

CGEA: « Matinées de Formation et de Veille Scientifique et Technologique »

Emmanuelle Galichet

Enseignante-chercheure Sciences et Technologies Nucléaires

Le Cnam



Sommaire

- ❑ Séminaire n°1 : Introduction à la Physique Nucléaire
- ❑ Séminaire n°2 : Réacteurs Nucléaires
- ❑ **Séminaire n°3 : Cycle du Combustible**
- ❑ Séminaire n°4 : Nouveaux Types de Réacteurs
- ❑ Séminaire n°5 : MIX Énergétique dans le Contexte du Réchauffement Climatique

Séminaire n°3 : Cycle du Combustible

- ❑ Introduction

- ❑ L'amont du cycle
 - ressources, mines
 - étapes amont: concentration, conversion, enrichissement
 - fabrication crayon combustible

- ❑ Le combustible en cœur

- ❑ L'aval du cycle:
 - recyclage : matières et déchets
 - gestion des déchets radioactifs

- ❑ Le futur

Composition isotopique de l'uranium naturel

- ❑ Le minerai d'uranium est appelé uraninite, ou pechblende.
- ❑ L'uranium est un élément chimique radioactif présent à l'état naturel en quantité significative sur Terre.
- ❑ Il est composé de 3 isotopes : U-238 (99,28%), U-235 (0,71%) et U-234 (traces).
- ❑ Il peut être créé artificiellement en laboratoire : 25 isotopes ont été caractérisés.

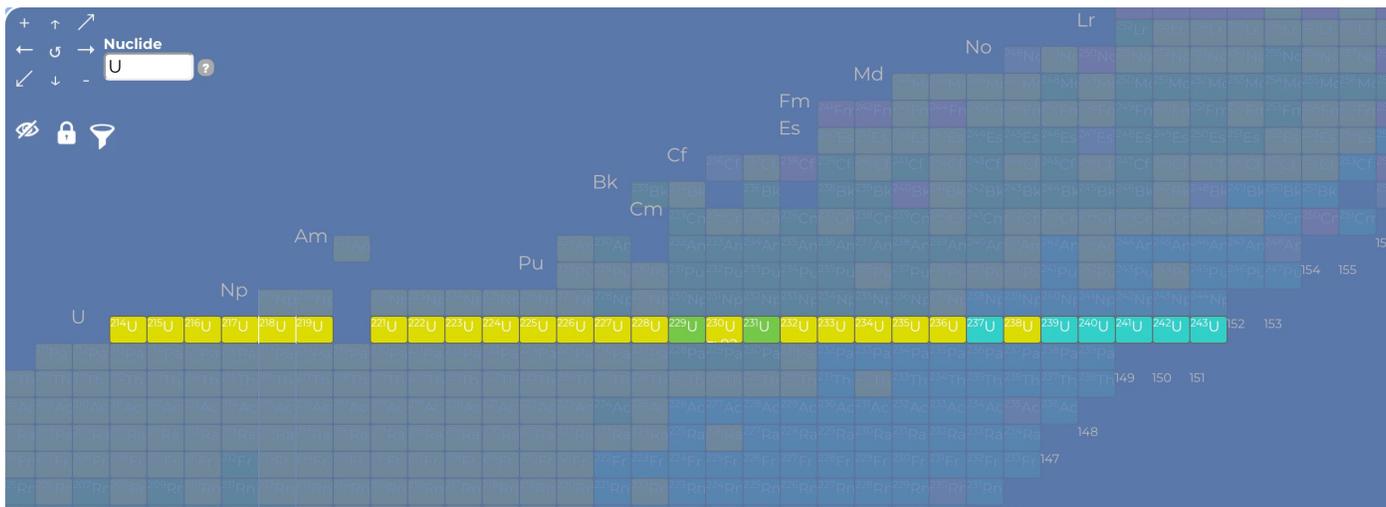


0,056 kg d'U-234

7 kg d'U-235

1 tonne

993 kg d'U-238

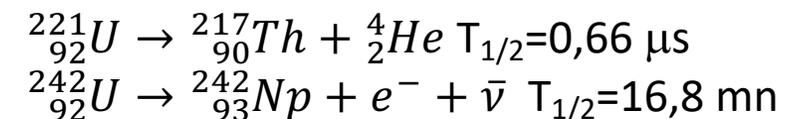


Live Chart of Nuclides
nuclear structure and decay data
email: nds.contact.point

Color zones by ?
value quantile

Main Decay Mode ...

- alpha
- EC+ beta+
- beta-
- p
- n
- EC
- SF
- Stable



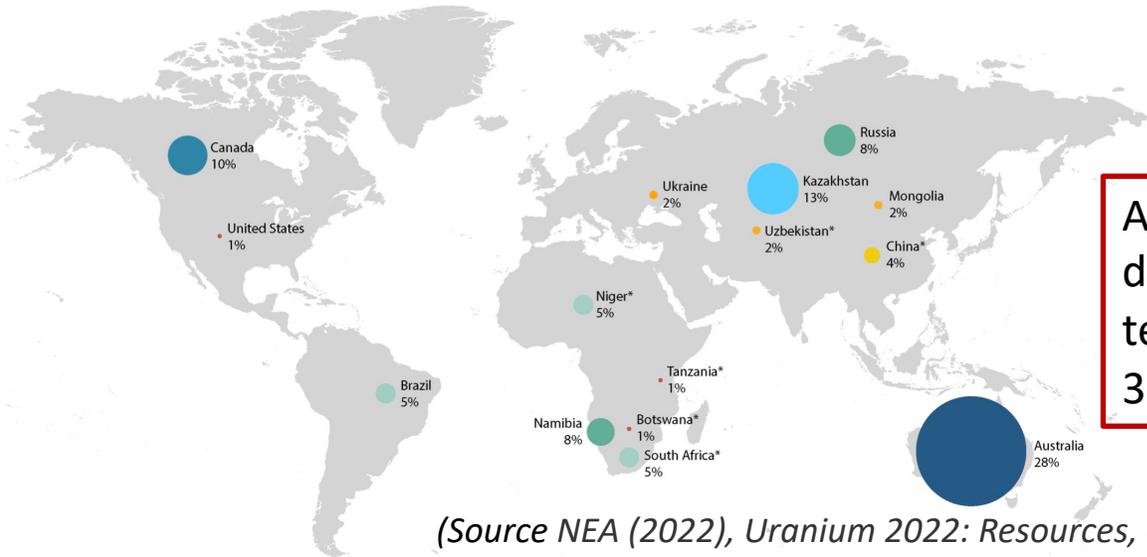
Informations générales sur l'uranium

- ❑ L'uranium est un **élément naturel**, radioactif, dont l'abondance naturelle est supérieure à celle d'autres éléments comme l'or ou l'argent. On retrouve de l'uranium dans la croûte terrestre, surtout dans les terrains granitiques et sédimenteux, mais aussi dans les océans.
- ❑ Dernier élément de de la classification périodique. Il appartient à la famille **actinides** (15 éléments).
- ❑ À l'instar de la plupart des métaux, l'uranium ne se trouve pas dans la nature sous sa forme pure. Il est combiné à d'autres éléments pour former principalement deux minerais dits **uranifères**, l'uranite (UO_2) et la pechblende (U_3O_8).
- ❑ L'exploitation de ces minerais se fait dans des mines au travers d'une vingtaine de pays dans le monde.
- ❑ En 2019, la production mondiale est de 54.752 tonnes d'uranium.
- ❑ Leader mondial : Kazatomprom, détenue à 100% par le gouvernement kazakh (plus d'un cinquième de la production mondiale).



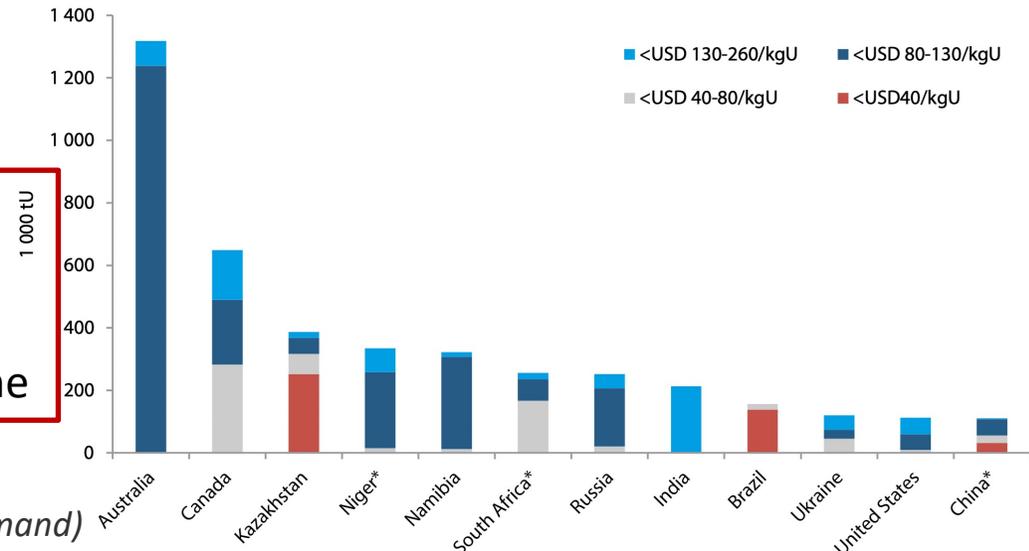
Ressources en uranium

Distribution des ressources conventionnelles d'uranium au 1^{er} janvier 2021, dont le prix < 130 \$ US/kg U



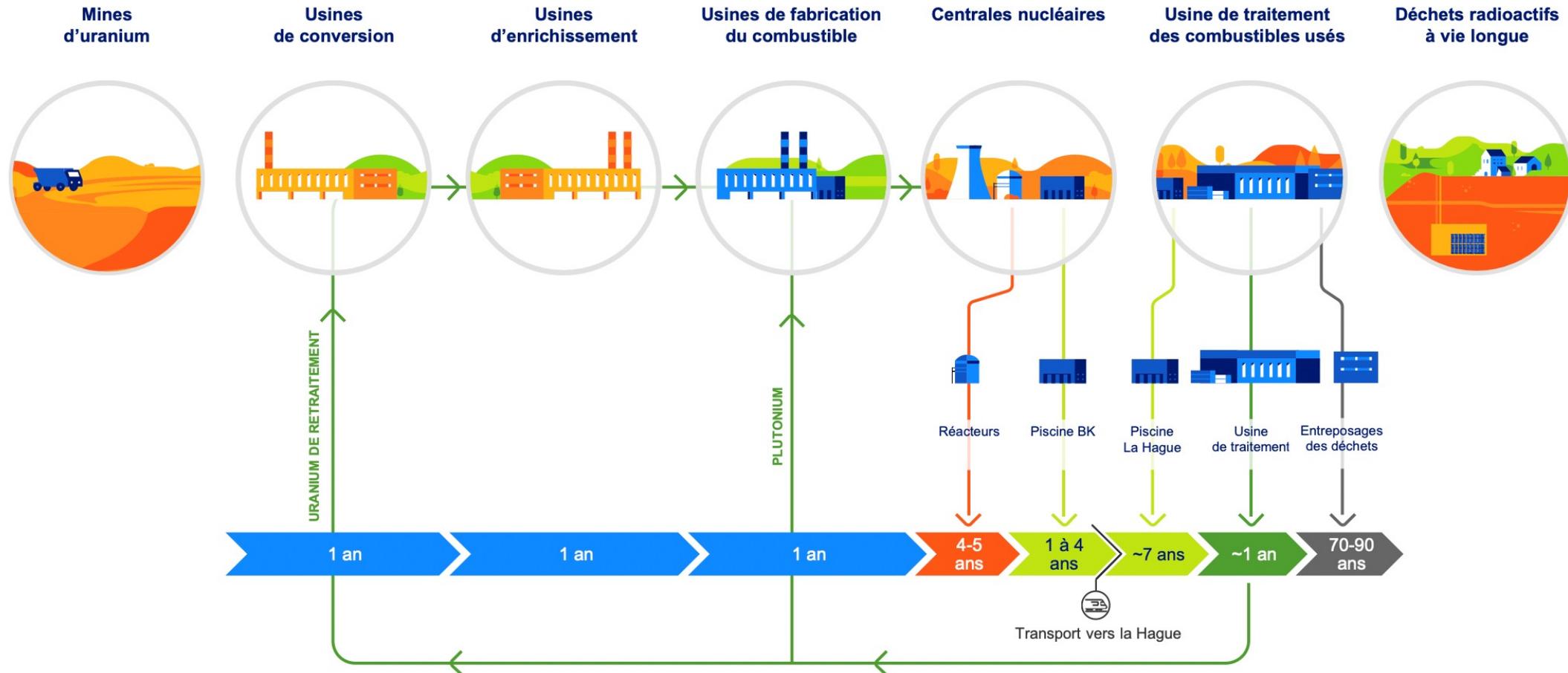
Abondance dans l'écorce terrestre :
3 g/t en moyenne

Répartition des ressources conventionnelles d'uranium récupérables raisonnablement



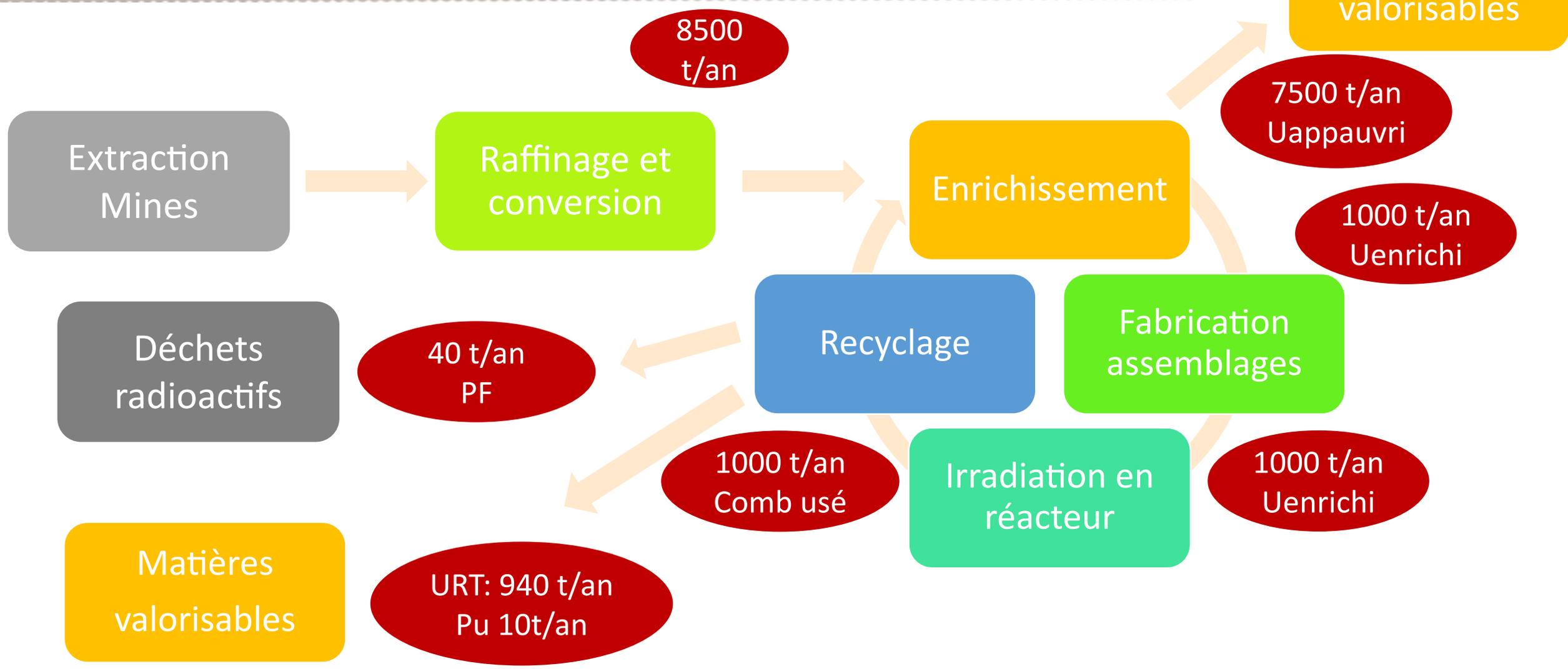
- Consommation actuelle dans le monde (autour de 60 000 tonnes par an)
- Bonne répartition des ressources conventionnelles -> permet facilement la diversification des fournisseurs
- Possibilité de stocks importants (à la différence des hydrocarbures l'uranium est non inflammable et très peu radioactif) : environ 10 ans pour la production française.
- Recyclage combustible utilisé : réduit les besoins en uranium naturel (10 % de l'électricité nucléaire française est produite à partir de matières recyclées)

Le cycle de vie du combustible : ~15 ans



(Source HCTISN)

Cycle du combustible simple



Le cycle du combustible



□ Ensemble des opérations :

- Extraction des minerais de l'uranium,
- Fabrication de combustible nucléaire,
- Recyclage,
- Gestion du combustible irradié.

□ La France possède toutes les étapes du cycle du combustible.

□ Les entreprises Orano, EDF et Framatome ont une activité dans le cycle du combustible.

□ Amont du cycle: enrichissement entre 3-5% en uranium-235.

□ Aval du cycle : recyclage du combustible utilisé et stockage.

URT/URE

☐ URT : uranium de retraitement

- uranium issu du combustible utilisé.
- 0,9% d'uranium-235 et beaucoup d'autres isotopes de l'uranium en particulier U-236 (poison neutronique) et U-232 (fils Tl-208, émetteur γ 2,6 MeV).
- Fin 2020 : 34 100 t sur le territoire français dont 25 000 t appartient à EDF.
- Augmentation d'environ 1000 t/an.
- Possibilité d'être réutilisé en réacteur en le ré-enrichissant.

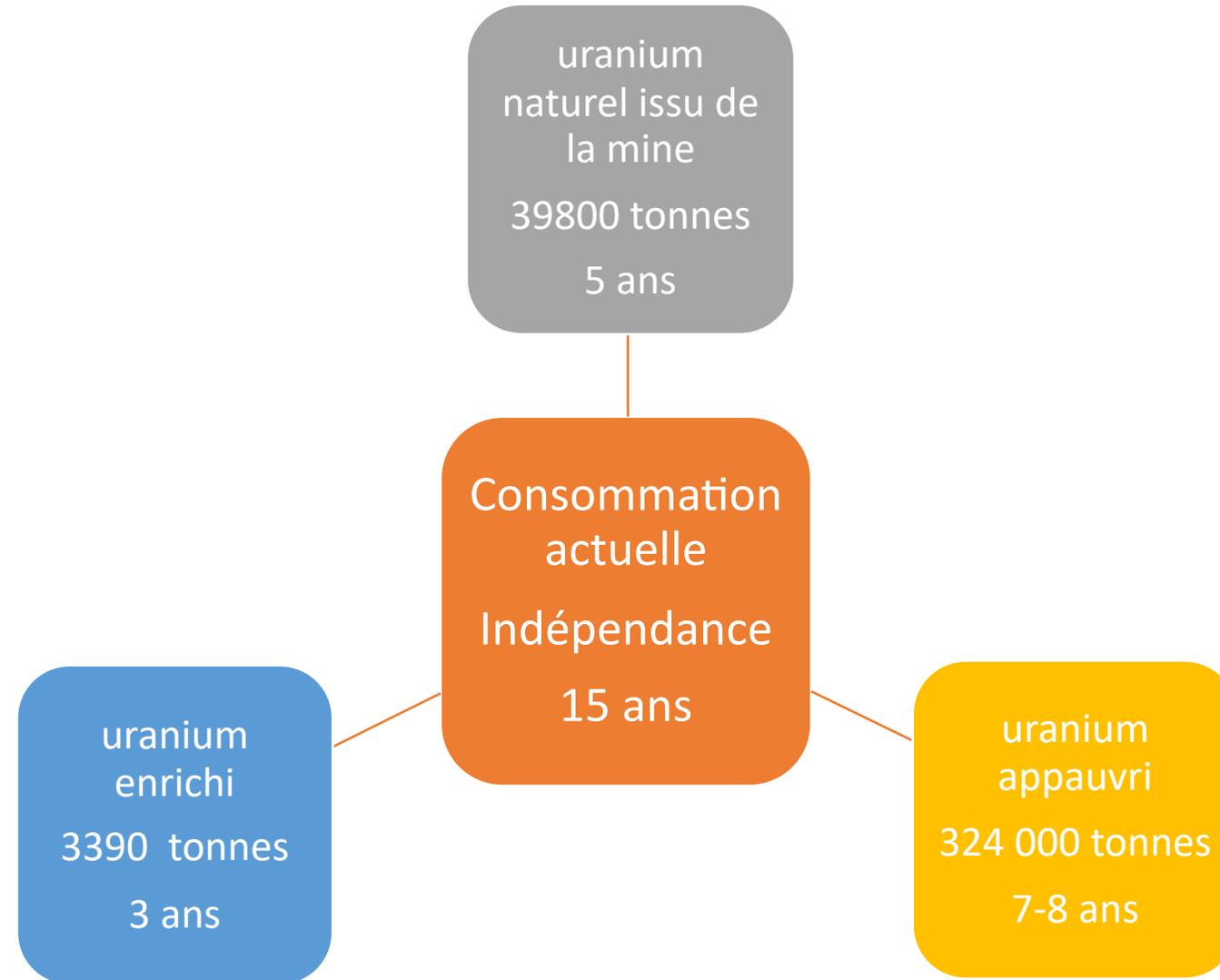
☐ URE : uranium de retraitement enrichi

- Aujourd'hui 4 réacteurs (Cruas) peuvent utiliser ce combustible.
- Il faut un atelier spécifique à la conversion de l'URT et des chaînes de centrifugeuses exclusives pour cet enrichissement du fait de la présence de l'URT plus radioactif que l'uranium naturel : contraintes de radioprotection.

Isotope	Uranium naturel	Uranium de retraitement
232	0	0.0023
233	0	0.106
234	57	239
235	7204	8390
236	0	5145
238	992739	986227

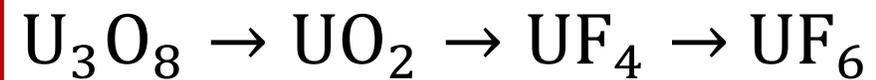
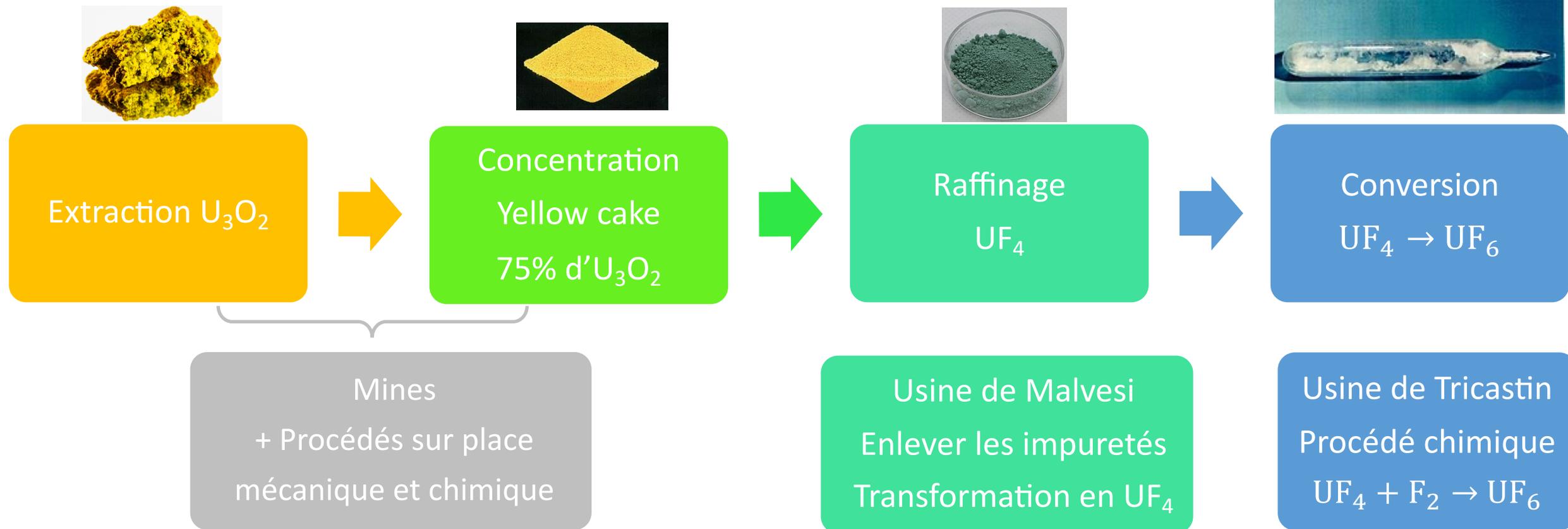
(Source Histoire et technique des réacteurs nucléaires et de leurs combustibles, Dominique Grenèche, EDP sciences)

Les stocks d'uranium en France



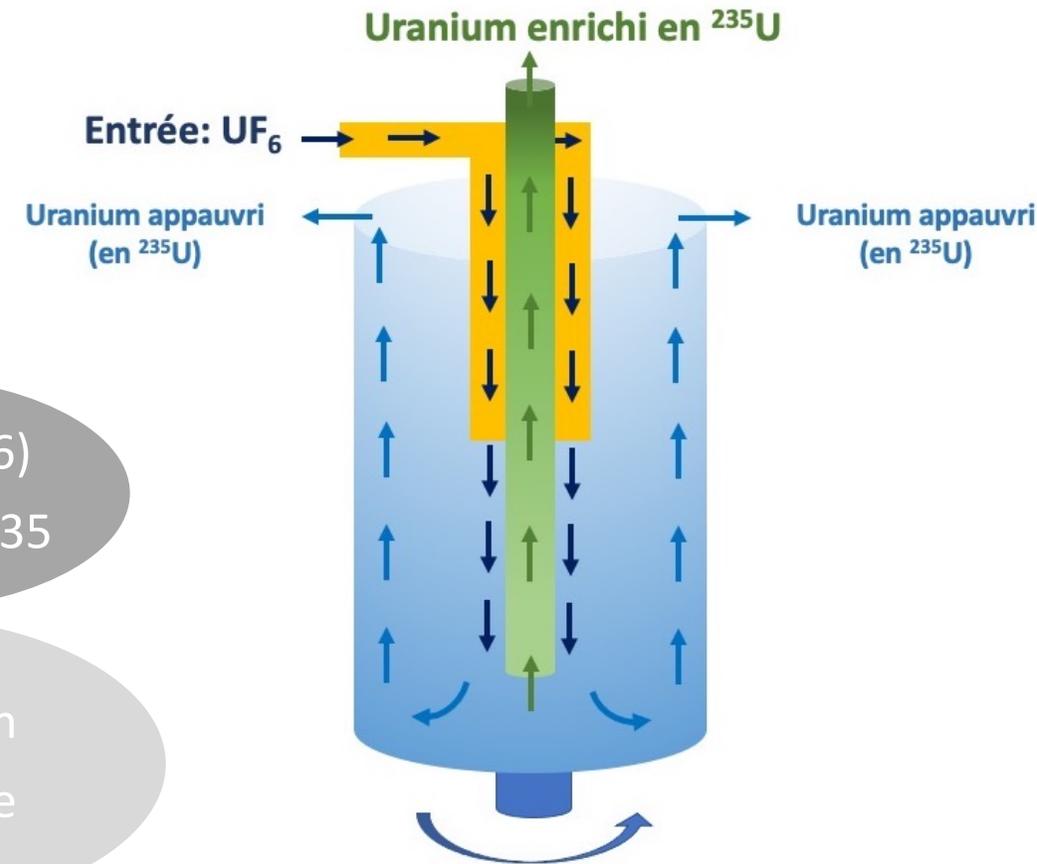
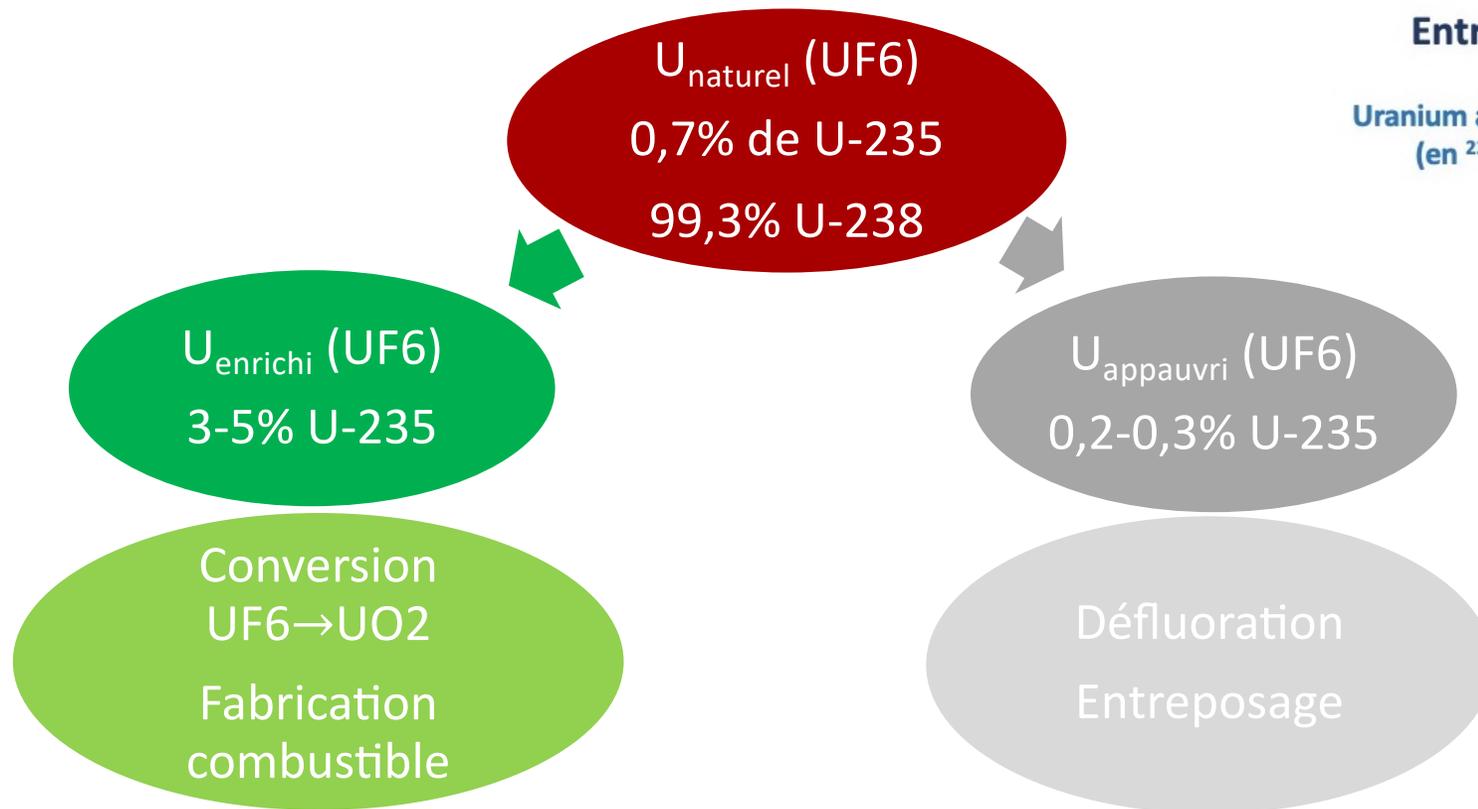
(Source Andra)

Les opérations chimiques



L'enrichissement

- Augmenter la teneur en uranium-235 dans le combustible nucléaire.
- Procédé utilisé : centrifugation.

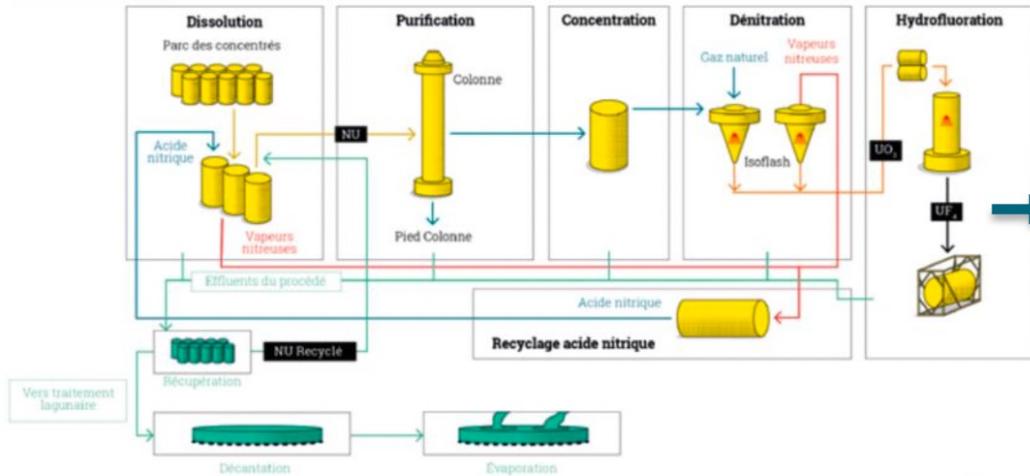


(Source chem4us)

Résumé des procédés chimiques industriels

Concentrés miniers

Orano Malvési (CXII)



**$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$
= 0,72%**

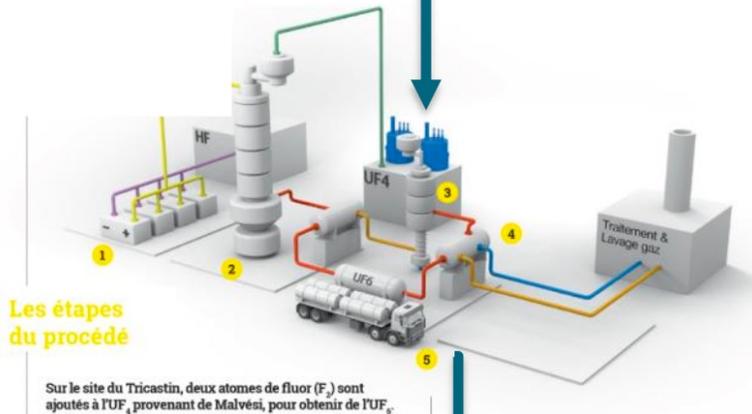
Activité spécifique 25 kBq/g
(activité alpha de l'U)

Activité spécifique
15 kBq/g

**$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$
~ 0,2%
UF₆ appauvri**

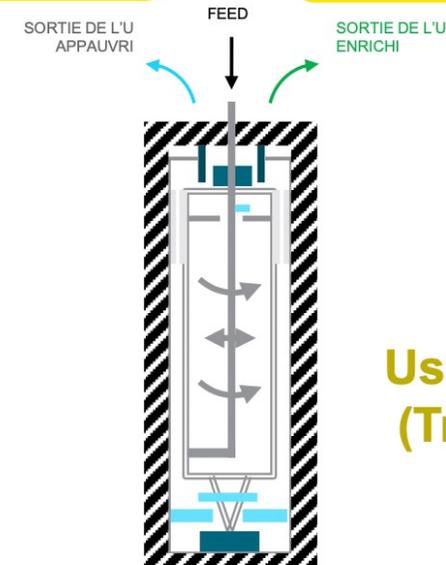
Activité spécifique
de 80 à 130 kBq/g

**$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$
= 3 à 5%
UF₆ enrichi**



Les étapes du procédé

Usine Ph Coste (Tricastin)



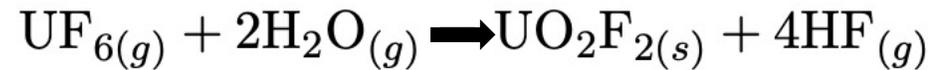
Usine GB II (Tricastin)

UF₆ naturel

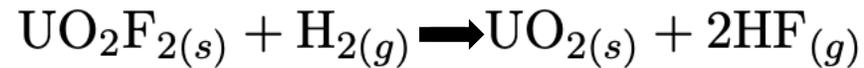


Procédé de conversion $UF_6 \rightarrow UO_2$ (voie sèche)

- Hydrolyse de l' UF_6 gazeux par de la vapeur d'eau à $300^\circ C$ pour former le difluorure d'uranyle UO_2F_2 :

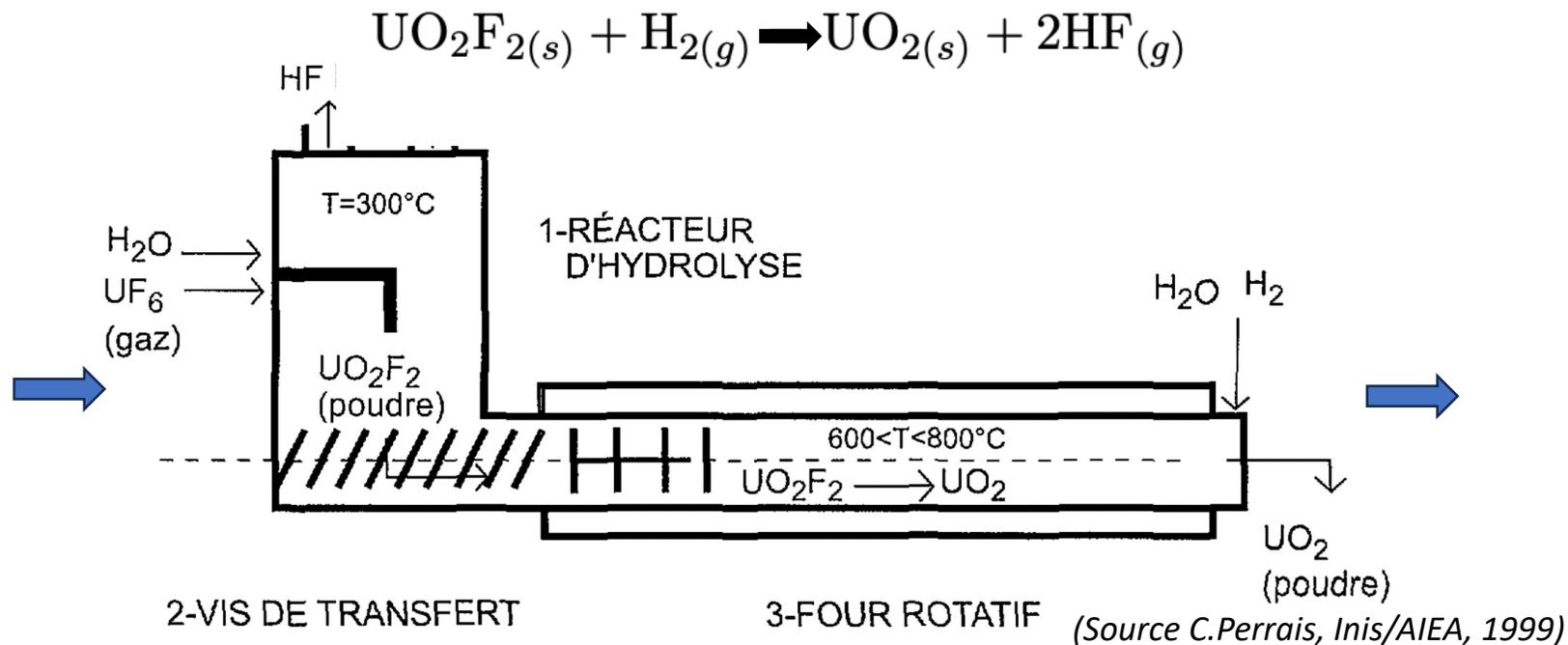


- Pyrohydrolyse réductrice de la poudre UO_2F_2 en poudre UO_2 dans un four à $750^\circ C$.

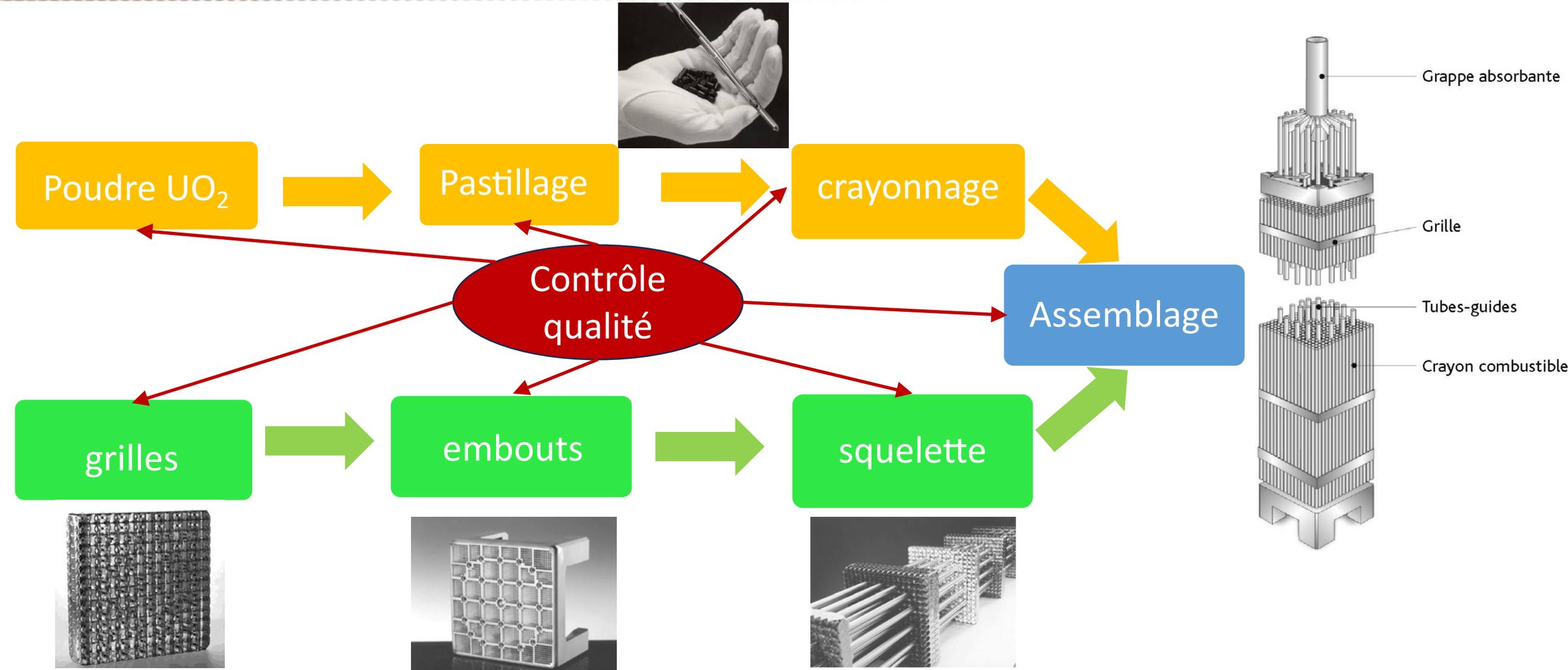


Enrichissement
en uranium-235
de l' UF_6

Fabrication des
pastilles d' UO_2



La fabrication des assemblages de combustible



Schémas

Crayons

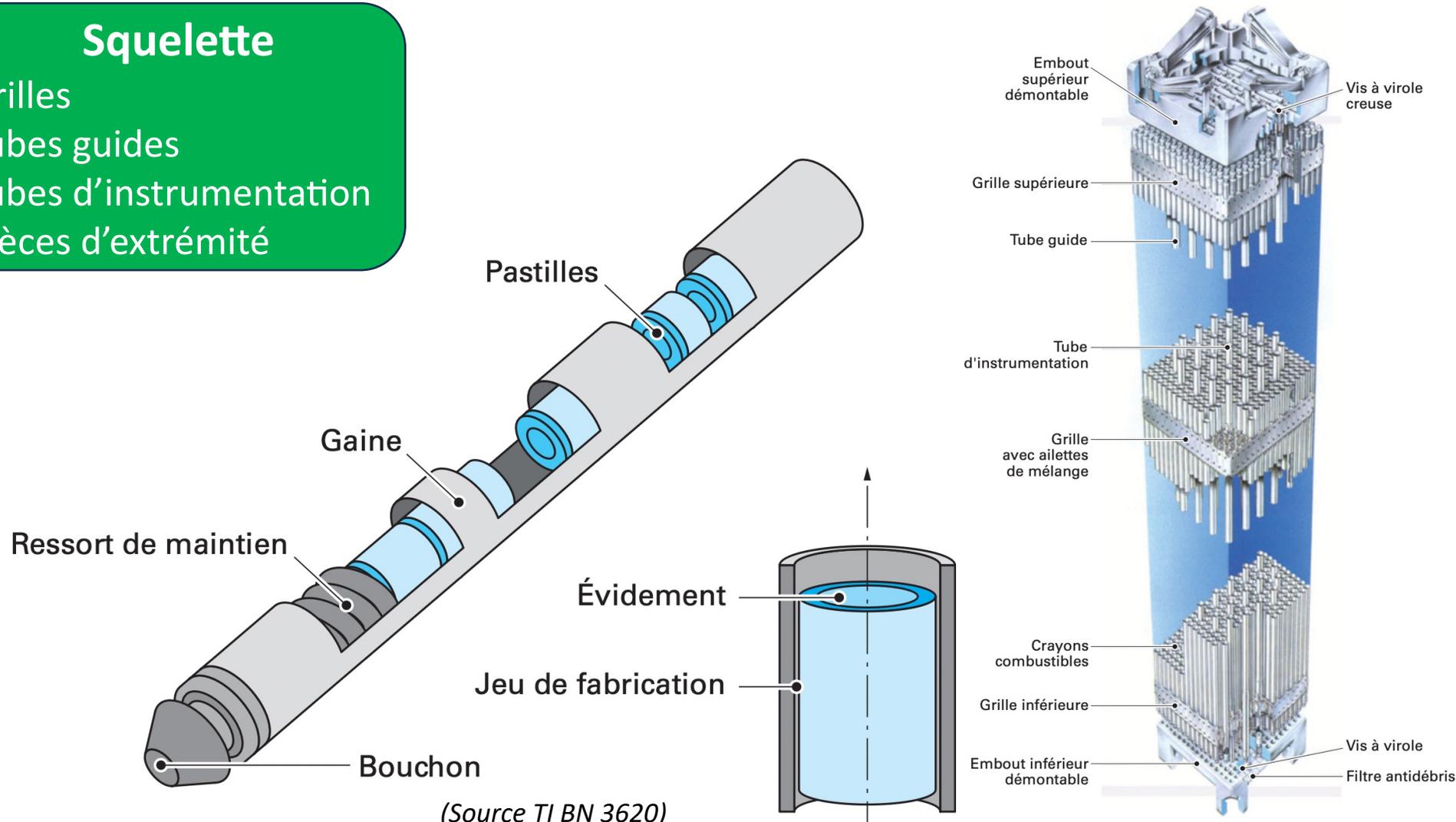
Pastilles d'UO₂
Gaines
Bouchons et ressorts

Squelette

Grilles
Tubes guides
Tubes d'instrumentation
Pièces d'extrémité

Assemblage

Réseau 17x17
264 crayons
200 assemblages



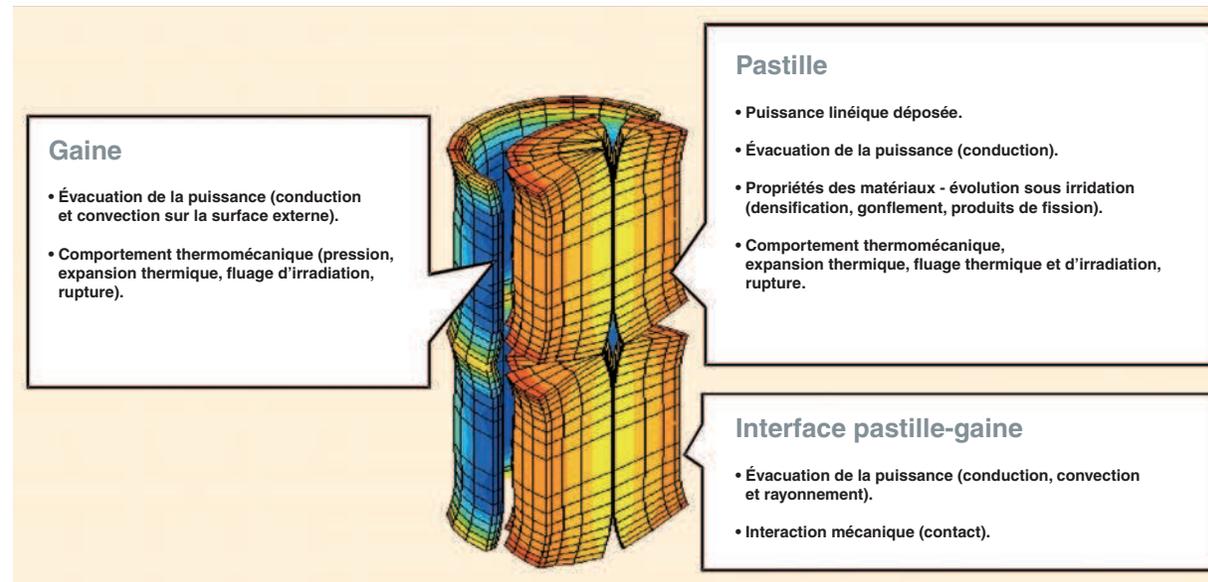
Evolution des cœurs et assemblages combustibles

Réacteurs	CPY 900 MWe	P4 1 300 MWe	N4 1 450 MWe	EPR 1 600 MWe
Année de mise en service	1977	1984	1991	–
Cœur :				
– nombre d’assemblages.....	157	193	205	241
– hauteur active (m)	3,66	4,27	4,27	4,20
– masse d’UO ₂ dans le cœur..... (t)	82	118	125	146
Assemblages :				
– réseau	17 × 17	17 × 17	17 × 17	17 × 17
– longueur hors tout..... (m)	4,10	4,85	4,85	4,80
– encombrement.....(mm)	214 × 214	214 × 214	214 × 214	214 × 214
– masse.....(kg)	664	773	773	785
– nombre de crayons par assemblage.....	264	264	264	265
– nombre de grilles par assemblage.....	8	10	10	10
– diamètre extérieur gaine.....(mm)	9,5	9,5	9,5	9,5
– épaisseur de la gaine(mm)	0,57	0,57	0,57	0,57
– longueur du crayon (m)	3,9	4,5	4,5	4,5
– diamètre pastille(mm)	8,2	8,2	8,2	8,2

(Source TI BN 3620)

Qu'attend-on d'un combustible nucléaire?

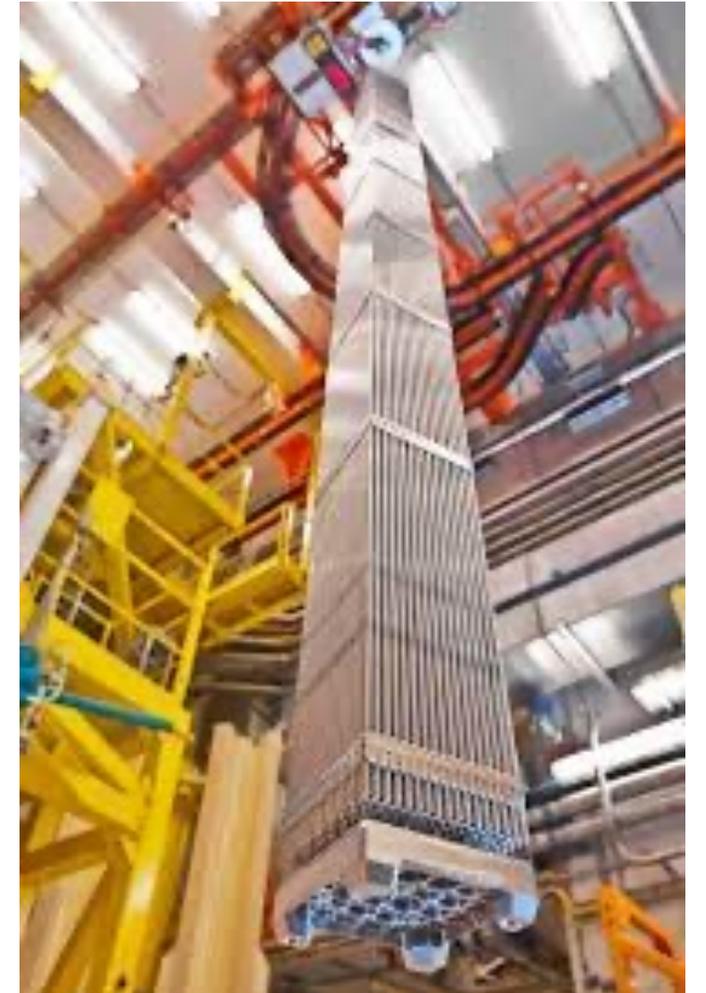
- ❑ Fournir la puissance attendue tout au long de la durée des cycles prévus en supportant les variations de puissance imposées par le réseau.
- ❑ Permettre l'évacuation de la chaleur,
- ❑ Confiner les produits radioactifs dans les éléments combustible en conditions de fonctionnement normales, incidentelles et accidentelles,
- ❑ Utiliser au mieux la matière fissile afin d'obtenir le coût de cycle le plus économique.



(Source CEA)

Exigences techniques et technologiques

- ❑ Puissance dégagée par unité de volume $\approx 400 \text{ W/cm}^3$ (réacteurs actuels)
- ❑ Grande fiabilité et durée de vie élevée : l'assemblage combustible, sa structure et les crayons qui le constituent, doivent résister sans défaillance pendant toute la durée du séjour en réacteur.
- ❑ Matériaux de structure de l'assemblage et des gaines doit être résistants à l'irradiation et à la corrosion.
- ❑ Même en situations accidentelles extrêmes, on doit pouvoir continuer de le refroidir.
- ❑ Malgré ces exigences de performance, l'assemblage combustible doit rester simple à :
 - fabriquer, manutentionner, transporter, réparer,
 - puis, après usage, simple à entreposer.
- ❑ En France on exige, qu'il soit "traitable"(récupérer U et Pu).



La gaine en zircaloy

❑ La gaine doit :

- participer au maintien de la géométrie du combustible dans le cœur
- assurer le confinement du combustible et des produits de fission.
- avoir une bonne capacité à évacuer la chaleur produite dans le crayon.

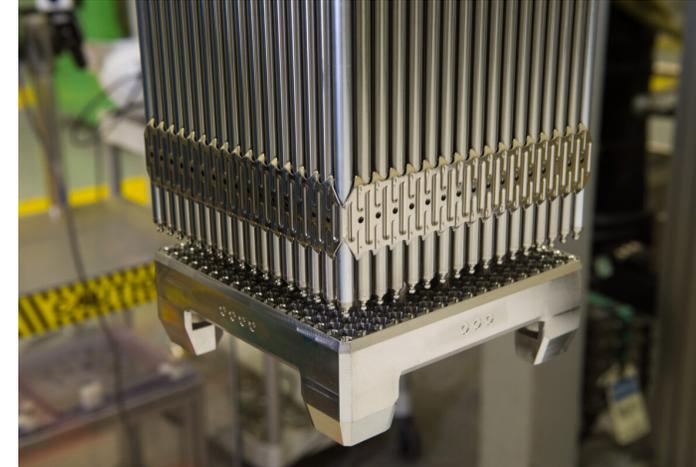
❑ Par conséquent le matériau choisi doit avoir:

- une faible section efficace d'absorption pour les neutrons thermiques,
- une bonne conductivité thermique,
- une bonne résistance mécanique, même à haute température,
- une bonne étanchéité,
- une bonne résistance à la corrosion dans toutes les situations, y compris les situations accidentelles.

❑ Choix pour les REP: alliages de zirconium le Zircaloy, épaisseur d'oxyde de Zr $\approx 580 \mu\text{m}$

❑ Test en 2023: nouveau combustible 100 % EATF (Enhanced Accident Tolerant Fuel)

- gaines en alliage de zirconium revêtues de chrome,
- pastilles dopées à l'oxyde de chrome.



A retenir sur l'amont du combustible

- ❑ Un réacteur nucléaire a besoin d'un combustible dont la teneur en uranium-235 fissile se situe entre 3% et 5%.
- ❑ Dans la croûte terrestre, l'uranium naturel (sous forme uranite UO_2 ou pechblende U_3O_8) dont l'abondance est d'environ 3g/tonne de minerai contient seulement 0,7% d'uranium-235.
- ❑ Plusieurs étapes chimiques permettent de le transformer et de le convertir sous une forme liquide (UF_6) permettant l'enrichissement.
- ❑ Comment fait-on? Le procédé industriel le plus utilisé est l'ultracentrifugation.
- ❑ C'est la différence de masse entre les isotopes d'uranium-235 et 238 qui est utilisée : les molécules d' UF_6 avec l'uranium-238 plus lourdes vont être projetées en périphérie alors que celles avec l'uranium-235 restent au centre de la centrifugeuse.
- ❑ Trois acteurs principaux assurent l'enrichissement d'uranium dans le monde : le russe Tenex, l'européen Urenco et le français Orano.
- ❑ Framatome est responsable de la fabrication de pastilles de céramique à base d' UO_2 :
 - ❑ Pastilles de dimensions : $D=8,19$ mm et $H=13,5$ mm ; masse = 7g.
 - ❑ Crayon de dimension : 4 m de long, 1 cm de diamètre, 265 pastilles.

Le combustible en cœur

Chaîne d'évolution de l'uranium-235

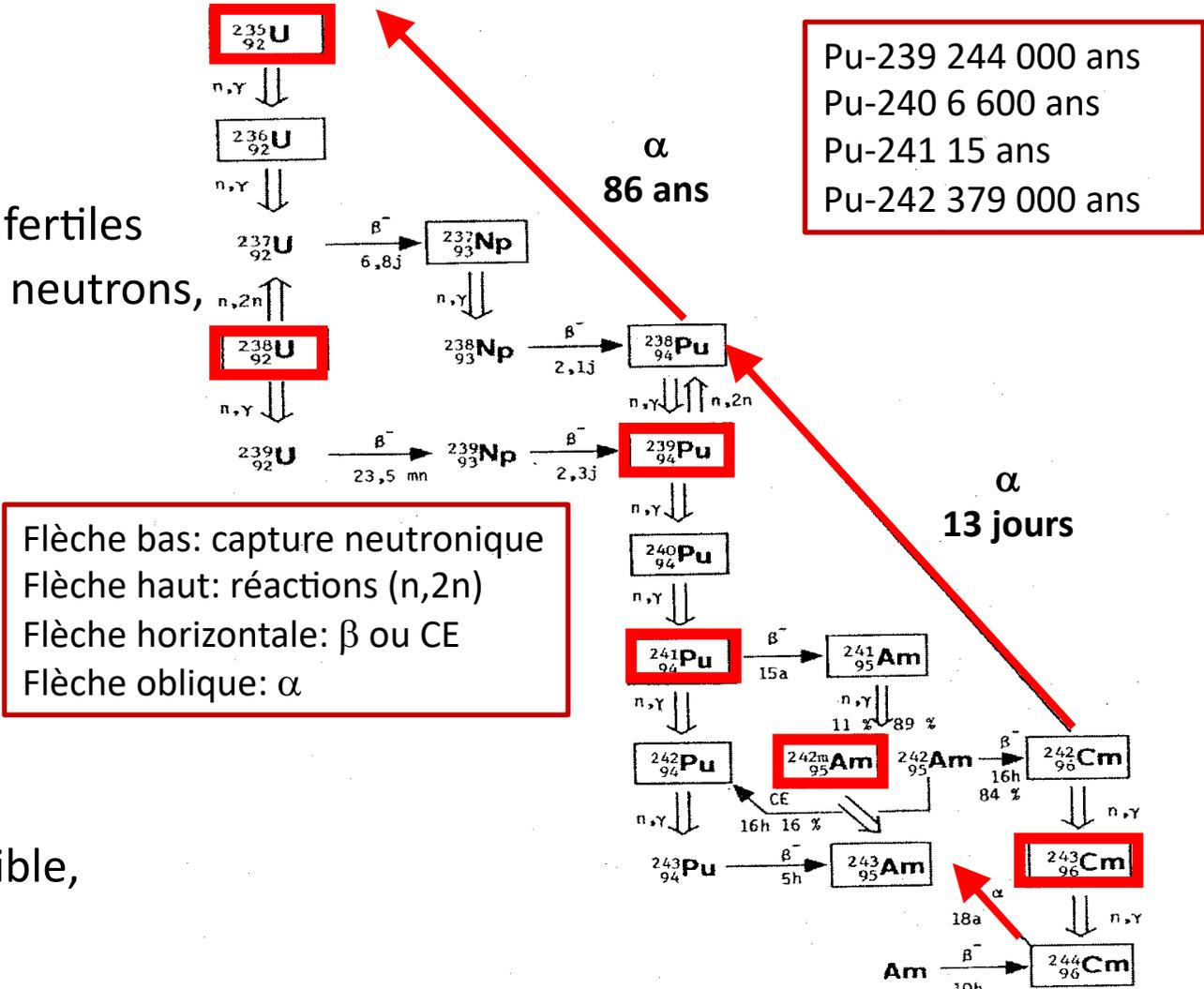
❑ Usure du combustible :

- Consommation des matières fissiles initiales,
- Formation de matière fissile à partir de matières fertiles
- Apparition d'isotopes non fissiles, absorbeurs de neutrons,
- Accumulation des PF.

➔ **Renouvellement du combustible**

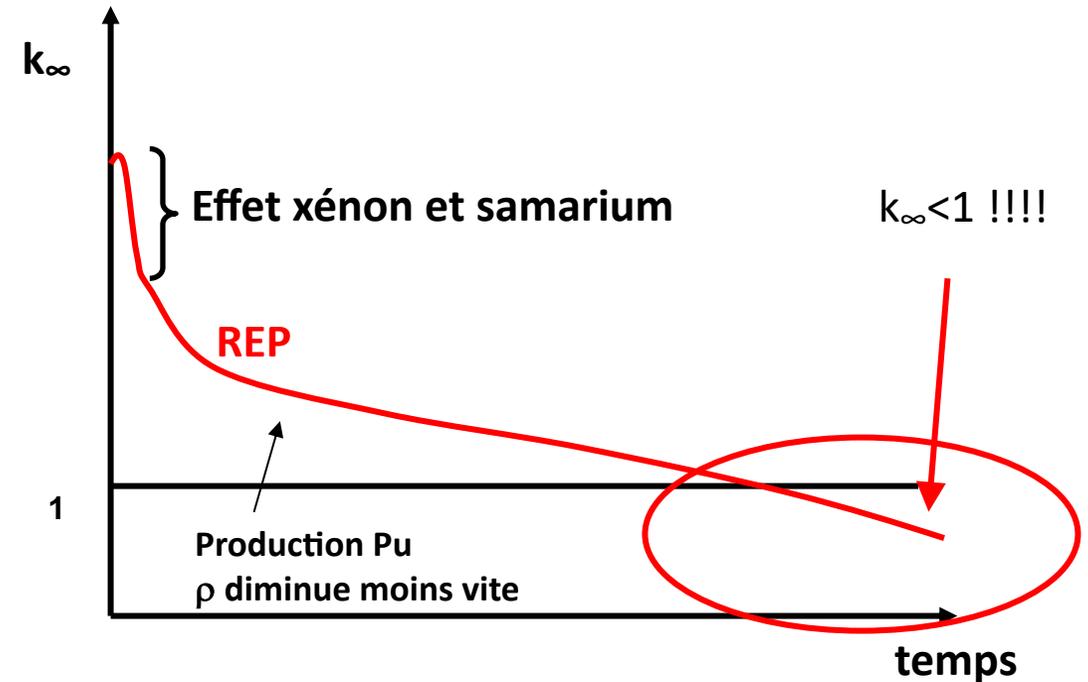
❑ Etudier l'évolution du combustible c'est :

- Prévoir la longueur du cycle,
- Respecter les marges de sureté,
- Connaître l'irradiation optimale pour le combustible,
- Prévoir la gestion du combustible.



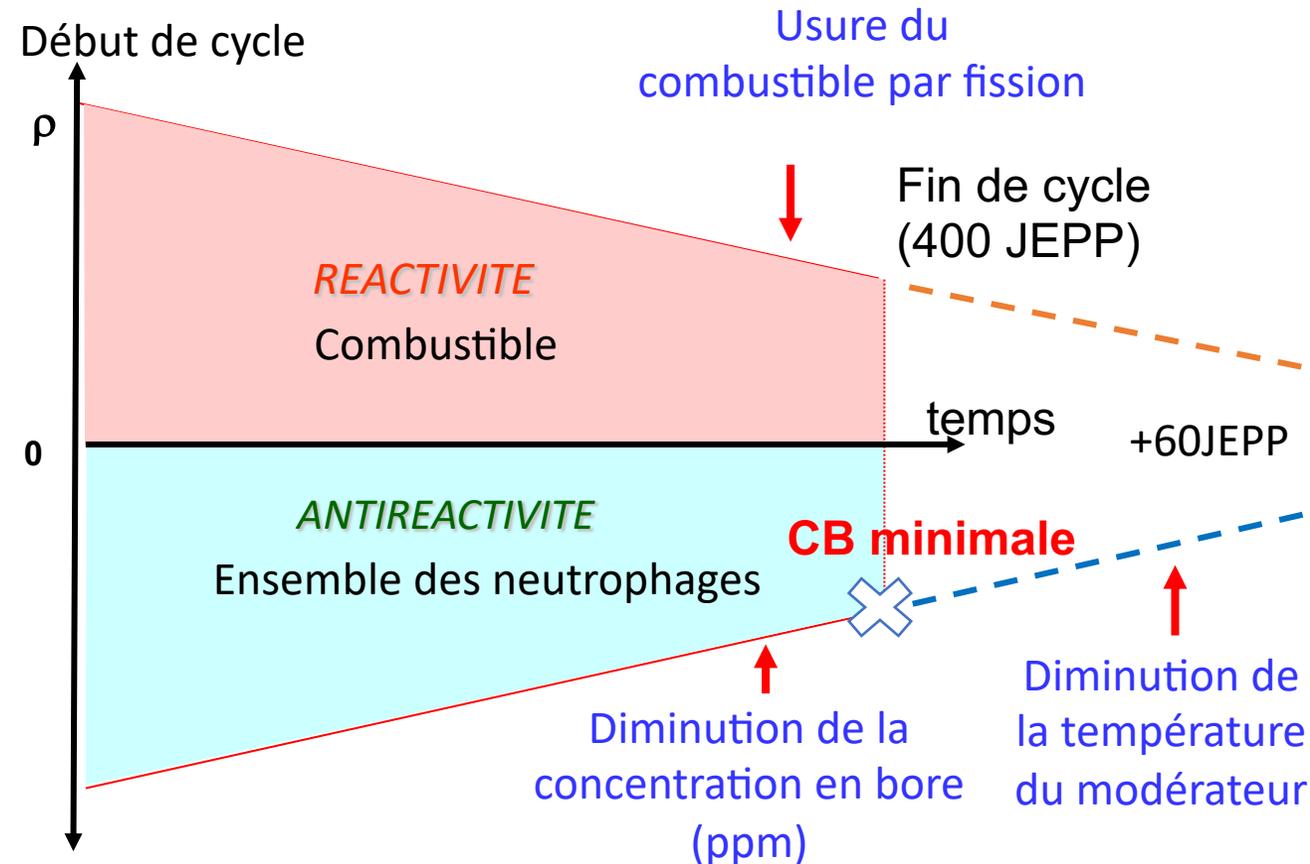
Evolution du combustible en cœur

- ❑ **1^{ère} phase** : décroissance rapide de la réactivité durant les premières heures (ou premiers jours) de fonctionnement, liée à l'apparition des produits de fission rapidement saturants, en particulier ^{135}Xe et ^{149}Sm .
- ❑ **2^{ème} phase** : décroissance moins rapide due à la présence du ^{239}Pu .
- ❑ **3^{ème} phase** : décroissance liée à l'épuisement des noyaux fissiles et à l'empoisonnement par les corps non saturants.
- ❑ L'évolution de la réactivité devra être compensée par des moyens de contrôle et par une gestion appropriée du combustible.
- ❑ Il faut disposer d'environ 13 000 ou 15 000 pcm pour les réacteurs à eau ordinaire pour la compensation.



Gestion du combustible

- ❑ Compenser la baisse de ρ et cela tout au long du cycle (mesuré en JEPP= jour équivalent pleine puissance).
- ❑ Permet de toujours augmenter, rester stable ou diminuer la puissance.
- ❑ Il faut disposer d'environ 13 000 ou 15 000 pcm au fur et à mesure de la vie du cœur, pour les réacteurs à eau ordinaire, pour la compensation.
- ❑ Début :
 - Excès de combustible en plus du combustible qui serait juste suffisant pour rendre la réactivité initiale nulle ou légèrement positive.
 - Compenser par un excès d'absorbant, dont on règle exactement l'évolution de la concentration du départ jusqu'à la fin du cycle, de manière à avoir toujours une réactivité nulle.
- ❑ En cours de cycle : le bore, les poisons consommables et les barres de contrôle.
- ❑ En fin de cycle: renouvellement partiel du combustible.

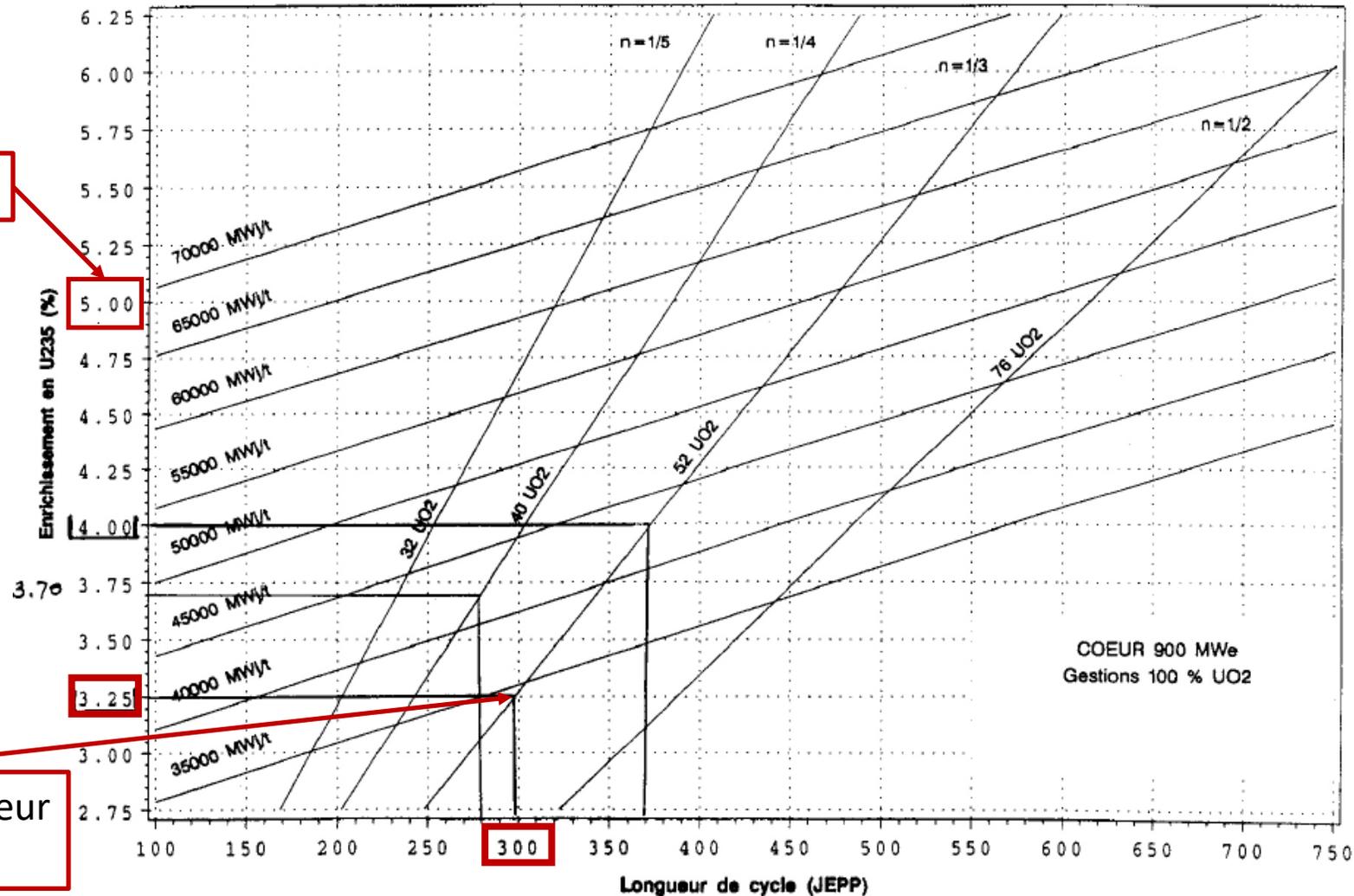


Renouvellement du combustible

- ❑ Plusieurs possibilités suivant les réacteurs et les politiques industrielles:
 - **Irradiation en bloc** : fonctionnement jusqu'à épuisement de la réactivité et déchargement total. (les sous-marins)
 - **Chargement central** : introduction du combustible neuf au centre du cœur, puis déplacé vers la périphérie à mesure que son taux de combustion augmente et déchargé de la périphérie à son taux de combustion maximal.
 - **Chargement extérieur** : introduction du combustible neuf à la périphérie du cœur, puis progressivement amené vers le centre d'où il est déchargé à son taux de combustion maximal. Exemple: REP
 - **Chargement croisé** : le combustible neuf est chargé à l'extrémité d'un canal et le combustible utilisé est extrait à l'autre extrémité.
- ❑ Dans le cas des réacteurs comme les UNGG et les CANDU, la gestion est presque idéale car le renouvellement est effectué continuellement pendant le fonctionnement.
- ❑ Dans le cas des réacteurs à eau et à neutrons rapides, le renouvellement de $1/n$ des assemblages combustible, se fait à chaque arrêt du réacteur et la gestion est donc plus loin de la gestion idéale.
- ❑ Dans le cas des REP français n est égal à 3 ou 4 suivant les cœurs et cela se fait tous les ans.
- ➡ **Compromis entre la durée du cycle, la valeur de n et le taux de combustion**
- ❑ Pour un cœur et un combustible donnés : E_{produite} croît en $2n/(n+1)$ quand n augmente.
- ❑ Si $n=\infty$, on gagne un facteur 2 sur l'énergie produite. Mais évidemment cela demanderait d'être toujours à l'arrêt!!
- ❑ Aujourd'hui les REP français sont rechargés en $n=4$. Et pour augmenter la durée des cycles, EdF joue sur un autre paramètre en augmentant simultanément la teneur initiale du combustible (donc le taux de combustion augmente).

Comment trouver les variables adéquates

Limite actuelle



La gestion en REP

❑ Chaque arrêt du réacteur : renouvellement de $1/n$ des assemblages.

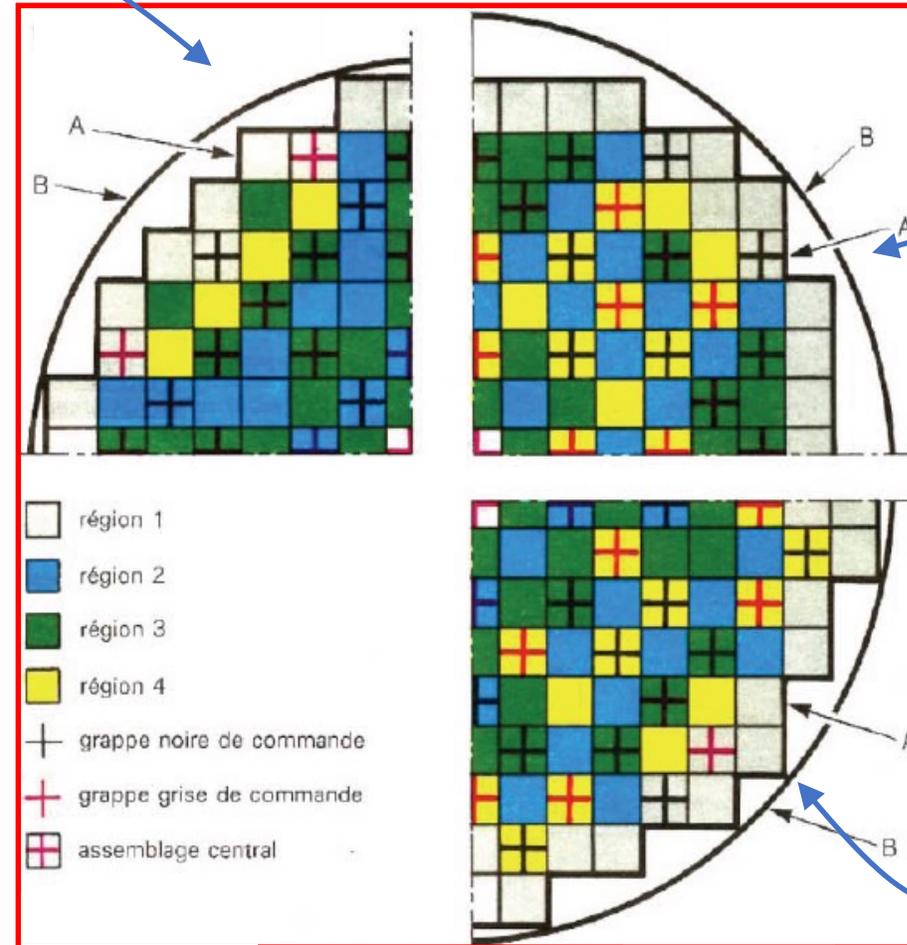
❑ Rechargement tous les ans avec $n=4$.

- région 4 = 4 cycles : décharges
- régions 1, 2, 3 = 1, 2, 3 cycles repositionnés

A enveloppe du cœur
B jupe enveloppe : support du cœur

Dans l'espace entre A et B il y a de l'eau.

900 MW

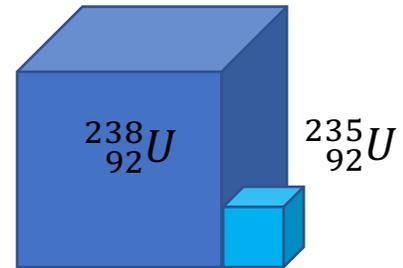


1300 MW

1450 MW

Le combustible

1 tonne d'uranium enrichi à 3,5%
965 kg $^{238}_{92}\text{U}$ et 35 kg $^{235}_{92}\text{U}$



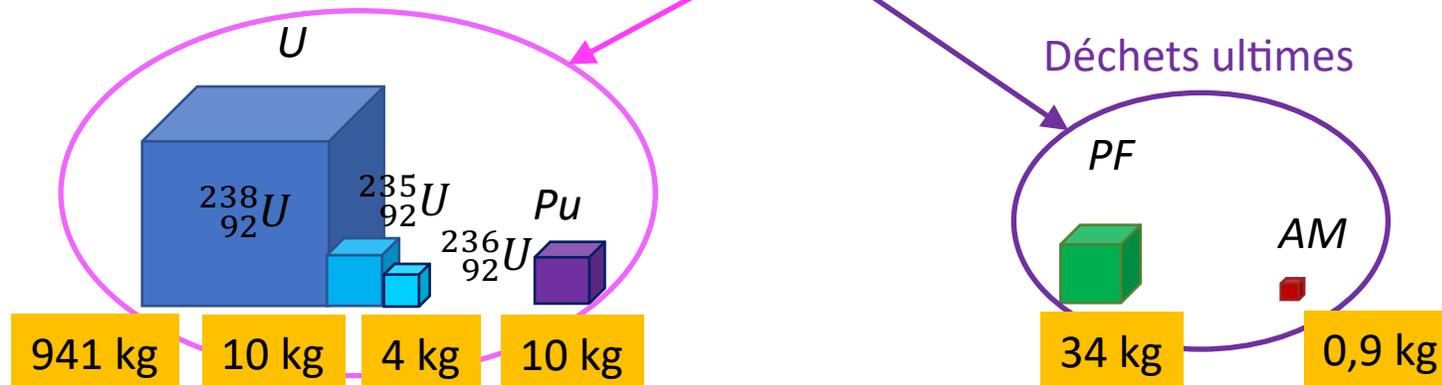
3-4 ans en réacteur

Après passage en cœur :

- 95% de l'uranium
- 1% de plutonium
- 4% PF+AM

Matières valorisables

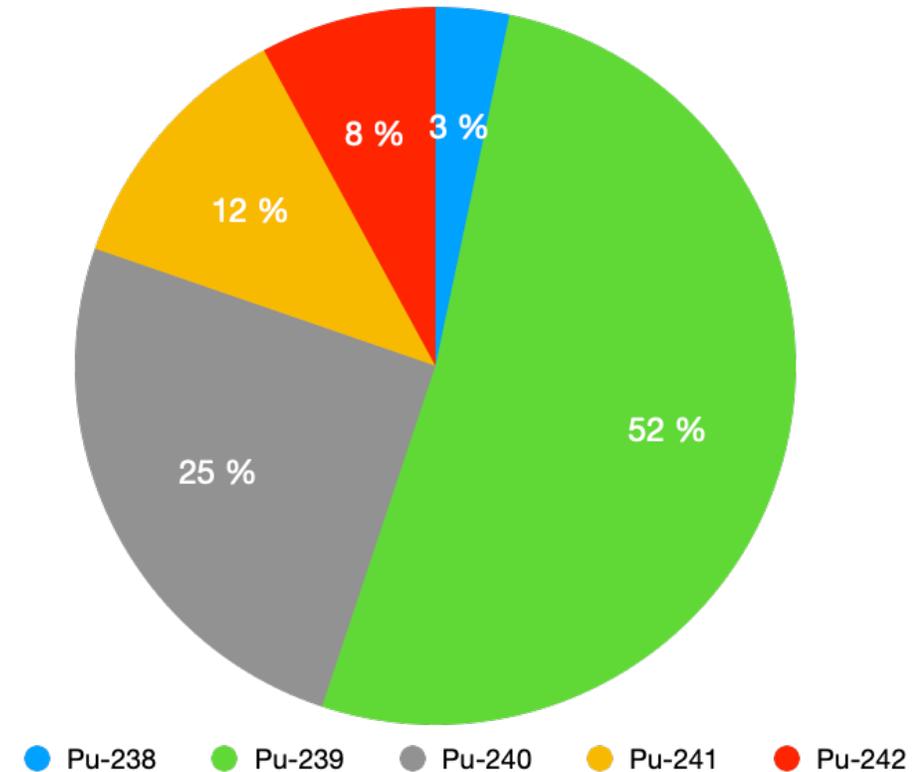
Déchets ultimes



Le cas du plutonium

- ❑ Environ 10 kg de plutonium dans 1t de combustible utilisé.
- ❑ Dégradation de la qualité du plutonium sous irradiation en cœur.
- ❑ Fission favorisée que pour Pu-239 et Pu-241 en n thermiques.
- ❑ Les isotopes pairs du plutonium absorbent les neutrons.
 - **problème pour stabilité de la réaction en chaîne.**
- ❑ Environ 60% d'isotopes impairs et 40% de pairs.
 - **Le plutonium moins adapté après plusieurs cycles d'irradiation.**
- ❑ Le même résultat est visible sur le recyclage des combustible MOX.
- ❑ En n rapides, tous les isotopes du plutonium peuvent fissionner.
 - **vers des concepts de réacteurs à neutrons rapides.**

Pourcentage isotopes du plutonium combustible déchargé à 50 000 MWj/t



Les deux voies possibles: RNR et RNT

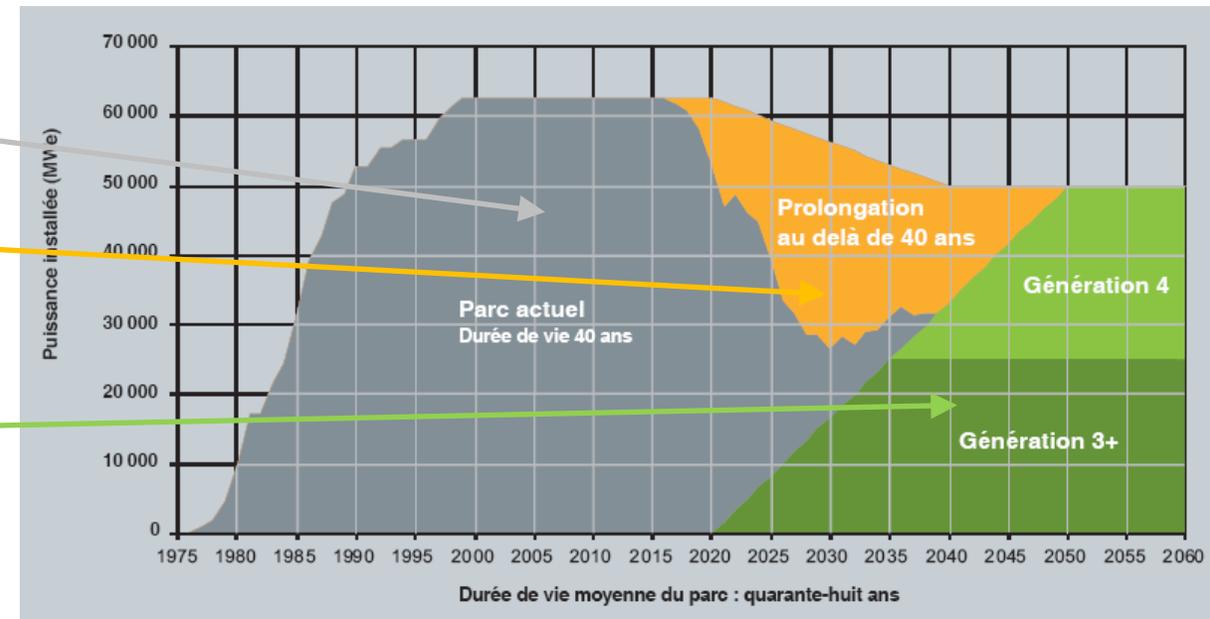
- ❑ La voie de l'uranium enrichi et des neutrons rapides: **les réacteurs à neutrons rapides RNR**: les neutrons sont utilisés directement lorsqu'ils sont produits par la fission.
- ❑ La voie de l'uranium peu enrichi et des neutrons thermiques: **les réacteurs à neutrons thermiques RNT**: les neutrons sont utilisés aux énergies thermiques et doivent donc être ralentis en franchissant les résonances.
- ❑ Ces deux voies furent développées par la France la première dans Phénix et Superphénix et la seconde dans les REP actuellement en fonctionnement.
- ❑ Ces deux voies peuvent être appelées **filières de réacteurs**.
- ❑ Un cœur de réacteur est composé:
 - un combustible contenant des noyaux fissiles,
 - un fluide caloporteur permettant l'extraction de l'énergie produite par la fission,
 - pour les RNT, un modérateur contenant des noyaux légers destinés au ralentissement des neutrons,
 - des structures métalliques qui permettent la tenue mécanique de l'ensemble et la séparation des différents milieux.

Utilisation du plutonium: intérêt

- ❑ 1g de Pu = 1 tonne de Pétrole
- ❑ 90% de la radiotoxicité des déchets à vie longue est le Pu.
- ❑ Scénario idéal français non réalisé :
 - 1^{ère} étape: réacteurs à neutrons thermiques et U-235 avec recyclage pour constituer un stock de Pu.
 - 2^{ème} étape: réacteurs à neutrons rapides utilisant le Pu recyclé et surgénération pour tenir le stock de Pu constant.
 - A terme: tout le parc constitué de RNR et ramener $G=0$ (ou continuer à produire du Pu pour d'autres pays) et consommer l'intégralité de l'uranium naturel (U-235 directement et U-238 en le convertissant en Pu)

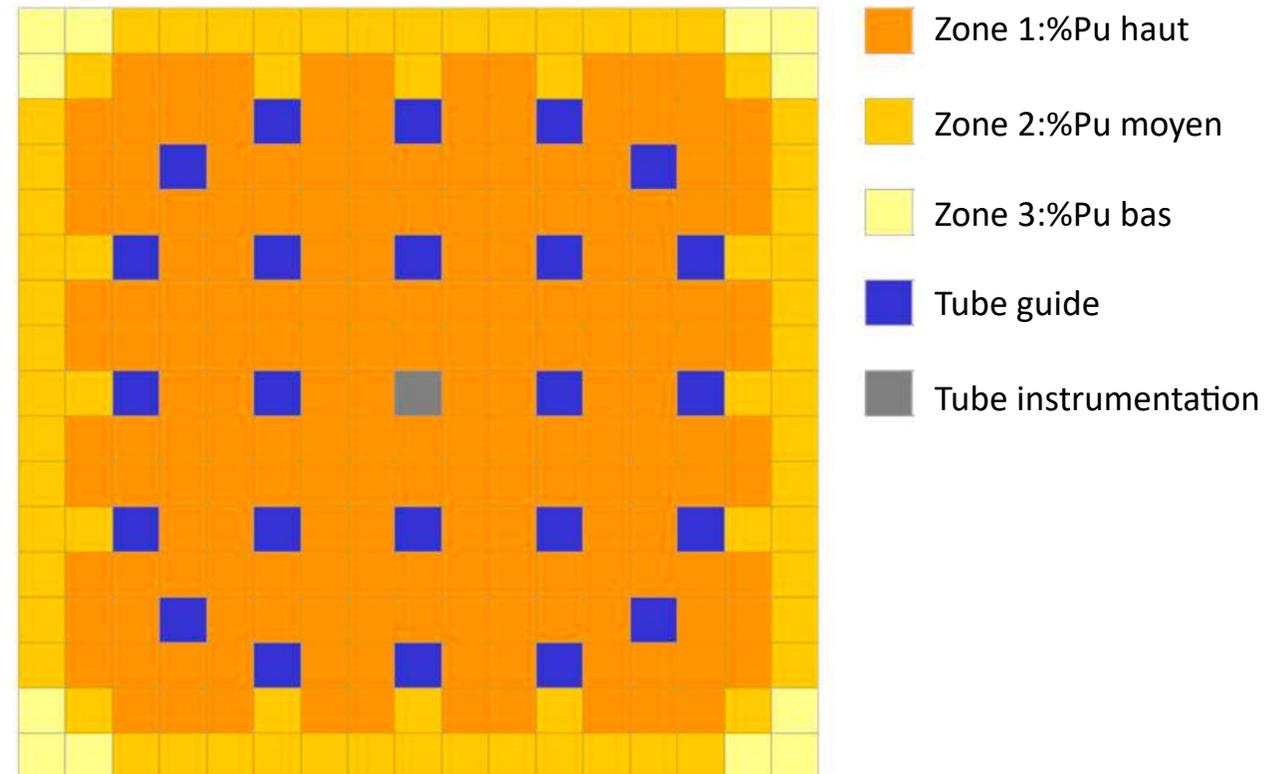


Energie extraite multipliée par 50 comparée à la filière actuelle
Ressources énergétiques immenses

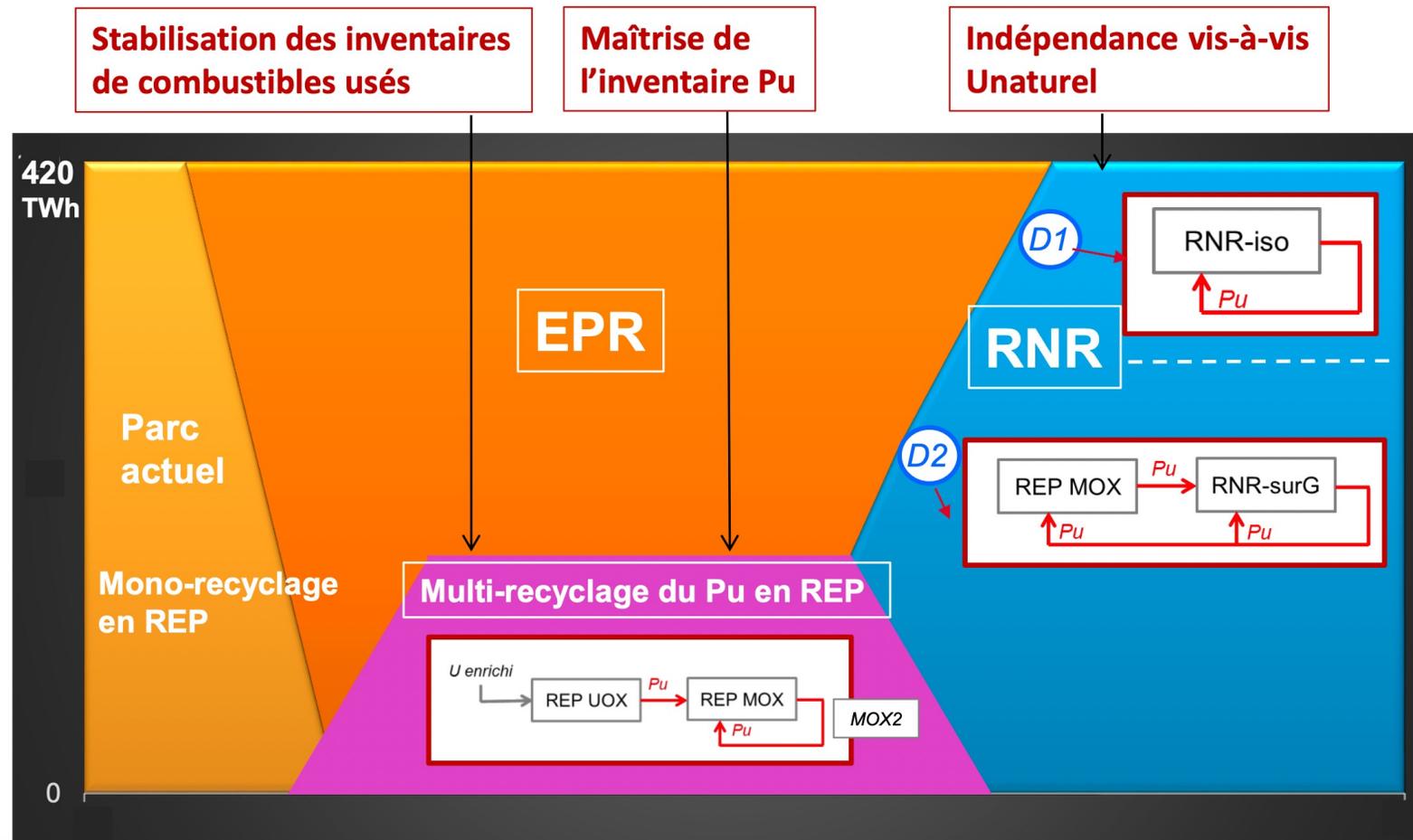


Recyclage du plutonium problèmes

- ❑ Combustible MOX = UO_2 appauvri + Pu
- ❑ 20 réacteurs en France (900 MWe)
- ❑ L'absorption des neutrons thermiques pour le Pu est 2 fois plus importante que pour l'U :
 - Efficacité des barres de contrôle et du bore soluble diminuée de moitié
 - Teneur Pu limitée (8% autorisé)
- ❑ La remontée du flux aux limites de l'assemblage provoque d'éventuels pics de puissance locaux qui seront compensés par le zonage des assemblages MOX: 1/3 de MOX dans les REP.
- ❑ Dégradation vecteur isotopique
 - Retraitement MOX ?
 - REP Multi-recyclage ?



Perspectives pour le futur



Conclusion sur l'évolution du combustible

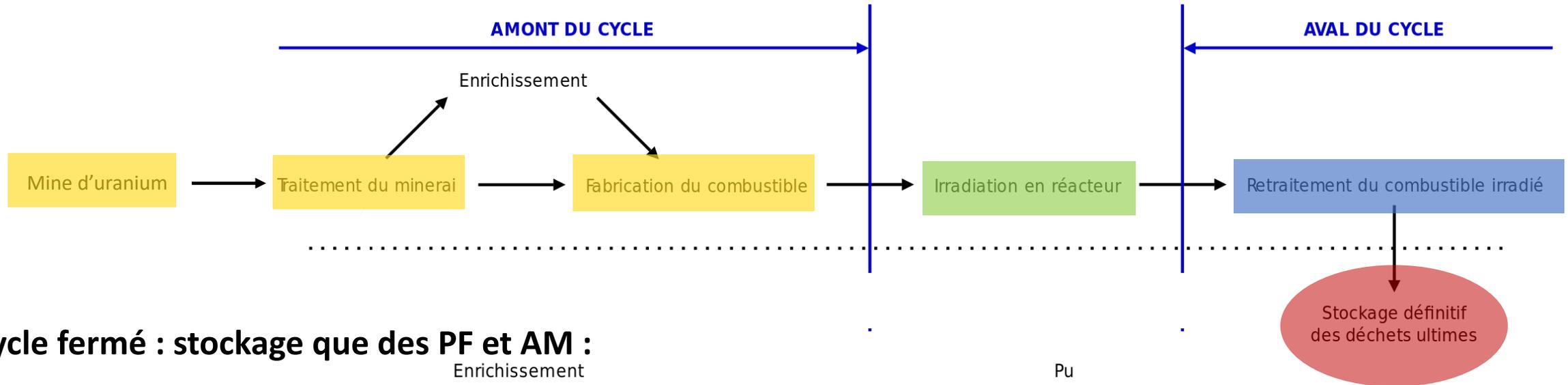
- ❑ Aujourd'hui en France, la fermeture du cycle du combustible, malgré le recyclage n'est pas complète.
- ❑ La France est à un moment important concernant les décisions sur la stratégie de fermeture du cycle.
- ❑ Les industriels proposent une approche progressive, par paliers:
 - aujourd'hui : mono-recyclage du Pu en REP (combustible MOX),
 - moyen terme : multi- recyclage en REP
 - long terme : les réacteurs de Gen IV.
- ❑ La transmutation s'inscrit dans une perspective encore plus lointaine et pourra bénéficier du retour d'expérience acquis sur les RNR.
- ❑ Nécessité de partenariats internationaux pour les programmes de R&D pour les nouveaux réacteurs.



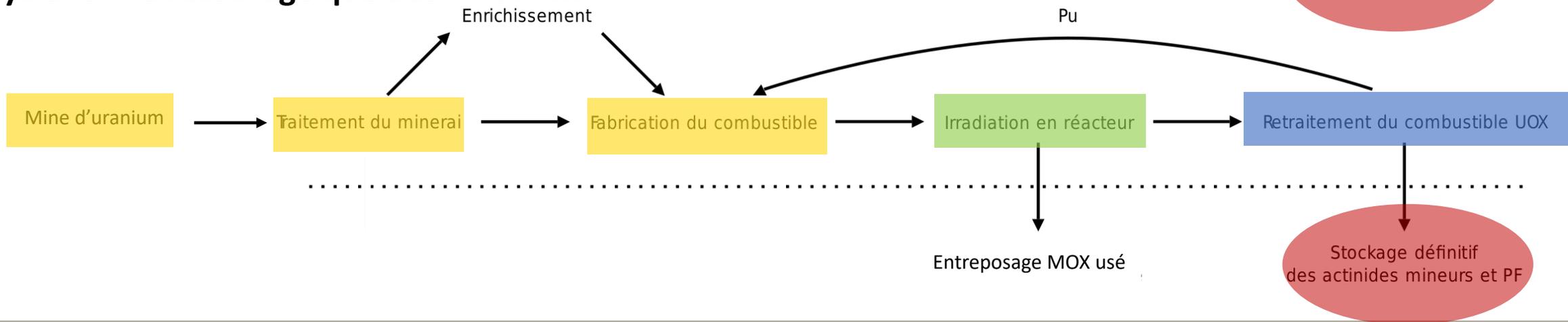
- L'aval du cycle du combustible

Amont/Aval et cycle ouvert/fermé

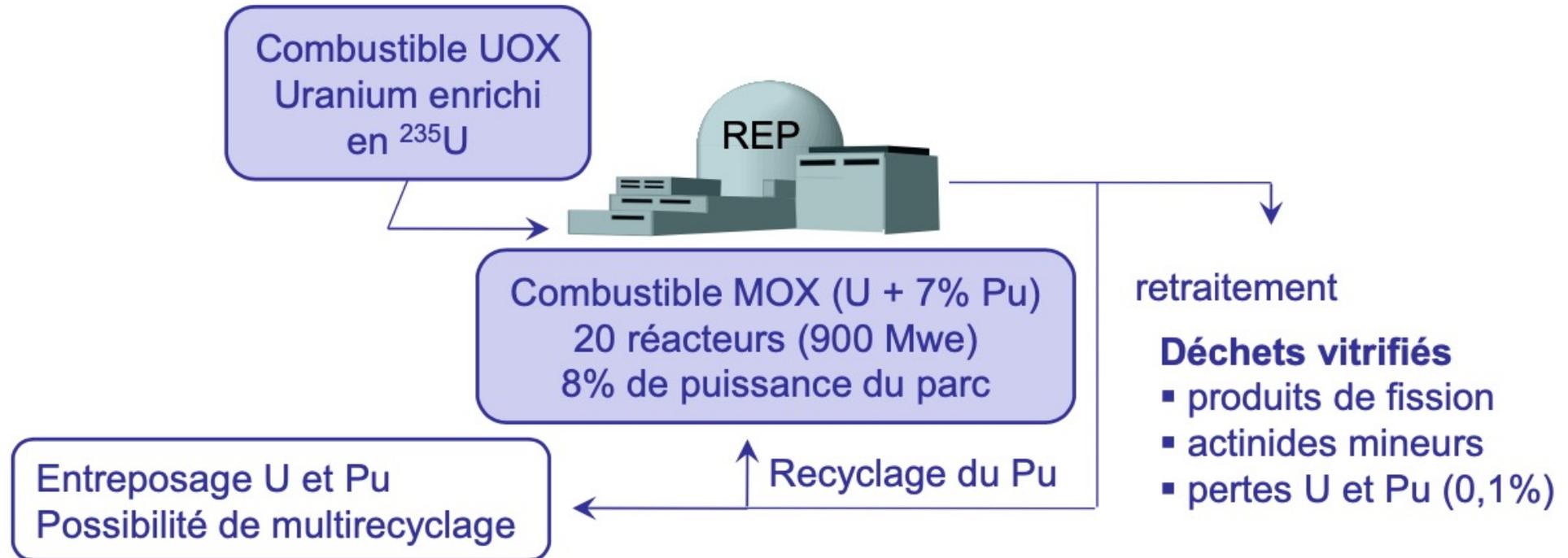
❑ Cycle ouvert : stockage de tout le combustible utilisé :



❑ Cycle fermé : stockage que des PF et AM :



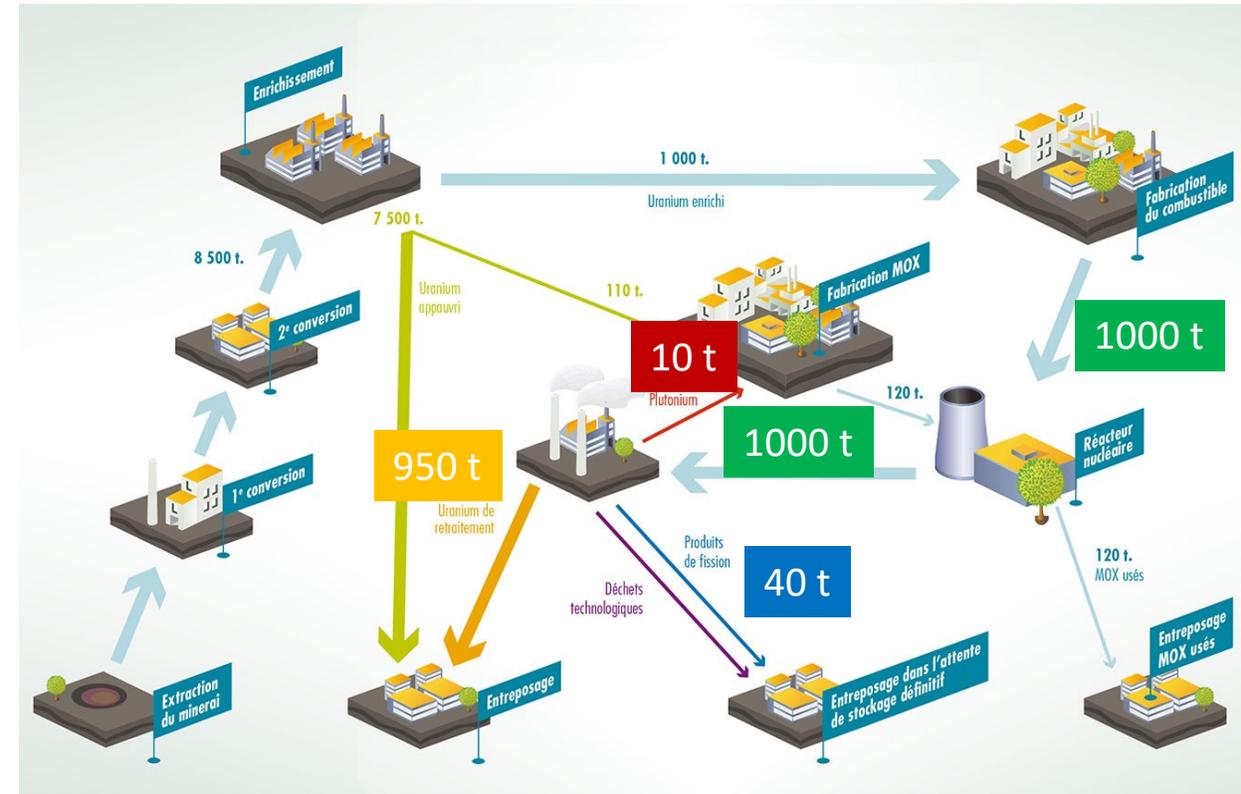
Le cycle actuel en France



- Monorecyclage du Pu dans le combustible MOX
- Retraitement/entreposage UOX usés
- Entreposage MOX usés
- Stockage /entreposage des déchets ultimes

Flux de matières et déchets nucléaires

- ❑ Production annuelle de 400 TWh (= production annuelle du parc nucléaire français).
- ❑ 22 REP 900MWe chargés à 30% MOX
- ❑ Combustible oxyde mélange : U-238 + 8-10 % Pu (moitié Pu-239)
- ❑ MOX \approx 10% de la puissance totale du parc
- ❑ Le mono-recyclage du Pu \approx 1980 :
- ❑ Economie sur l'uranium naturel \approx 20% p/p cycle ouvert
- ❑ Déchets finaux sans Pu \approx 99,54% du Pu récupéré
- ❑ Entreposage des combustibles usés UO₂ stabilisé \approx 11 900 t fin 2019
- ❑ Entreposage du combustible usé MOX qui augmente (130 t/an). Fin 2019 \approx 2 270 t.



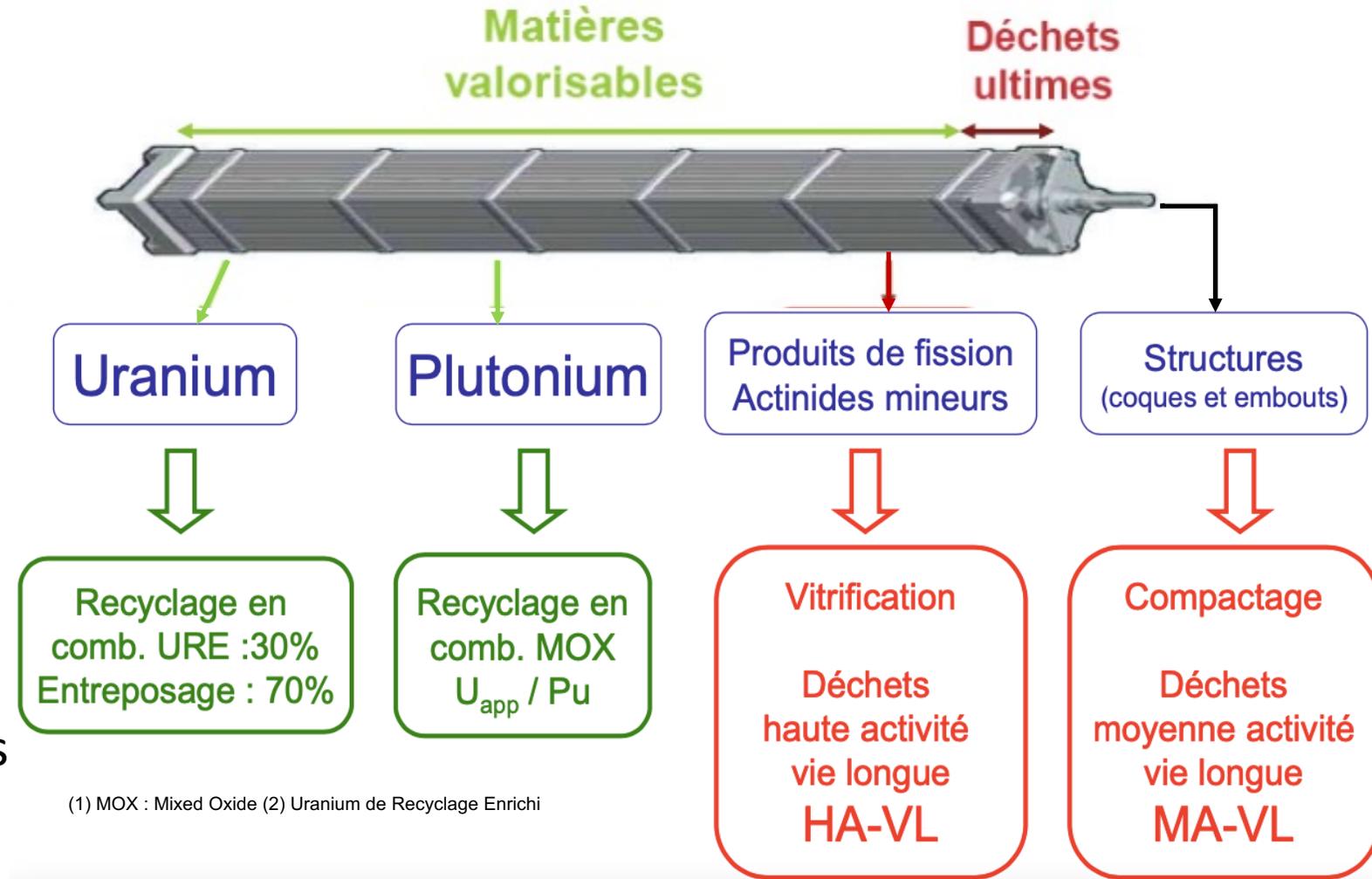
(Source : chiffres Andra 2021)

Le recyclage

Le recyclage

□ Le combustible:

- 3-4 ans en réacteur
- 5 ans placé en piscine sur site.
- Transport vers la Hague
- entreposé 15 ans dans une seconde piscine.
- Séparation matières et déchets

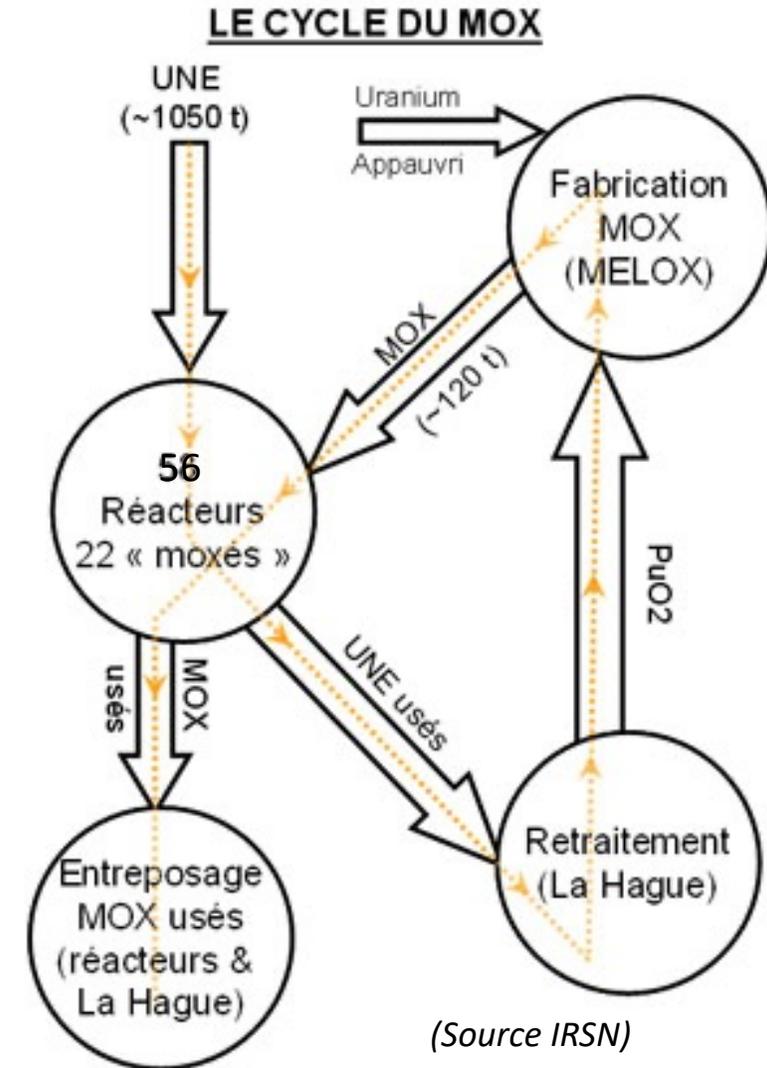


(1) MOX : Mixed Oxide (2) Uranium de Recyclage Enrichi

(D'après Orano)

Combustible Mixed OXides

- ❑ **Mélange d'oxydes de plutonium et d'uranium provenant du recyclage du combustible utilisé des centrales nucléaires. (usine de la Hague)**
- ❑ Le recours aux combustibles MOX a débuté en 1987
- ❑ Pour les réacteurs d'EDF, la consommation annuelle d'uranium naturel est de l'ordre de 8 400 tonnes et celle de combustibles MOX de 120 tonnes, soit une économie annuelle d'environ 900 t d'uranium naturel.
- ❑ **Constitué d'un mélange d'environ 92 % d'uranium « appauvri » (sous-produit des usines d'enrichissement de l'uranium) et de 8 % de plutonium.**
- ❑ Le MOX contribue à la production de 10% de la production électrique nationale
- ❑ Le MOX est utilisé dans 22 réacteurs de 900 MW. (Tricastin, Dampierre, Gravelines, St Laurent, Blayais et Chinon). 24 réacteurs sont autorisés à l'utiliser.
- ❑ Après utilisation en réacteur, le MOX utilisé sont entreposés dans les piscines de La Hague, en attente d'un traitement ultérieur.

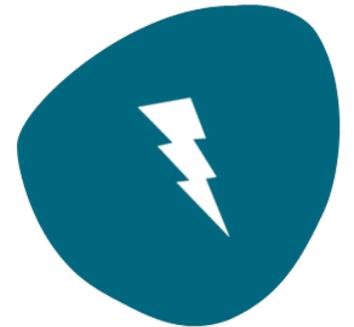


Pourquoi recycler?

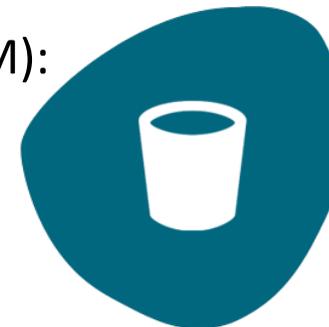
- Réutiliser l'uranium irradié encore avec un grand pouvoir énergétique;
- Epargner les ressources naturelles d'uranium
 - Fabrication du combustible MOX
- 10% de l'électricité en France générée avec du combustible MOX;
- Réduction de la consommation d'uranium de plus de 10%;
- Eviter le cout de l'enrichissement;
- Réduire la quantité de combustible: 7 UOX → 1 MOX;
- Diminuer la quantité et la radio-toxicité des déchets (plus que les PF et AM):
 - facteur 5 sur le volume
 - facteur 10 sur la radio-toxicité
- Recycler le plutonium (éviter les risques de prolifération).



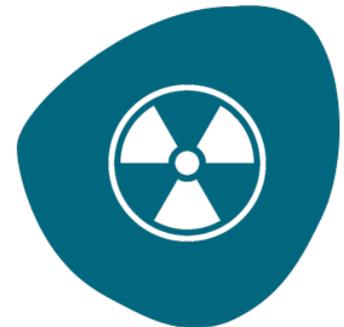
Qui permet d'économiser les ressources en uranium naturel (25 %)



Qui valorise le pouvoir énergétique du plutonium :
1g Pu = 100 g U = 1 tep = 11,6 MWh

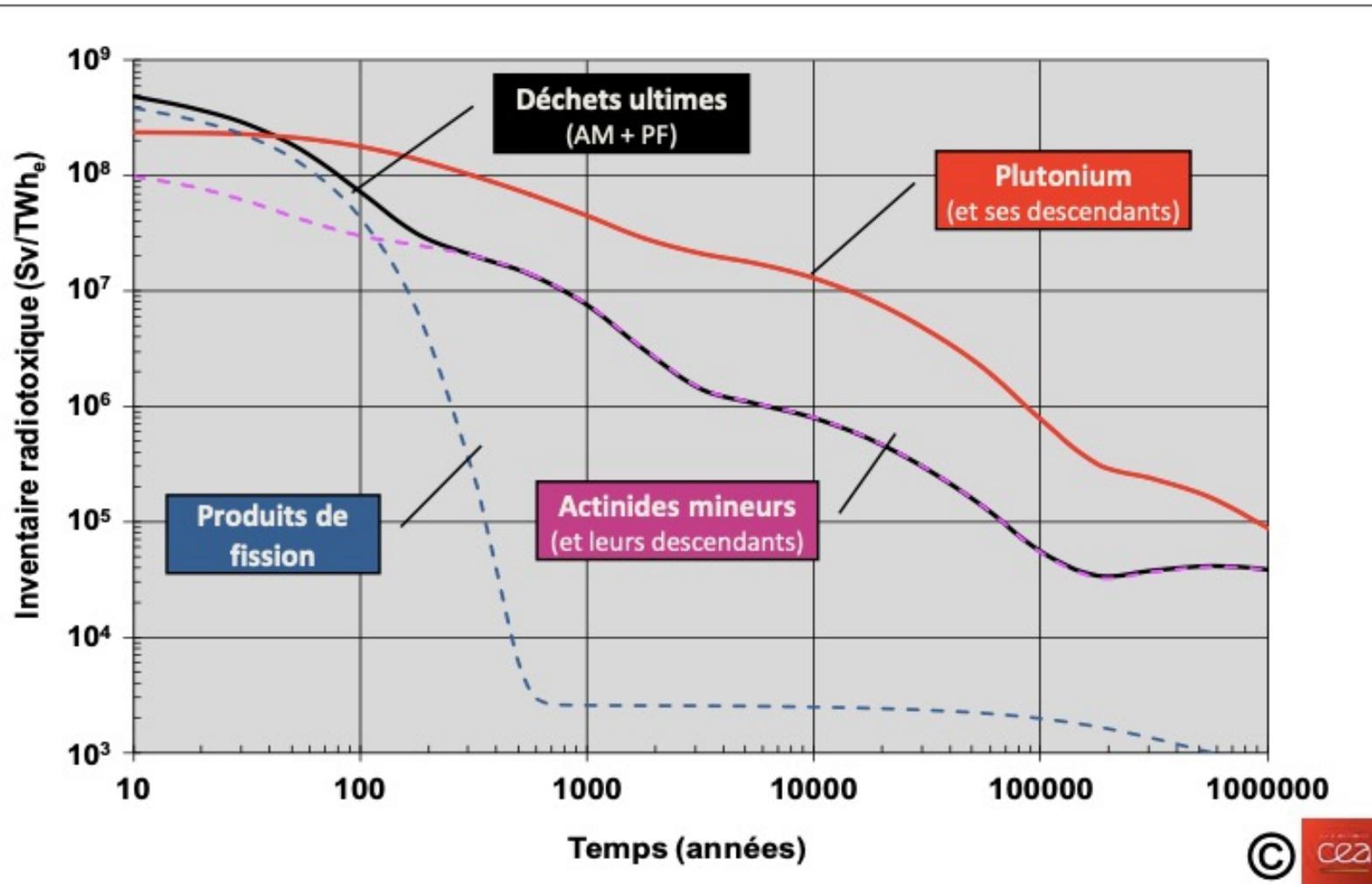


Qui divise le volume des déchets par 5 et leur toxicité par 10



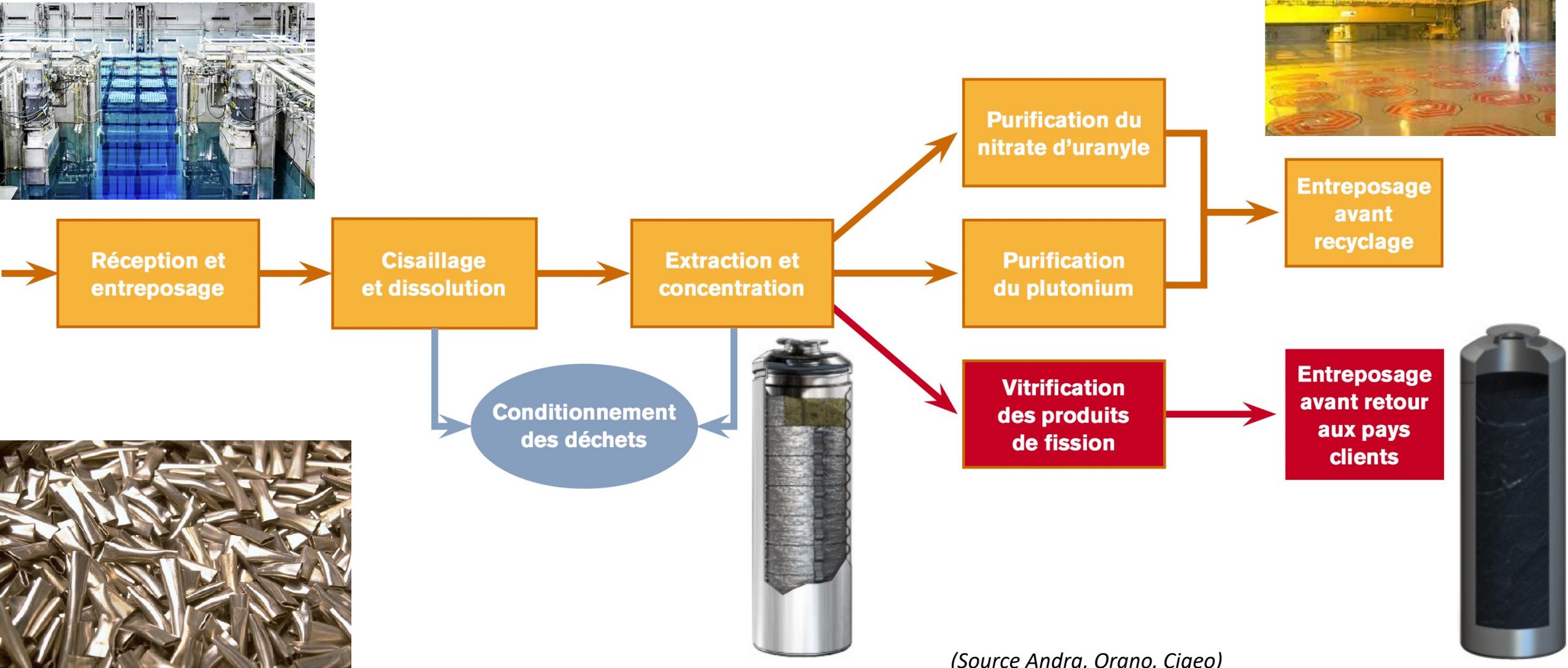
Qui permet de lutter contre la prolifération des armes nucléaires

Evolution dans le temps de l'inventaire de radiotoxicité des différents composants d'un combustible usé (UOX 45 GWj/t)



- ❑ La radiotoxicité relative du combustible usé et des déchets vitrifiés décroît en fonction du temps.
- ❑ Le recyclage du Pu déjà pratiqué en France réduit beaucoup la radiotoxicité relative.
- ❑ Retirer les actinides mineurs des colis de déchets vitrifiés permettrait une réduction supplémentaire de la radiotoxicité des déchets.

Les différentes étapes de la Hague



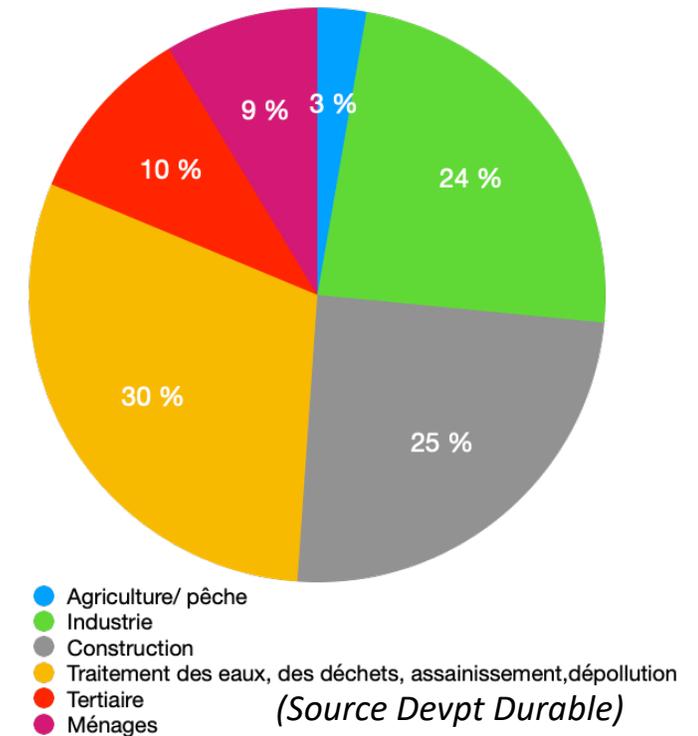
(Source Andra, Orano, Cigeo)

□ Les déchets radioactifs

Les déchets en général



Production de déchets dangereux, par secteur, en France, en 2018



- ❑ Les déchets non biodégradables font partie de la vie des hommes depuis leur sédentarisation.
- ❑ Chaque changement de société s'est accompagné d'une amélioration de leur gestion.
- ❑ En France ils sont classés en 3 catégories :
 - Les déchets minéraux,
 - Les déchets dangereux,
 - Les autres déchets.
- ❑ Le [Ministère de la transition écologique](#) en établit annuellement l'inventaire:

un français produit environ 5 tonnes de déchets par an, dont 2 kg de déchets radioactifs.

- ❑ Ces derniers font partie des déchets dangereux.

Définition des déchets radioactifs

❑ D'après l'AIEA (agence internationale de l'énergie atomique) :

« Toute matériau qui contient ou est contaminé par des radionucléides à des concentrations ou niveaux d'activité supérieurs aux valeurs définies par les autorités compétentes de réglementation et pour lequel aucune utilisation n'est prévue. »

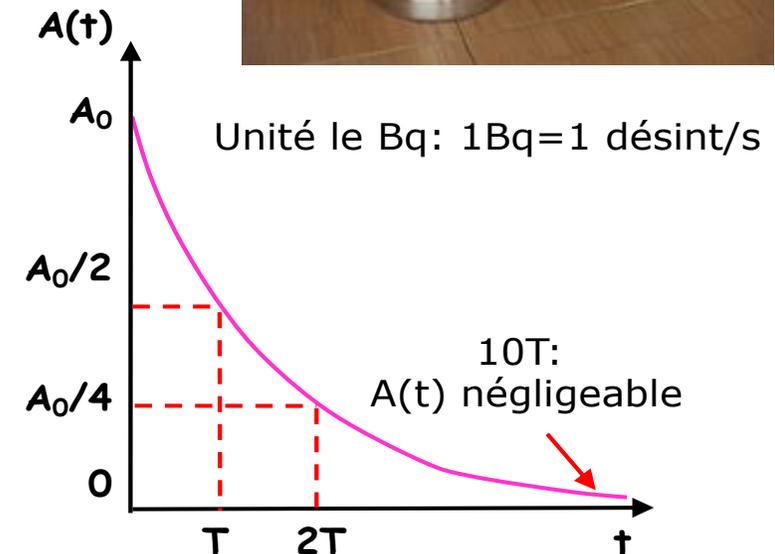
❑ En France aucun seuil minimum n'est défini.

❑ Différence entre matière nucléaire et déchet radioactif.

- déchet radioactif = substance radioactive n'ayant aucune utilisation ultérieure
- matière radioactive = substance radioactive ayant une possible utilisation ultérieure.

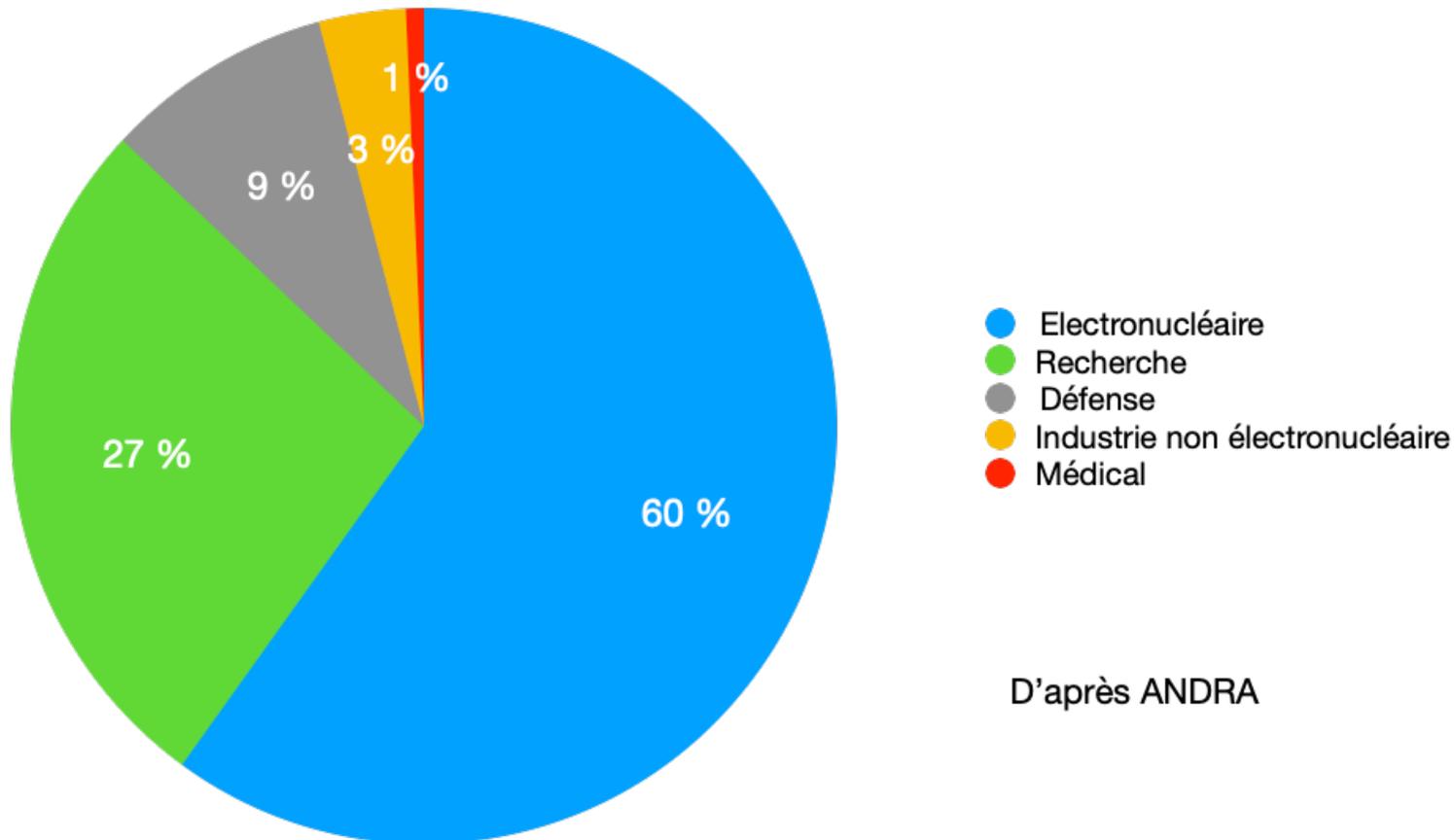
❑ Les déchets sont classés en fonction de :

- leur niveau de radioactivité (activité en Becquerel)
- leur durée de vie (période radioactive)



Répartition industrielle des déchets radioactifs

RÉPARTITION PAR SECTEUR ÉCONOMIQUE DU VOLUME DE DÉCHETS À FIN 2019

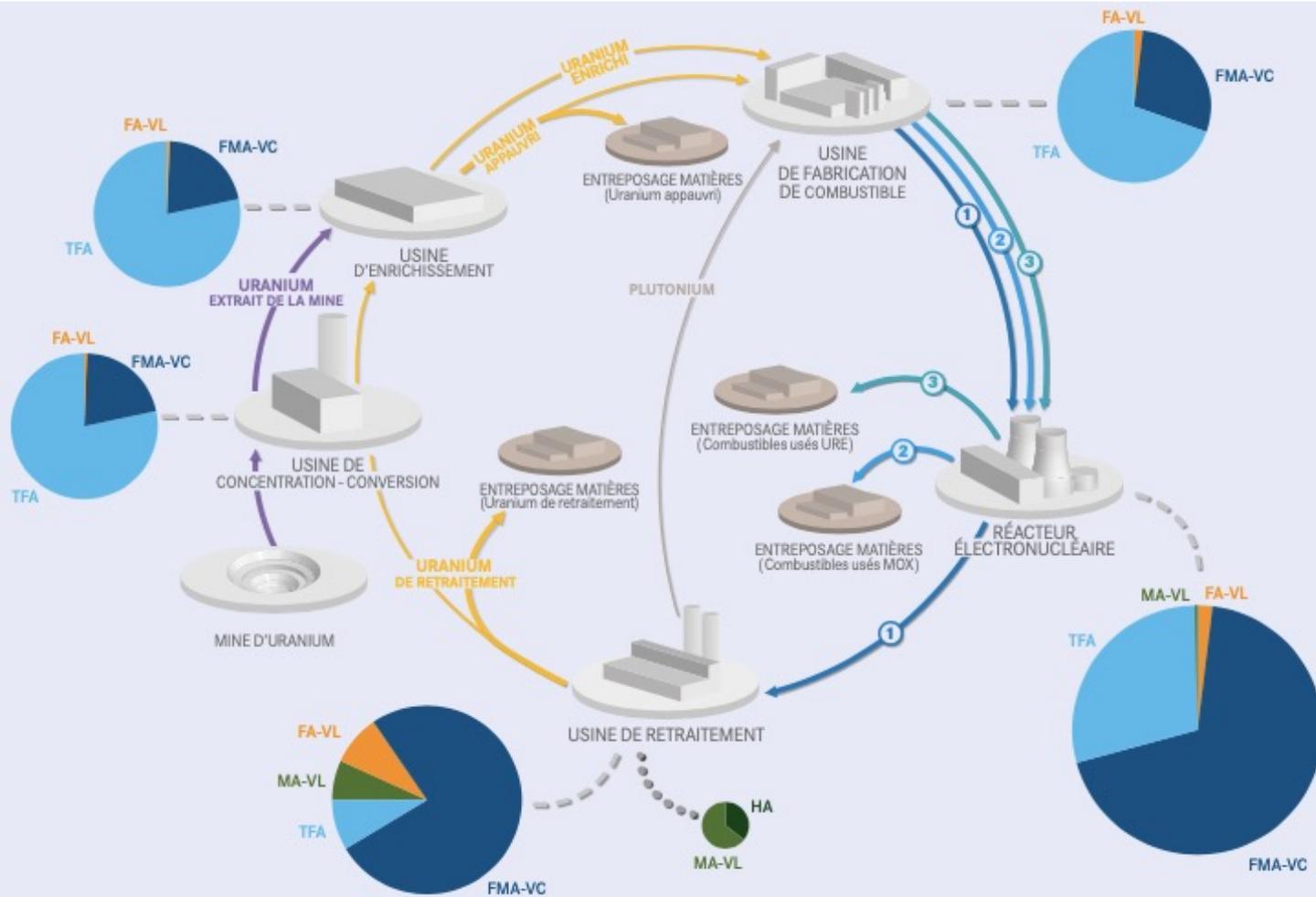


D'après ANDRA

□ Industrie Electronucléaire:

- 60 % du volume de déchets
- L'essentiel des déchets à haute activité et moyenne activité à vie longue.

Quand les déchets sont-ils produits



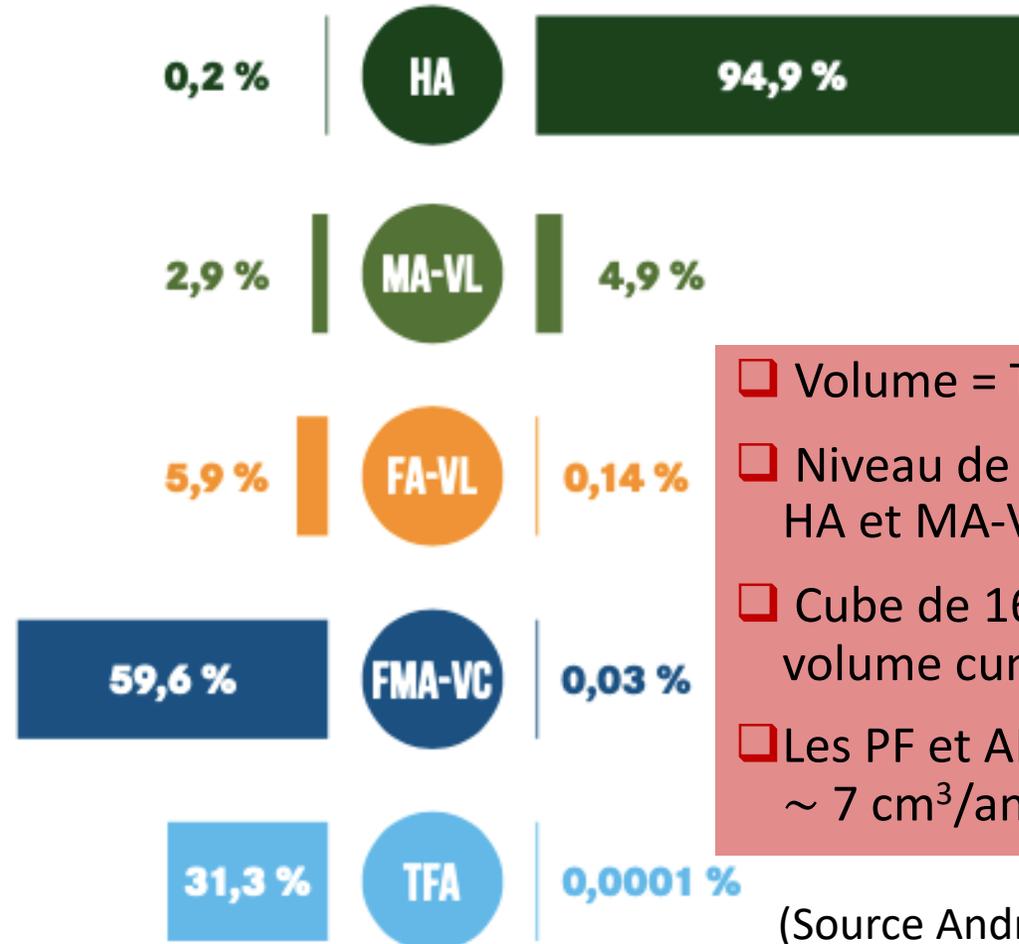
(Source Andra)

- ❑ Amont du cycle : plus de 75% TFA
- ❑ Exploitation : plus de 60% FMA-VC
- ❑ Déchets FA-VL : stockage est à l'étude.
- ❑ Aval du cycle : HA et MA-VL (PF et Am).
- ❑ Démantèlement : majorité TFA.
- ❑ Centres de stockage:
 - Centre Cires : TFA
 - Centre de l'Aube (CSA) et de la Manche (CSM) : FAM-VC
 - Projet Cigéo: HA et MA-VL.

Répartition en volume et radioactivité

Volume de déchets radioactifs

Niveau de radioactivité



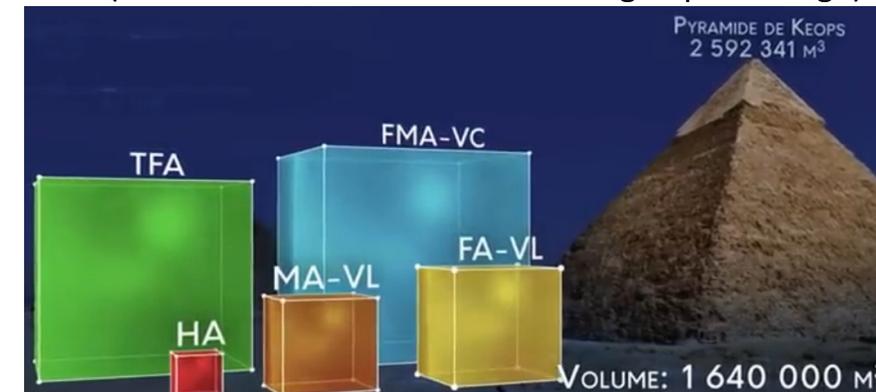
- Volume = TFA et FMA-VC
- Niveau de radioactivité = HA et MA-VL
- Cube de 16 m de coté = volume cumulé HA
- Les PF et AM représentent ~ 7 cm³/an/habitant.

(Source Andra)

► BILAN ET ÉVOLUTION DES VOLUMES (m³) DE DÉCHETS DÉJÀ STOCKÉS OU DESTINÉS À ÊTRE PRIS EN CHARGE PAR L'ANDRA

Catégorie	À fin 2020	Évolution 2020-2019
HA	4 190	+100
MA-VL	42 900	+200
FA-VL	93 800	+200
FMA-VC	971 000	+9 700
TFA	586 000	+16 000
DSF	295	-300
Total	~ 1 700 000	+25 900

(Source : film Nucléaire: une énergie qui dérange)



Classement des déchets radioactifs

Période radioactive* / Activité**	Vie très courte (VTC) (période < 100 jours)	Principalement vie courte (VC) (période ≤ 31 ans)	Principalement vie longue (VL) (période > 31 ans)
Très faible activité (TFA) < 100 Bq/g	 Gestion par décroissance radioactive	 Stockage de surface (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage)	
Faible activité (FA) entre quelques centaines de Bq/g et un million de Bq/g		 Stockage de surface (centres de stockage de l'Aube et de la Manche)	 Stockage à faible profondeur à l'étude
Moyenne activité (MA) de l'ordre d'un million à un milliard de Bq/g			 Stockage géologique profond en projet (projet Cigéo)
Haute activité (HA) de l'ordre de plusieurs milliards de Bq/g	Non applicable		 Stockage géologique profond en projet (projet Cigéo)

*Période radioactive des éléments radioactifs (radionucléides) contenus dans les déchets

** Niveau d'activité des déchets radioactifs

(Source Andra)

Les déchets radioactifs

- ❑ Une problématique nationale, prise en compte par les pouvoirs publics, et encadrée par la loi du 28 juin 2006.
- ❑ La loi du 25 juillet 2016 précise les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue.
- ❑ La gestion des déchets nucléaires est pilotée via [le plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs](#) (PNGMDR). Ce plan est conçu par le Ministère en charge de l'environnement et par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) selon L'article L. 542-1-2 du code de l'environnement.
- ❑ Cinquième édition du PNGMDR : 2022-2026



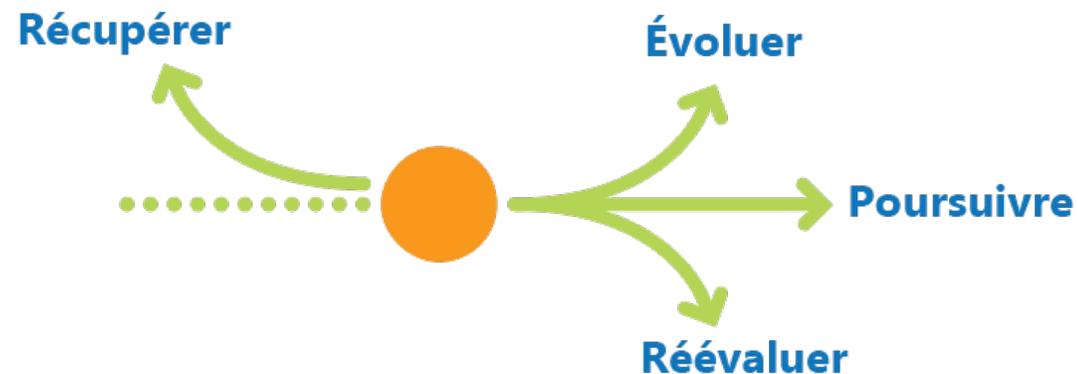
Les différents combustibles

- ❑ **Les combustibles ont des caractéristiques différentes :**
- ❑ **La nature et la composition isotopique des matières fissiles et fertiles :** uranium naturel, uranium faiblement (<5%), moyennement (5 à 80 %) ou fortement (> 80 %) enrichi en isotope 235, mélanges uranium et plutonium, thorium...
- ❑ **Composition :** métal, oxydes, oxydes mixtes, carbures, nitrures, siliciures, etc., avec des éléments d'alliage ou d'éventuels additifs (Si, Cr, Al, Mo, Sn... dans les UNGG ; Gd dans les réacteurs à eau...
- ❑ **La nature du matériau de gainage :** zirconium et ses alliages (Zircaloy 2 et 4), aciers inoxydables, magnésium, aluminium, etc. ;
- ❑ **Leur forme et leur structure :** barreaux cylindriques unitaires pleins ou creux (UNGG), assemblages ou faisceaux de crayons (réacteurs à eau ou à neutrons rapides) de section carrée ou hexagonale, assemblages de plaques (réacteurs de propulsion ou de recherche), etc., emprisonnés ou non dans un boîtier, combustibles boulets (HTR), combustibles liquides dont le confinement est assuré par la cuve du réacteur (réacteurs à sels fondus) ;
- ❑ **Leurs dimensions :** différentes selon le type de réacteur ou même dans une filière identique selon le constructeur et la puissance du réacteur.

La réversibilité

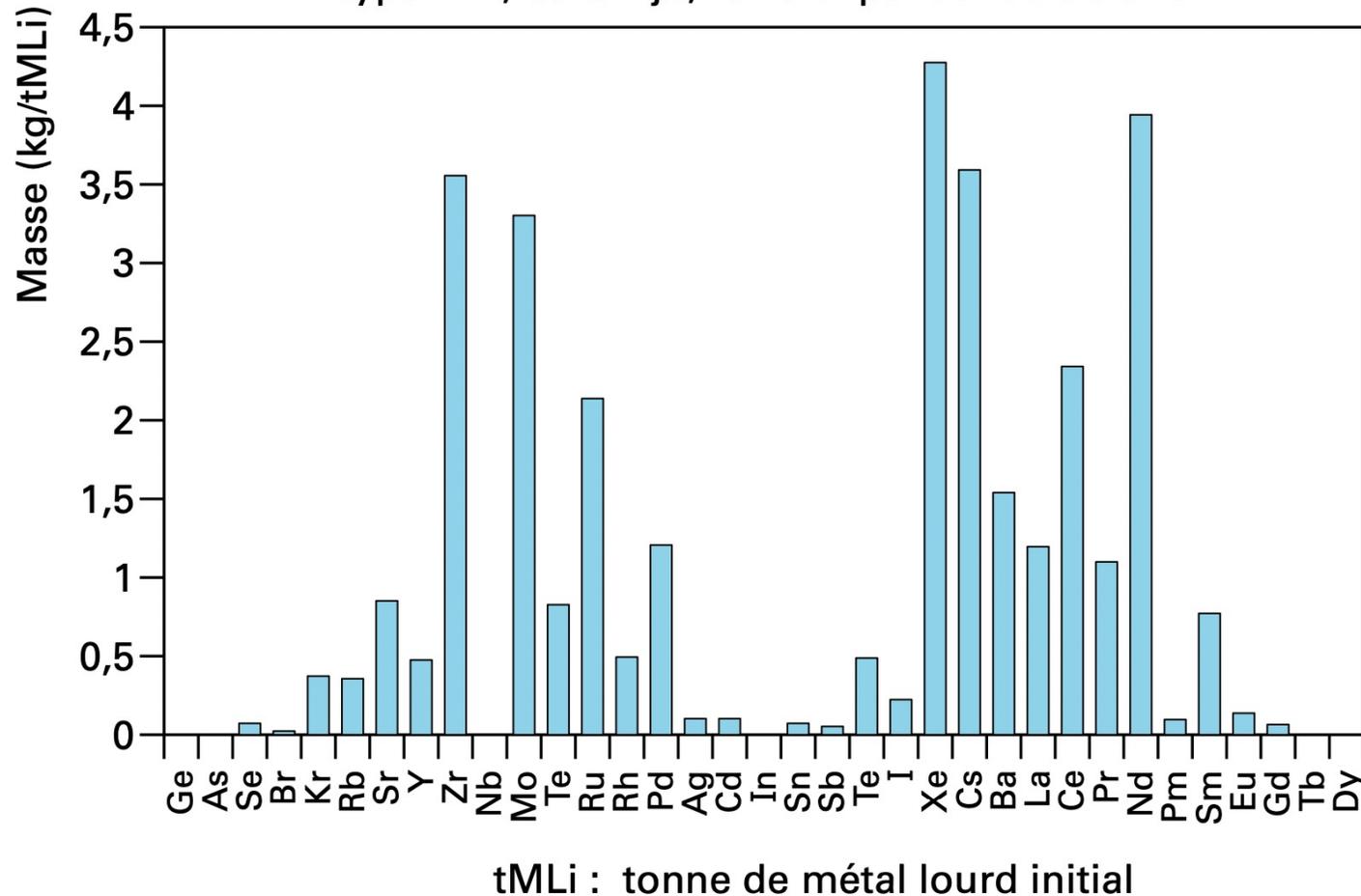
- ❑ **Début 2016** : diffusion par l'Andra d'une contribution sur la réversibilité du stockage
- ❑ **25 juillet 2016** : publication au Journal Officiel de la loi sur la réversibilité
- ❑ **Principe** : ne pas enfermer les générations futures dans les choix que nous ferions à la conception :

« La réversibilité du stockage est la capacité à offrir à la génération suivante des choix sur la gestion à long terme des déchets radioactifs, y compris le choix de revenir sur les décisions prises par la génération antérieure. »



Les produits de fission produits

Combustible de référence :
type REP, 33 GWj/t, refroidi pendant trois ans



(Source TI, BN3650)

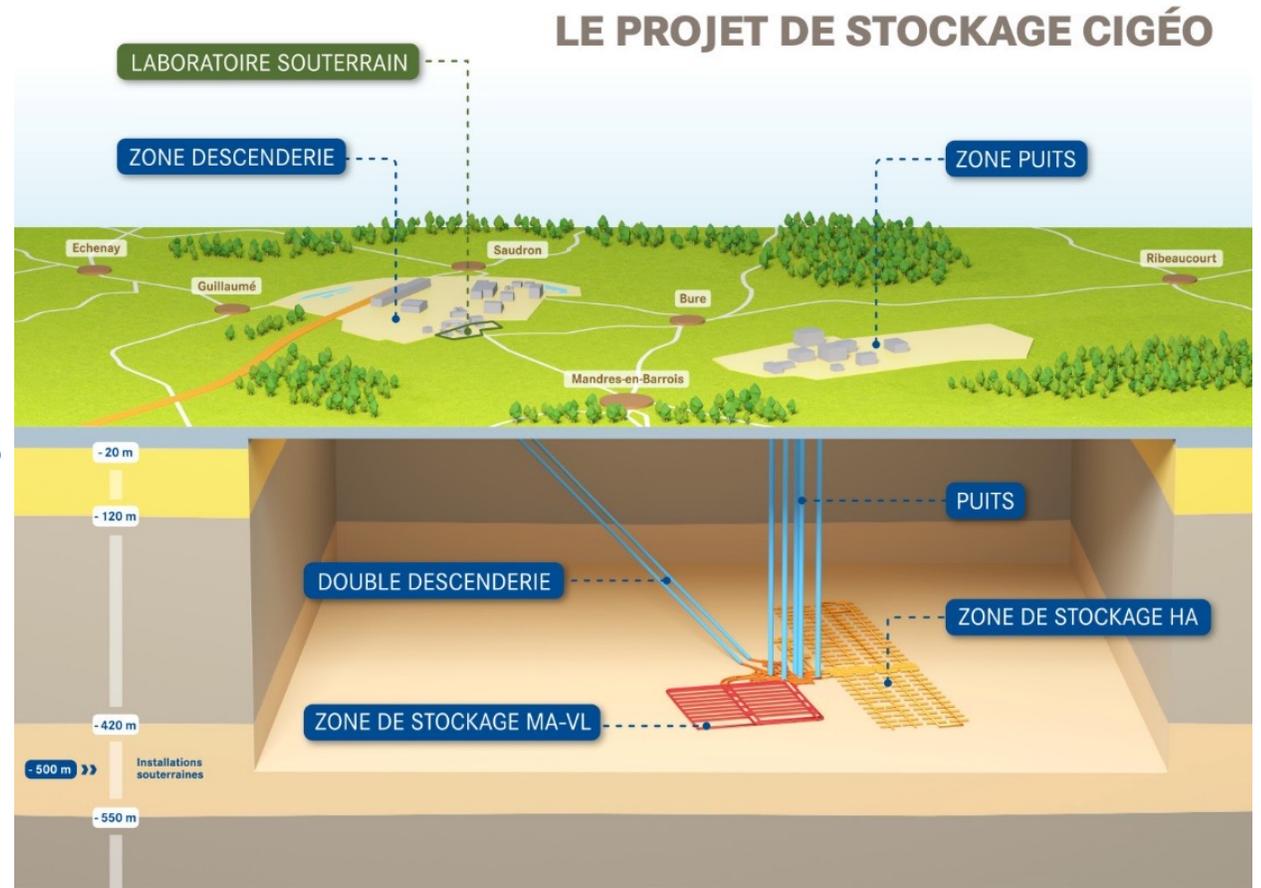
Le projet Cigéo

500 Mètres de profondeur **1,5 km²** De zone de stockage

250 Km de galeries et alvéoles **83 000 m³** de déchets

MA-VL HA

120 Ans d'exploitation **25 Mds** d'euros



Quelques pistes pour le futur

❑ Pistes pour la recherche sur la gestion des déchets:

- **Axe 1:** Recherches et développements sur des procédés de multi-recyclage du combustible utilisé, à moyen terme, en réacteurs à eau pressurisée (REP).
- **Axe 2:** Recherches à plus long terme, dans des réacteurs à neutrons rapides (RNR) ou ADS.
- **Axe 3 :** Recherches Séparation – Transmutation.
- **Axe 4 :** Recherches sur l'enfouissement en couche géologique profonde (Projet [Cigeo](#)).