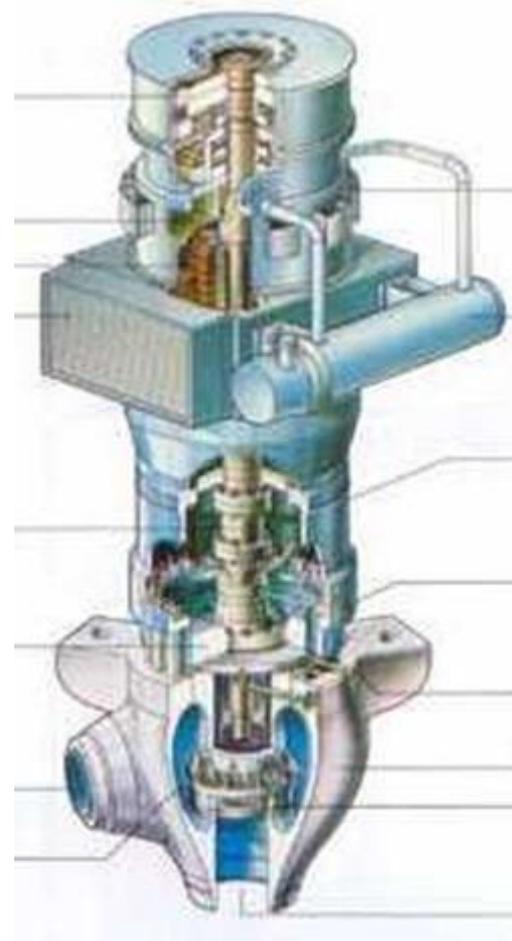
hauteur : 8 m

masse : 86 tonnes

débit nominal : 21240 m³/h

900 MW : 3 boucles

1300 et 1450 MW : 4 boucles



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Circuit Secondaire

température entrée : 225 °C

température sortie : 287 °C

Condenseur

chargé de transformer
la vapeur en liquide.

Refroidi par le circuit
tertiaire venant de
la rivière ou de la mer
avec l'aide des aéroréfrigérants.



Centrale de Nogent sur Seine

LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

La salle de conduite d'un réacteur



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Principes de sûreté des réacteurs à eau pressurisée.

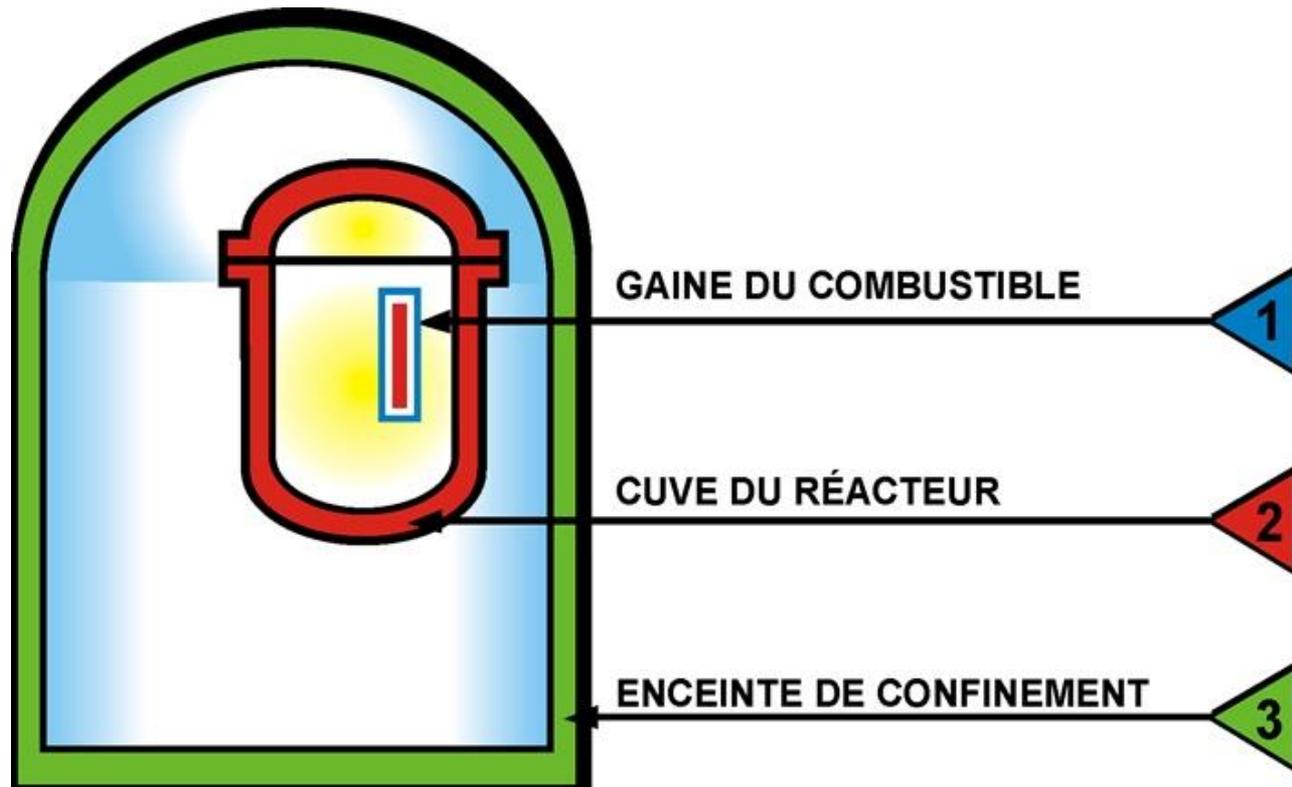
On utilise le principe des trois barrières.

- Le combustible est dans **une gaine**. C'est la première barrière vis-à-vis de l'extérieur.
- La gaine du crayon se trouve dans la **cuve du réacteur**, incluse dans le circuit primaire. C'est la deuxième barrière vis-à-vis de l'extérieur.
- La cuve est dans un **bâtiment** qui a une épaisseur de 90 cm et le dôme une épaisseur de 80 cm. C'est la troisième barrière vis-à-vis de l'extérieur.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

C'est ce que l'on désigne aussi par la défense en profondeur.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Le nouveau Réacteur pressurisé européen (EPR) possède une enceinte de confinement composée de deux parois de béton: une paroi interne en béton précontraint, recouverte d'une peau métallique côté intérieur et une paroi externe en béton armé, chacune de ces parois a une épaisseur de 1,3 mètre.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Quelques mots sur l'accident de Tchernobyl et la non maîtrise de la réaction en chaîne.

La tranche 4 de la centrale de Tchernobyl est un réacteur RBMK de 1000 MW(e), en service depuis 1983. Il contient 1 681 tubes de force enfermant le combustible (soit 190 tonnes d'oxyde d'uranium enrichi) et un empilement de graphite comme modérateur, le tout refroidi par une circulation d'eau sous pression.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Trois causes pour un accident

- La **première cause** de l'accident est le réacteur lui-même. Les soviétiques n'ont pas assez pris en compte les problèmes de sûreté lors de sa conception. C'est lors d'un essai de sûreté que tout s'est déclenché.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

- La **deuxième** provient d'un essai voulant être réalisé par des électriciens et pas des conducteurs de réacteurs.

Programmé lors d'un arrêt de routine de la tranche pour maintenance, les 25 et 26 avril 1986, cet essai devait tester le fonctionnement d'un nouveau système de refroidissement de secours du cœur et de fonctionnement de la turbine à basse puissance.

- La **troisième** enfin, due au personnel qui n'a pas su anticiper et stopper à temps le processus destructeur. Il l'a même amplifié.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Un engrenage fatal

Entre 13h et 23h: le réacteur est maintenu à mi-puissance sur demande du centre de distribution électrique pour préparer l'essai de la turbine à basse puissance.

Vers 23 h: la réduction de puissance reprend. Des barres de contrôle sont introduites de nouveau. Une erreur des opérateurs conduit à une baisse excessive de la puissance à 30 MWth et à une chute de réactivité : le réacteur n'est plus stable. On observe d'importantes variations des flux de neutrons.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

A 1h 15': en violation de la procédure, les opérateurs décident d'effectuer l'essai prévu et bloquent les signaux d'arrêt d'urgence sur "bas niveau" et "basse pression" dans les séparateurs de vapeur.

A 1h 22': le calculateur ordonne l'arrêt immédiat.
Le personnel décide toutefois de continuer l'essai.

A 1h 23' 04: les vannes d'admission de la turbine sont fermées contrairement à ce qu'indique la procédure : la pression de vapeur augmente.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

A 1h 23' 21: les barres de contrôle descendent alors automatiquement sans effet notable. Il y a très certainement de fortes variations de réactivité dans le réacteur.

A 1h 23' 40 :le chef opérateur ordonne l'arrêt d'urgence : la totalité des barres est descendue dans le cœur. En vain.

A 1h 23' 44", le pic de puissance est atteint. (100 fois la puissance nominale).



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Une explosion, puis un incendie

Dans le cœur, les crayons de combustible se fragmentent. Les pastilles d'oxyde d'uranium, surchauffées, explosent et provoquent une déflagration qui soulève la dalle supérieure du réacteur, d'un poids de 2 000 tonnes, à une hauteur que l'on a estimé à 15 mètres.

Le graphite qui sert de modérateur prend alors feu.



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

La partie supérieure du cœur du réacteur est à l'air libre.

Trente foyers s'allument.
Il faudra trois heures aux pompiers pour les éteindre.

Du 27 avril au 10 mai,
5000 tonnes de matériaux
(sable, bore, argile, plomb...)
sont déversées par hélicoptère
pour recouvrir le réacteur.



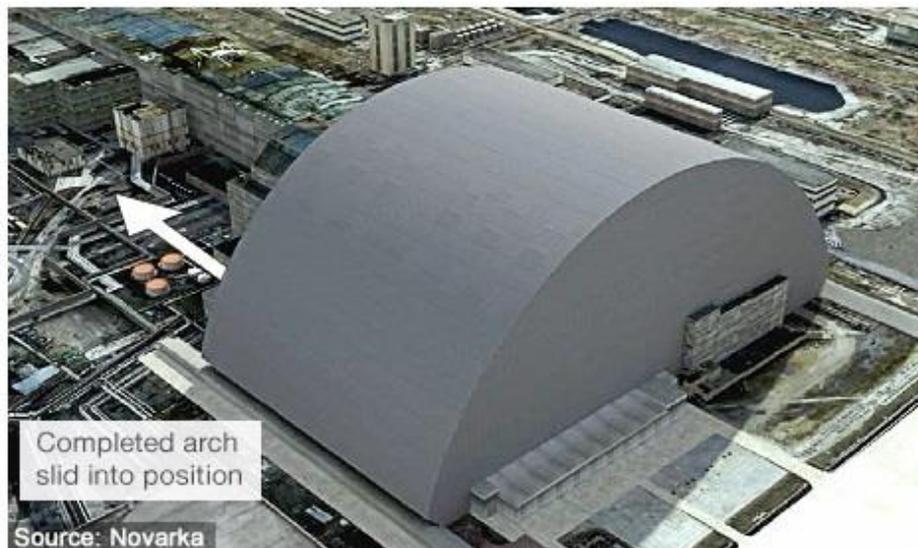
LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Le premier sarcophage mis en place sur le réacteur accidenté



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Le nouveau sarcophage, mis en place en novembre 2016:

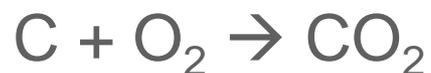


LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Comparons les énergies produites par une centrale thermique au charbon et une centrale nucléaire, toutes les deux de même puissance électrique.

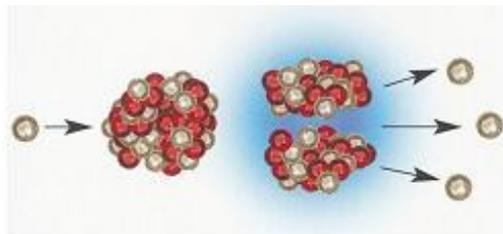
Combustion d'un atome de carbone :

$$\Delta E = - 4,08 \text{ eV}$$



Fission d'un noyau d'uranium-235 :

$$\Delta E = - 190 \text{ MeV}$$



LE PASSAGE EN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Prenons deux centrales de 1000 MW électrique chacune.
Une tranche nucléaire et une centrale au charbon.



27 t de combustible par an
Soit 1 camion par an

**Production de 2.200 t de
déchets nucléaires
dont 22 t de HA - VL**



2.000.000 t de charbon par an
**Soit 2 trains de 3000 tonnes
par jour**

7.300.000 t de CO₂ par an !



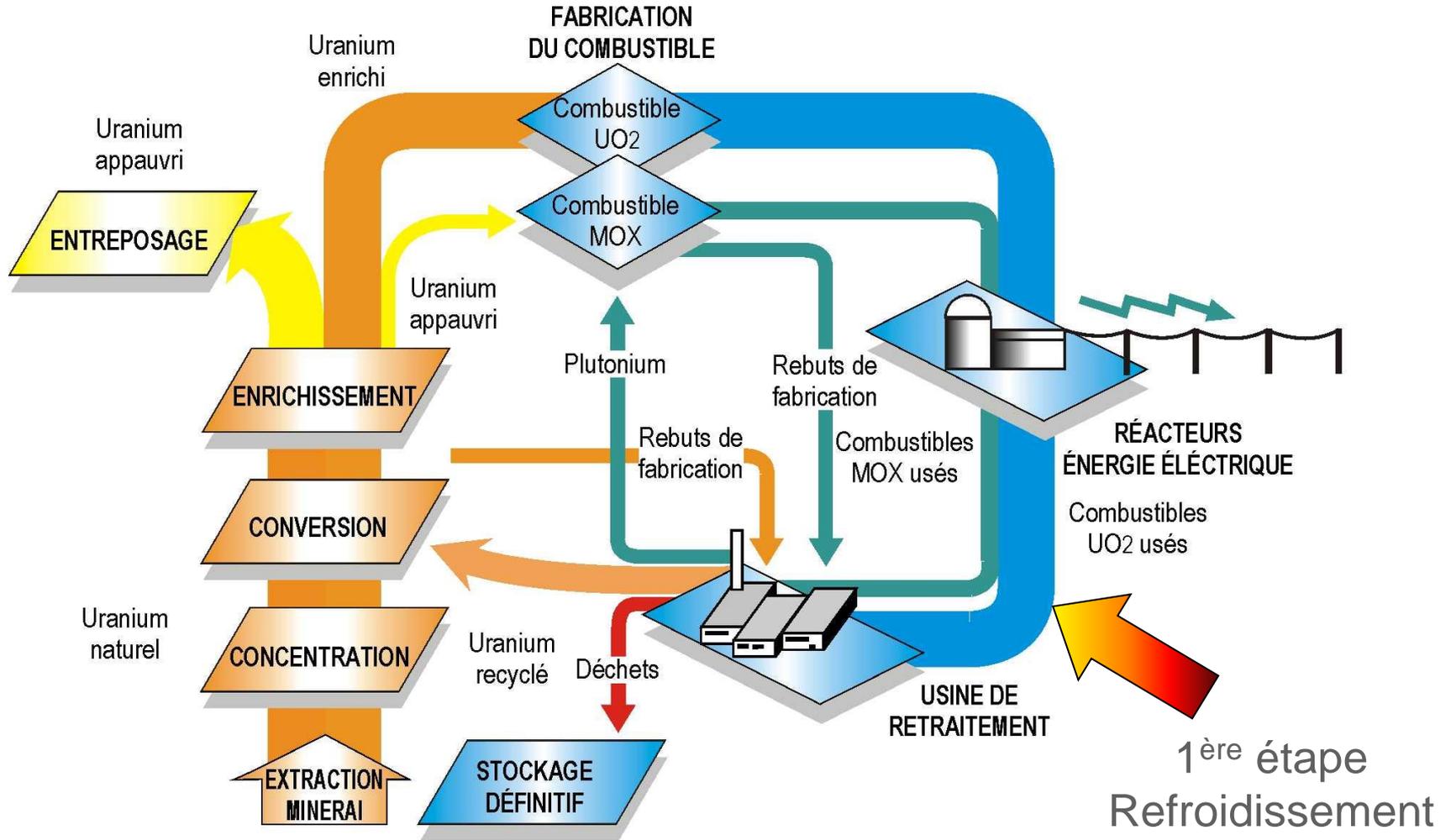
LE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

SOMMAIRE

- Introduction
- L'amont du cycle nucléaire
- Le passage en réacteur nucléaire
- **L'aval du cycle nucléaire**
- Les déchets nucléaires



L'AVANT DU CYCLE NUCLÉAIRE



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Le combustible nucléaire reste trois à quatre ans et demi dans le cœur du réacteur.

Il reste ensuite au moins un an dans le bâtiment combustible dans une piscine de refroidissement avant envoi à l'usine de retraitement de La Hague.

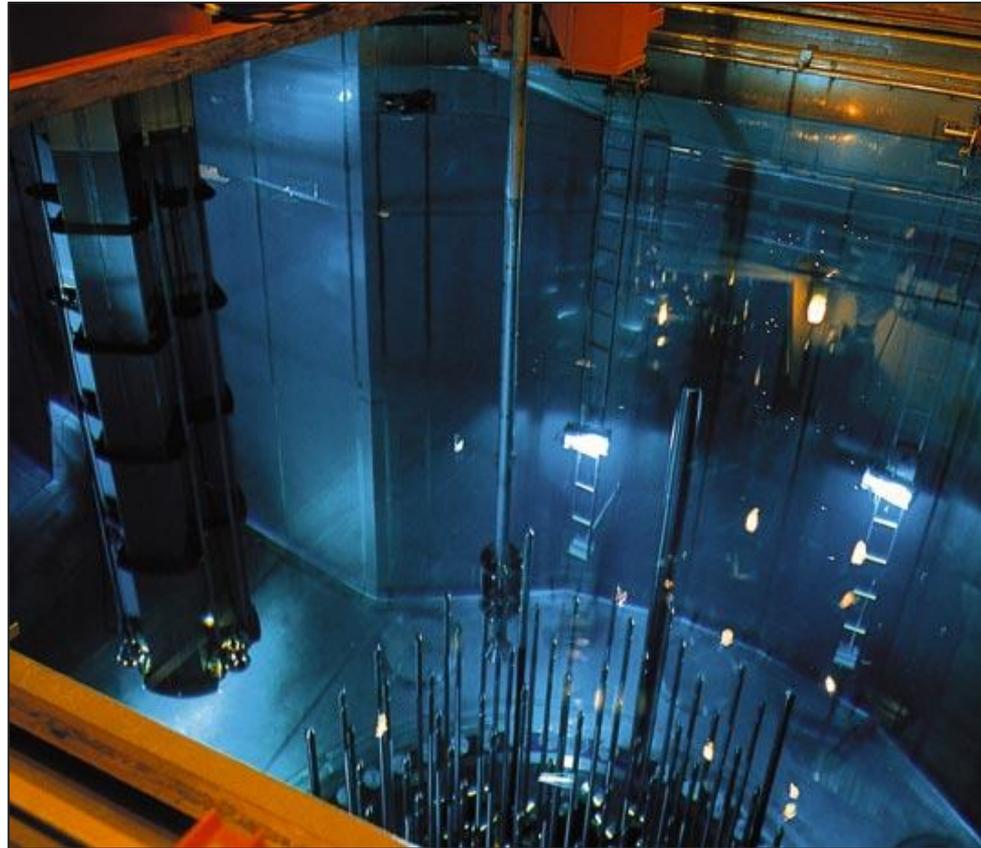
Après passage dans le réacteur, l'activité d'un assemblage est d'environ **10 000 000 GBq**

soit 10 millions de fois importante qu'au départ



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Ouvrons la cuve pour sortir le combustible.



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Le combustible est acheminé vers la piscine de refroidissement.

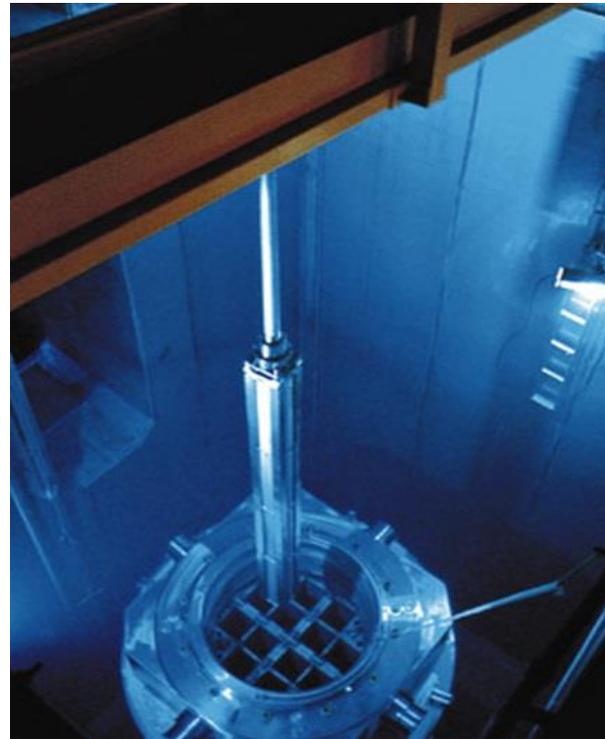


L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Le combustible nucléaire est chargé dans un conteneur spécial, soit sous eau, soit à sec, selon les différents sites et réacteurs.

Chargement d'un
château de transport
TN 12

Luminescence bleue
= Effet Tcherenkov



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

L'effet Vavilov-Tcherenkov est un phénomène similaire à une onde de choc, produisant un flash de lumière lorsqu'une particule chargée (plutôt un électron qui est proche des vitesses relativistes) se déplace dans un milieu diélectrique avec une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière dans ce milieu (la vitesse de la lumière dans le vide étant toujours supérieure à celle de la particule).

C'est notamment cet effet qui provoque la **luminosité bleue de l'eau** entourant le cœur d'un réacteur nucléaire.

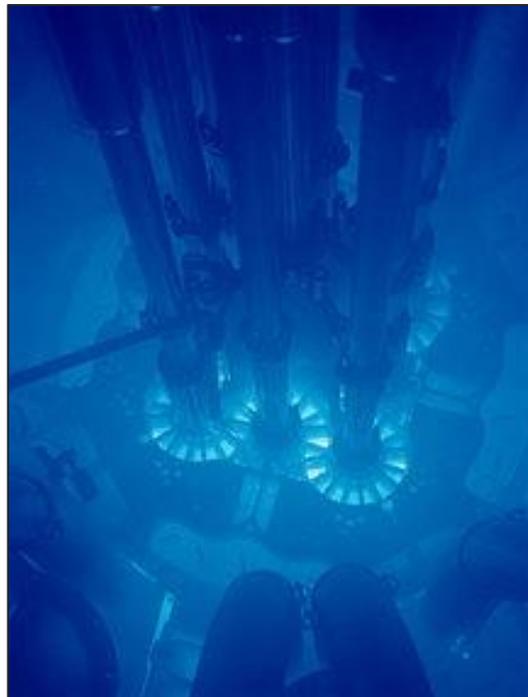


L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Dans un milieu matériel, la lumière se déplace à une vitesse $c_1 = c / n$, où :

c est la vitesse de la lumière dans le vide.

n est l'indice de réfraction du milieu.



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Château de transport TN 12

Poids : 100 tonnes
12 éléments
combustibles
Soit 7 tonnes
« utiles »



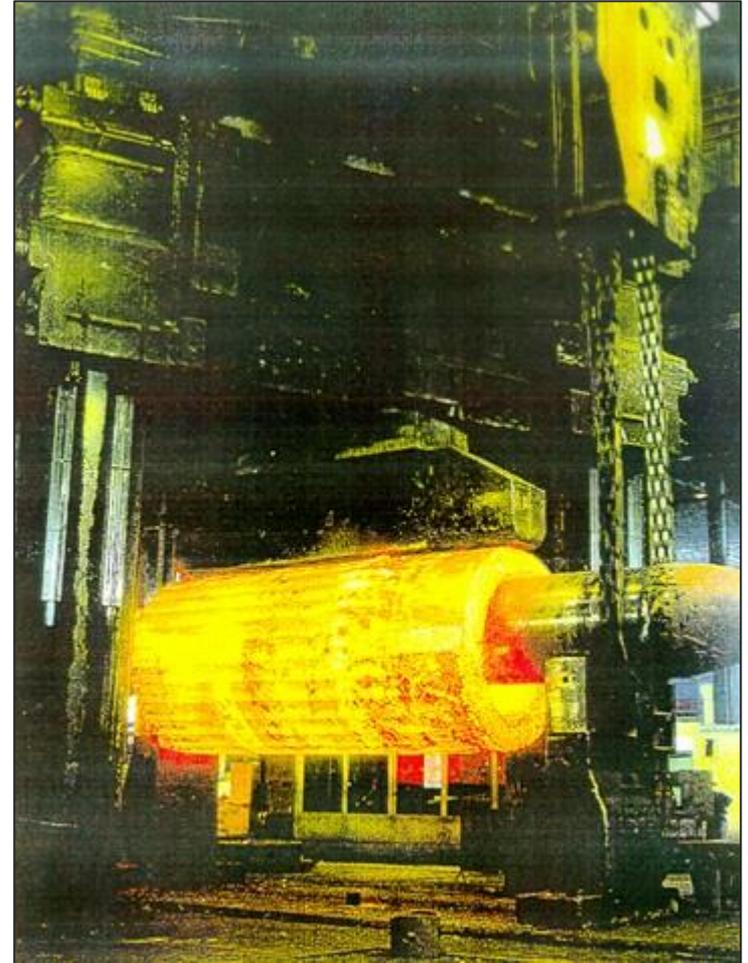
Longueur : 6,5 m – Diamètre : 2,5 m

L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

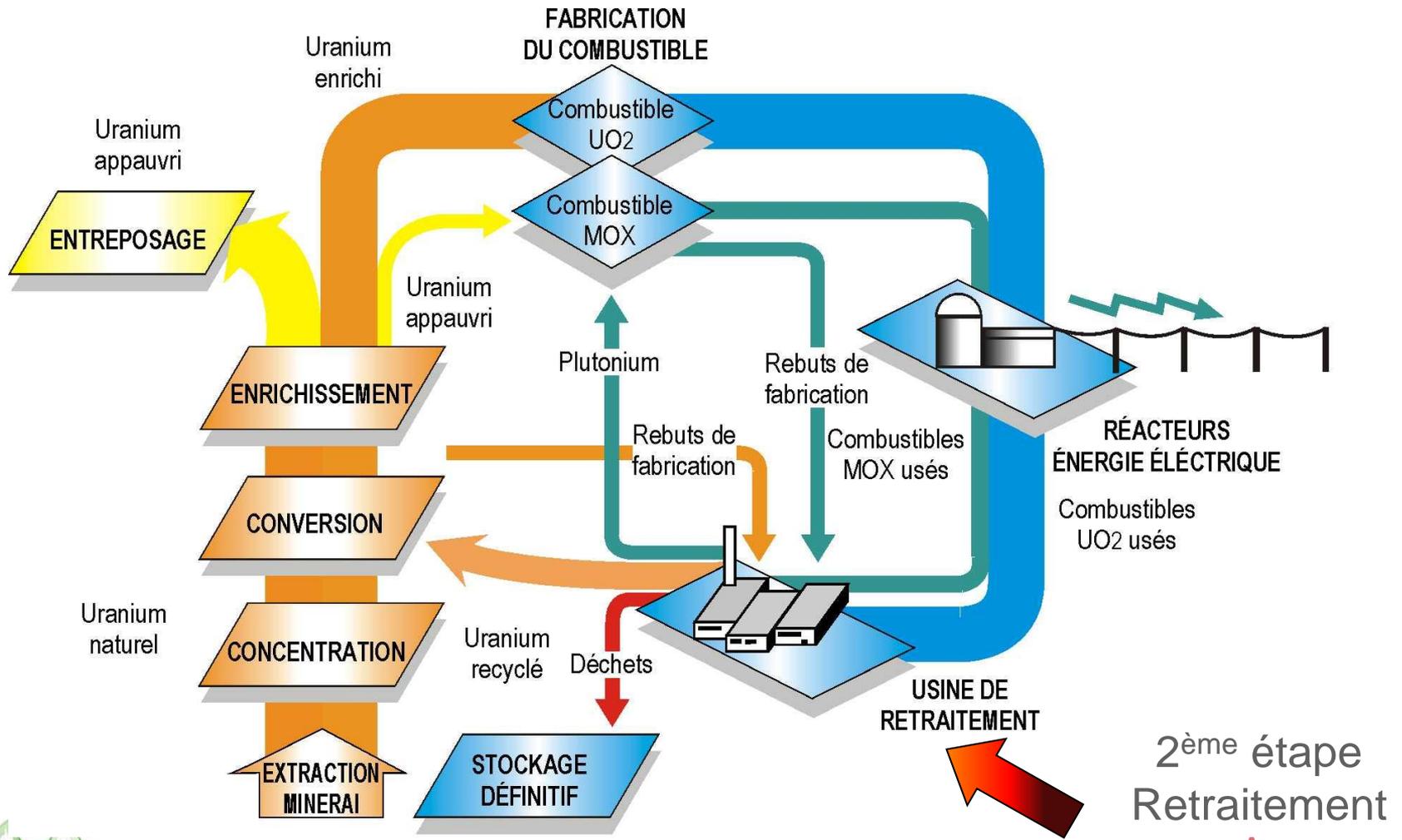
Château de transport TN 12

Exemple d'opération
de formatage de la
virole en acier

Épaisseur minimale
Acier inox 30 cm
Résine borée 10 cm



L'AVANT DU CYCLE NUCLÉAIRE



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Le retraitement du combustible, voie choisie par la France, a pour but de récupérer les matériaux « utiles » comme l'uranium et le plutonium.

L'usine de retraitement de La Hague, après la mise au point des procédés au CEA a démarré en 1966.

Entreprise : **ORANO LA HAGUE**
INB



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

ORANO LA HAGUE



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Le combustible nucléaire est acheminé par plusieurs types de transport à l'usine de La Hague.



Par route



Par rail

Par mer ou fleuve



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Le combustible nucléaire est acheminé par plusieurs types de transport à l'usine de La Hague.



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Le combustible nucléaire est entreposé dans les conteneurs puis en piscine à La Hague.



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Après un entreposage de plusieurs années, le combustible va être traité et on va séparer l'uranium, le plutonium et les produits de fission.

Le procédé consiste en une dissolution chimique avec de l'acide nitrique et sulfurique, plus des solvants.

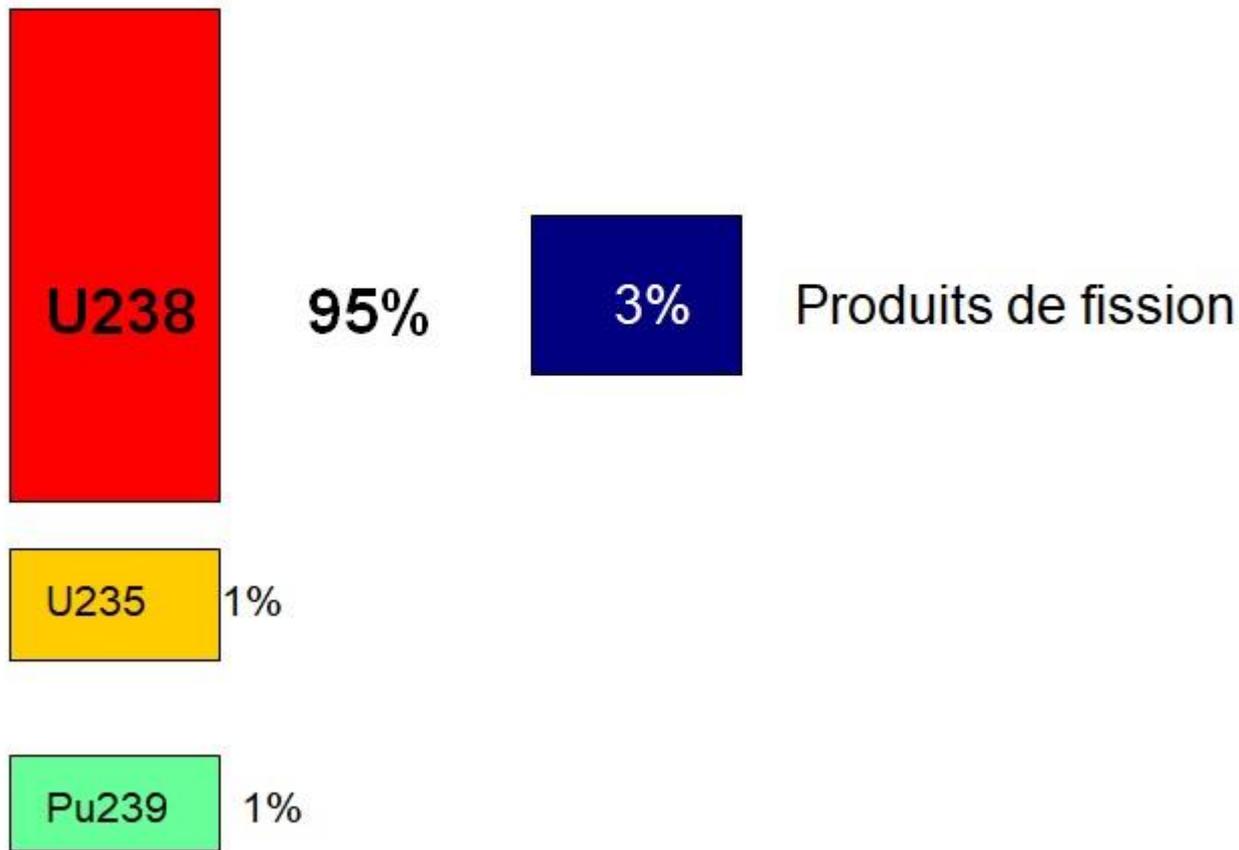
Il reste alors la gaine du crayon qui va constituer des déchets de haute activité.



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Produits utiles

Produits inutiles



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Le procédé de séparation a été mis au point au CEA. consiste en une dissolution chimique avec de l'acide nitrique et sulfurique, plus des solvants.

On va donc opérer en phase liquide pour faire cette séparation. On fait tomber les pastilles de combustible irradiées dans un bain d'acide nitrique bouillant, où elles se dissolvent. La solution résultante contient de nombreux éléments chimiques, des produits de fission, radioactifs ou non, de l'uranium et du plutonium.



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE



Cisailage
et dissolution

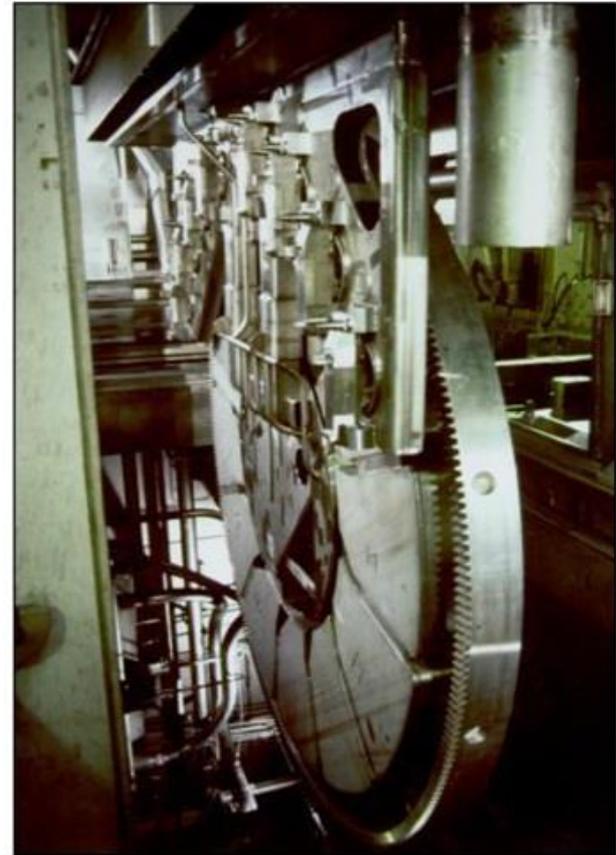
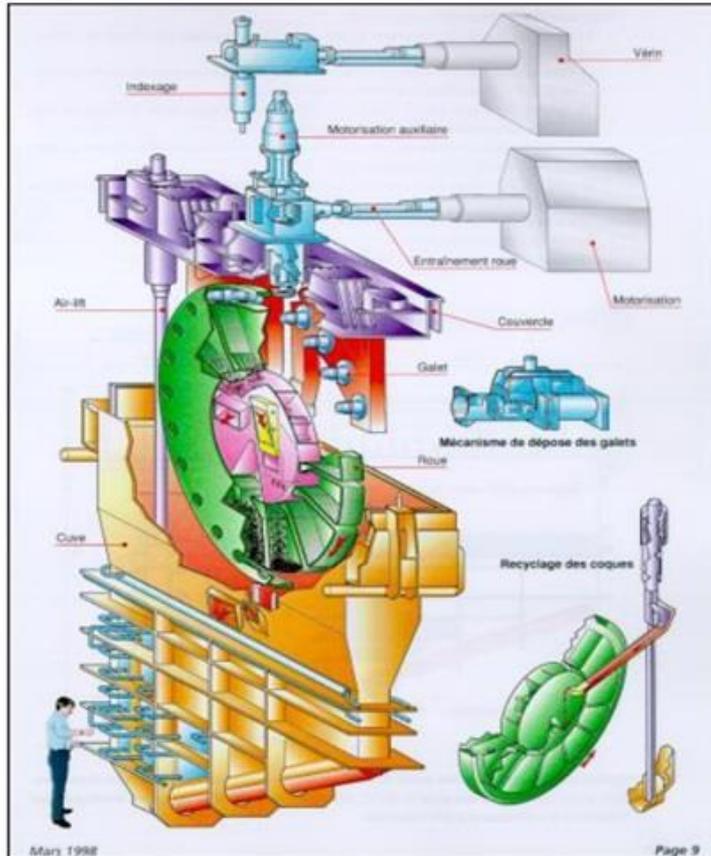
séparation
U-Pu

Produits
de fission



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Dissolveur continu à roue



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

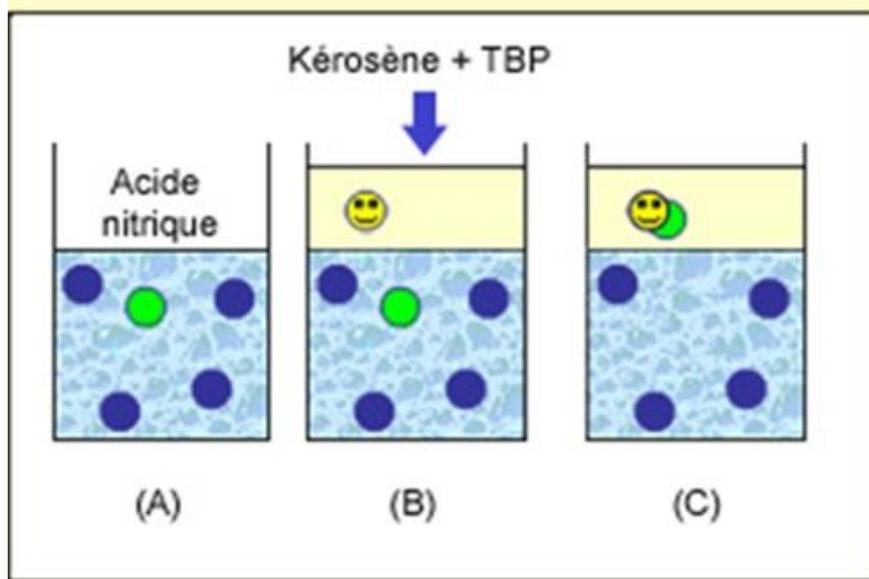
On rajoute alors un mélange huileux à base de kérosène qui contient une molécule spécifique, le TriButylPhosphate ou TBP.

Ce TBP, qui va jouer le rôle d'enzyme glouton vis-à-vis des atomes d'uranium et de plutonium, n'est efficace qu'en présence d'eau très acide. On agite, comme pour faire une vinaigrette, et la molécule capture sélectivement l'uranium et le plutonium maintenus prisonniers dans le kérosène.



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Principe de l'extraction liquide / liquide:



● Uranium (et Pu)

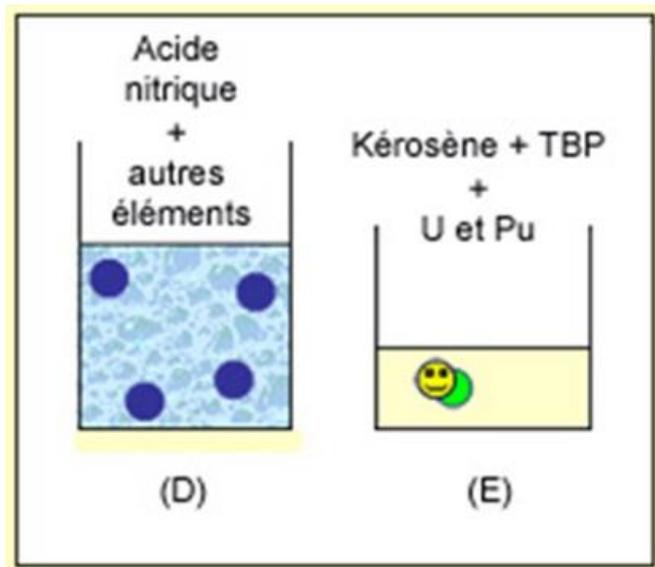
● Autres éléments
(PF et act. mineurs)

● TBP

L'uranium et le plutonium représentés en vert sont au départ mélangés à d'autres éléments radioactifs (en bleu foncé) au sein d'une eau très acide. On rajoute un mélange huileux à base de kérosène (en jaune pâle) qui contient une molécule spécifique, le TriButylPhosphate ou TBP (en jaune vif), qui n'est efficace qu'en présence d'eau très acide. On agite (C), et la molécule capture l'uranium et le plutonium dans le kérosène. On laisse reposer et l'eau acide se sépare naturellement du kérosène. L'uranium et le plutonium restent piégés dans le kérosène.

L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Principe de l'extraction liquide / liquide:



● Uranium (et Pu)

● Autres éléments
(PF et act. mineurs)

● TBP

Après transvasement, on a d'un coté le bain acide avec les autres éléments, et de l'autre, le kérosène avec l'uranium et le plutonium.

L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

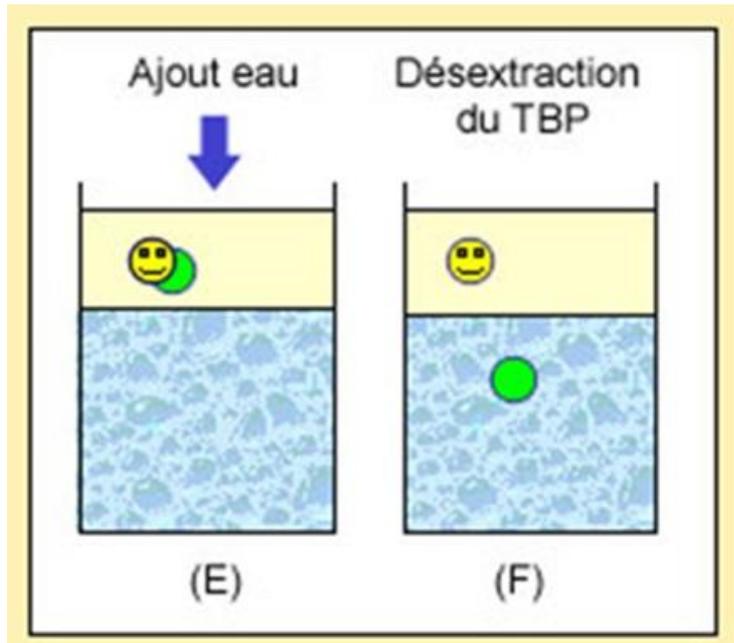
Au final, la solution de kérosène contient la plus grande partie du plutonium et de l'uranium. Les produits de fission et les autres transuraniens restent dans la solution acide sous forme aqueuse.

On va mettre ensuite le kérosène / TBP en contact avec de l'eau très pure. Le TBP n'est plus efficace car l'eau n'est plus acide. Il relâche alors l'uranium et le plutonium qui passent dans l'eau.



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Phase de dés extraction de l'uranium et du plutonium



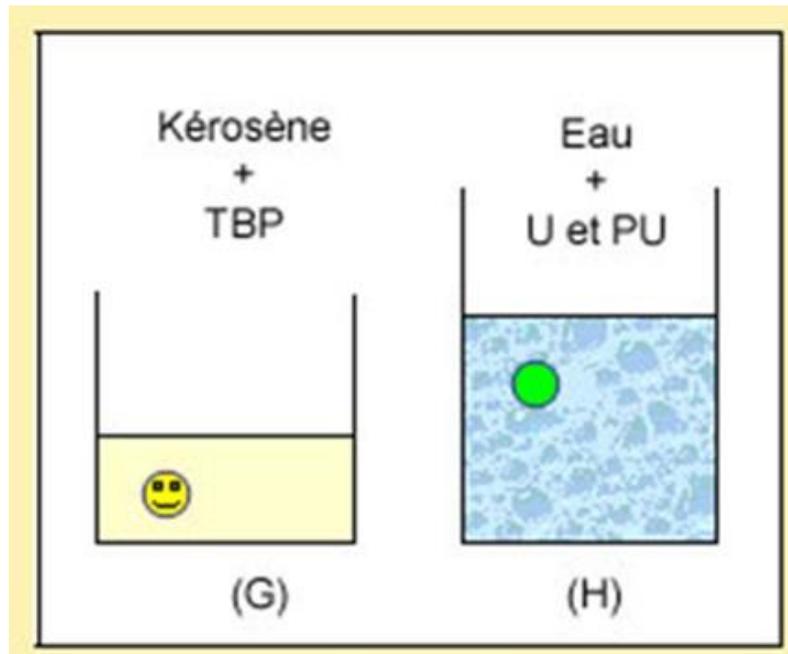
● Uranium (et Pu)

● TBP

La seconde étape a pour but de récupérer dans le kérosène l'uranium et le plutonium. Le kérosène est mis en contact avec une eau pure et on agite de nouveau. Le TBP n'est plus efficace car l'eau n'est pas assez acide. Il relâche alors l'uranium et le plutonium, qui repassent dans l'eau pure. On laisse reposer, le kérosène et l'eau se séparent.

L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Phase de désextraction de l'uranium et du plutonium:



● Uranium (et Pu)

○ TBP

Il ne reste qu'à transvaser. On a obtenu une eau ne contenant que de l'uranium et du plutonium, et récupéré le mélange kérosène/TBP qui pourra être réutilisé (presque indéfiniment) pour une prochaine extraction.

L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Le plutonium et l'uranium sont ensuite séparés l'un de l'autre par réduction du plutonium. Plusieurs cycles sont nécessaires pour arriver à une purification aussi parfaite que possible.

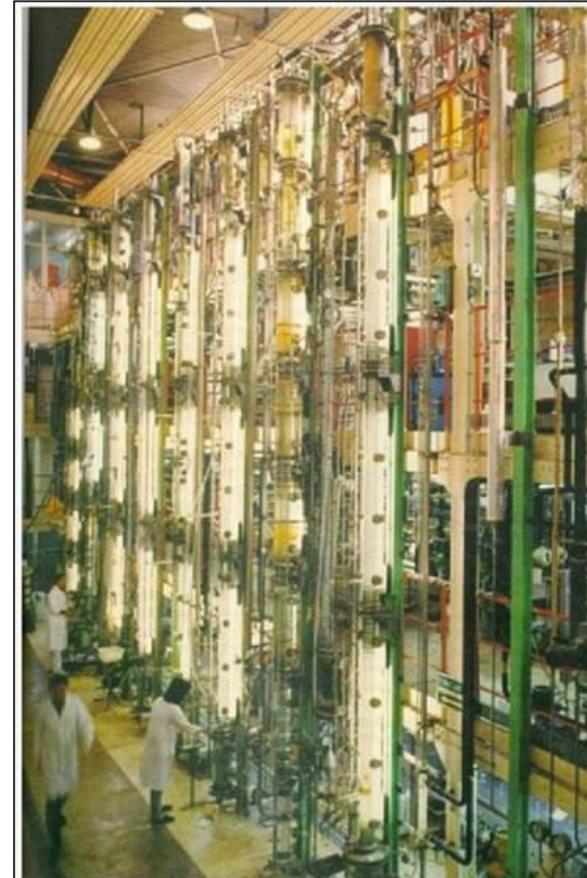
L'uranium sous forme de nitrate d'uranyle est épuré par extraction liquide-liquide en plusieurs étapes pour éliminer les produits de fission. Le plutonium est lui aussi purifié, par extraction, concentré, puis précipité sous forme d'oxalate. La solution résiduelle contenant les produits de fission et les actinides est calcinée pour être vitrifiée.



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Procédé PUREX:

Colonne pulsée contenant les produits en phase liquide.

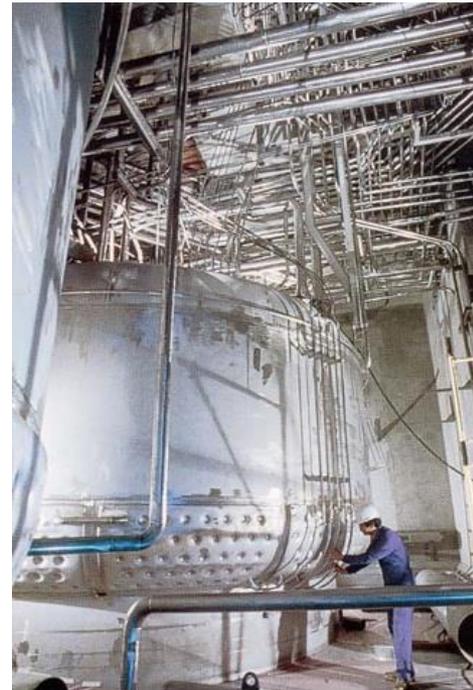


L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

La solution résiduelle contenant les produits de fission est d'abord entreposée dans des cuves. Il y a un refroidissement et une ventilation / filtration.



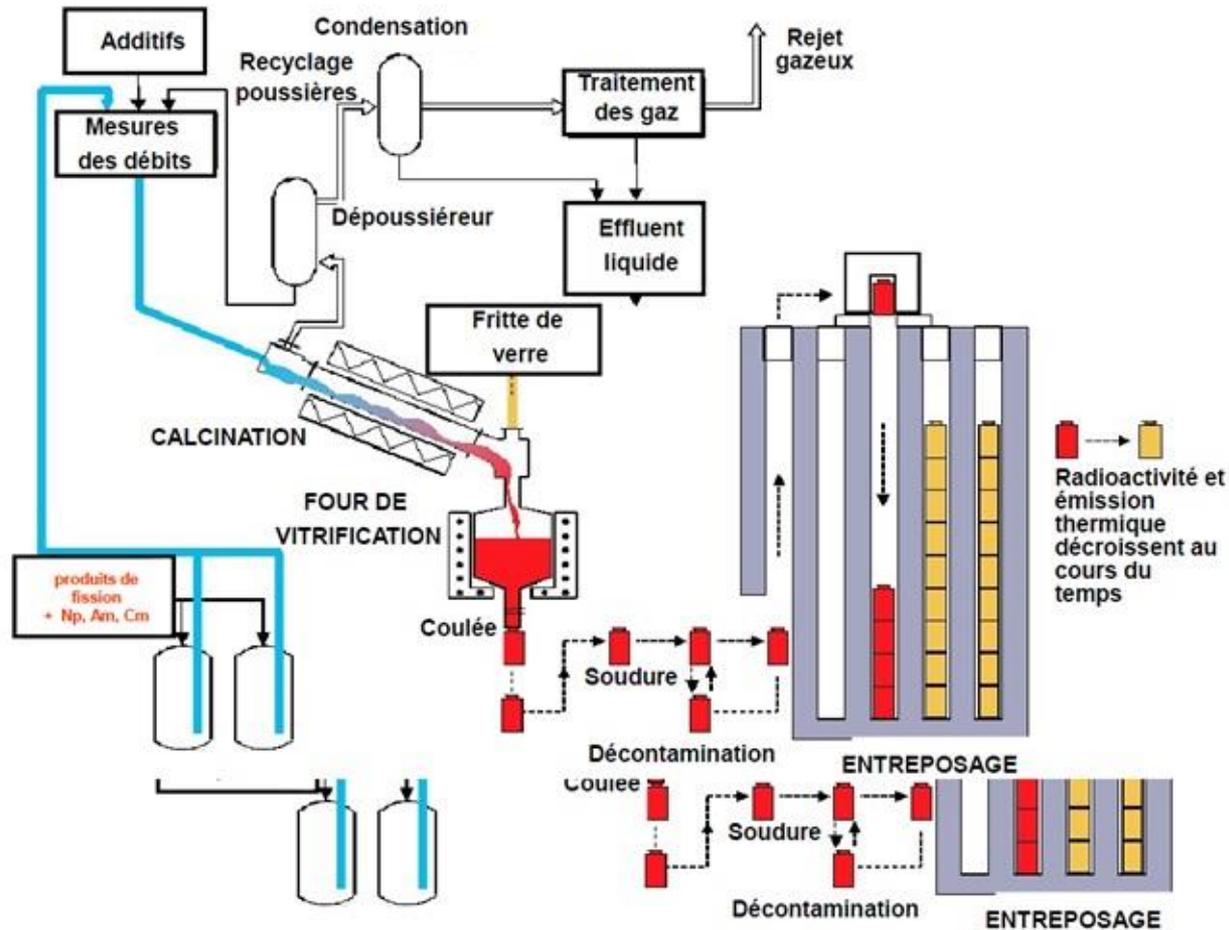
Entreposage



En construction

L'AVANT DU CYCLE NUCLÉAIRE

Procédé de vitrification



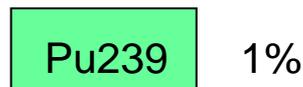
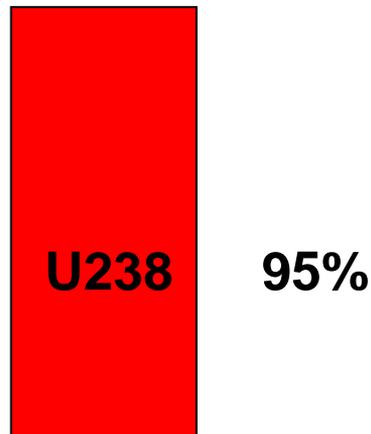
L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

En attendant un entreposage définitif, les conteneurs en inox (avec la fritte de verre et les produits de fission de haute activité) sont mis dans des puits sur les sites.



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

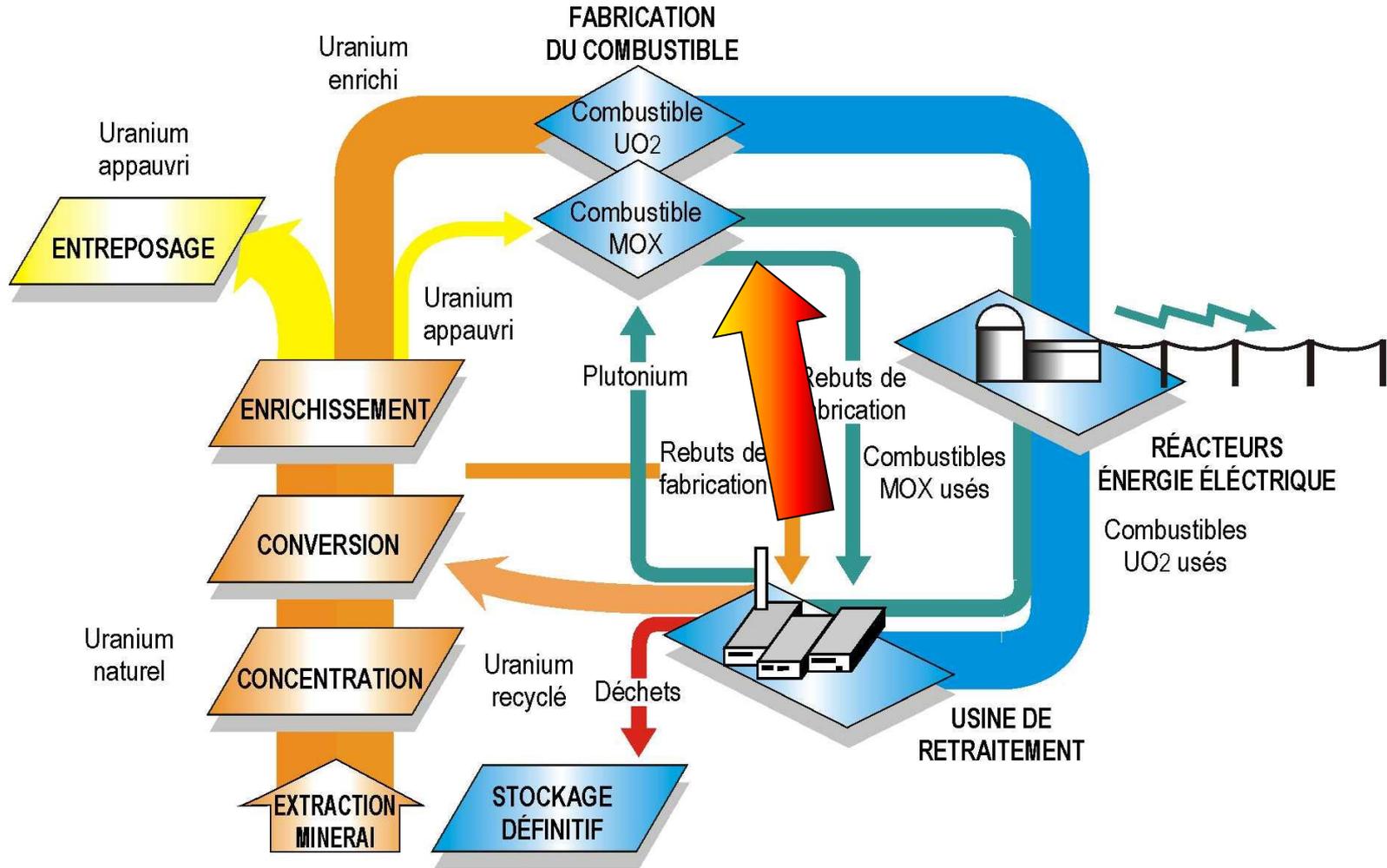
Pour l'uranium et le plutonium, retour dans la chaîne de fabrication soit à FBFC Romans (uranium de retraitement) soit à MELOX Marcoule (plutonium).



La Hague



L'AVANT DU CYCLE NUCLÉAIRE



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

L'usine MELOX à Marcoule va reprendre le plutonium et le mélanger à l'uranium pour faire des combustibles constitués par un mélange d'oxydes.

C'est ce que l'on nomme le **MOX**.

Les crayons combustibles sont fabriqués en boîte à gants. Impossible de les toucher directement.



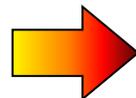
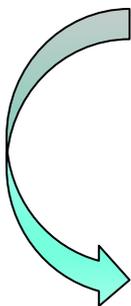
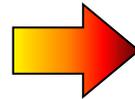
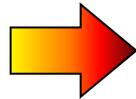
L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Les boîtes à gants fonctionnent sous gaz neutre, en circuit fermé. Elles peuvent être de très grandes dimensions.



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

On utilise des conteneurs spéciaux et des convois particuliers, pour acheminer le plutonium.



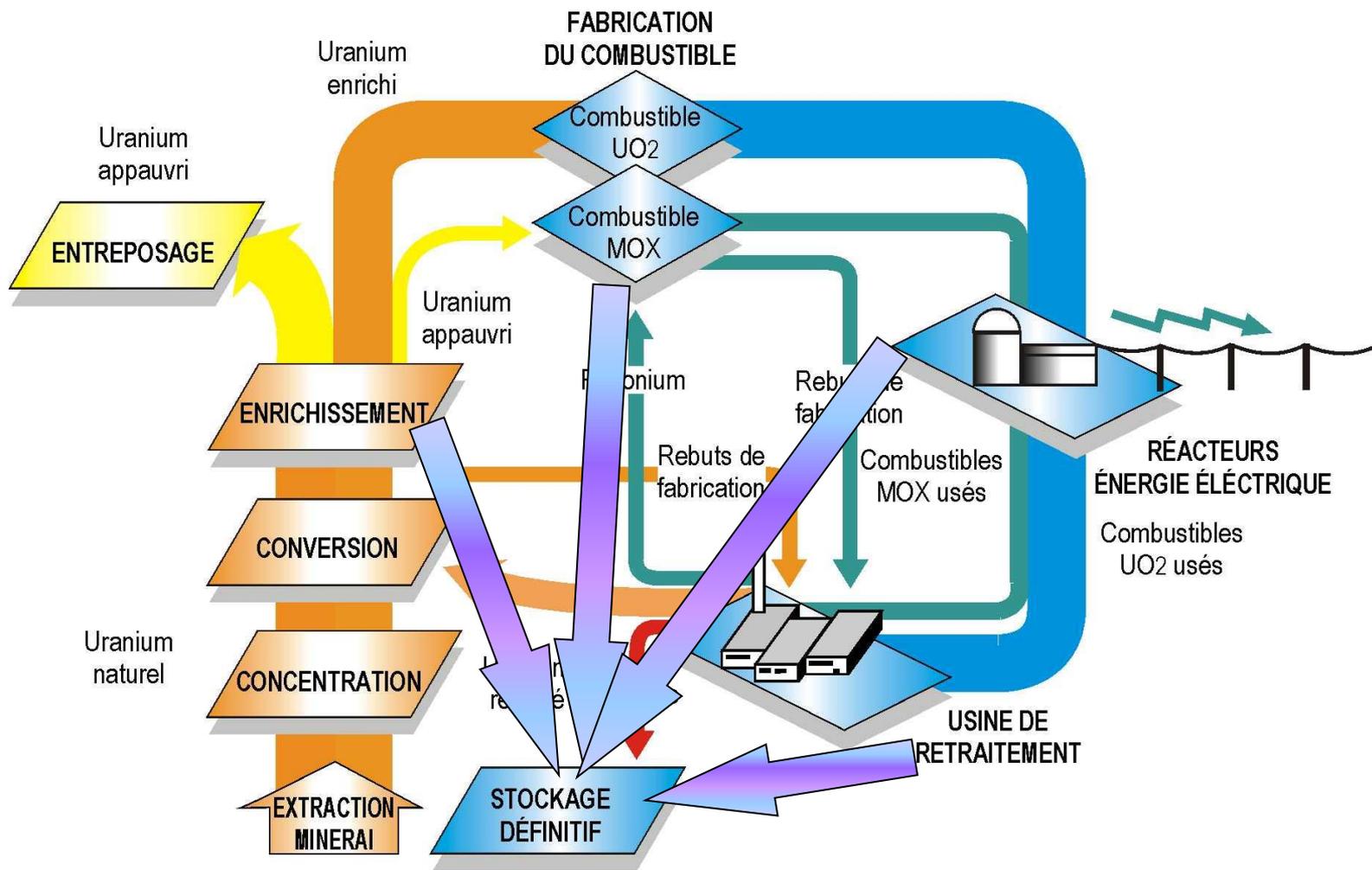
LE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

SOMMAIRE

- Introduction
- L'amont du cycle nucléaire
- Le passage en réacteur nucléaire
- L'aval du cycle nucléaire
- **Les déchets nucléaires**



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Trois idées à retenir

- Les quantités

Bien inférieures à celles des déchets « classiques ».

- Le tri sélectif

Chaque type de déchet a son traitement approprié.

- La vision de l'avenir

Modélisation à 300 ans, à 200 000 ans...



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Voici les quantités annuelles de déchets produits en France, par habitant :

➤ **Industriels** :

2 500 kg dont 100 kg de déchets toxiques

➤ **Ménagers** :

360 kg (hors encombrants, matières recyclables et autres) dont 4 kg de déchets toxiques

➤ **Nucléaires** :

2 kg environ dont 20 g de déchets dits « haute activité et vie longue » (15 g de MAVL 5 g de HA) soit 3 pièces de 1 euro



L'AVAL DU CYCLE NUCLÉAIRE

Déchets industriels et ménagers toxiques, que trouve-t-on ?

Déchets organiques : solvants, hydrocarbures, boues d'épuration ou boue de curage de lagunes, d'égouts industriels, etc. (déchets hospitaliers et vétérinaires)...

Déchets minéraux solides : cendres Refioms et mâchefers d'incinération, laitiers, poussières, amiante...

Déchets minéraux liquides et semi-liquides : bains de traitement de surface, acides...



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Les déchets ménagers toxiques sont extrêmement disparates

Produits détachants, antirouille, cires, eau de javel, soude caustique, déboucheurs pour évier ou WC, décapants pour four, etc. ;

Médicaments ;

Résidus de l'automobile : huiles minérales, huiles de vidange, antigel, liquide de frein, etc. ;

Produits de traitements pour le jardin ou les plantes d'intérieur : insecticides, herbicides, fongicides, etc. ;

Colles, peintures, vernis, laques, lasures, diluants autres que l'eau, etc. ; solvants (toluène, trichloréthylène, etc.) ; produits de traitements du bois ;

Piles, accumulateurs, batteries ;

Produits chimiques divers : acides chlorhydrique et sulfurique, ammoniacale, acétone, éther, benzène, formol, etc.

Autres ...



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

L'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA).

Crée au sein du  le 7/11/79. Actuellement Établissement Public Industriel et Commercial depuis 1991.

L'ANDRA gère les centres de stockage existant et mène des recherches pour l'implantation de nouveaux sites (en particulier le stockage longue durée).

L'ANDRA ne stocke que les déchets **français**..
EDF - CEA - COGEMA = 95 % des déchets



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

L'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs gère la classification des déchets.

Déchets du cycle du combustible Faible et moyenne activité, déchets de haute activité, déchets alpha.

Les déchets de Faible activité et Très faible activité sont gérées dans les filières existantes.

Principe de sûreté : Réaliser un confinement entraînant l'exposition la plus faible possible pour les populations.



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

L'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs définit les méthodes de conditionnement en accord avec les autorités.

Méthodes de conditionnement :

- Résidus effluents : Ciment
- Déchets bêta-gamma : Ciment
- Résines : Enrobage résines
- Déchets Haute Activité : Vitrification



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Quelques conditionnements :



Très faible activité (TFA)



Faible et moyenne activité (FA-VC et MA-VC)



Moyenne activité (MA-VL)

Haute activité (HA)

LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Classification des déchets :

	Déchets à vie courte (période des principaux éléments < 30 ans)	Déchets à vie longue
Très faible activité	En exploitation Centre de Morvilliers (Résidus miniers)	
Faible activité	En exploitation	Filières à l'étude (subsurface) (graphite, radifères)
Moyenne activité	A Centre de l'Aube	B
Haute activité	C Filières à l'étude Loi du 30/12/91 (revue 2006)	



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

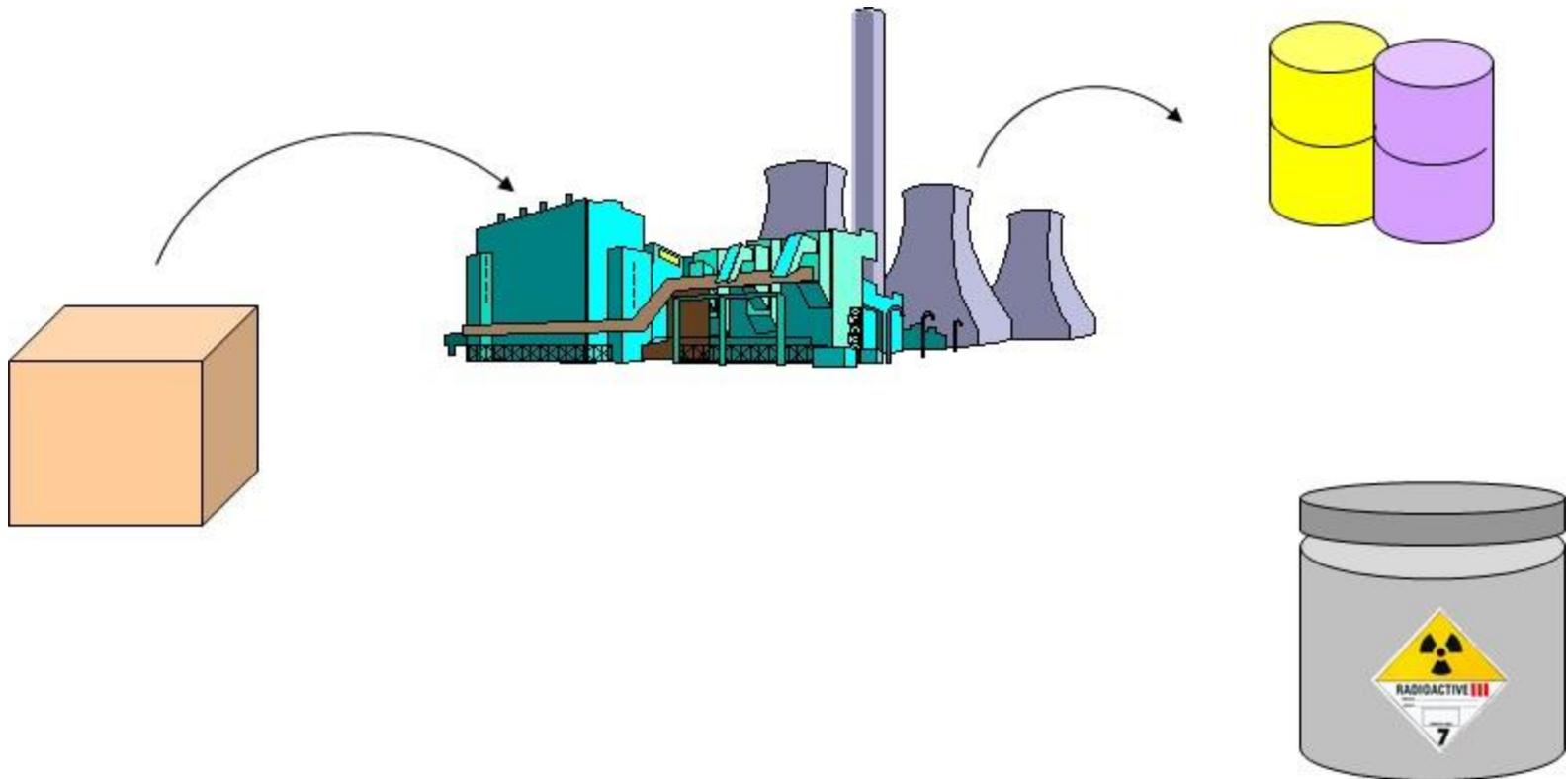
Chez les grands exploitants nucléaires, on évite de faire entrer les éléments inutiles dans des zones à risque de contamination.

Comme il n'y a pas de seuil de libération en France (contrairement à certains de nos voisins européens, dont un qui a stoppé le nucléaire récemment...) tout est conditionné en déchets TFA ou FAMA.

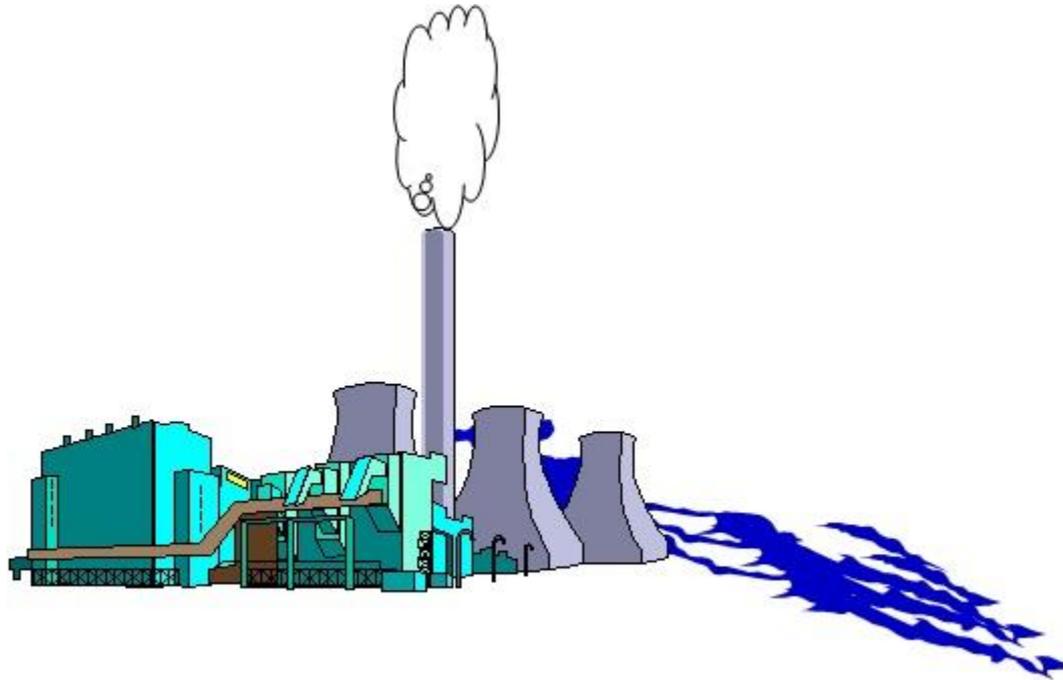
Mise en place d'un zonage déchets
Arrêté 31/12/99 puis révisé le 07/02/2012



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

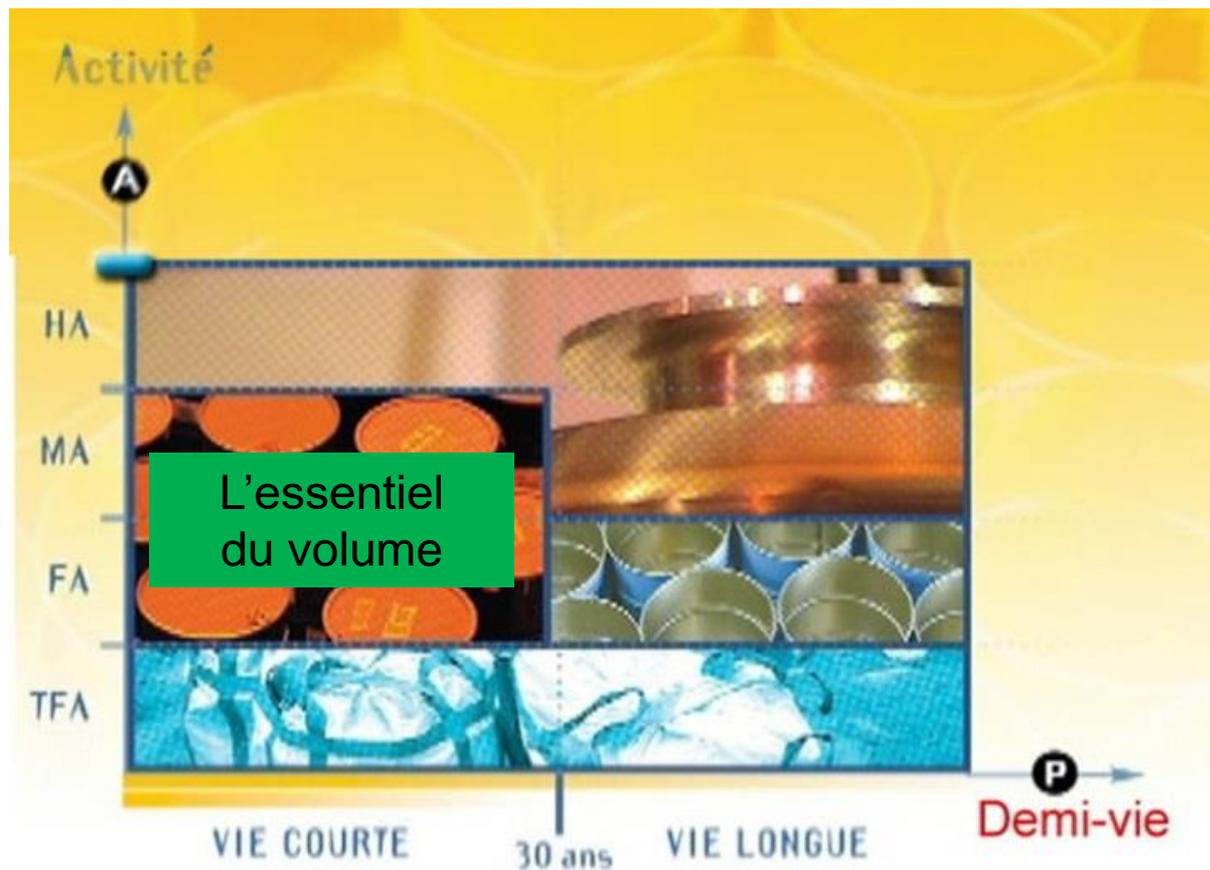


Effluents liquides et gazeux
Arrêté d'autorisation de rejets



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Classification des déchets:



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Stockage des déchets FAMA:

Ces déchets sont entreposés en surface, Le site va faire l'objet d'une surveillance pendant un minimum de 300 ans, soit 10 périodes du césium-137 produit de fission.

Le premier site de stockage (le centre de stockage de la Manche) est aujourd'hui fermé. C'est le centre de stockage de l'Aube (celui de Soulaines) qui est actuellement en activité.



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Stockage des déchets FAMA:

CSM
Fermé



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Stockage des déchets FAMA:

CSA



En exploitation

LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Stockage des déchets FAMA:

CSA



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Préparation des colis pour le CSA



1ère barrière : le colis

Soit en fûts,

soit dans une coque en béton



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Capacité de stockage : 1 million de mètres cube



2^{ème} barrière : l'ouvrage

LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Stockage des déchets TFA :

Ces déchets sont entreposés en surface, à même la terre, compte tenu de la très faible radioactivité, qu'ils contiennent.

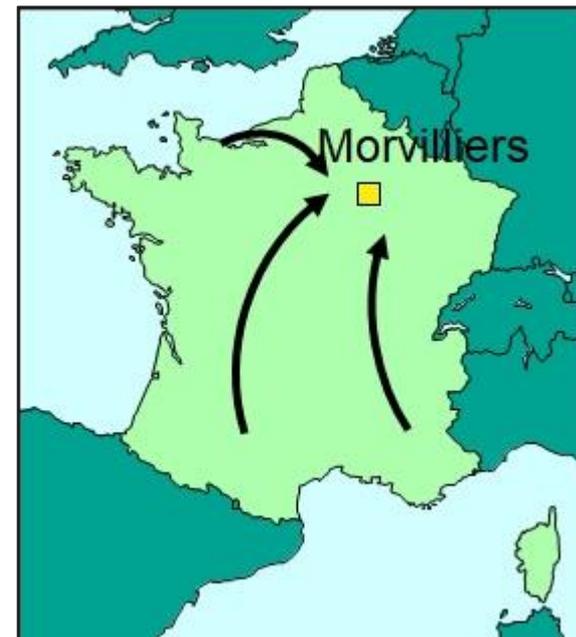
Leur niveau de radioactivité est en général inférieur à 100 becquerels par gramme, c'est-à-dire inférieur à la radioactivité naturelle.

Ce centre s'appelle le Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (CIRES)



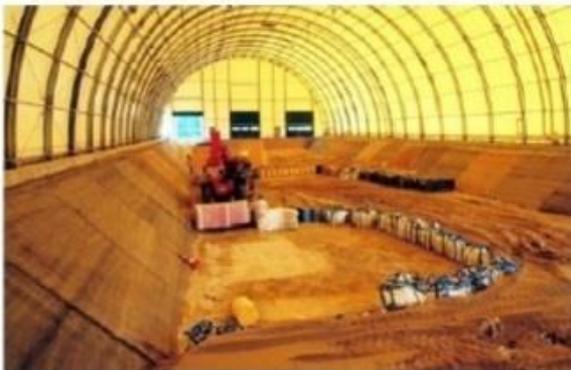
LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Stockage des déchets TFA : Le CIREs



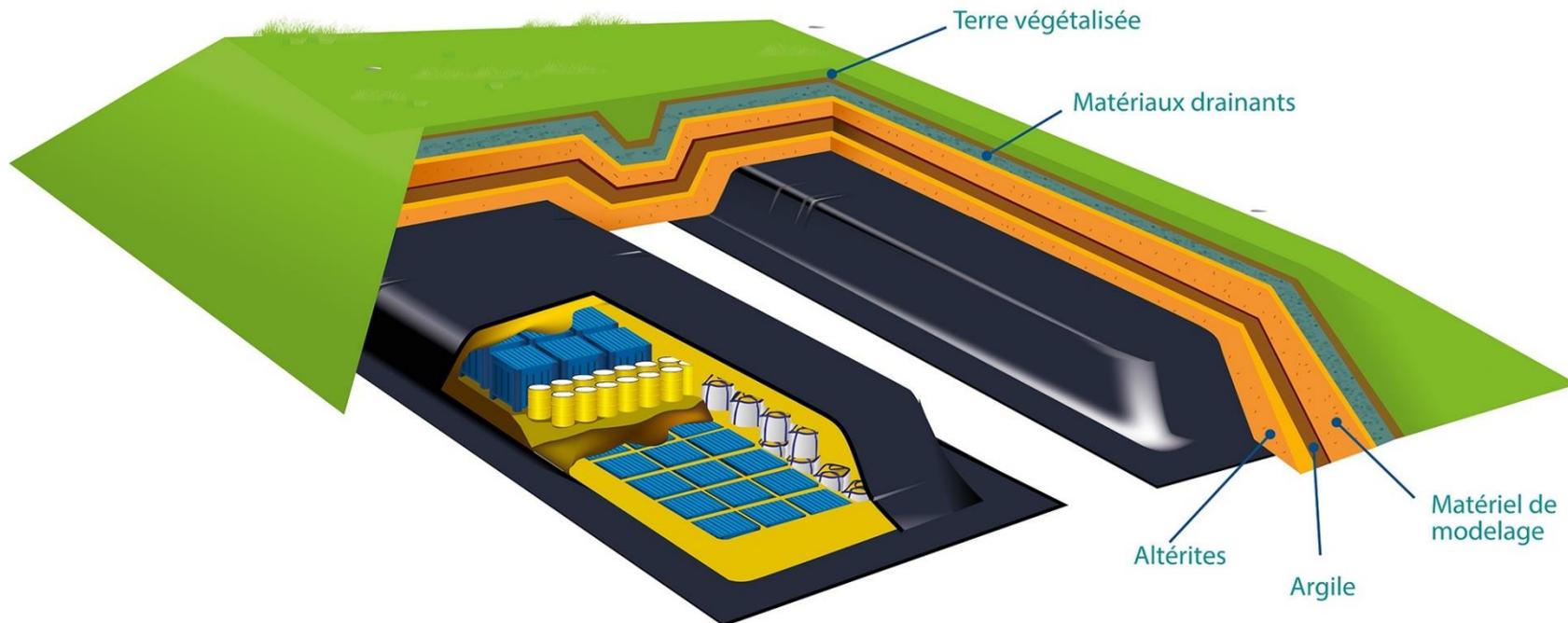
LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Stockage des déchets TFA : Le CIREs



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Stockage des déchets TFA :
Quand le CIREs fermera



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Entreposage des déchets HA et MA vie longue:

Ces déchets n'ont pas encore de filières.

L'ANDRA étudie actuellement à Bure dans la Meuse la possibilité d'entreposage de ces déchets en profondeur.

Celui-ci pourrait être dans une couche d'argilite roche très compacte et imperméable à l'eau.

C'est la loi sur les déchets nucléaires n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs qui a fixé le cadre de la recherche.



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

➤ Loi de 1991

Séparation poussée et transmutation (CEA),
Conditionnement et entreposage de longue durée (CEA),
Stockage en formation géologique profonde (ANDRA).

➤ Loi de 2006

L'ANDRA est chargée de le mettre en œuvre le stockage
profond,
Principe de la réversibilité.

➤ Loi de 2016

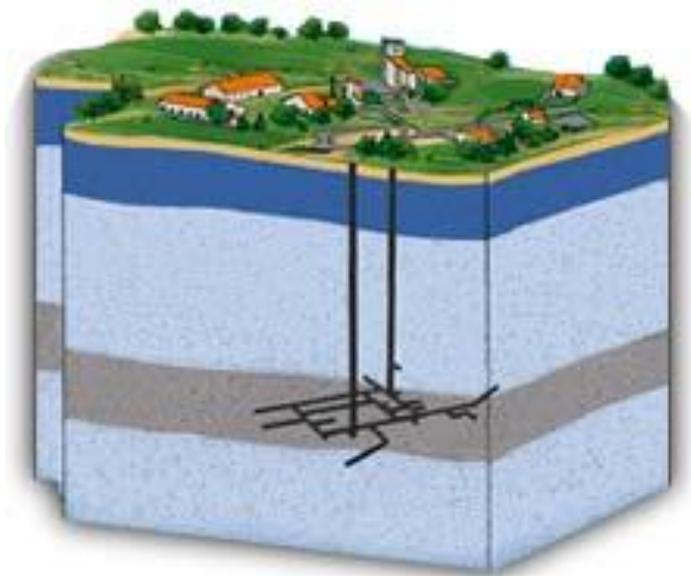
Modalités de la réversibilité,
Phase industrielle pilote.



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Laboratoire souterrain du CMHM :

Études pour entreposage en profondeur entre – 500 et - 600 m. Aucun becquerel dans le laboratoire



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

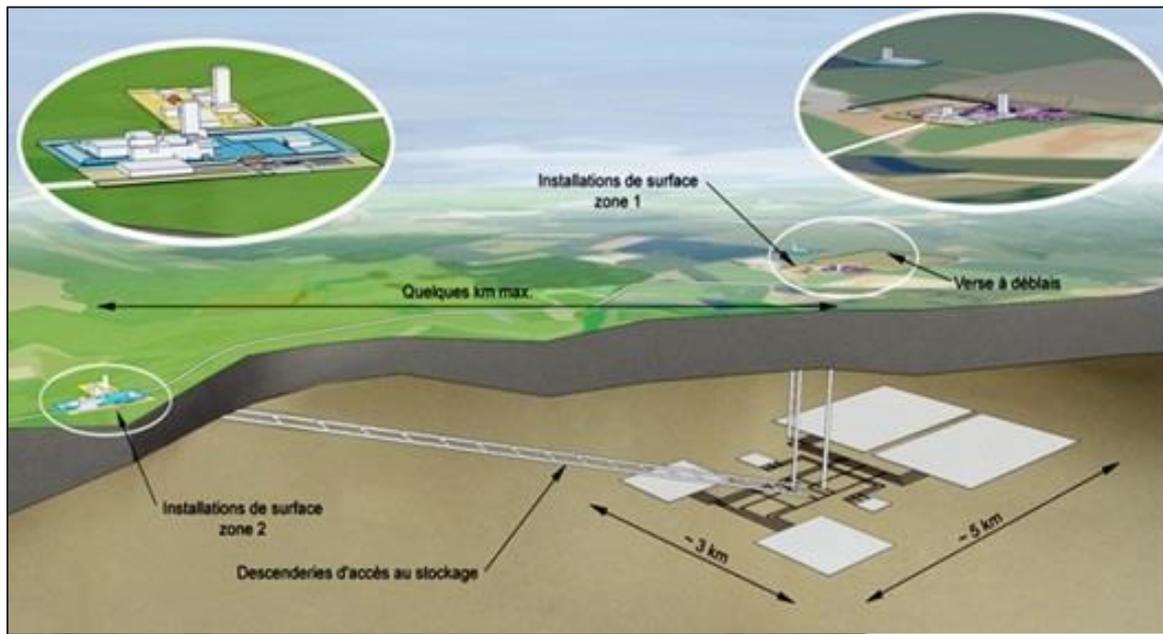
Projet CIGEO:

CIGEO (acronyme de Centre Industriel de stockage GEOlogique) est un projet français de centre de stockage des déchets radioactifs en couche géologique profonde, aussi appelé enfouissement des déchets nucléaires.

Il est conçu pour enfouir (stocker) les déchets radioactifs de haute activité et à vie longue produits par l'ensemble des installations nucléaires françaises, jusqu'à leur démantèlement, et par le traitement des combustibles usés utilisés dans les centrales nucléaires.



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

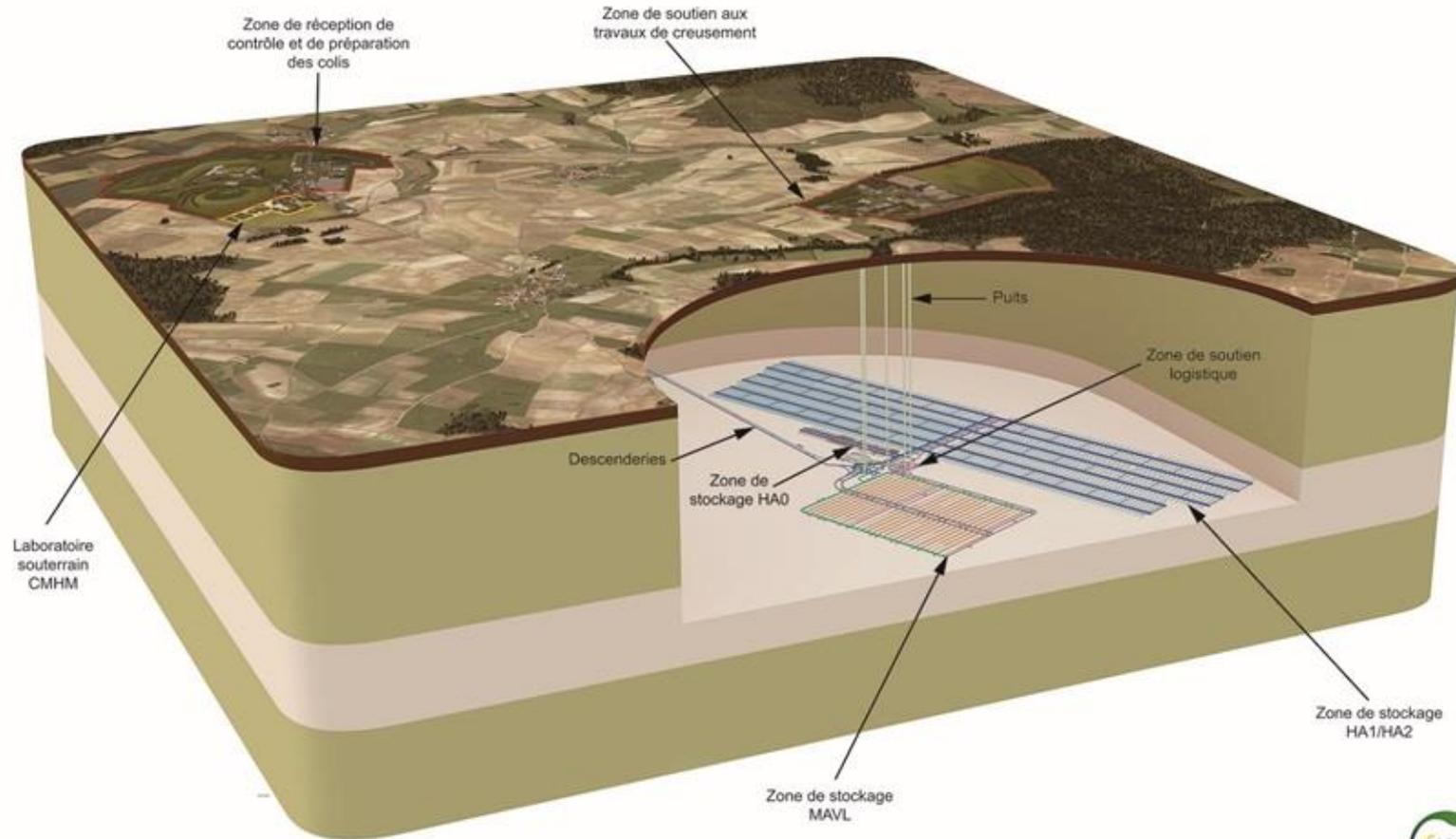


Colis déchets
MA-VL

3^{ème} barrière : la couche géologique

LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Bloc diagramme 3D Cigéo



C.IM.0EKS.15.0005.C

Echelle des ouvrages non respectée.
Pendage des formations géologiques non représenté.



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES



Les déchets MH-VL seront entreposés dans des cylindres en inox puis dans des cubes en béton, stockés dans des galeries. Les déchets HA, qui arriveront aussi dans des cylindres en inox, seront poussés dans des alvéoles de 70 cm de diamètre et d'une centaine de mètres de long. Tout cela grâce à un système d'automates.

“On ne va pas construire toutes les galeries d'un coup, mais stocker et construire en même temps, car on veut se donner la possibilité de profiter de toute nouvelle technologie qui nous aiderait à mieux creuser”, indique-t-on à l'agence.



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Pour mémoire concernant les déchets de haute activité et moyenne activité à vie longue, quelques éléments :

Volume des déchets HA et VL depuis les débuts du nucléaire en France = cube de 14 m de côté.

Objectifs prioritaires :

- Conservation du site
- Vérification de l'intégrité des colis dans le temps
- Éviter les intrusions

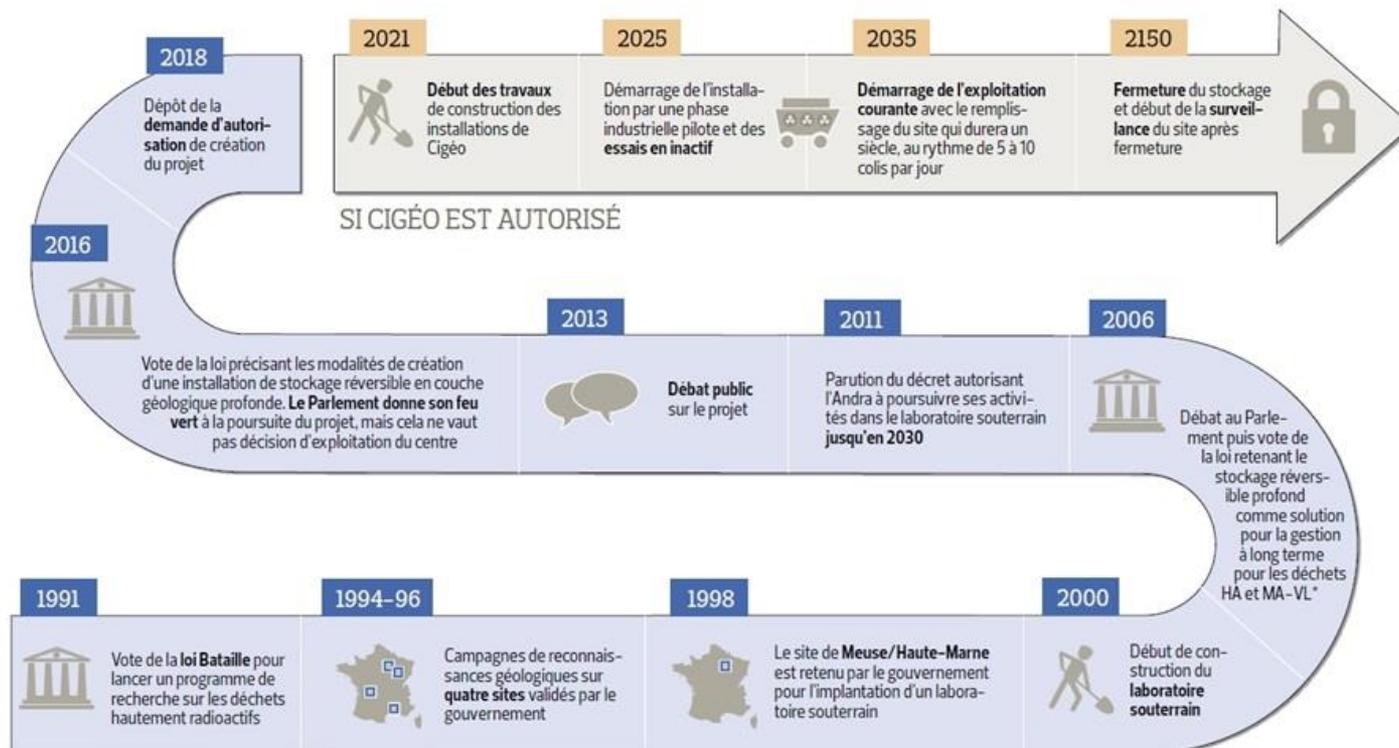


LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Echéancier actuel concernant CIGEO

Chronologie du projet Cigéo

PROJET DE CENTRE INDUSTRIEL DE STOCKAGE DES DÉCHETS RADIOACTIFS EN COUCHE GÉOLOGIQUE PROFONDE



Infographie LE FIGARO

*déchets à haute activité et déchets à moyenne activité et longue vie Source : Cigéo.com



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Conclusions concernant les déchets nucléaires

Faibles quantités

2 kg par an et par habitant (dont surtout 20 g)

Un seul centre de stockage par type de déchet

Tri sélectif

Aucun déchet n'est « abandonné »

90 % auront disparu dans 300 ans → stockage en surface

20 g par an et par habitant (3 pièces de 1 €) → stockage profond



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Conclusions concernant les déchets nucléaires

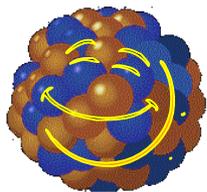
Vision de l'avenir

Pour la première fois dans l'histoire, l'homme se préoccupe de ce qui se passera dans des dizaines de milliers d'années.

Les Finlandais se sont penchés sur la question dès 2010 en réalisant le film « [Into Eternity](#) ».

Le film traite du stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs au complexe d'Onkalo, en Finlande. Le bâtiment étant conçu pour exister 100 000 ans, le film pose la question de l'héritage laissé aux générations futures.





POUR CONCLURE



Voilà !
Notre périple se termine ici.

Mais il y a encore beaucoup à faire et pour les jeunes lecteurs, il faut savoir qu'il y a du travail pour de nombreuses années, puisqu'il faudra démonter et nettoyer toutes ces installations.

