

EXPERTNUC



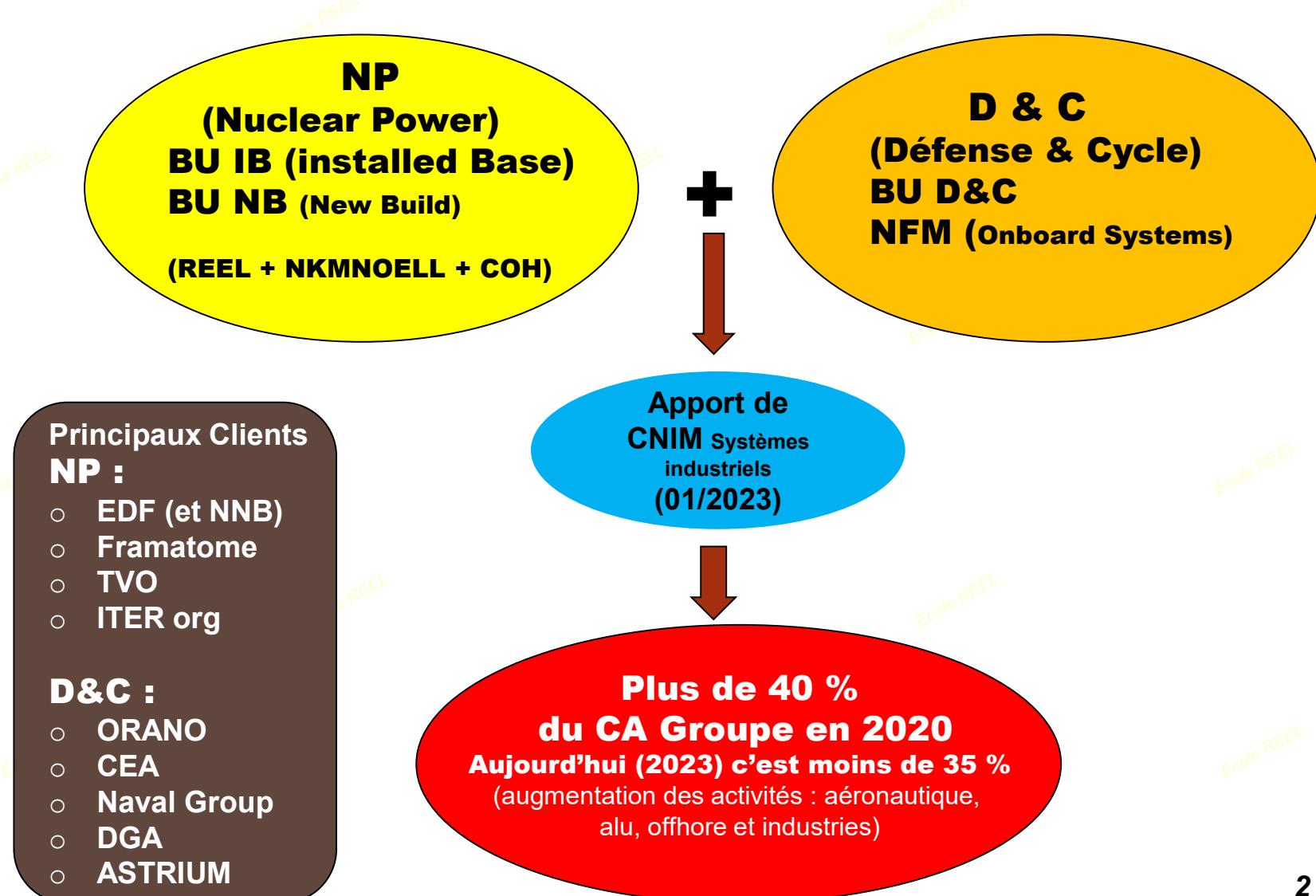
ENERGIE NUCLEAIRE



**Comprendre les
aspects
de l'énergie nucléaire
et de la
filière nucléaire
(et activités de REEL dans la filière)**

ENERGIE NUCLEAIRE

LE NUCLEAIRE CHEZ REEL



ENERGIE NUCLEAIRE

1 – Introduction - Energie Nucléaire

PARTIE 1

2 - Cycle du Combustible

Ecole REEL

3 - Réacteur Nucléaire

Ecole REEL

4 - Modèles de Réacteur Nucléaire

Ecole REEL

PARTIE 2

5 - Sureté & Aspects Réglementaires

Ecole REEL

PARTIE 3

6 - Parc Nucléaire (Canada, USA, France, Autres)

Ecole REEL

7 - Acteurs du Nucléaire

Ecole REEL

8 - Enjeux & Débats & Chiffres

Ecole REEL

9 - Nucléaire et R&D

Ecole REEL

PARTIE 4

10 - Bibliographie & Filmographie

Ecole REEL

Ecole REEL

11 - Activités du Groupe REEL dans le Nucléaire

PARTIE 5

ENERGIE NUCLEAIRE

1 - L'ENERGIE NUCLEAIRE

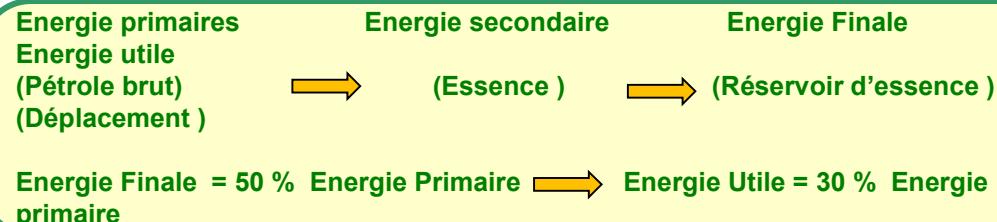
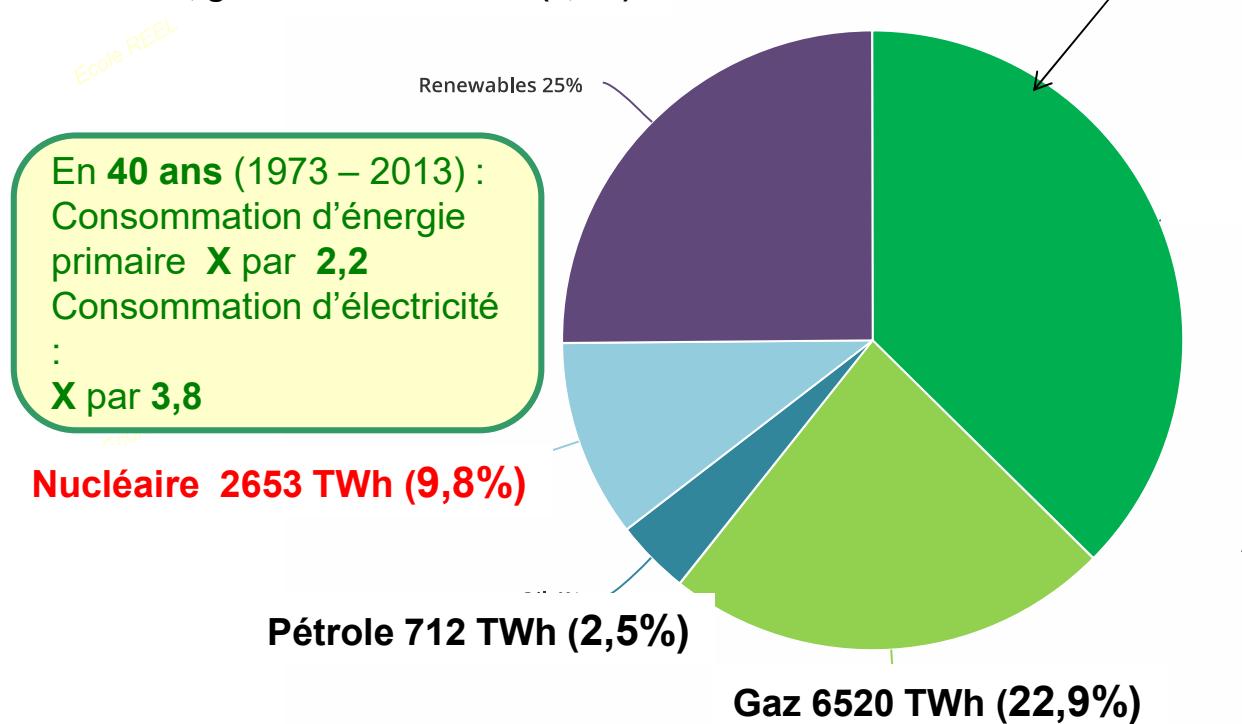
- **Introduction** (avec une revue des ENR)
- **La Radioactivité**
- **Principes des réactions Nucléaires** (Fission – Fusion)
- **Applications de l'Energie Nucléaire**
- **Activités Nucléaires** (en France, au Canada, aux USA)
- **Historique**

ENERGIE NUCLEAIRE

INTRODUCTION

Origine de la production d'électricité mondiale – 2021 28 466 TWh

Renouvelables 8349 TWh (28,8%)
dont Hydroélectrique (15%),
Eolien (6,5%), Solaire (3,6%),
Biomasse, géothermie et autres (3,7%)



En ce début du XXI ième siècle, **80 %** de l'énergie primaire consommée par l'humanité provient de la combustion de pétrole, de charbon et de gaz naturel qu'on appelle **Combustibles Fossiles**

10% de la consommation par la combustion directe de la **Biomasse**

10 % restant par les **EnR** :
Hydro, éolien, solaire,
géothermie, énergies marines
et nucléaire

Augmentation de 3,1 % en 2022

- Chine 6 % (7 % de croissance)
- Inde 12% (7 % de croissance)
- Europe 2,3% (2,3 % de croissance)
- USA moins de 1 %
- France : Baisse

Chine + Inde = 70% de l'augmentation de la production d'électricité mondiale

ENERGIE NUCLEAIRE

INTRODUCTION

Le Nucléaire désigne l'ensemble des techniques et des industries permettant de produire et d'exploiter **l'énergie nucléaire**, d'utiliser les rayons ionisants, de gérer les déchets radioactifs ainsi que la radioprotection associée

L'électronucléaire comprend l'ensemble des technologies permettant de construire, d'alimenter en combustible, de faire fonctionner, de maintenir et de démanteler des réacteurs nucléaires producteur de vapeur (chaudière nucléaire) puis d'électricité (groupe turboalternateur), le traitement du combustible pour extraire, recycler ou stocker les matières nucléaires produites.

Le **nucléaire médicale** et **industriel** désigne des techniques et savoir-faire pour les diagnostics et traitements en médecine nucléaire et dans l'industrie

Le **nucléaire militaire** inclut les technologies relatives à la conception, la production, le maintien en conditions opérationnelles et le démantèlement des armes atomiques. Associé à ces technologies de la bombe nucléaire, il y a le concept de la dissuasion nucléaire.

La **propulsion nucléaire navale** utilise une chaudière nucléaire pour la production de vapeur en remplacement des chaudières classiques au fuel, au gaz ou au charbon. Ces chaudières nucléaires sont de petite taille compte tenu de leur implantation sur des navires de surface (civil ou militaire) ou des sous-marins (militaire).

La **propulsion spatiale** : le moteur atomique (*comme pour la fusée de Tintin*)

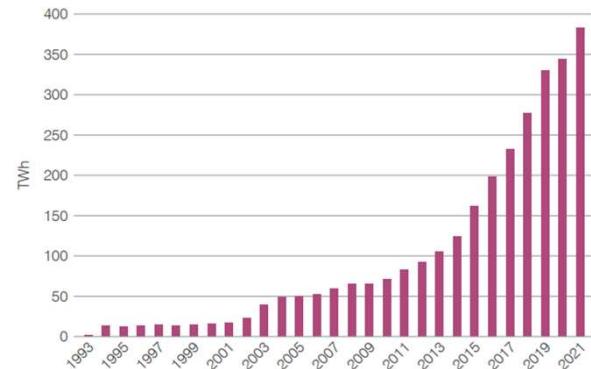
Le nucléaire donne lieu à des débats passionnés, à d'importants questionnements et espoirs, à des affrontements et coopérations économiques, politiques et géostratégiques en ce qui concerne l'extraction de l'uranium, la fabrication du combustible (et son enrichissement), la recherche scientifique, la sécurité nucléaire, la lutte contre la prolifération nucléaire ainsi que la détention ou non de l'arme nucléaire avec la politique de dissuasion associée.

ENERGIE NUCLEAIRE

INTRODUCTION

2020 : La Chine dépasse la France avec 345 TWh (49 réacteurs) contre 335 TWh (56 réacteurs)

Production électronucléaire en CHINE



Production d'électricité d'origine nucléaire par pays en 2021 - 2022



Part du nucléaire dans la production totale d'électricité en 2021-2022

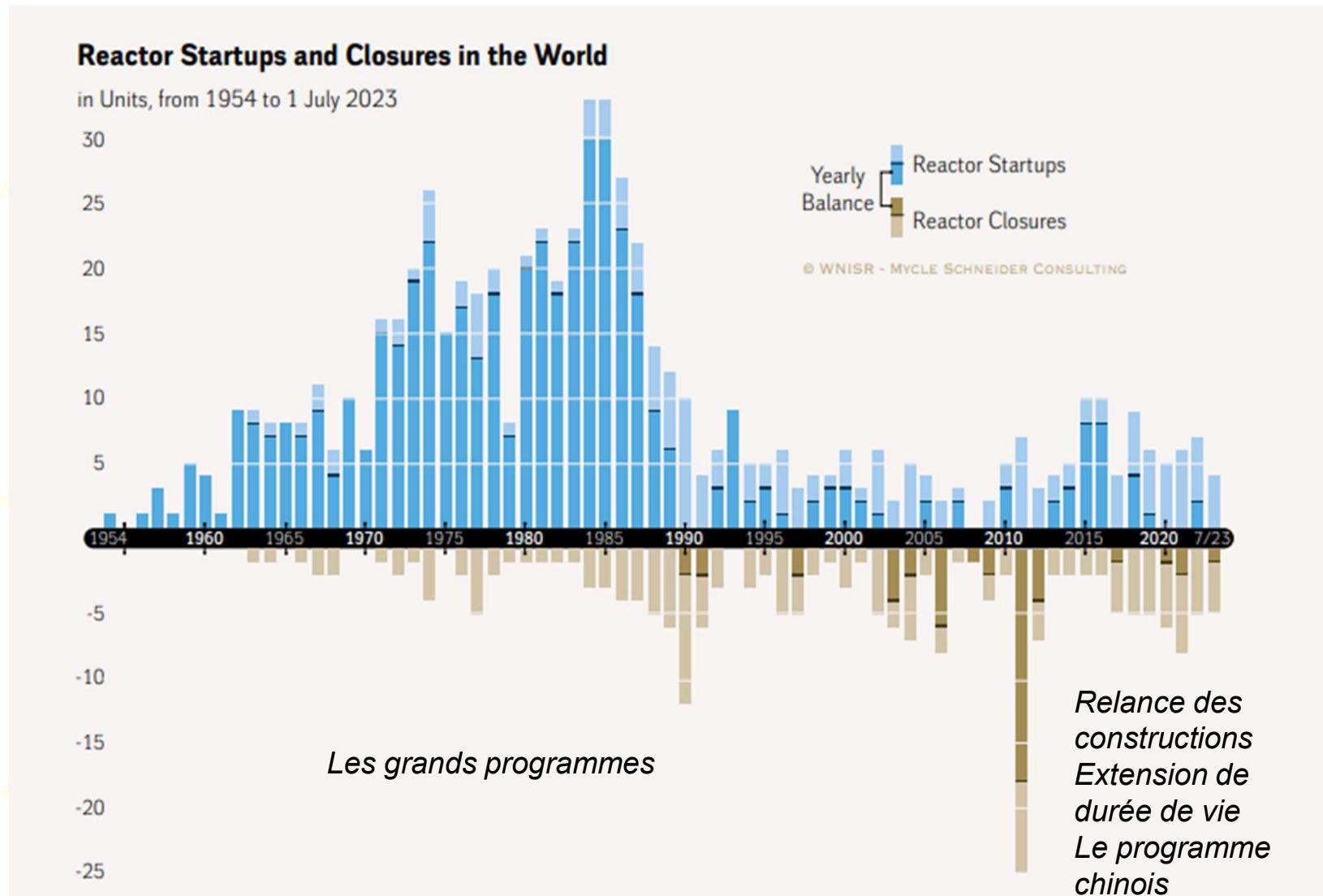


Sources: IAEA-PRIS, with national sources for France and Switzerland, and Energy Institute data for Ukraine, compiled by WNISR, 2023

Source : AIEA

ENERGIE NUCLEAIRE

INTRODUCTION



ENERGIE NUCLEAIRE

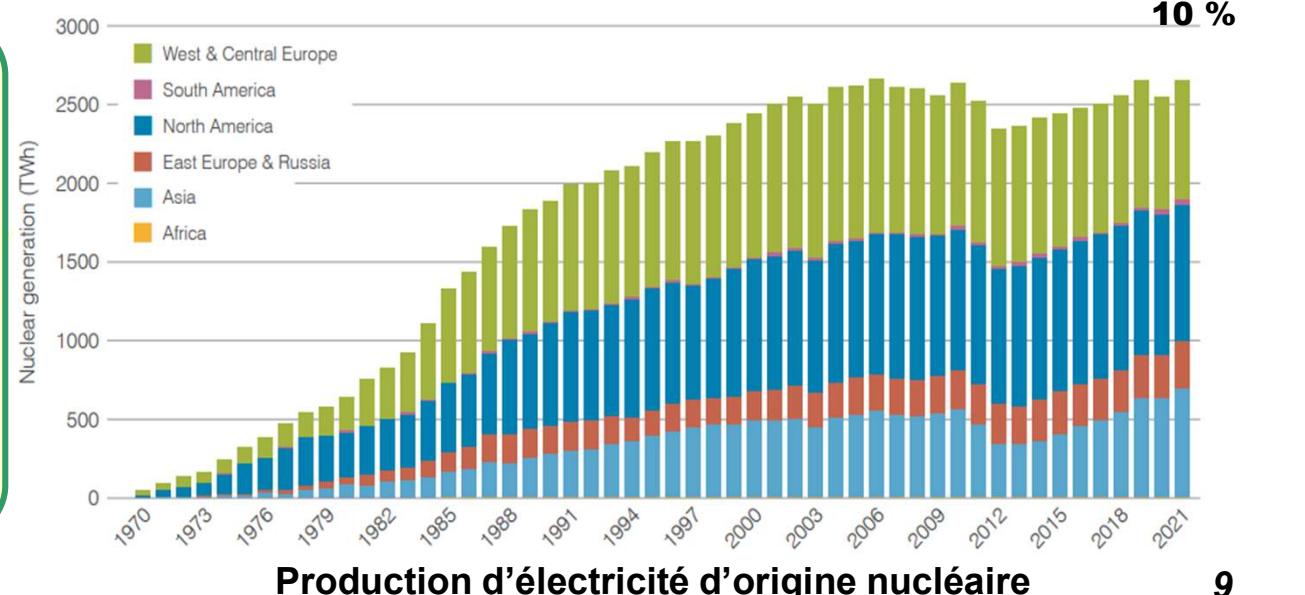
INTRODUCTION

LES DERNIERS CHIFFRES DU NUCLEAIRE (1/07/2022)

- **Puissance générée (2653 TWh) en légère hausse par rapport à 2020**
- **Démonstration de Résilience et de Flexibilité**
- **Facteur de charge en moyenne à 80 %**
- **440 réacteurs en opération : 395 GWe (70 % de REP) 407 et 365 GWe en 07/2023**
- **Nouveaux réacteurs :** Barakah 1,2,3 & 4 (UAE), Ostrovets 1 (Biélorussie), Leningrad II-2 (Russie), Fuqing 5 & 6 et Tianwan 5 (Chine)
- **Arrêts de 6 réacteurs :** FSH 1&2 (France), Indian Point 2 et Duane Arnold (USA), Leningrad 2 (Russie), Ringhals 1 (Suède)
- **Entre 2018 et 2021 :** 26 réacteurs fermés (20,8 GWe) - 20 nouveaux réacteurs (21,3 GWe)
- **07/2022 :** 4 nouveaux réacteurs mis en service – **56 réacteurs en construction (58MWe)**
2 réacteurs fermés
- **Délais moyens de construction réduits de 117 mois à 95 mois (Chine et Russie)**

2020 : La Chine a générée plus d'électricité nucléaire que la France

2022 : La France enregistre sa plus faible production électronucléaire de ces 30 dernières années !!!



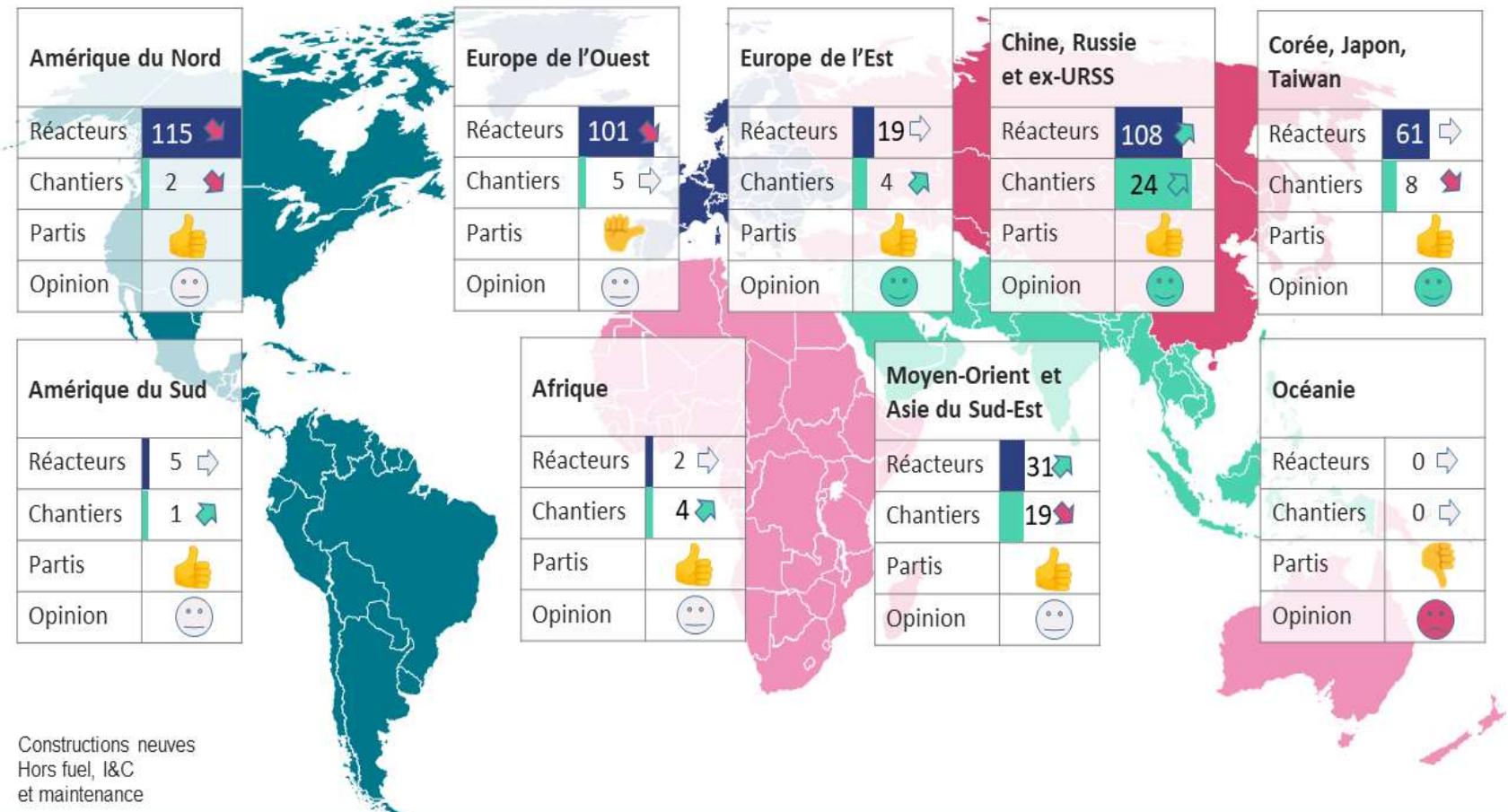
ENERGIE NUCLEAIRE

INTRODUCTION

Ecole RE

Ecole

Ecole



The Shifters – Cartographie politique de l'électricité nucléaire dans le monde

2

ENERGIE NUCLEAIRE

INTRODUCTION

RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE (+4°C en 2100 !!!!). Un impératif : Réduire les émissions de gaz à effet de Serre. Zéro carbone en 2050 ! Réaliste ?

CRISE DE L'ENERGIE : Flambée des prix du gaz, du pétrole et de l'électricité. Les EnR, intermittents, ne peuvent satisfaire la demande.

Un besoin de croissance dans les économies actuelles qui passe par une augmentation de la consommation énergétique (et d'électricité).

LES QUESTIONS DE SOUVERAINETE ENERGETIQUE et ECONOMIQUE. Le cas de l'Allemagne et de sa dépendance au gaz Russe dans un contexte conflictuel (Guerre en Ukraine – Positionnement de l'Europe)

Le NUCLEAIRE doit retrouver sa place comme vecteur pilote de production d'électricité avec une reduction des gaz à effet de serre et comme vecteur de souveraineté énergétique et donc de souveraineté tout court.

La relance d'un programme de réacteurs nucléaires en France avec une reorganization de la filière qui dépend d'une mobilization de compétences (avec un impératif de recrutement et de formation et une stabilité politique).

Une possible relance au Canada avec SMR's et Réacteur de puissance.

Un premier AMR aux USA avant 2030 (construction lancée)

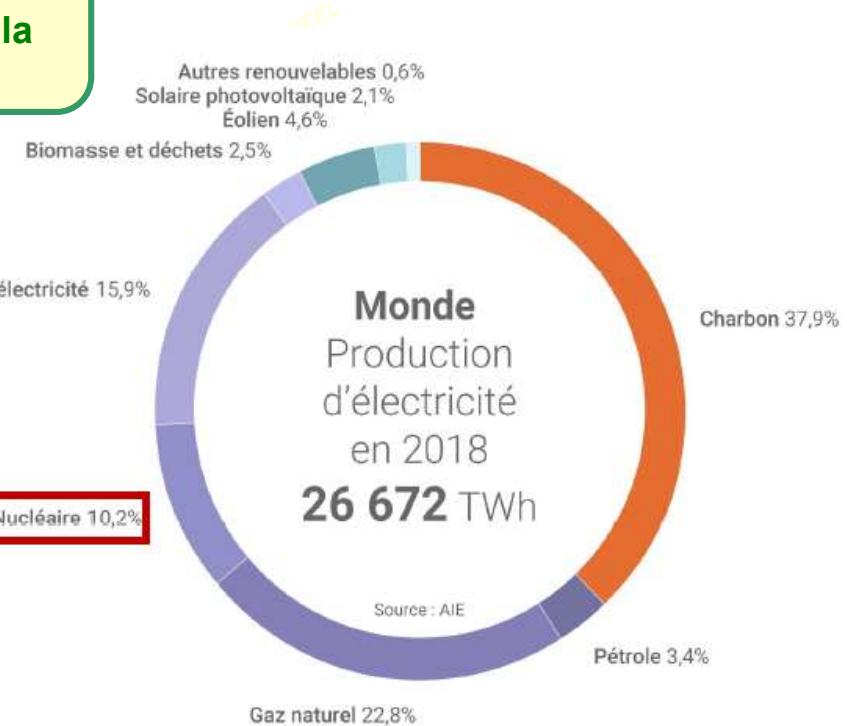
Annonce de la COP28 : Tripler la puissance nucléaire d'ici 2050 ! Réaliste ? 11

ENERGIE NUCLEAIRE

INTRODUCTION

Production & Consommation énergétique mondiale en 2018

Chiffres plus
représentatifs avant la
crise COVID



80,5 % d'Energie Primaire Carbonée (énergies fossiles)

Mais le déclin de la demande, d'abord du charbon et ensuite du pétrole, semble écrit

26672 TWh d'électricité = **2293 Mtep** soit **16 %** de la consommation de l'**Energie Primaire** mondiale

1 tep = 11 630 kW ; 1 t de bois = 0,3215 tep ; 1 t d'Uranium = 16 000 tep ; 1 tep = 1000 m³ de gaz

tep : Tonne Equivalente Pétrole

ENERGIE NUCLEAIRE

INTRODUCTION (Le Nucléaire)

Prévision de consommation mondiale d'énergie (et d'électricité) de 2019 à 2050 (EJ)

Final Consumption	2019	2030	2040	2050
Energy	427.1	491.4	544.3	592.3
Electricity	80.4	109.0	135.8	161.4
Electricité comme % d'énergie	18.8%	22.2%	24.9%	27.2%

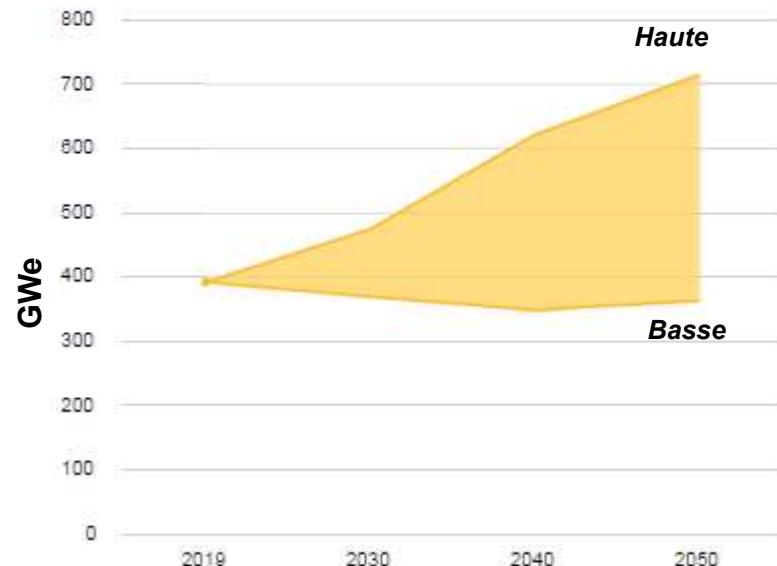
PREVISION à 2050

Fourchette basse (stabilité) et fourchette haute (augmentation de la puissance installée)

Le nucléaire est une source de production d'électricité Piloteable et Bas Carbone

COP 28 : Tripler la puissance nucléaire

Capacité de production électronucléaire de 2019 à 2050



Capacité de production électrique (GWe)

Electrical Capacity	2019		2030		2040		2050	
	Low	High	Low	High	Low	High	Low	High
Total	7 410	10 722	10 722	13 272	13 272	15 978	15 978	15 978
Nuclear	392	369	475	349	622	363	715	715

Nucléaire comme % de la production électrique

Numérique et Consommation d'Energie

Le numérique absorbe déjà **10%** de la consommation mondiale d'électricité et génère plus de **4 %** des émissions de gaz à effet de serre.

Augmentation de la consommation de plus de 5 % chaque année avec les évolutions suivantes :

- 4K ➤ 8K
- 4G ➤ 5G (plus de puissance, plus d'informations et plus grande consommation électrique)
- Augmentation du nombre de smartphones, tablettes, PC, Data Centers, Réseaux,...

Data Center hyperdimensionné pour une hyperdisponibilité

Logiciels = obégiciels (calculs plus longs et plus gourmant en énergie)

La consommation d'électricité se répartie en :

- **20 %** pour les **Equipements Terminaux**
- **19 %** pour les **Data Centers** (un gros data center consomme 100 MWe)
- **16 %** pour les **Réseaux**
- **45 %** pour la **Production** (Ordinateurs, smartphones, TV,...)

**Attention l'industrie
(Sidérurgie,
cimenterie,
chimies,...) veut
passer au tout
électrique d'ici 2030 !
Cela représenterai une
consommation de 12
réacteurs.**

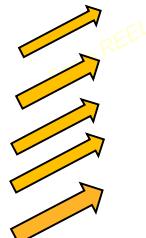
Chiffres de 2017. On peut s'attendre à une augmentation de 20 à 40 % pour 2025

1 mail de 1Mo ➤ une ampoule de 60W pendant 25 minutes et 20 gr de CO2 émis

Consommation d'énergie du numérique : **3000 TWh/an**. On pourrait atteindre plus de 7000 TWh en 2025 . L'augmentation de la consommation d'énergie du numérique entre 2013 et 2017 : **50%**

Prévisions de la consommation d'électricité dans le futur :

- Numérique
- Transport (voiture électrique et autres)
- Dessalement de l'eau de mer
- Production d'Hydrogène
- Rattrapage de l'Inde et de l'Afrique



Il faut 800 kg de matières premières pour fabriquer un PC de 2 kg

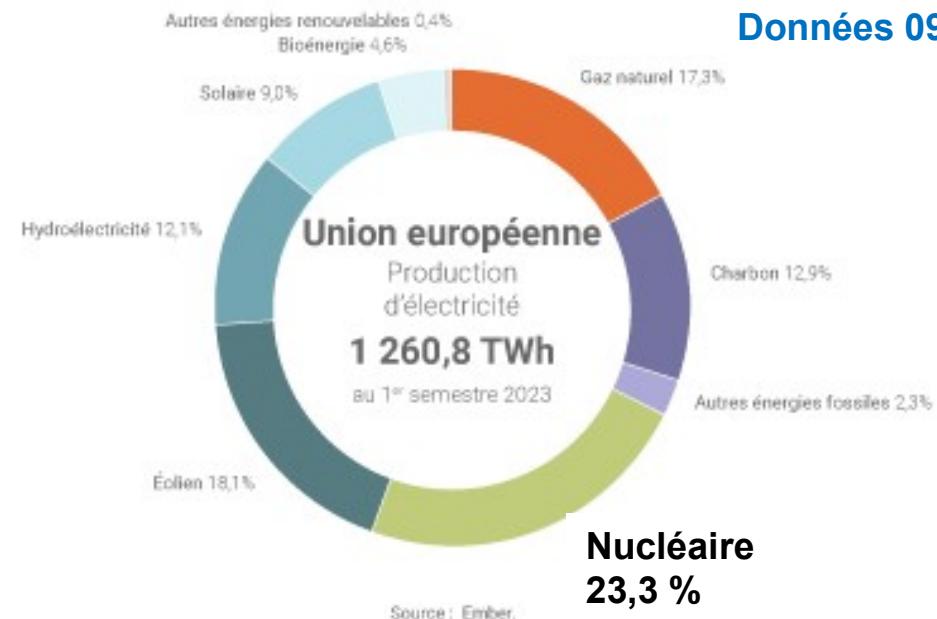
ENERGIE NUCLEAIRE

INTRODUCTION

Consommation & Production d'électricité aux USA

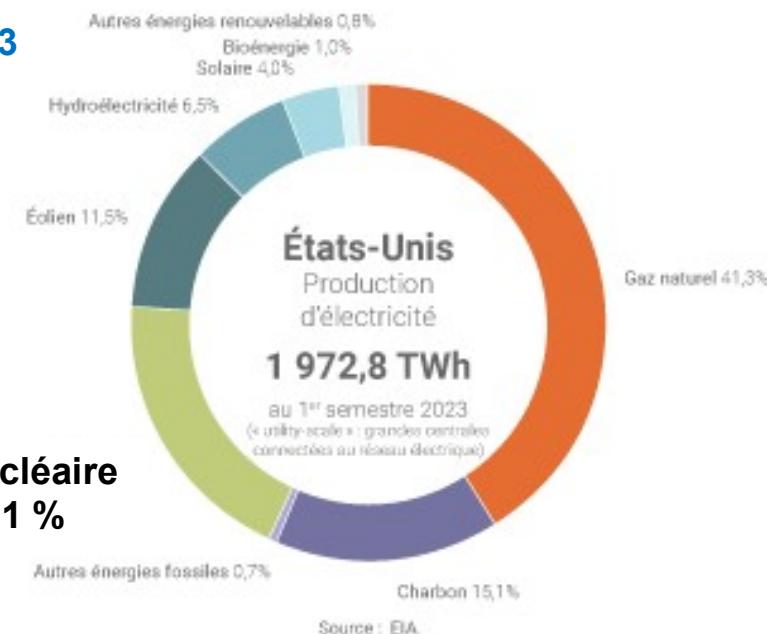
2022	4048 TWh	Pour une production de 4548 TWh (NUC = 17,8 %)
2021	3979 TWh	pour une production de 4164 TWh
2020	3897 TWh	pour une production de 4051 TWh
2018	4032 TWh	pour une production de 4210 TWh

Population : 449 Millions



Données 09/2023

Population : 340 Millions

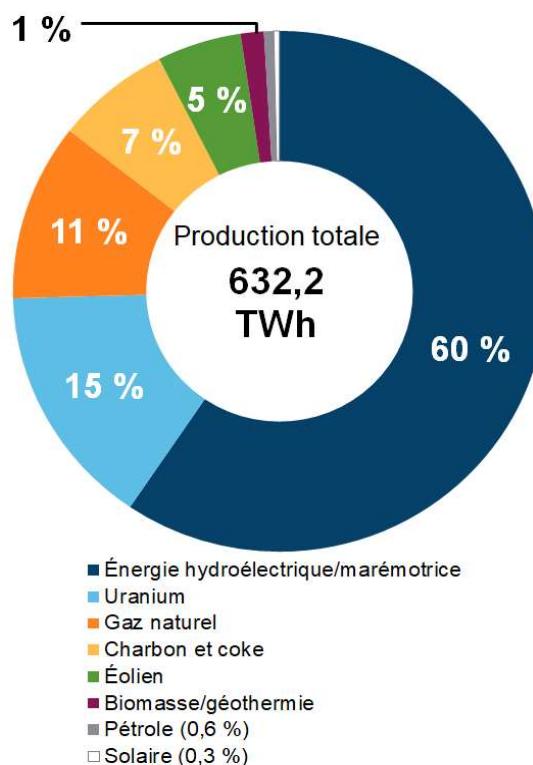


ENERGIE NUCLEAIRE

INTRODUCTION

Consommation & Production d'électricité au Canada

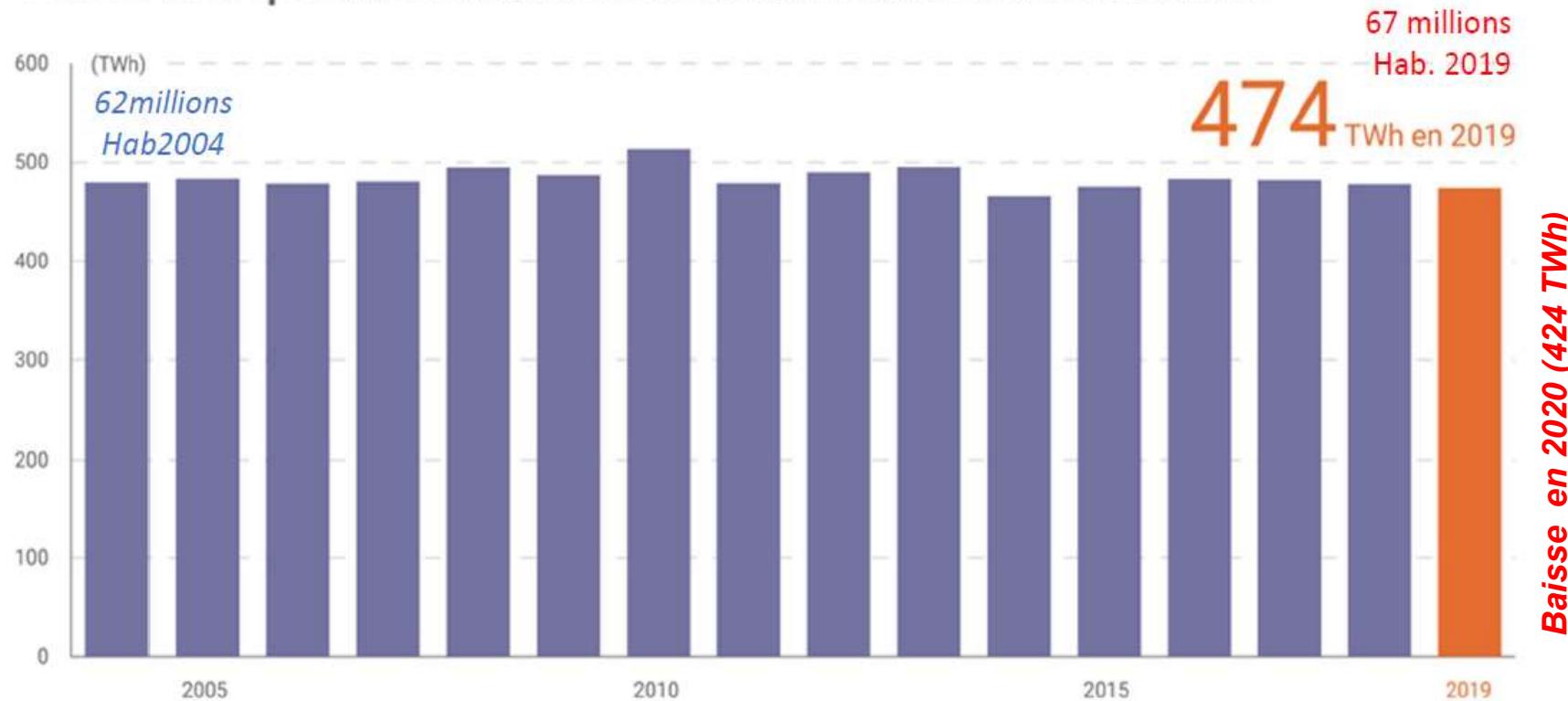
- 2000 **523 TWh** pour une production de **605 TWh** (NUC = 12 %)
- 2010 **539 TWh** pour une production de **603 TWh** (NUC = 15 %)
- 2020 **590 TWh** pour une production de **652 TWh** (NUC = 14,4 %)
- 2022 **+600 TWh** pour une production de **659 TWh** (NUC = 13,1 %)



A priori, un ajout d'une puissance nucléaire de +4,8 GW permettrait une production d'électricité sans charbon.
Aujourd'hui c'est 14% Nucléaire contre 7 % Charbon

Consommation d'électricité en France sur 15 ans

France métropolitaine Évolution de la consommation brute d'électricité



Source : RTE

Constat : Stabilité de la consommation (voire légère baisse)

Elle sera encore en baisse en 2020 (crise sanitaire puis crise économique)

Origine 2019 de l'électricité vendue par EDF :

87,7 % nucléaire – 7,1% renouvelables (dont 5,6 % hydraulique) – 3,5% gaz
 1,1% fioul - 0,6% charbon

ENERGIE NUCLEAIRE

INTRODUCTION (Les EnR)



Photovoltaïque décentralisé



Photovoltaïque centralisé (Ferme).

La plus puissante au monde (Chine) : 4 millions de panneaux solaire pour **850 MWe** sur **27 km²**
Efficacité : moins de 25%

LES EnR's

Ecole REEL



Les plus puissantes éoliennes :

Eolien en Mer (posé sur le fond) :

GE (ex Alstom) avec Haliade X : 13 MWe (260 m de haut – Rotor de 220 m)

Siemens Mastodon : 14 MWe

Vestas V236 : 15 MWe (80 GWh/an) (Rotor de 230 m)

Eolienne flottante Vestas : 9,5 MWe

Projet chinois (MingYang) de 16 MWe



Eolien Terrestre

ENERGIE NUCLEAIRE

INTRODUCTION (Les EnR)



Ecole REEL



Ecole REEL

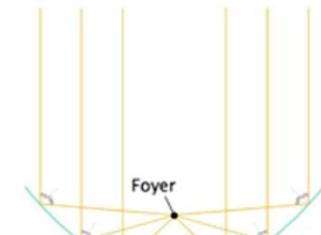
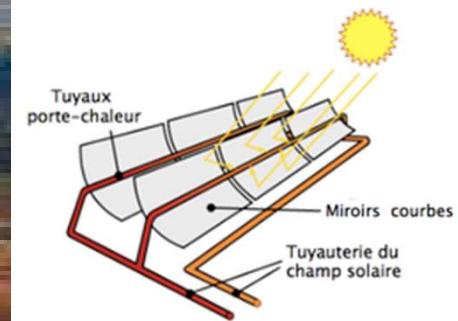


Ecole REEL

CENTRALE SOLAIRE

Centrale solaire centralisée de **NOOR** près de Ouarzazate au Maroc.
4 centrales sur **3000 ha** et une production globale de **580 MWe** :

- Noor 1** : 380 ha 160 MW - Technologie thermo-solaire à capteur cylindro-paraboliques (miroirs courbes)
- Noor 2** : Idem Noor 1 - 200 MW
- Noor 3** : Technologie Thermo-solaire à concentration avec une tour - 150 MW
- Noor 4** : Technologie Photovoltaïque - 70 MW



Ecole REEL

ENERGIE NUCLEAIRE

INTRODUCTION (Les EnR)



Academy

PIOLENc (Vaucluse)

Centrale photovoltaïque « flottante » avec 47 000 panneaux solaires. Par le refroidissement de l'eau, le rendement est amélioré de plus de 10 %. EDF étudie un site dans les Alpes.

Installations similaires au Portugal (lac de barrage).

Installation en Thaïlande avec près de 145 000 panneaux photovoltaïques. Une des plus grandes centrales hydrosolaires au monde avec 700 000 m² sur les eaux d'un barrage électrique. Capacité de 2,72 MWe.

EDF – EnR et sa filiale LUXEL ont 18 projets de centrales photovoltaïques de 120 MWe pour 100 M€ à réaliser en 2020/2021. C'est plus de 200 000 panneaux sur plus de 100 ha.



ENERGIE NUCLEAIRE

INTRODUCTION (Les EnR)

Remplacer les 2 Tranches de Fessenheim (FSH) par de l'éolien terrestre

La question posée : Combien d'éoliennes actuelles terrestres pour remplacer la production des deux Tranches nucléaires de Fessenheim devant être arrêtées cette année ?

FSH a produit 11,9 TWh en 2018

Les éoliennes terrestres ont produit **27800GWh** pour un parc de 15GW installé. Les éoliennes ont donc produit pendant **1853 h** pour une année de 8760 heures, soit un **rendement de 21 %**.

Pour remplacer 11,9 TWh de FSH, il faut donc 5660 MW d'éoliennes terrestres.

Avec une puissance unitaire moyenne de 2 MW (le parc actuel), il faut donc près de 3000 éoliennes.

Avec des éoliennes de **3 MW**, on arrive à **1900** éoliennes

Il faut aussi prendre en compte le critère de la puissance disponible aux heures de pointe. Cela correspond à la puissance appelable à volonté, quand elle est nécessaire. Cette caractéristique d'une installation de production d'électricité, primordiale pour la solidité et la stabilité du réseau, s'appelle le **Crédit de Capacité**.

Le crédit de capacité de l'éolien terrestre est de seulement **10%**. Ce qui signifie que 3MW d'éolien permettent de remplacer seulement 300kW de puissance ferme. Par comparaison, le **crédit de capacité du nucléaire** est de l'ordre de **70%**.

Pour remplacer une centrale nucléaire de 1800 MWe fonctionnant «normalement», en tenant compte des crédits de capacité respectifs de l'éolien et du nucléaire, il faudrait donc un peu plus de **4 000 éoliennes** terrestres d'une puissance moyenne de 3MWe.

La production 2019 de FSH était équivalente à celle de tous les panneaux solaires en France (2,2 %)



Cela fait vraiment beaucoup de terrains occupés, de turbines, d'acier et de bloc de béton (et des terres rares)

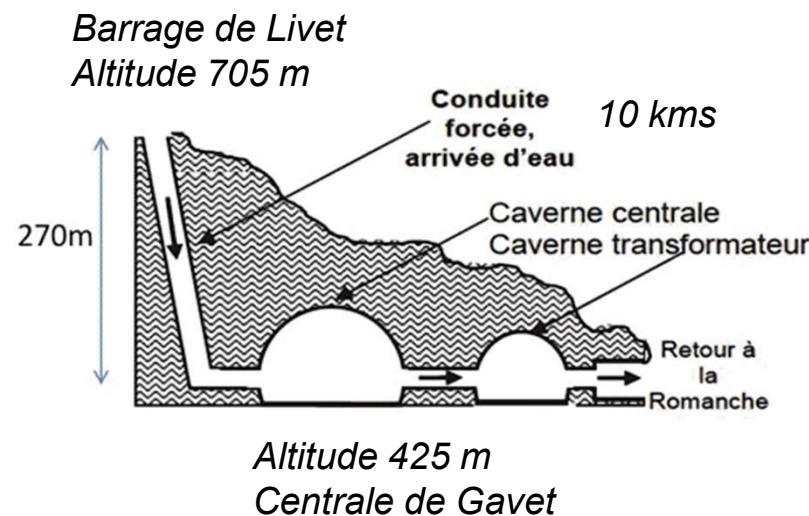
ENERGIE NUCLEAIRE

INTRODUCTION (Hydroélectrique)

Reproduction interdite sans l'accord d'EXPERTNUC



Hydroélectricité
25,46 GW installés
France : 1^{er} producteur en UE



Centrale hydroélectrique de Romanche-Gavet

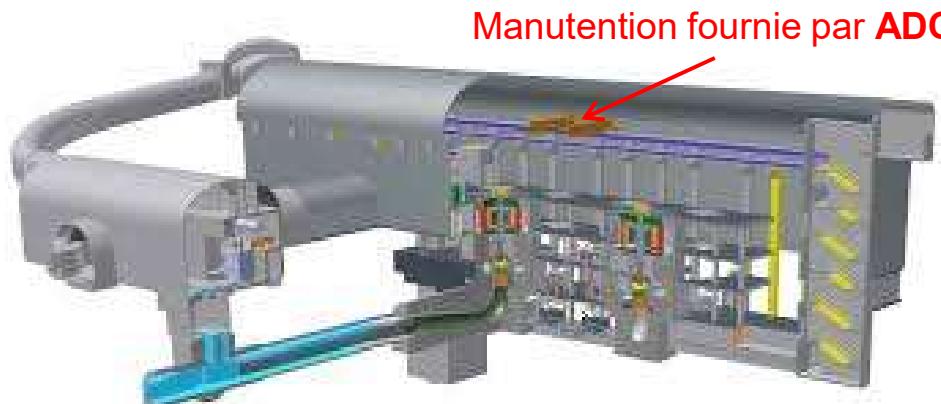
97 MWe (560 GWh/an). 1,5 % de la production hydroélectrique Française (500 centrales et 650 barrages)

Le barrage détourne une partie de l'eau de la Romanche qui se déverse dans une galerie d'aménée de 10 kms creusée sous Belledonne. Capacité d'alimenter Grenoble et Chambéry

400 Millions € d'investissement (modification d'un site de 6 barrages existants). Une première en Europe.



2 Turbines
« Francis » de
50 MW

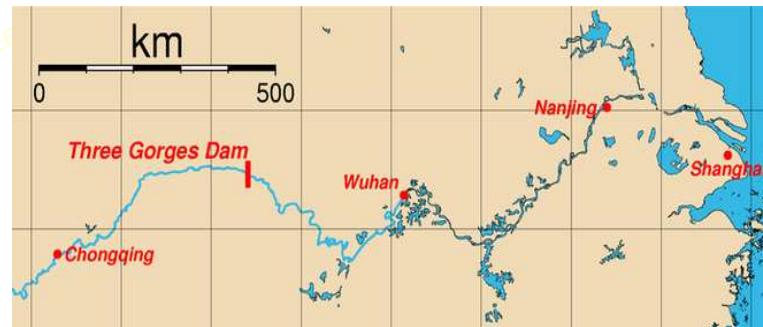


ENERGIE NUCLEAIRE

INTRODUCTION (Hydroélectrique)

Le plus grand barrage du monde est situé en Chine sur le fleuve Yangzi Jiang dans la province centrale du Hubei. C'est le barrage des **Trois Gorges**.

Il a battu en 2020 le record mondial de production électrique avec 111.795 GWh.



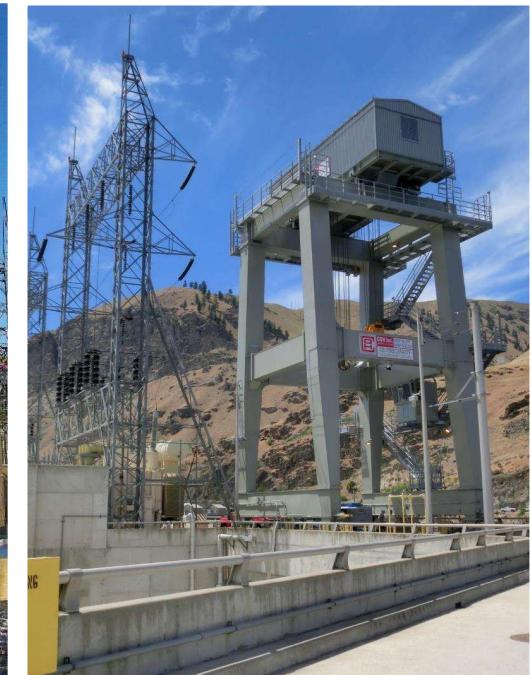
Avec plus de 2,3 kilomètres de long et 185 mètres de haut, sa construction progressivement entre 2003 et 2012. Il possède 32 turbines d'une puissance unitaire de 700 MW et deux déplacement de plus de 1,8 million de tonnes. Les grandes turbines qui pèsent plus de 1500 tonnes chacune ont été construites notamment par 116 villages engloutis. Son coût des constructeurs européens et leurs partenaires ou filiales locaux : allemand avec Voith, Autrichien avec Andritz et français (à l'époque) avec Alstom.

L'hydraulique est de loin la première source d'électricité renouvelable dans le monde (70%). Mais la majorité des barrages sont construits pour l'irrigation. Il existe de nombreux projets très ambitieux en Chine, en Asie et en Afrique (voir le projet en Ethiopie). En revanche, la France semble moins y croire. D'autant que les sites potentiels se font rares et les démarches pour l'implantation d'un barrage sont très longues.

ENERGIE NUCLEAIRE

INTRODUCTION (Hydroélectrique)

COH un leader en Amérique du Nord pour la fourniture d'équipement de manutention des barrages



STEP

Station de Transfert d'Energie par Pompage : C'est un type particulier d'installations hydroélectriques. composées de 2 bassins situés à des altitudes différentes avec un groupe hydroélectrique réversible dit « synchrone ». La STEP permet de stocker de l'énergie en pompant l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur lorsque la demande électrique est faible (prix bas) par rapport à la production. Lorsque la demande électrique augmente (prix élevé), la STEP restitue de l'électricité sur le réseau en turbinant l'eau du bassin supérieur comme le fait un barrage hydroélectrique.

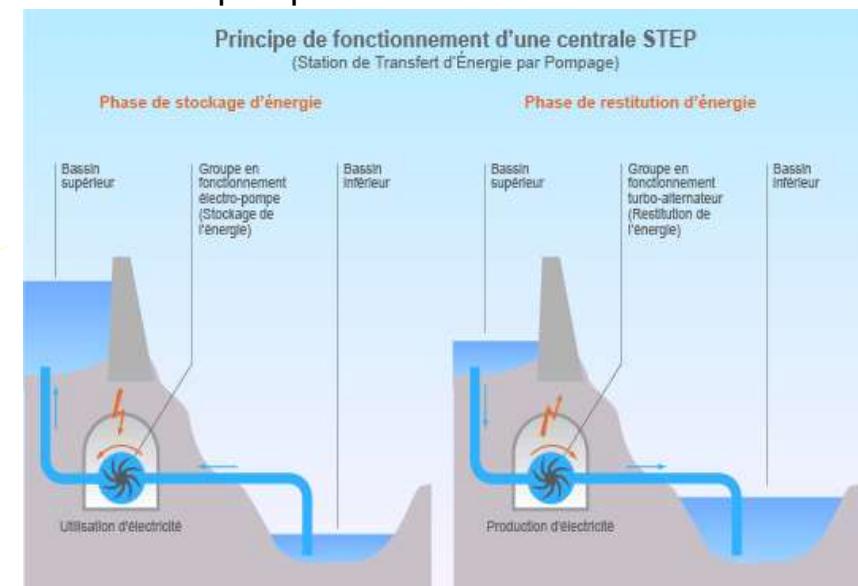
Le groupe hydroélectrique fonctionne comme un ensemble « pompe-moteur » ou » turbine – alternateur »

Grace à leur fonction de stockage, les STEP contribuent à maintenir l'équilibre entre production et consommation sur le réseau électrique

En général ces installations sont implantées dans des zones offrant des différences de relief significatives entre les deux bassins

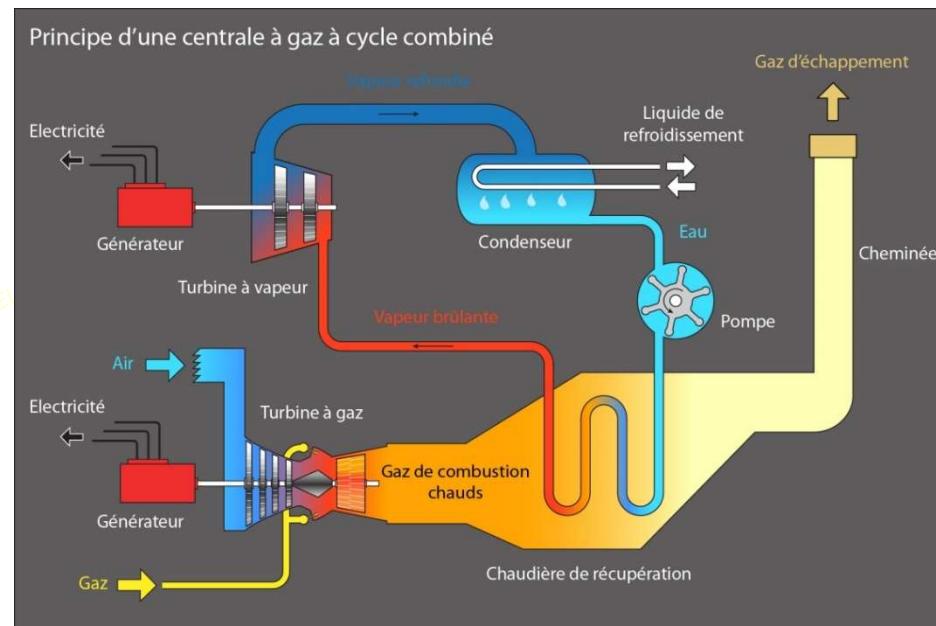
Une STEP dite mixte : Grand Maison : Reçoit l'eau de l'Eau d'Olle et utilise les retenues de Grand Maison (amont) et du Verney (aval).

Les STEP consomment plus d'électricité qu'elles n'en produisent et sont activées en dernier recours pour sécuriser le réseau électrique : équilibre entre production et consommation et maintien de la fréquence sur le réseau. *En utilisant les STEP on pourrait diminuer les variations des réacteurs nucléaires et les rendent ainsi plus efficaces.*



ENERGIE NUCLEAIRE

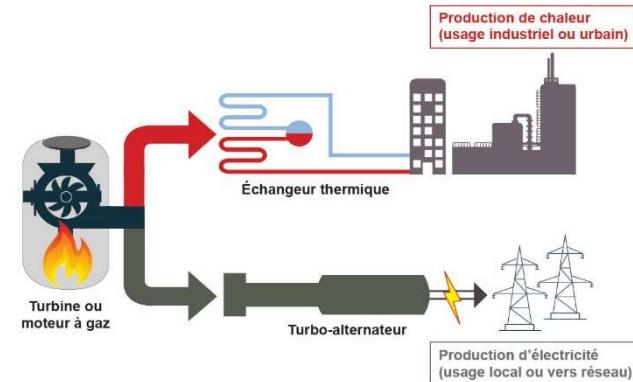
INTRODUCTION (Gaz Naturel)



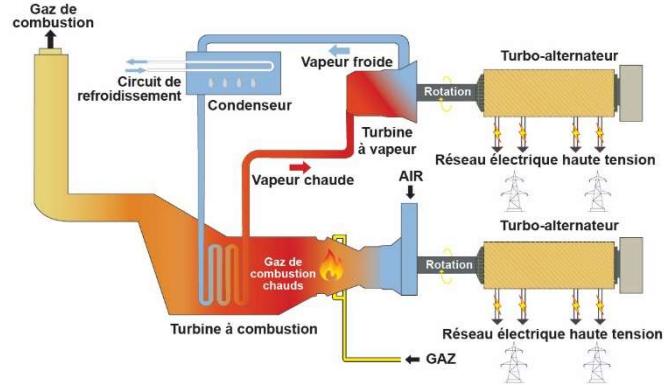
Une Centrale Thermique à Cycle Combiné Gaz (CCG)

produit de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de gaz naturel. Ce type de centrale combine deux types de turbine : une turbine à combustion et une turbine à vapeur reliées à un alternateur. Avec le même volume de combustible, ces deux turbines permettent de produire une quantité plus importante d'électricité. Grâce à l'utilisation du gaz naturel comme combustible, les émissions de CO₂ sont divisées par 2 par rapport à une centrale au charbon. Flexible et réactive, une centrale à cycle combiné a un rendement supérieur à celui des centrales thermiques classiques. Capable de monter à pleine puissance en moins d'une heure, elle répond aux fortes variations de consommation.

PRINCIPE GÉNÉRAL DE LA COGÉNÉRATION



EXEMPLE D'UNE CENTRALE À CYCLE COMBINÉ AU GAZ





Academy

L'énergie nucléaire est l'énergie **de liaison des constituants du noyau des atomes**.

Dans les réacteurs électronucléaires actuels, une forte énergie sous forme de chaleur est libérée par la fission (et la réaction en chaîne de celle-ci) de noyaux lourds.

Dans le futur, on pourra utiliser la chaleur libérée par la fusion de noyaux légers : Projet ITER

Cette chaleur (puissance thermique) est alors convertie en électricité au travers d'une turbine (puissance mécanique) et d'un alternateur (puissance électrique). Cette électricité est distribuée sur un réseau pour y être consommée (chaleur, transport, rayonnement)

On passe d'une puissance thermique à l'entrée de la turbine à une puissance mécanique à l'entrée de l'alternateur puis à une puissance électrique à la sortie de ce dernier.

Quelques unités :

L'unité de l'énergie est le Joule

L'unité de l'énergie électrique est le **Watt** mais pour les installations de production d'électricité c'est le kWh (ou le MWh ou le GWh ou le TWh quand il s'agit d'une production plus globale)

E (Energie en Joule) = P (puissance en Watt) x t (Temps en seconde)

$$E = R \times i^2 \times t$$

$$1 \text{ Joule} = 1 \text{ Watt} \times \text{Seconde}$$

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ Joules}$$

$$1 \text{ Exajoule (EJ)} = 10^{18} \text{ joules} \text{ (unité de mesure d'énergie du Système International)}$$

Dans la nature, la plupart des noyaux d'atomes sont stables, c'est-à-dire qu'ils restent indéfiniment identiques à eux-mêmes. Les autres sont instables car ils possèdent trop de protons ou de neutrons ou trop des deux. Pour revenir vers un état stable, ils sont obligés de se transformer. **Ils expulsent alors de l'énergie – provenant de la modification du noyau – sous forme de rayonnements : C'est le phénomène de radioactivité.**

Les atomes qui possèdent cette propriété de transformation spontanée en d'autres éléments en émettant de l'énergie sous forme de rayonnements sont appelés « **radionucléides** » ou « **radio-isotopes** » (isotope radioactif).

Les atomes :

Les atomes sont les constituants de base de toute la matière.

Ils sont tous bâtis sur le même modèle : **un noyau, formé de particules lourdes – protons et neutrons – autour duquel se déplacent les électrons**, particule près de 2000 fois plus légère qu'un proton ou neutron.

Dans un atome, le nombre de protons est égal au nombre d'électrons.

Ce nombre Z, appelé numéro atomique, définit les propriétés chimiques de l'atome et c'est le chimiste russe **Dimitri Mendeleïev** qui eut l'idée de ranger les éléments chimiques dans un tableau de classification publié en 1869. Z = 1 représente l'hydrogène, Z=8 l'oxygène, Z=92 l'uranium, etc. On connaît aujourd'hui **118 éléments chimiques**.

Les isotopes :

Un élément chimique est formé d'atomes ayant le même nombre de protons Z.

Ils ont donc tous le même nombre d'électrons et les mêmes propriétés chimiques.

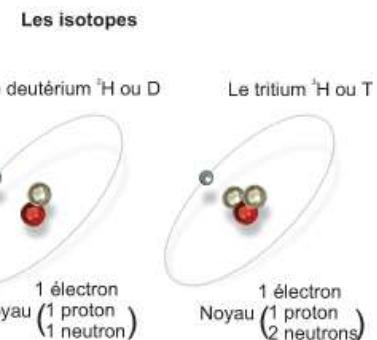
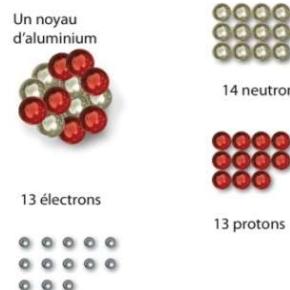
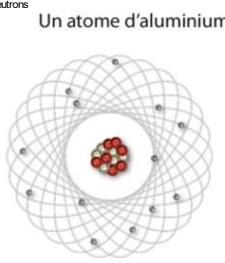
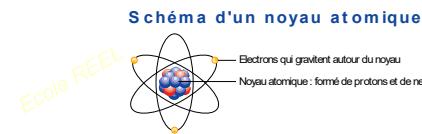
Mais ils peuvent différer par leur nombre N de neutrons : ce sont les isotopes de l'élément en question.

Chaque isotope d'un élément est caractérisé par son nombre de protons et neutrons dans son noyau. Ce nombre de masse est toujours noté en exposant à gauche du symbole chimique de l'élément : les isotopes du carbone, par exemple, possèdent tous 6 protons et le plus souvent, 6, 7 ou 8 neutrons.

On parle alors du carbone 12 (12C), du carbone 13 (13C) ou du carbone 14 (14C).

Parmi ces 3 isotopes du carbone, seul le 14C est radioactif, les 2 autres sont stables.

On connaît aujourd'hui près de 2 800 isotopes dont 2 500 environ sont radioactifs.



ENERGIE NUCLEAIRE

LA RADIOACTIVITE

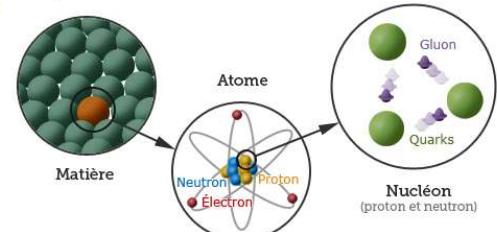
• TABLEAU DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES DANS LE CADRE DU MODÈLE STANDARD •

Matière		ATOME	NOYAU	NUcléONS (Protons & Neutrons)	Quarks
		Électron			
FERMIENS					
La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe.					
Première Famille	ELECTRON	RESPONSABLE de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1.	NEUTRINO ELECTRON	Sans charge électrique et interactant rarement avec le milieu environnant.	
Deuxième Famille	MUON	Un compagnon plus massif que l'électron.	NEUTRINO MUON	Propriétés similaires à celles du Neutrino Electron.	
Troisième Famille	TAU	Un compagnon encore plus lourd que le Muon.	NEUTRINO TAU	Propriétés similaires à celles du Neutrino Electron.	
BOSONS VECTEURS					
Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.					
	PHOTON	Grain élémentaire de la lumière porteur de la force électromagnétique.	GLUON	Porteur de la force "forte" entre Quarks.	BOSONS INTERMÉDIAIRES : W, W et Z ⁰
					Porteurs de la force "faible", responsables de certaines formes de désintégrations radioactives.
BOSON DE HIGGS ?					
Hypothétique			Responsable de la "brisure de symétrie électro-faible"		
			Hypothétique		
GRAVITON ?					

Daniel BONNERIE - CEAD/CDAMPA Novembre 1992 (MAJ Sept. 2005)

Les briques élémentaires de la Nature

Composition de la matière



Fermions (particules de matière)

Quarks Électron Neutrino

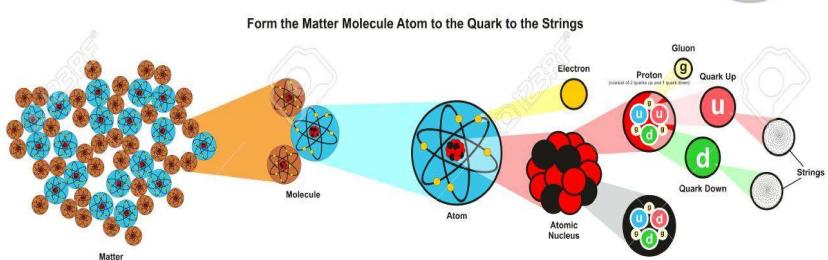
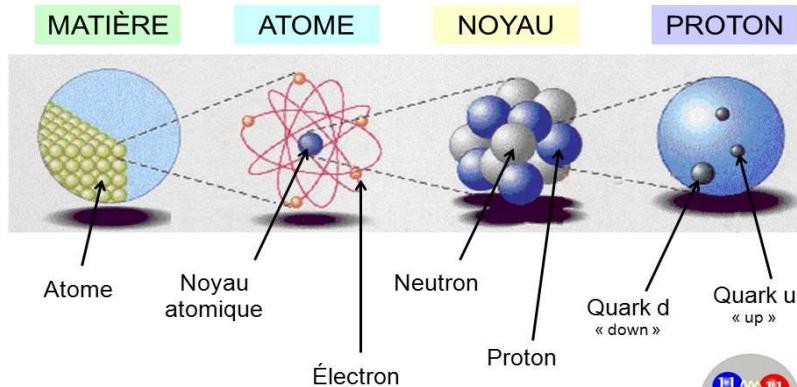
Bosons (particules de force)

- Photons → force électromagnétique
- Gluons → interaction forte
- Bosons intermédiaires → interaction faible

Source : CEA

ENCORE PLUS PETIT

Au cœur de la matière



Dans les années les scientifiques pensaient que les électrons, les protons et les neutrons étaient véritablement indivisibles. On les désigna alors comme particules élémentaires.

Pour étudier l'interaction des neutrons et des protons dans le noyau atomique, on les fait entrer en collision dans une accélérateur de particules. On découvre alors que ces particules subatomiques sont elles-mêmes composées d'objets plus petits, les « **quarks** ». Ces particules composites sont presque toujours représentées sous forme parfaitement sphérique mais cette dernière représente seulement la région de l'espace au-delà de laquelle la nature composite de ces particules devient visible. Dans le modèle standard, proton et neutron n'ont pas de forme à proprement parler. *Jusqu'ici, aucune sous-structure n'a été découverte aux quarks ni aux électrons. Ce sont donc les nouvelles particules élémentaires.*

L'observation des collisions de particules (accélérateur du CERN), composites et souvent instables, a permis aux physiciens de déduire l'existence de nouvelles particules élémentaires.

ENERGIE NUCLEAIRE

LA RADIOACTIVITE

Le tableau de Mendeleïev

PRINCIPE

Conçu en 1869 par le chimiste russe Dimitri Ivanovich Mendeleïev, le tableau périodique classe tous les éléments chimiques selon leur numéro atomique et leurs propriétés chimiques. Quatre éléments ont été identifiés entre 2004 et 2010 et viennent d'être validés par l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC).

1 H	2 Be	3 Li	4 Bérylum	5 Na	6 Magnénum	7 K	8 Ca	9 Sc	10 Ti	11 V	12 Cr	13 Mn	14 Fe	15 Co	16 Ni	17 Cu	18 Zn	19 Al	20 Si	21 P	22 O	23 S	24 Cl	25 Ar	26 He
Hydrogène	Bérylum	Lithium	Bérylum	Sodium	Magnénum	Potassium	Calcium	Scandium	Titan	Vanadium	Chrome	Manganèse	Fer	Cobalt	Nickel	Cuivre	Zinc	Gallium	Silicium	Phosphore	Oxygène	Soufre	Chlore	Argon	Hélium
Li	Be	Na	Mg	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Al	Si	P	O	S	Cl	Ar	He		
Hydrogène	Bérylum	Lithium	Bérylum	Sodium	Magnénum	Scandium	Titan	Vanadium	Chrome	Manganèse	Fer	Cobalt	Nickel	Cuivre	Zinc	Gallium	Silicium	Phosphore	Oxygène	Soufre	Chlore	Argon	Hélium		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26

— Éléments synthétiques créés artificiellement dans des accélérateurs de particules ou lors de réactions nucléaires

✗ Éléments n ayant pas d'utilisation

★ Nouveaux éléments chimiques validés par l'IUPAC

Actinides →

Familles

Classification des éléments en fonction d'un comportement chimique proche.

- Non-métaux
- Métaux alcalins
- Métaux alcalino-terreux
- Métaux de transition
- Lanthanides (ou terres rares)
- Actinides
- Métaux pauvres
- Halogènes
- Gaz rares
- Métalloïdes

État physiques

Ne gaz Hg liquide Fe solide

Ce2 Les décls du CEA Octobre 2016 N°211
Aude Gossat, Cloé Abou et Michel Silzack (photographe), avec la collaboration de Pascal Reiller, chercheur à la DEN

Atome

Constituant fondamental de la matière formé par un noyau (au centre) composé de protons et de neutrons, autour duquel se répartissent des électrons dans différents niveaux d'énergie appelés couches électroniques (ellipses).

Les atomes stables connus ont jusqu'à 7 couches électroniques (correspondant aux 7 lignes du tableau) dont les électrons occupent au fur et à mesure des orbitales électroniques (il existe jusqu'à 44 types de ces orbitales pouvant contenir des sous-couches électroniques : s(1), p(3), d(5) et f(7)).

Élément chimique

Ensemble des atomes caractérisés par un nombre défini de protons dans leur noyau. Ces atomes ont différentes formes possibles : les isotopes (même nombre de protons et d'électrons mais nombre différent de neutrons). Numéro atomique : nombre de protons et d'électrons de l'élément. Symbole atomique : représentation universelle de l'élément.

Périodes I à VII

Classification des éléments selon leur configuration électronique (pour prévoir l'évolution de leurs propriétés) : nombre d'orbitales occupées par des électrons. Les éléments de la ligne I ont 1 couche occupée, ceux de la ligne II en ont 2, etc.

Groupes (1 à 18)

Organisation des éléments selon leurs propriétés communes, comme la réactivité (capacité de l'élément à céder ou recevoir des électrons).

Colonnes 1, 2 et 13 à 17 : éléments remplissant progressivement les orbitales « s » et « p » et ayant le même nombre d'électrons sur leur couche électronique : col. 1 = 1 électron, col. 13 = 3 électrons, col. 14 = 4, etc.

Colonnes 3 à 12 : éléments remplissant les orbitales « d » et « f ».

Colonne 18 : éléments dont la couche électronique externe est saturée.

La terre, du fait de sa composition en éléments lourds qui sont instables, est radioactive.
La radioactivité est un phénomène naturel très commun et incontournable
Tout sur terre est plus ou moins radioactif

ENERGIE NUCLEAIRE

LA RADIOACTIVITE

LES DIFFÉRENTES FORMES DE RADIOACTIVITÉ

Près de **2 500 atomes**, dont la plupart ont été fabriqués par l'homme, sont radioactifs.

On distingue trois formes de radioactivité, correspondant aux trois types de rayonnements émis lors des transformations des noyaux instables.

Le rayonnement « alpha » [α] est constitué de particules composées de deux protons et de deux neutrons (noyau d'hélium). Il concerne les noyaux lourds : l'Uranium 238, par exemple, se transforme en Thorium 234.

Ce rayonnement, qui perd très vite son énergie, a un pouvoir de pénétration très faible.

Il ne parcourt que quelques centimètres dans l'air.

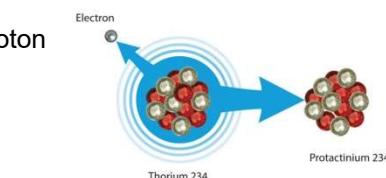
Une feuille de papier ou les couches superficielles de la peau l'arrêtent.



Le rayonnement « bêta » [β] provient de la transformation dans le noyau soit d'un neutron en proton (il y a alors émission d'un électron β^-) soit d'un proton en neutron (il y a émission d'un positon, « électron » de charge positive β^+).

Ce rayonnement ne parcourt que quelques mètres dans l'air.

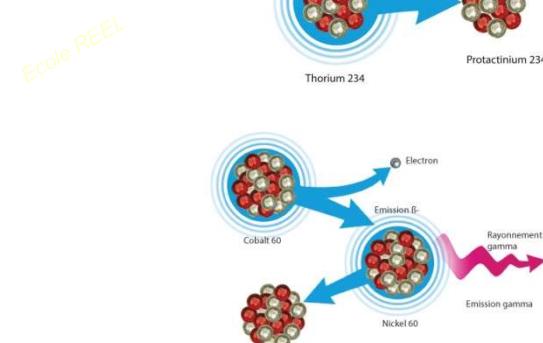
Il est stoppé par une vitre ou une feuille d'aluminium.



Le rayonnement « gamma » [γ] est un rayonnement **électromagnétique**, comme la lumière visible ou les rayons X, mais plus énergétique.

Il est émis le plus souvent par des noyaux possédant encore un excès d'énergie à évacuer après une désintégration α ou β .

Son parcours dans l'air est de plusieurs centaines de mètres et de fortes épaisseurs de plomb ou de béton sont nécessaires pour l'atténuer.



Les rayonnements radioactifs, comme tous les rayonnements, transportent de l'énergie et interagissent avec la matière, notamment le vivant. Certains rayonnements (alpha, bêta, gamma et X) sont dit « **ionisants** » parce qu'ils transportent une grande quantité d'énergie qui provoque un changement de la charge électrique des atomes qu'ils traversent (phénomène d'ionisation). Ils peuvent être, dans certaines conditions d'exposition, dangereux pour les êtres vivants et il faut savoir s'en protéger.

LA RADIOACTIVITÉ DIMINUE DANS LE TEMPS

Chaque radionucléide est caractérisé par sa **période radioactive**, temps (1/2 vie) au bout duquel la **moitié** des atomes radioactifs, initialement présents, a disparu par transformation spontanée. Celle-ci peut varier de quelques secondes à quelques heures voire quelques centaines ou milliards d'années.

- La période radioactive de l'Uranium-238 est de 4,5 milliards d'années ;
- La période radioactive de l'Uranium-235 est de 710 millions d'années ;
- La période radioactive du Césium-137 est de 30 ans (90% des produits de fission ont une demi-vie de 10 à 100 ans),
- La période radioactive du Tritium est de 12,3 ans

ENERGIE NUCLEAIRE

LA RADIOACTIVITE

Le **neutron** est une particule subatomique de charge électrique nulle.

Les neutrons sont présents dans le noyau des atomes. Les neutrons liés dans un noyau atomique sont généralement stables mais les neutrons libres sont instables et se désintègrent en moins de 15 minutes. Les neutrons n'interagissent qu'avec les noyaux des atomes.

La radioactivité produit des neutrons libres. Ces neutrons peuvent être absorbés par les noyaux d'autres atomes qui peuvent alors devenir instables. En particulier, ils peuvent provoquer une fission nucléaire par collisions avec un noyau lourd fissile (**Uranium 235, Plutonium 239**)

Le neutron étant globalement neutre, il ne produit pas directement d'ionisations en traversant la matière. En revanche, il peut avoir de nombreuses réactions avec les noyaux des atomes produisant ainsi des rayonnements ionisant.

On appelle « **Neutrons Rapides** » les neutrons produits par les réactions de fission avant qu'ils ne soient ralentis par un grand nombre de chocs. Leur domaine d'énergie se situe entre 0,1 MeV et 2 ou 3 MeV. L'appoint d'une énergie cinétique relativement importante permet aux neutrons rapides de fissionner davantage de noyaux s'ils sont capturés. **Application aux surgénérateur**.

On appelle « **Neutrons Lents** » les neutrons rapides ralentis par une série de collisions sur des noyaux (Hydrogène, Bore10). Leur énergie cinétique est de l'ordre de 1eV ou d'une fraction d'eV. Quand l'énergie des neutrons lents est de l'ordre de celle des atomes du milieu où ils évoluent, ils sont dits **Thermiques**. **Application aux réacteurs à fission (l'essentiel du parc mondial)**

On appelle « **Neutrons Retardés** » les neutrons produits par la réaction de fission mais qui ne sont pas libérés instantanément, restant prisonniers dans les produits de fission, avant d'être émis puis absorbés. Ils participent grandement au pilotage des réacteurs nucléaires.

L'étude du cheminement des neutrons dans la matière est définie comme la **Neutronique**.

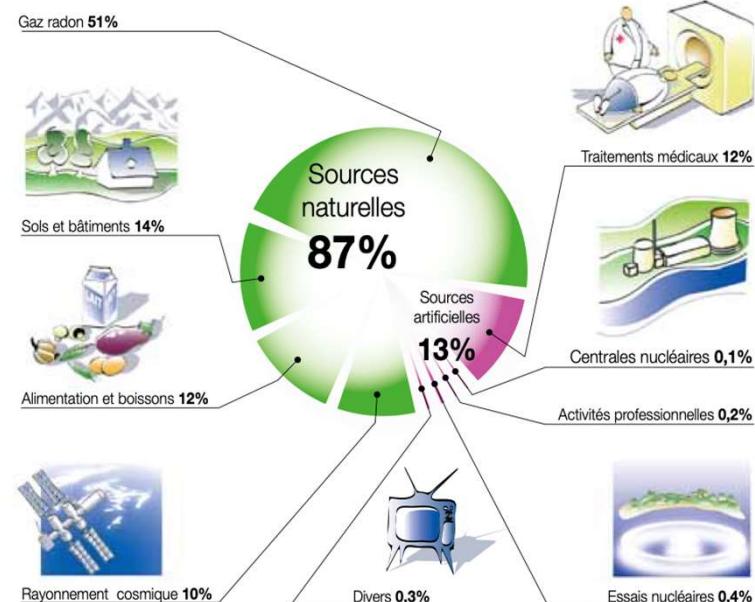
Types de rayonnements

type	Composition/charge	arrêté par
α	noyaux d'hélium ++	feuille de papier couche d'air : 3 cm
β^+	électrons, positrons - +	plaque aluminium : < 1 cm couche d'air : 3 m
γ, X	ondes ionisantes non chargé	fer, béton, plomb : 1 m couche d'eau : 3 m
γ	non chargé	béton, eau : épaisseur importante

Demi-vies de quelques radio-isotopes (N = Naturel; A = Artificiel)

Oxygène 15 (A)	124 secondes
Technicium 99m (A)	6 heures
Radon 222 (N)	3,8 jours
Iode 131 (A)	8 jours
Iridium 192 (A)	74 jours
Cobalt 60 (A)	5,3 ans
Césium 137 (A)	30 ans
Américium 241 (A)	432 ans
Radium 226 (A)	1600 ans
Carbone 14 (N et A)	5730 ans
Plutonium 239 (A)	24.100 ans
Uranium 235 (N)	700 millions d'années
Uranium 238 (N)	4,5 milliards d'années
Thorium 232 (N)	14 milliards d'années

Sources de Radioactivité naturelles et artificielles



ENERGIE NUCLEAIRE

LA RADIOACTIVITE

LA RADIOACTIVITE NATURELLE (Rayonnements terrestres)

Des radionucléides naturels d'origine terrestres sont présents à des teneurs diverses dans tous les milieux de notre environnement, y compris dans le corps humain. Ces radionucléides conduisent à une exposition externe des personnes du fait des émissions de rayonnement gamma produites par les chaînes de l'**Uranium 238**, du **Thorium 232** et du **Potassium 40** (K40) présents dans les sols mais aussi par inhalation de **Radon** (gaz radioactif provenant de la désintégration d'Uranium et de Thorium) ou de particules remises en suspension, par ingestion de denrées alimentaires ou d'eau.

Cette radioactivité naturelle provient donc du sol ou des bâtiments (18%), du Radon (42%), des rayons cosmiques (14%), des sources artificielles du médical (14%) et de la nourriture/boissons (11%).

Selon la nature des sols la radioactivité naturelle est plus ou moins importante.

Elle est forte dans les massifs granitiques (Bretagne – Massif Central) qui contiennent plus d'Uranium et de Thorium.

On a enregistré une radioactivité naturelle de 250 mSv/an (pointe à 700 mSv/an) à Ramsar en Iran.

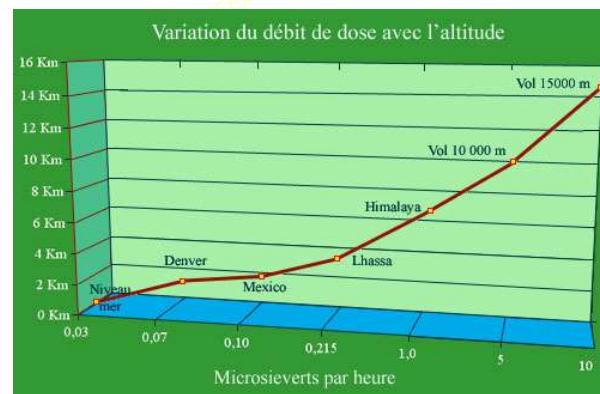
L'exposition moyenne pour un individu à la radioactivité naturelle est de **3 mSv/an (*)**
(Elle est plus forte en Bretagne, massif granitique)

() Pour les doses voir la section « Radioprotection »*

RAYONNEMENT COSMIQUE

Principale origine : Le soleil. L'exposition d'un individu au rayonnement cosmique dépend de l'altitude à laquelle il vit et de la fréquence de ses voyages aériens.

L'exposition moyenne en France est d'environ **0,30 mSv**.



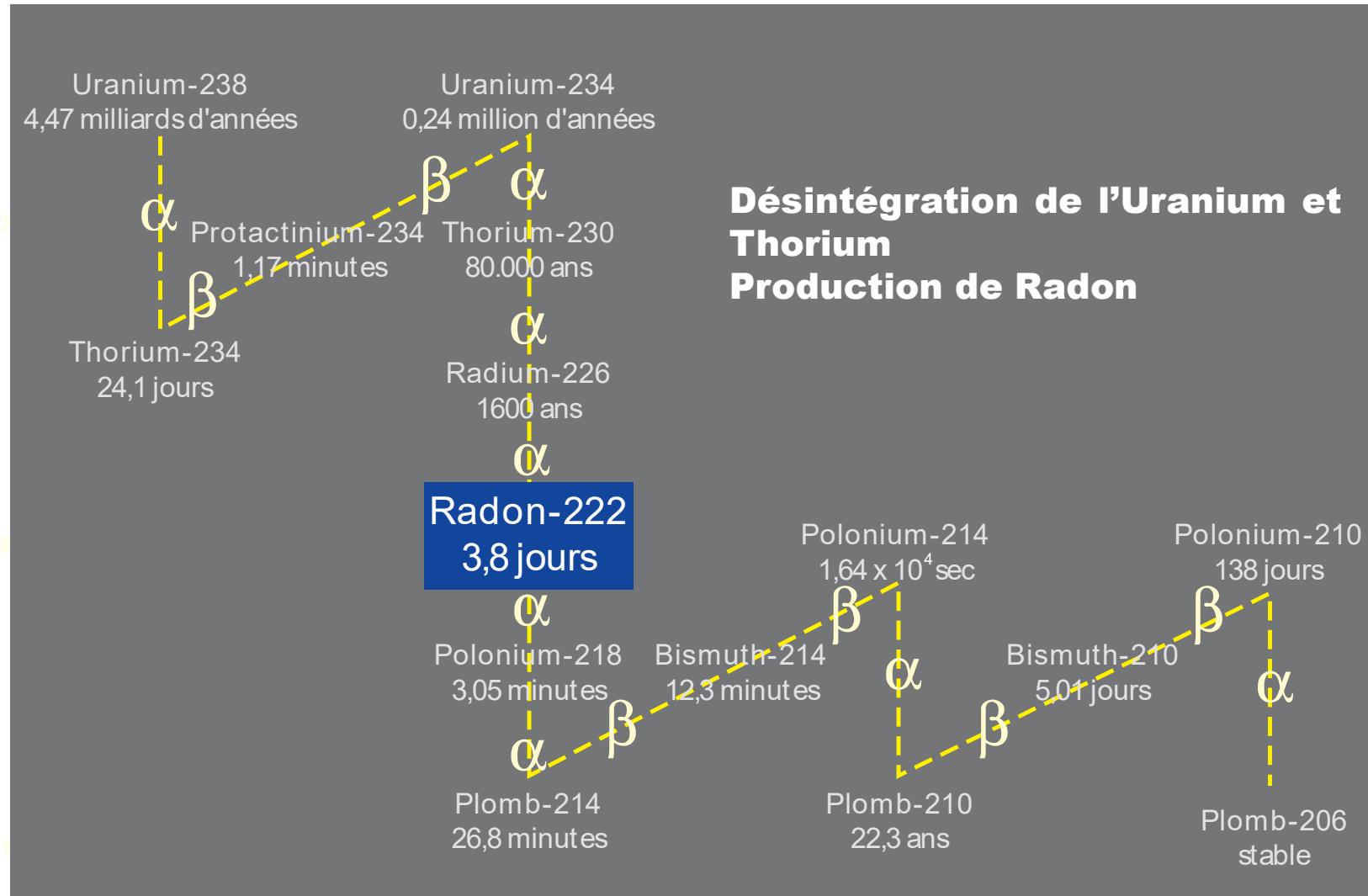
ENERGIE NUCLEAIRE

LA RADIOACTIVITE

Ecole REE

Ecole R

Ecole I



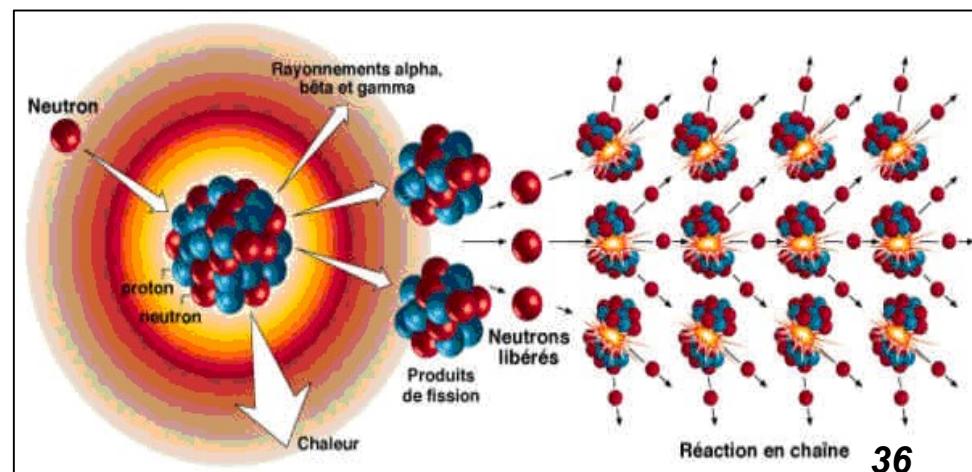
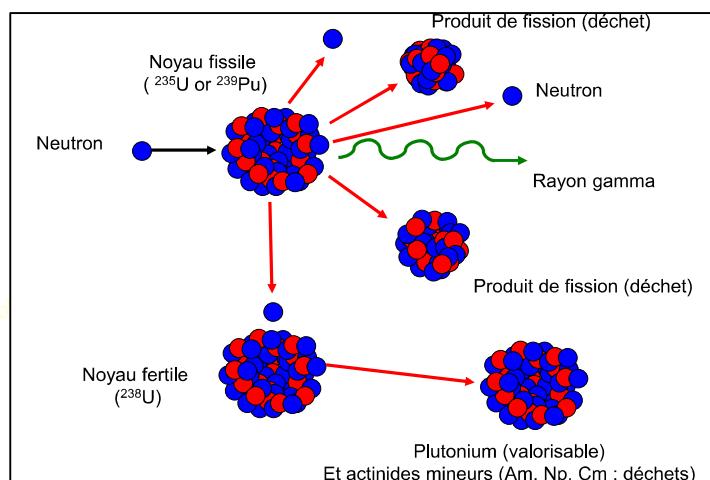
ENERGIE NUCLEAIRE

PRINCIPE

FISSION & REACTION EN CHAINE (une radioactivité stimulée)

La fission consiste à casser des **noyaux lourds**, comme ceux de l'Uranium 235 ou Plutonium 239. Sous l'impact d'un neutron, les noyaux lourds se divisent en 2 atomes plus petits, libèrent de l'énergie et des neutrons (de 2 à 3). Les neutrons libérés peuvent alors aller percuter un autre atome lourd qui va, à son tour, se diviser en deux et ainsi de suite. **C'est la réaction en chaîne**. L'énergie (et la chaleur) dissipée lors de ses collisions est utilisée dans les réacteurs pour générer de la vapeur qui à son tour fait tourner une turbine qui, lié à un alternateur, produit de l'électricité. La réaction en chaîne est maintenue dans le cœur du réacteur si le nombre de neutrons produits par les fissions des atomes lourds est égal au nombre de neutrons qui disparaissent (par exemple absorbés par l'uranium 238). Le rapport de ces deux nombres (production divisée par disparition) est appelé coefficient de multiplication **K** (ou « **criticité** ») et doit être égale à **1**.

Si ce rapport est inférieur à 1, alors les neutrons disparaissent plus vite qu'ils ne sont produits et la réaction en chaîne va finir par s'arrêter et le réacteur aussi : le cœur est alors dit « **sous-critique** ». A l'inverse, si le coefficient de multiplication est supérieur à 1, alors le nombre de neutrons présents dans le cœur va augmenter très rapidement (exponentiellement), ce qui entraînera une augmentation du nombre de fissions et de l'énergie dégagée. La réaction en chaîne va donc s'emballer. Le réacteur est dit « **sur-critique** ».



ENERGIE NUCLEAIRE

PRINCIPE Produits de la Fission

PRODUITS DE FISSION

Les produits de fission sont des corps chimique résultant de la fission d'un noyau atomique fissile (le cas de l'**Uranium 235** en particulier).

Ce sont les cendres de la réaction nucléaire, qui constituent des **déchets radioactifs ultimes**

Les produits de fission initialement formés sont des isotopes très instables et donc très fortement radioactifs. Ils dégagent une forte chaleur et des rayonnements gamma le plus souvent très énergétique et donc très dangereux.

Les produits de fission sont responsables de pratiquement toute la radioactivité des Combustibles Usés. On les classe selon :

Produits de fission à radioactivité négligeable à long terme : dont

Zirconium 96, Césium 142,...

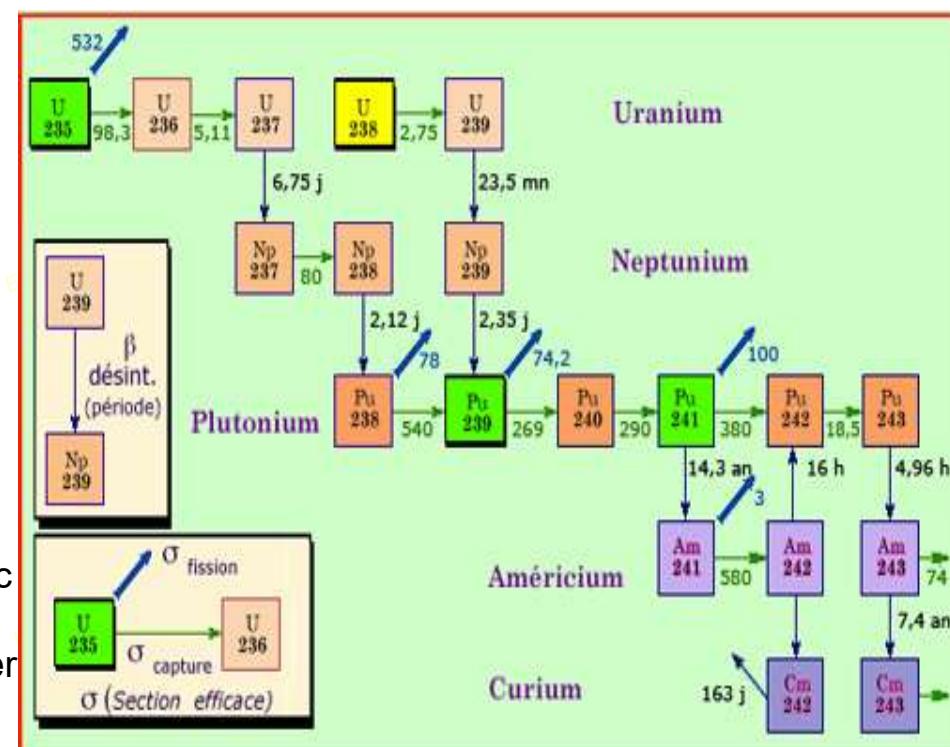
Produits de fission radioactifs à vie moyenne, gérables (6,8 % du total), dont :

Césium 137, Strontium 90,...

Produits de fission radioactifs à vie très longue, non gérables (10,4 % du total). Ils sont 7 dont : Césium 135, Zirconium 93, Technétium 99, Iode 129,....

Ces produits de fission, gérés comme déchets Haute Activité à Vie Longue (et donc ultimes), doivent être confinés.

R&D pour des possibilités de **les transmuter** pour devenir des éléments à vie plus courte et donc plus facilement gérables..



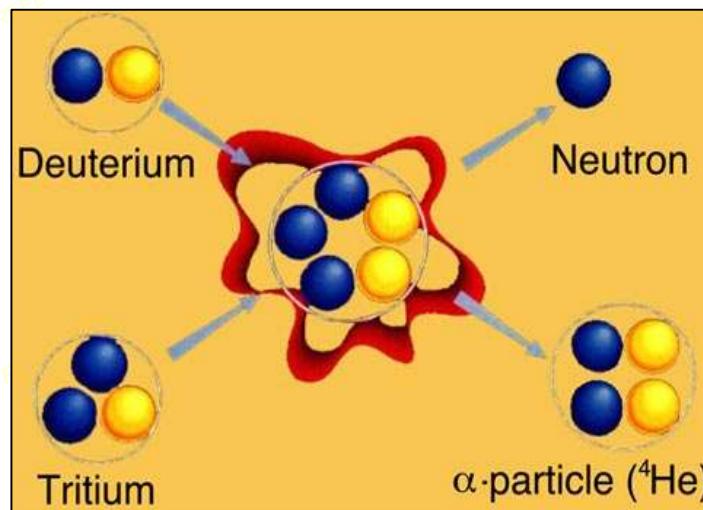
FUSION

La **fusion nucléaire** est une réaction nucléaire dans laquelle deux noyaux d'atomes **légers** (Deutérium et Tritium, isotopes de l'hydrogène, dont la somme des nombres de masse est << 60) se combinent pour former un noyau plus lourd (en l'occurrence l'Hélium). Cette liaison est accompagnée par l'émission de particules (neutron pour le deutérium). Ce noyau plus lourd se désintègre très rapidement en 2 autres noyaux légers mais différents des noyaux initiaux et dégage de l'énergie sous forme d'énergie cinétique des produits de la réaction.

Cette grande quantité d'énergie ($E = mc^2$, 3 fois supérieure à celle de la fission), permet à la matière d'entrer dans un état de plasma (le 4^{ème} état de la matière).

La grande difficulté est l'extraction de l'énergie et le maintien permanent d'une température très élevée (de l'ordre de 150 millions de degrés) dans une enceinte matérielle.

Le Soleil : réactions de fusion de deux noyaux d'hydrogène qui forme un noyau d'hélium avec émission d'un neutron. Dans le soleil cette fusion se fait, de manière naturelle, à 15 millions de degrés Kelvin



Le Tritium vient de l'irradiation du Lithium. C'est un isotope radioactif de l'hydrogène

Le Deutérium est un isotope stable de l'hydrogène

Aujourd'hui, une des solutions utilisées est le principe du **TOKAMAK**, un anneau magnétique (confinement magnétique) enfermant et chauffant fortement les particules (le **Plasma**) devant fusionner. Ces particules ionisées sont parfaitement confinées dans une sorte de chambre magnétique circulaire invisible et n'entrent pas en contact de l'enceinte matérielle.

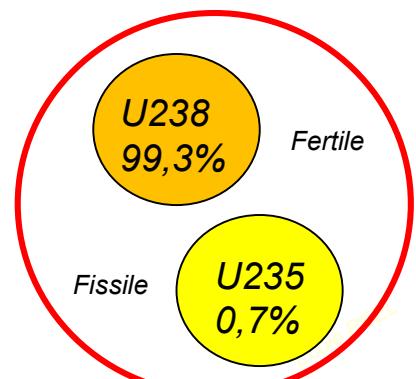
En France, ce sont **Tore Supra** et **ITER**

ENERGIE NUCLEAIRE

PRINCIPE

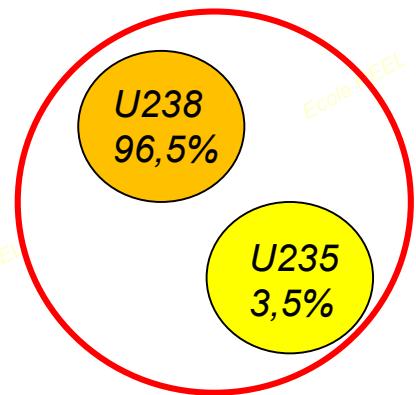
MATERIAUX NATURELS

FILIERE URANIUM



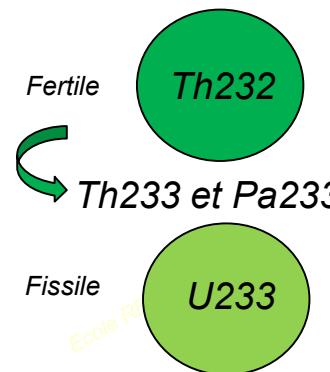
Uranium Naturel
Concentration sur terre :
2,5 à 3 ppm

URANIUM ENRICHED



Combustible Uranium Enriched

FILIERE THORIUM



Thorium Naturel
Concentration sur terre :
7,2 ppm

Probabilité de fission = 0,92
Nb Neutrons : 2,49

Facteur de reproduction : $2,49 \times 0,92 = 2,29$

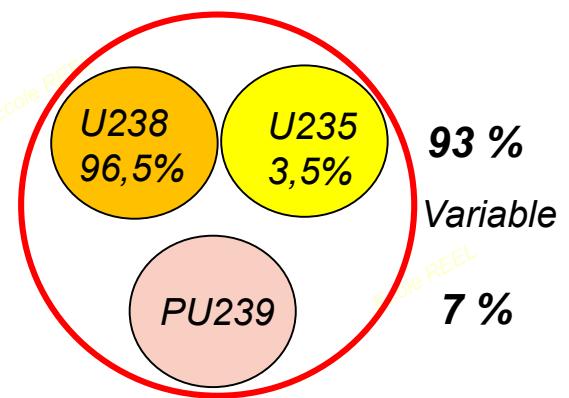
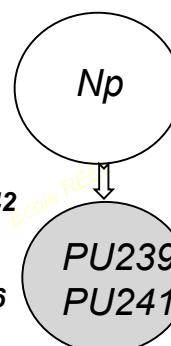
Non exploitée aujourd'hui mais un futur ?

Eléments Synthétiques

Fission



Probabilité de fission = 0,85
Nb Neutrons : 2,42
Facteur de reproduction :
 $0,85 \times 2,42 = 2,06$



Combustible MOX

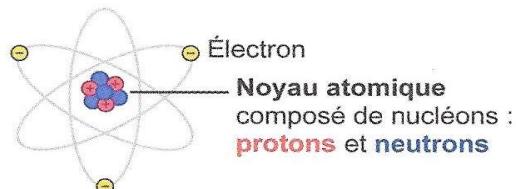
39

EN RESUME

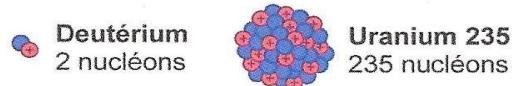
ENERGIE NUCLEAIRE

PRINCIPE

Les atomes sont les constituants élémentaires de toute la matière de notre Univers.

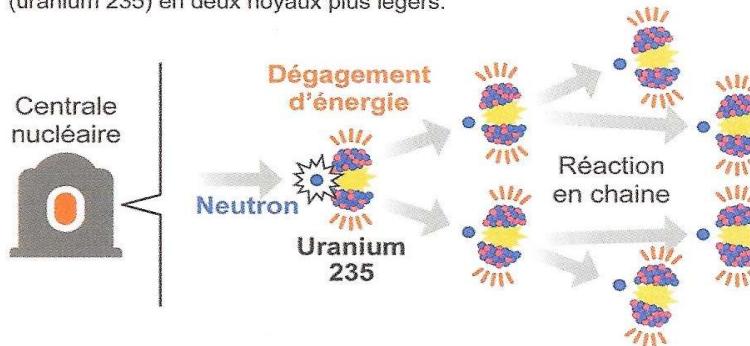


Plus il y a de nucléons, plus le noyau atomique est lourd.



Comment fonctionne la fission nucléaire ?

La fission consiste à scinder un noyau atomique lourd et instable (uranium 235) en deux noyaux plus légers.

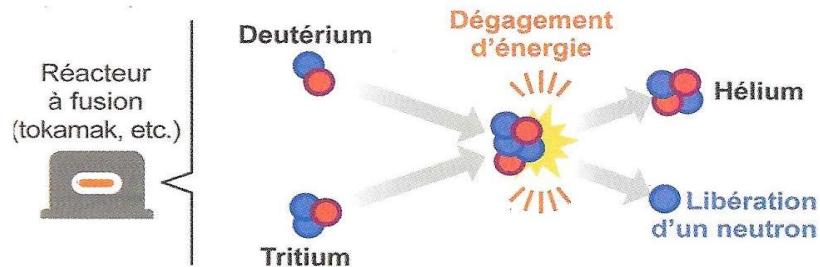


L'impact d'un neutron
suffit à entraîner une réaction en chaîne de fissions.

Un gramme d'uranium
libère autant d'énergie que la combustion de deux tonnes de pétrole.

Comment fonctionne la fusion nucléaire ?

La fusion consiste à unir deux noyaux atomiques légers (deutérium et tritium) pour former un noyau plus lourd (hélium).



Une température de 150 millions de degrés Celsius
est nécessaire pour déclencher la fusion.

Un gramme de deutérium et tritium
libère autant d'énergie que dix grammes d'uranium.

Un réacteur nucléaire n'est pas une bombe nucléaire

Bombe : Concentration forte de matériaux fissiles pratiquement purs (Uranium 235 ou Plutonium 239) avec lesquels on forme très rapidement un volume critique et donc une réaction en chaîne si brutalement divergente qu'avant que le milieu ai pu se disperser, une énergie suffisante s'est accumulée.

Réacteur : Matières fissiles (Uranium 235) utilisées à faibles concentration (moins de 5%). La présence de matériaux absorbant les neutrons (Uranium 238) empêche la croissance illimitée de la puissance. Il n'y a pas de dispositif qui permette l'accumulation de l'énergie jusqu'à un niveau dit "explosif".

ENERGIE NUCLEAIRE

LES APPLICATIONS du NUCLEAIRE

LES APPLICATIONS DE L'ENERGIE NUCLEAIRE

En dehors de la **Production d'Energie** (production d'électricité, de chaleur, Propulsion Navale et spatiale) et **d'Armes Nucléaires**, l'énergie nucléaire s'applique aussi dans :

Le domaine médical et de la santé

- Recherche génomique (les biotechnologies; utilisation de marqueurs isotopiques)
- Imagerie médicale (rayon X, IRM, Gamma-densitométrie (Ostéoporose), tomographie PET (Alzheimer))
- Radiothérapie (Photons X, gamma, neutron) et Protonthérapie (des rayons plus ciblés)
- Curiethérapie (pour éliminer le cancer de la prostate)
- Irradiation ciblée thérapeutique (bombe au cobalt)
- Stérilisation du matériel médical et des implants chirurgicaux
- L'éradication des maladies parasitaires (stériliser des insectes comme la mouche Tsé-Tsé)

Le domaine Agroalimentaire

Créations de nouvelles variétés de plantes par irradiation - Gestion de l'eau d'irrigation - Conservation des aliments par ionisation - Destruction d'insectes et de champignons.

La Géophysique

Evaluation des roches par « log » neutrons (porosité et nature du fluide contenu), par log gamma (densité de la roche – Porosité - Radioactivité naturelle) et par log RMN (spectre des roches).

Utilisation de traceurs radioactifs – Datations absolues des fossiles et des minéraux

Plusieurs secteurs de l'Industrie

Contrôle des soudures, contrôle d'épaisseur,.... (Mesures d'atténuation de rayonnements)

La Protection de L'Environnement : Traceurs en hydrologie - Datation de l'eau des aquifères souterrains par analyse isotopiques – Dépollution des fumées

AMONT du Réacteur:



- Les Centres de Recherches du CEA : Cadarache – Marcoule – Pierrelatte – Saclay – Orsay –
- Les Réacteurs expérimentaux : RJH (**en cours de construction**)
- Le réacteur à fusion ITER (projet international avec Europe – USA – Inde – Corée – Japon – Russie)
- Production de combustibles (ORANO ex AREVA New Co) : Extraction de l'Uranium – Conversion (COMURHEX) - Enrichissement (avant EURODIF, aujourd'hui GB2) - Fabrication des pastilles (UO₂ et MOX)

AVAL du Réacteur :

- Traitement des déchets : Marcoule (installation ATALANTE) – Fontenay aux Rose -
- Gestion des déchets (Transport & Entreposage par catégorie) : Centre de l'Aude – La Hague - Le futur Cigéo
- Retraitements (Usine ORANO de La Hague)

PRODUCTION ELECTRONUCLEAIRE - CENTRALES NUCLEAIRES (EDF) :

Types de réacteurs en opération : Eau Pressurisée (PWR ou REP)

Capacité électro nucléaire : **63 GWe**

Le Parc Nucléaire Français :

- **56** réacteurs de Génération 2 en opération + 1 réacteur de Génération 3 (EPR) en construction – 2 réacteurs arrêtés
- **9** réacteurs de Génération 1 en déconstruction (Brennilis filière HWGCR est le premier suivi de Chooz A (PWR), G2, G3 et St Laurent 1&2, Chinon 1&2, Bugey 1 de la filière UNGG)
- **2** surgénérateurs (Phénix et Superphénix) en déconstruction
- Des nouveaux projets : Génération IV (ASTRID **mais arrêté en 2019**) – EPR Nouveau Modèle (**EPR2**) – SMR (**Neward**)

DEFENSE avec la dissuasion nucléaire (CEA/DAM - TechnicAtome - Naval Group)

- 1 nouveau réacteur pour les essais de chaufferie nucléaire nouvelle génération : **RES** à Cadarache
- Le **Laser MégaJoule** (composante de la simulation d'essais thermonucléaires) près de Bordeaux
- Le centre de développement et de fabrication des bombes nucléaires (**Valduc** près de Dijon)
- 4 Sous-marins Nucléaire Lance Engins (SNLE) avec, par SNLE, 16 missiles (M51) portant des charges thermonucléaires multiples (6 ou plus)
- 6 Sous-marins Nucléaires d'Attaque (SNA). Nouvelle génération (*Barracouda*) en cours de construction
- 1 Porte Avions Nucléaire (*Le Charles de Gaulle*) propulsé par 2 chaufferies nucléaires de 150 MWth chacune

HISTORIQUE DU NUCLEAIRE

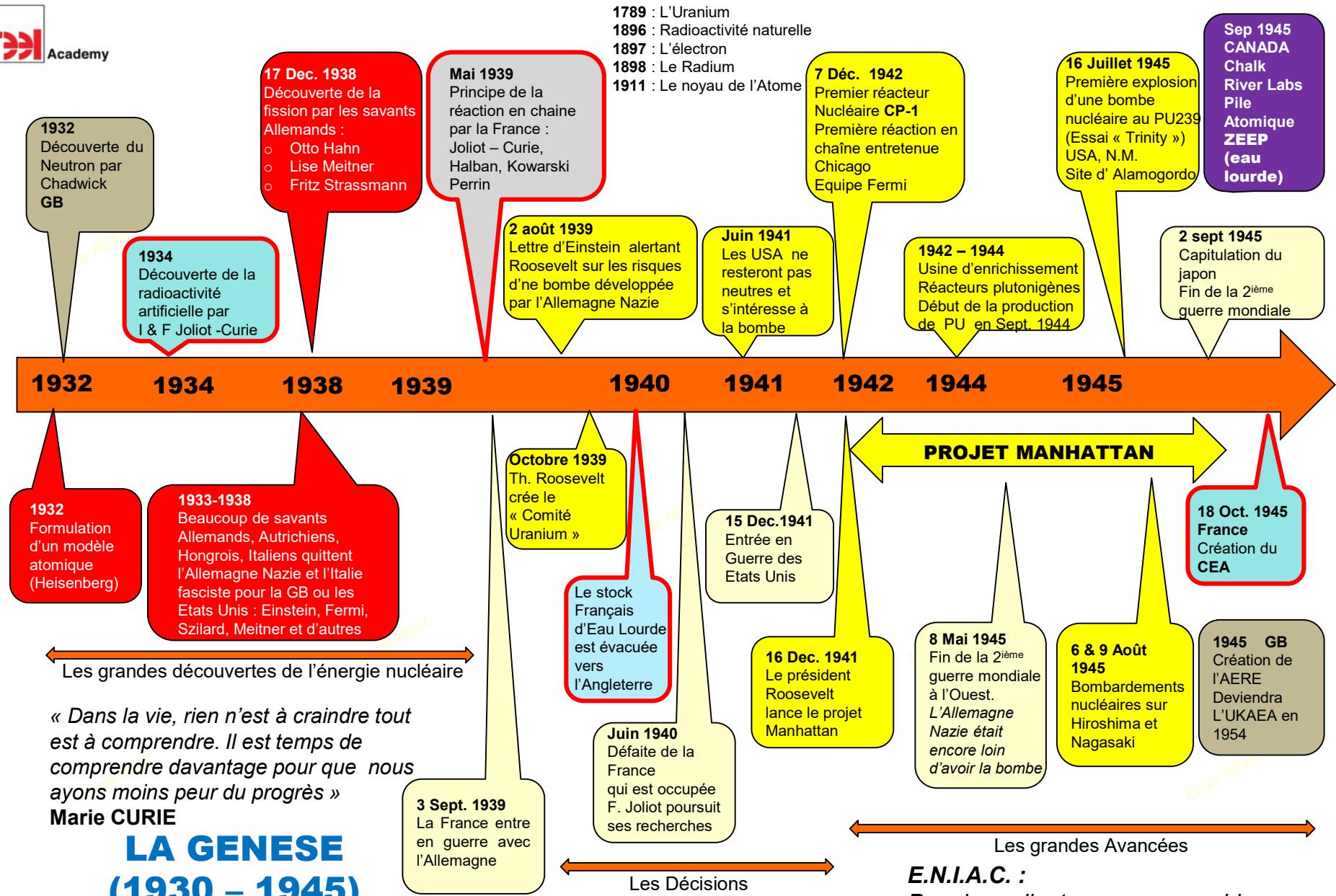
Celui qui ne sait pas d'où il vient, ne peut savoir où il va car il ne sait pas où il est.

ENERGIE NUCLEAIRE

HISTORIQUE

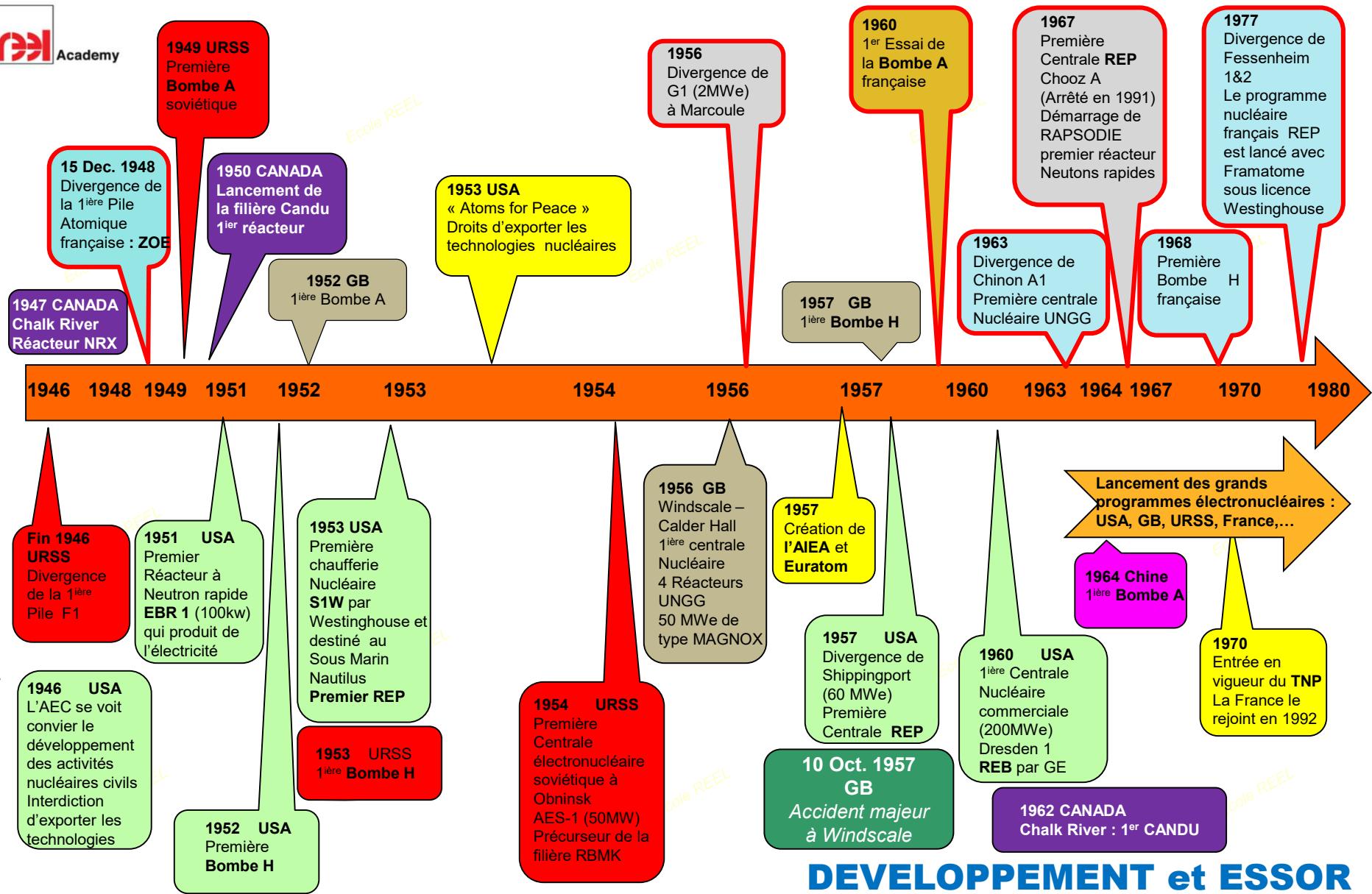
Reproduction interdite sans l'accord d'EXPERTNUC

03/09/2024 JY PERON



ENERGIE NUCLEAIRE

HISTORIQUE



Choix de l'Uranium (au lieu du Thorium)

**DEVELOPPEMENT et ESSOR
(1946 – 1980)**

ENERGIE NUCLEAIRE

HISTORIQUE

ANNEE	EVENEMENT RECENTS (1980 – 2018)	PAYS - AUTEUR	Remarques
1979	Accident Majeur (Niveau 5) de « Three Miles Island » (un REP de B&W)	USA	Moratoire du programmes nucléaire US
1976	Mise en Service de l'usine d'enrichissement (Oxyde) à La Hague	France - COGEMA	Sellafield (GB) traite le combustible métallique (1964)
1986	Accident Majeur (Niveau 7) de Tchernobyl . Explosion d'un réacteur de type RBMK	URSS (Ukraine)	Le plus important accident nucléaire à ce jour. Conséquences : Moratoire des projets mais la France continue son programme avec les tranches 1300 et 1450 MWe
1997	Fermeture de Superphénix , le premier Surgénérateur de production d'électricité (1200 MWe). Projet commencé en 1977 avec une mise en Service en 1986 et arrêté en 1998	France	Une décision purement de politique électorale. Un fiasco industrielle pour une installation qui n'a pas eu le temps de se rentabiliser. La France était en avance sur les surgénérateurs.
2003	Commande de l' EPR OL3 en Finlande. AREVA-Siemens signe le contrat avec TVO le 18/12/2003 pour le 5 ^{ème} réacteur du pays qui dispose déjà de 2 x REB et 2 x VVER.	Finlande TVO (AREVA-Siemens)	Redémarrage des constructions en Europe. Suivi par la décision de construire un EPR à FA3 en 2004. Si ce n'avait pas été l'EPR, ce serait un ESBWR par GE (<i>L'exploitant ayant une préférence pour le REB car il en exploite déjà 2 sur le même site</i>). Les Russes concourraient également.
2005	ITER à Cadarache	France – ITER Org	Le site Français est choisi et la construction peut démarrer
2009	KEPCO (La Corée du Sud) obtient le contrat de construction de 4 réacteurs à Abu Dhabi	Abu Dhabi Corée du Sud	Une première à l'export pour la Corée du Sud et son réacteur APR1400 . Une première au Moyen-Orient
2011	Accident Majeur (Niveau 7) de FUKUSHIMA Daiichi (BWR de concept GE dans les années 60s)	Japon - TEPCO	Conséquence d'un Tsunami – Gestion accidentelle défaillante.. Moratoire de près de 5 ans pour les constructions de nouveaux réacteurs. Les pays émergents tirent le marché.
2015	Redémarrage d'un réacteur REP (Sendai 1) en 08 puis d'un 2 ^{ème} (Sendai 2) en 10 au Japon. Depuis 3 de plus (des REP) on redémarrer soit un total de 5 sur 42 pouvant redémarrer. 2 de plus (OHI) attendus avant la fin 11/2017. On sera à 10 en 03/2019	Japon – Kyushu et Kansai Elec.	Le gouvernement (conservateur) pousse au redémarrage. Les anti nucléaires deviennent plus actifs. <i>A terme, l'objectif de 50 % nucléaire dans le mix peut-être oublié.</i>
2016	Le projet Hinkley Point C est (enfin) lancé : 2 X EPR de type FA3 post-Fukushima	GB - EDF (avec CGN)	Le feu vert est donné par EDF. Les conséquences (éventuelles) du BREXIT ne sont pas encore évaluées.
2018	Les premiers réacteurs de Génération 3 sont mis en service : 4 x AP1000 et 2 x EPR respectivement sur les sites de Sanmen, Haiyang et Taishan en Chine.	Chine	Pleine puissance de Sanmen 1 (AP1000) le 14/08/2018 Pleine puissance de Taishan 1 (EPR) en 10/2018

ENERGIE NUCLEAIRE

HISTORIQUE

Histoire du nucléaire au Canada : Les premiers pas 1900 - 1980

1900 – 1910

Le prix Nobel de chimie : **Ernest Rutherford**

1921 – 1930

Gilbert A. Labine découvre le premier gisement d'uranium au Canada.

1931 – 1940

George C. Laurence conçoit l'un des premiers réacteurs nucléaires au monde,

1941 – 1950

Construction de la première installation de recherche nucléaire à Chalk River.

Participation au projet Manhattan

La pile expérimentale d'énergie zéro (**ZEEP**) fait du Canada, en 1945, le deuxième pays à contrôler la réaction de fission nucléaire.

Le réacteur **NRX**, le plus puissant du monde, entre en service à Chalk River en 1947.

1951 – 1960

Les deux premiers appareils de radiothérapie au cobalt 60 dans le monde.

EACL est créée.

Le cœur du réacteur NRX subit des dommages lors d'un accident

Wilfrid B. Lewis amorce le développement du réacteur nucléaire **CANDU**

Le réacteur NRU –entre en service à Chalk River.

1961 – 1970

Le réacteur NPD, premier réacteur de production électrique et prototype des réacteurs CANDU, entre en exploitation (1962) à **Rolphton**, en Ontario. Il a une puissance de 20 MWe.

La centrale Douglas Point, première centrale nucléaire canadienne à grande échelle, entre (1967) en exploitation à Kincardine, en Ontario. Elle a une puissance de 220 MWe.

1971 – 1980

Le premier réacteur CANDU hors Canada en exploitation, la centrale **Rajasthan 1** en Inde.

Les quatre réacteurs de la centrale **Pickering A** entrent en exploitation. Leur puissance totalise 2060 MWe, ce qui en fait la centrale nucléaire la plus puissante du monde à l'époque.

Six (6) pays se sont lancés, sans aide extérieur et indépendamment l'un de l'autre, dans la course aux centrales nucléaires :

Les quatre premiers membres du club militaire (la bombe atomique) : USA, URSS, Royaume-Uni (Magnox) et France (Graphite gaz)
puis le Canada (eau lourde) et la Suède (REB)

Tous les autres pays auront par la suite recours, pour la construction de leurs premières centrales, à l'un ou l'autre des 6 pays pionniers :

- Inde avec les USA (GE) et le Canada (AECL Candu),
- La Chine avec la France et les USA (REP),
- Le Japon avec les USA (REP et REB),
- La Corée du Sud avec les USA (REP) et la France (REP),
- les pays de l'Europe de l'Est avec l'URSS (ROSATOM - VVER), *
- Mexique avec les USA (GE)
- Brésil avec les USA (Westinghouse) et l'Allemagne (SIEMENS KWU)

La RUSSIE fournit les réacteurs aux pays émergents – C'est le champion à l'exportation

Licence « Westinghouse » (REP) cédée à **FRAMATOME** en 1974 pour lancer la construction de 58 réacteurs de 1975 à 1999

ENERGIE NUCLEAIRE

HISTORIQUE

Quelques grandes Figures



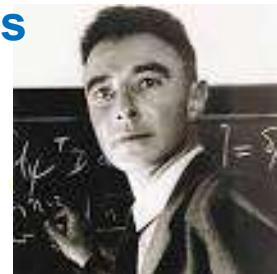
Marie Curie



James Chadwick



Irène Joliot-Curie & Frédéric Joliot



Robert Oppenheimer



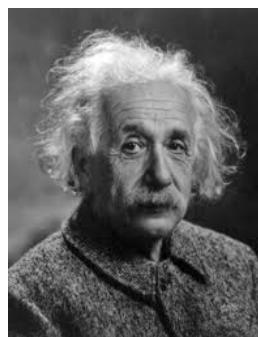
George C. Laurence



Otto Hahn & Lise Meitner



Lise Meitner



Albert Einstein



Niels Bohr



Leslie Groves



Louis Slotin



Otto Hahn



Fritz Strassmann



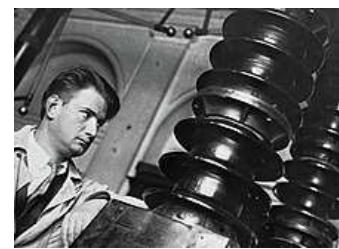
Werner Heisenberg



Enrico Fermi



*Ernest Rutherford
Prix Nobel Chimie*



Igor Kourchatov

ENERGIE NUCLEAIRE

HISTORIQUE

Le discours de que Frédéric Joliot-Curie prononça à Stockholm, en **1935**, lors de la remise de son prix Nobel de chimie pour la découverte de la radioactivité artificielle, était prémonitoire :

« Si, tournés vers le passé, nous jetons un regard sur les progrès accomplis par la science à une allure toujours croissante, nous sommes en droit de penser que les chercheurs construisant ou brisant les éléments à volonté sauront réaliser des transmutations à caractère explosif, véritables réactions chimiques à chaînes. Si de telles transformations arrivent à se propager dans la matière, on peut concevoir l'énorme libération d'énergie utilisable qui aura lieu.... »

On connaît la suite :

En **1938**, les physiciens Allemands, Otto Hahn, fritz Strassmann et Lise Meitner découvraient le phénomène de la fission de l'uranium, ouvrant ainsi la voie à l'exploitation de l'énergie nucléaire

En **1939**, l'équipe française de Juliot-Curie commençait à travailler sur une pile atomique (*) afin de valider une réaction en chaîne auto-entretenue. Brevets déposés en octobre 1939 mais gardés confidentiels. Acquisition par la France du stock d'eau lourde disponible en Norvège.

(*) La première pile atomique française (ZOE) sera opérationnelle en décembre 1948.

En **1939**, Albert Einstein avait informé le Président américain Franklin D. Roosevelt de la possibilité de construire une arme atomique (et en particulier par l'Allemagne)

En **1941**, F.D. Roosevelt lança le **programme Manhattan** pour la mise au point d'une arme atomique.

En **1942**, première réaction en chaîne auto-entretenue dans le cadre du programme Manhattan (**CP1**)

En **1945**, les deux premières armes atomique opérationnelles (contre le Japon)

Dans les **années 50**, premières centrales électronucléaires civiles mises en service (USA, GB, Russie, France).

ENERGIE NUCLEAIRE

HISTORIQUE

Pile CP-1 (Chicago Pile N°1) :

336t de graphite pur (45 000 briques empilées dont le terme pile) : C'est le Modérateur

40t d'Uranium Naturel (35t sous forme d'oxyde logées d'une matière hétérogène dans l'empilement et 5t sous forme métallique placées au centre)

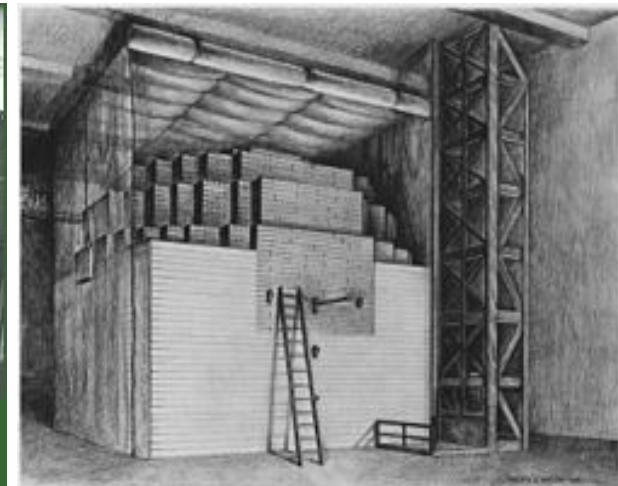
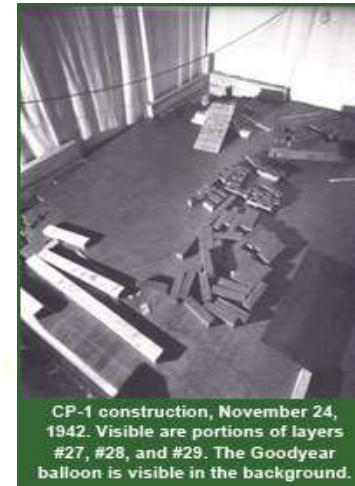
Barres de contrôle : 3 jeux de barre de contrôle en Gadolinium

- 1 barre automatique de contrôle
- 1 barre de sécurité d'urgence attaché par une corde (à couper en cas d'urgence : chute de la barre)
- 1 barre de maintien de la réaction en attente avant d'être sortie de quelques longueurs

Des compteurs de neutrons (à scintillation)

Moyens de calculs : Règle à calcul

Pas de calopoter



Le **2 Décembre 1942** à **15:53**, la criticité est atteinte, c'est-à-dire qu'une réaction en chaîne auto-entretenue est réalisée (pendant 28 minutes).

Pour la première fois, à cette date et à cette heure, l'homme venait de maîtriser l'énergie nucléaire.

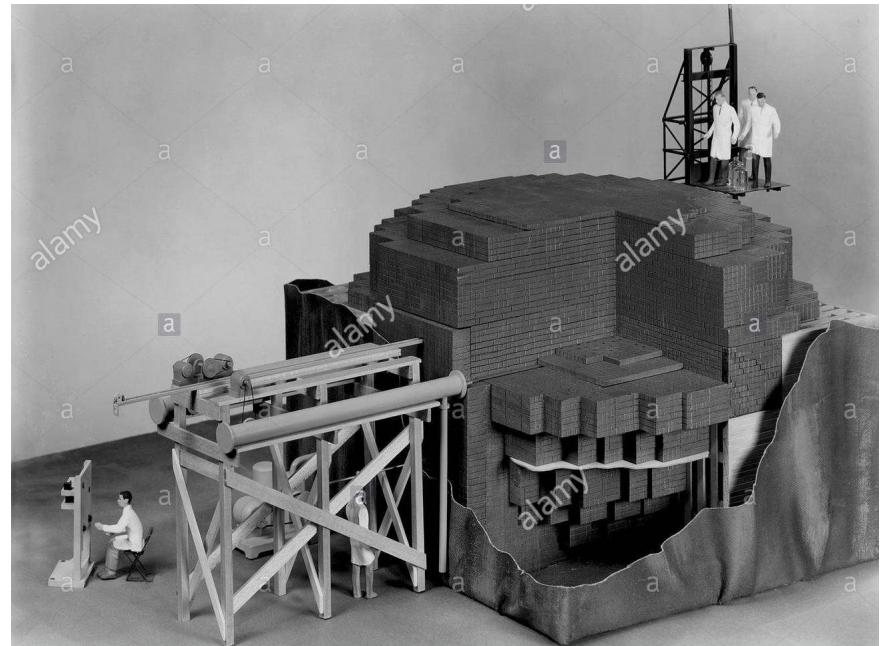
« Jim, you'll be interested to know that the italien navigator has just landed in the new world » .



Ecole REEL

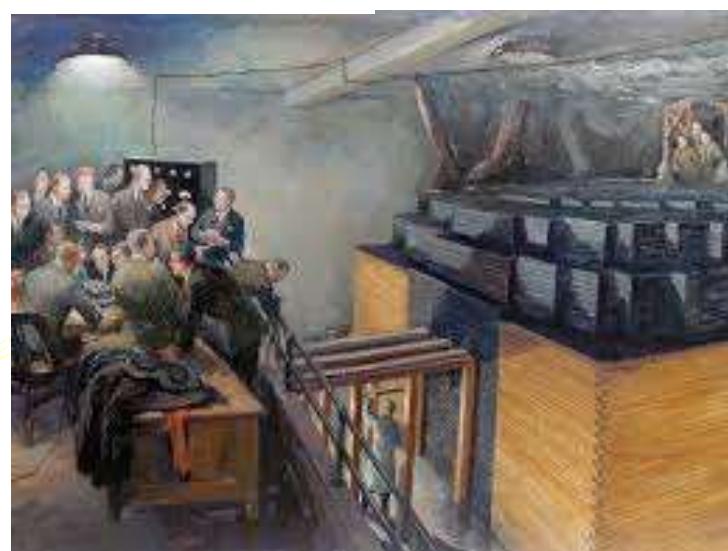
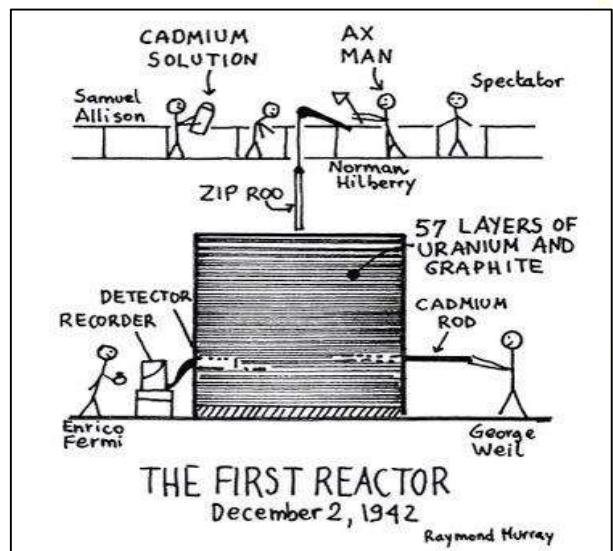
ENERGIE NUCLEAIRE

HISTORIQUE



Pile CP1

HRP34A
www.alamy.com



ENERGIE NUCLEAIRE

HISTORIQUE

« *L'inconnu est porteur d'angoisse* »

Nadine Gordimer, sud-africaine, prix Nobel de littérature en 1991

Cette réaction a pu nuire au développement de l'Energie Nucléaire, trop longtemps restée affaire de spécialistes. Un tel phénomène peut s'expliquer : les origines militaires des recherches qui ont permis sa mise au point portaient en elles le germe de la culture du secret.

Par ailleurs les concepteurs des programmes nucléaire ont sans doute consacré plus de temps à « bien faire qu'à faire savoir ».

Mais en démocratie et pour une **acceptation sociétale** la plus large possible, rien de durable ne peut se construire sans l'assentiment d'une large majorité.

3 catastrophes majeurs ont déstabilisé la filière et entraîner des renoncements.

La question des déchets pèse lourd dans l'acceptation sociétale

Mais :

CAMECO (producteur d'Uranium Canadien), qui a pris une participation de 49 % dans Westinghouse, communique en 10/2022 : « *L'énergie nucléaire connaît une résurgence dans le monde entier. Plus de 20 pays d'Amérique du Nord, d'Europe, du Moyen-Orient et d'Asie poursuivent de nouveaux projets ou l'extension de centrales. Plus de 60 GW de nouveau réacteurs sont attendus entre 2020 et 2040. A court terme, la prise de participation ouvre la possibilité d'obtenir de nouveaux contrats en soutenant le développement d'installations nucléaires dans les pays d'Europe de l'Est traditionnellement desservis autrefois par la Russie* ».

ENERGIE NUCLEAIRE



Les pères de la bombe : OPPENHEIMER - FERMI - LAURENCE

ENERGIE NUCLEAIRE

ENERGIE NUCLEAIRE

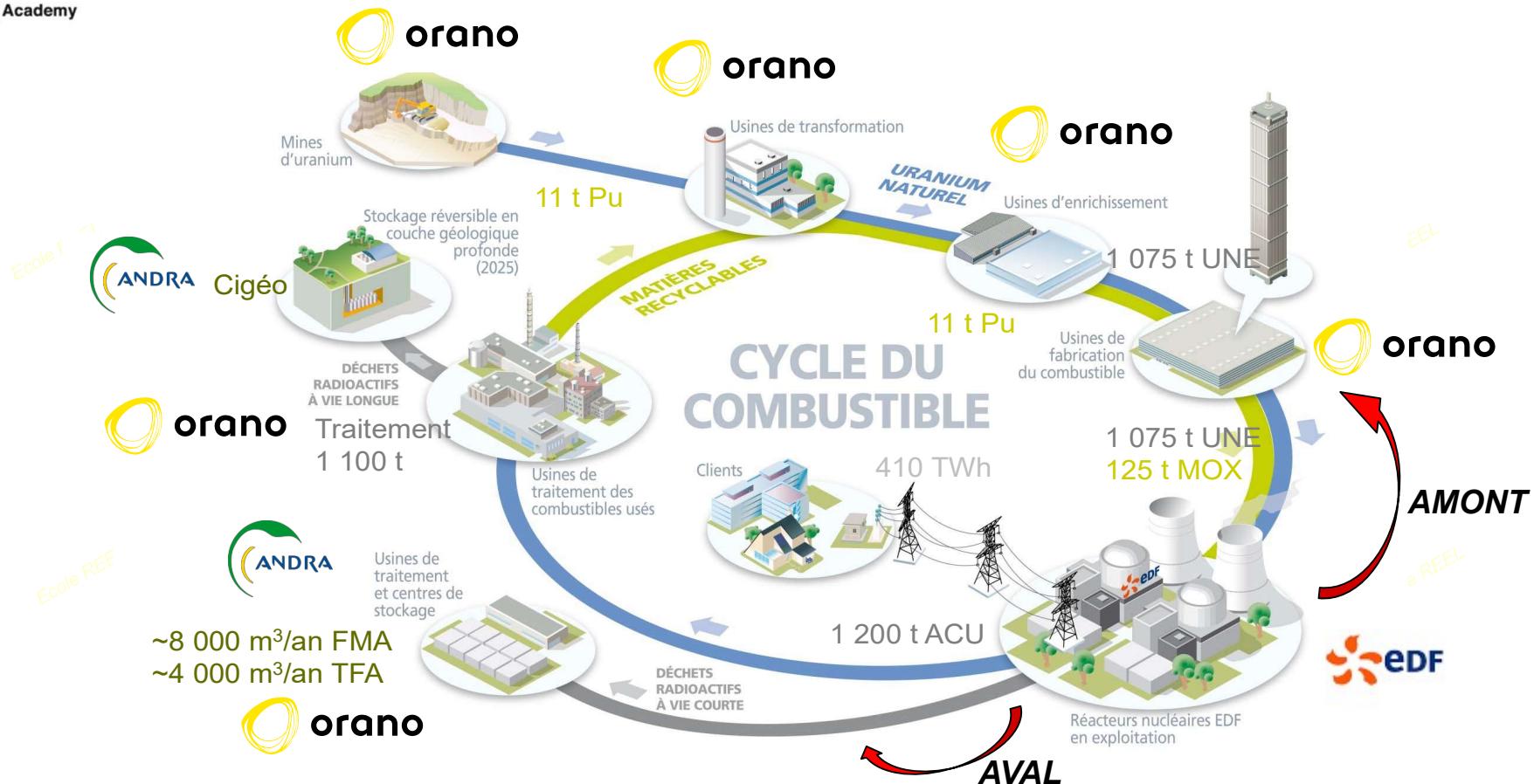
2 – LE CYCLE DU COMBUSTIBLE

- **Cycle**
- **Mines d'Uranium**
- **Conversion**
- **Enrichissement**
- **Fabrication Combustible :**
 - UO₂
 - MOX
- **Retraitement :**
 - France
 - Russie
 - Japon
- **Les Déchets**
- **Entreposage des Déchets :**
 - Humide (En piscine)
 - A sec (Conteneurs - Châteaux)
- **Stockage des déchets :**
 - France (**CIGEO & ICEDA**)
 - France (**Stockage en Surface**)
 - Finlande (**POSIVA - Onkolo**)
 - Suède (**CLAB**)
 - USA (**WIPP**)
 - Canada

ENERGIE NUCLEAIRE

CYCLE DU COMBUSTIBLE (France)

Le cycle du combustible en France

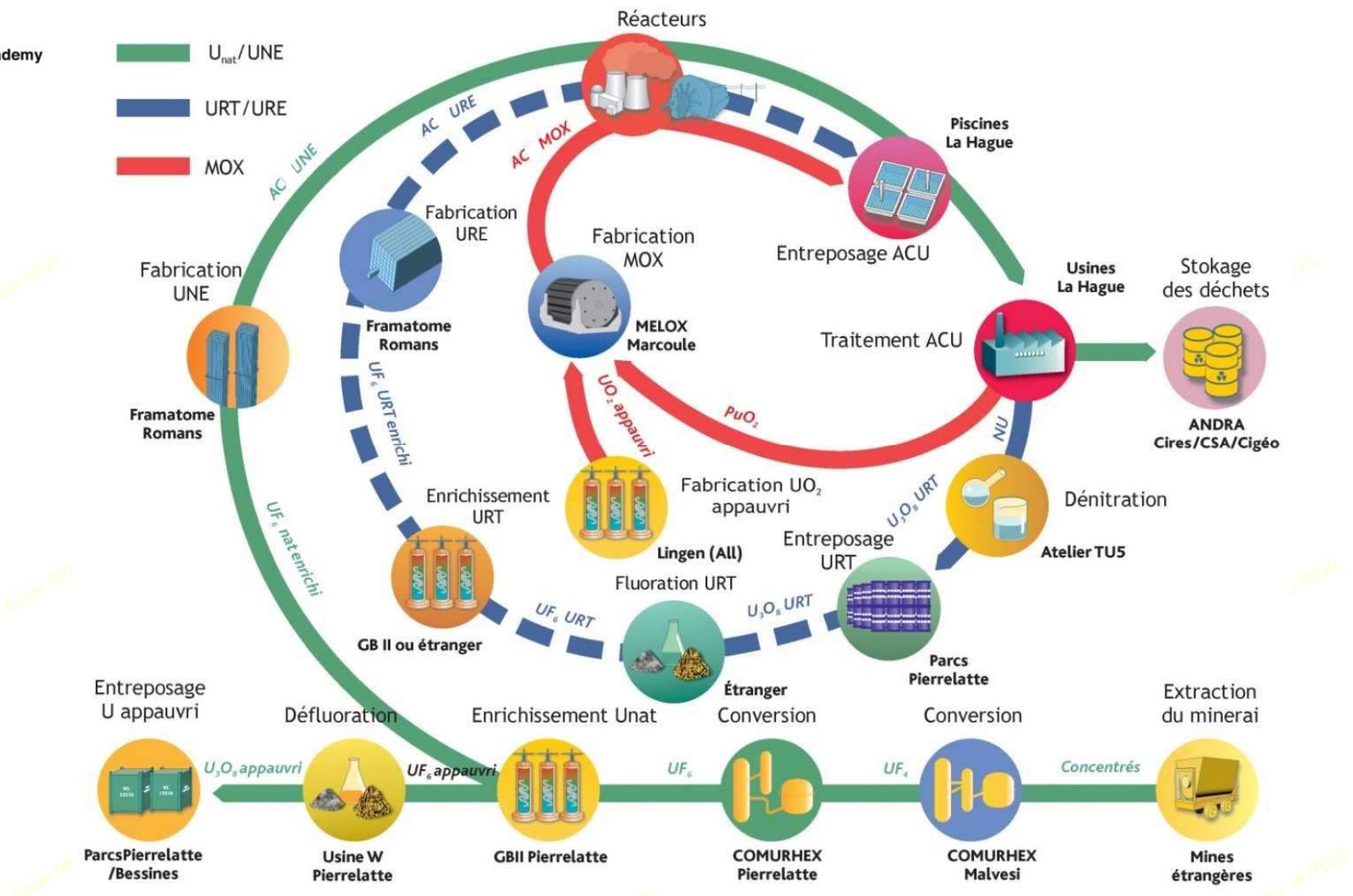


La France a fait le choix du « CYCLE FERME » qui permet de recycler (mono-recyclage aujourd'hui et multi-recyclage dans le futur) les matières valorisables des combustibles usés (uranium et plutonium) et d'optimiser la gestion des déchets ultimes (déchets Haute Activité à Vie Longue)

- Séparation des matières recyclables (Uranium appauvri 95% – Plutonium 1%) pour 96 % et des déchets ultimes (Produits de fission) pour 4 %
- Fabrication du combustible recyclé : UO₂ (recyclage de l'Uranium) et MOX (recyclage du Plutonium)

ENERGIE NUCLEAIRE

CYCLE DU COMBUSTIBLE (France les installations)



ACU : Assemblages Combustibles Usé
URT : Uranium issu du retraitement

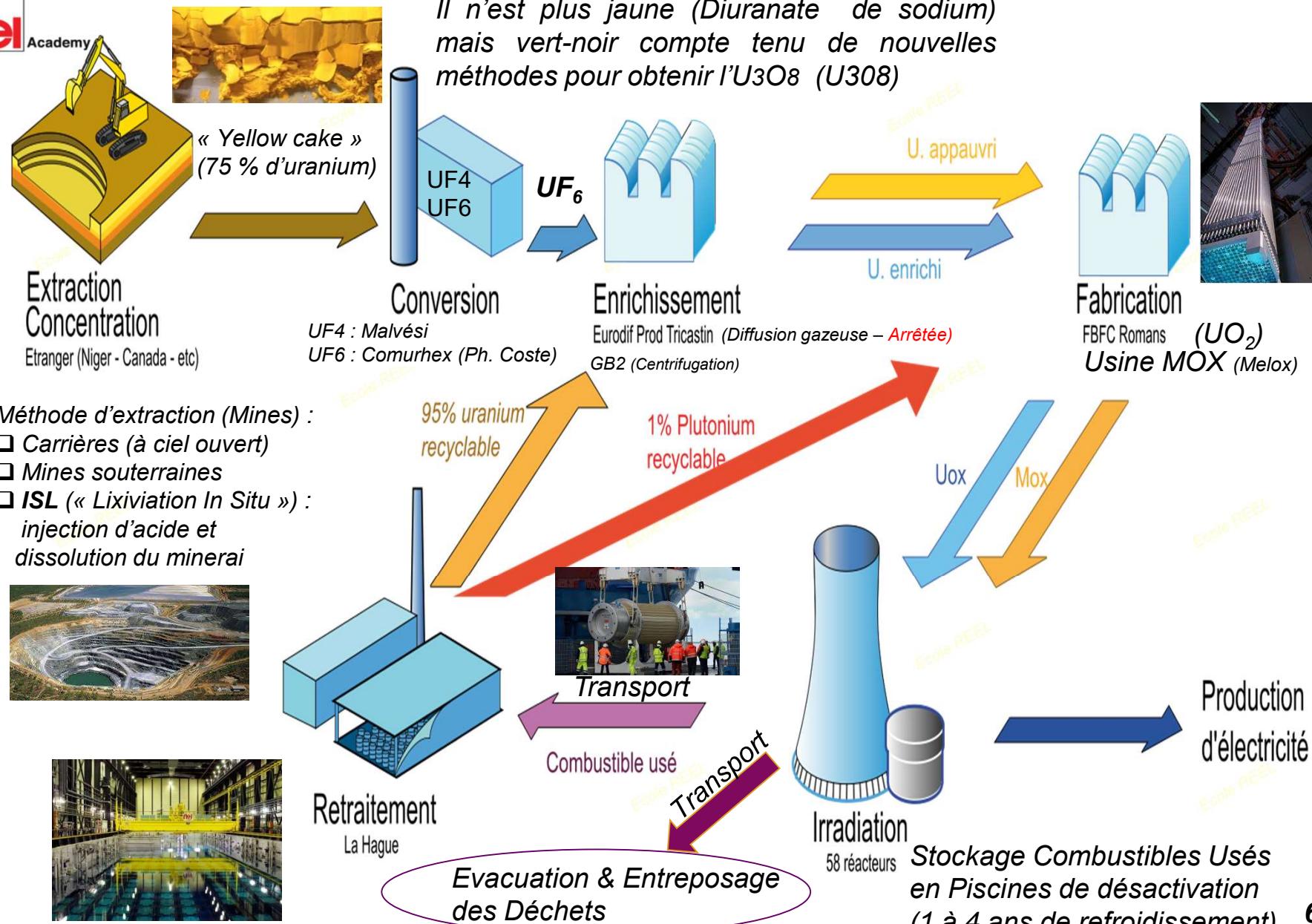
URE : Uranium de retraitement enrichi

Uranium Appauvri : issu de l'enrichissement (0,1 à 0,3 % d'U 235)

Uranium Enrichi : 3 à 5 % d'U235 (nucléaire civil)

ENERGIE NUCLEAIRE

CYCLE DU COMBUSTIBLE





ENERGIE NUCLEAIRE

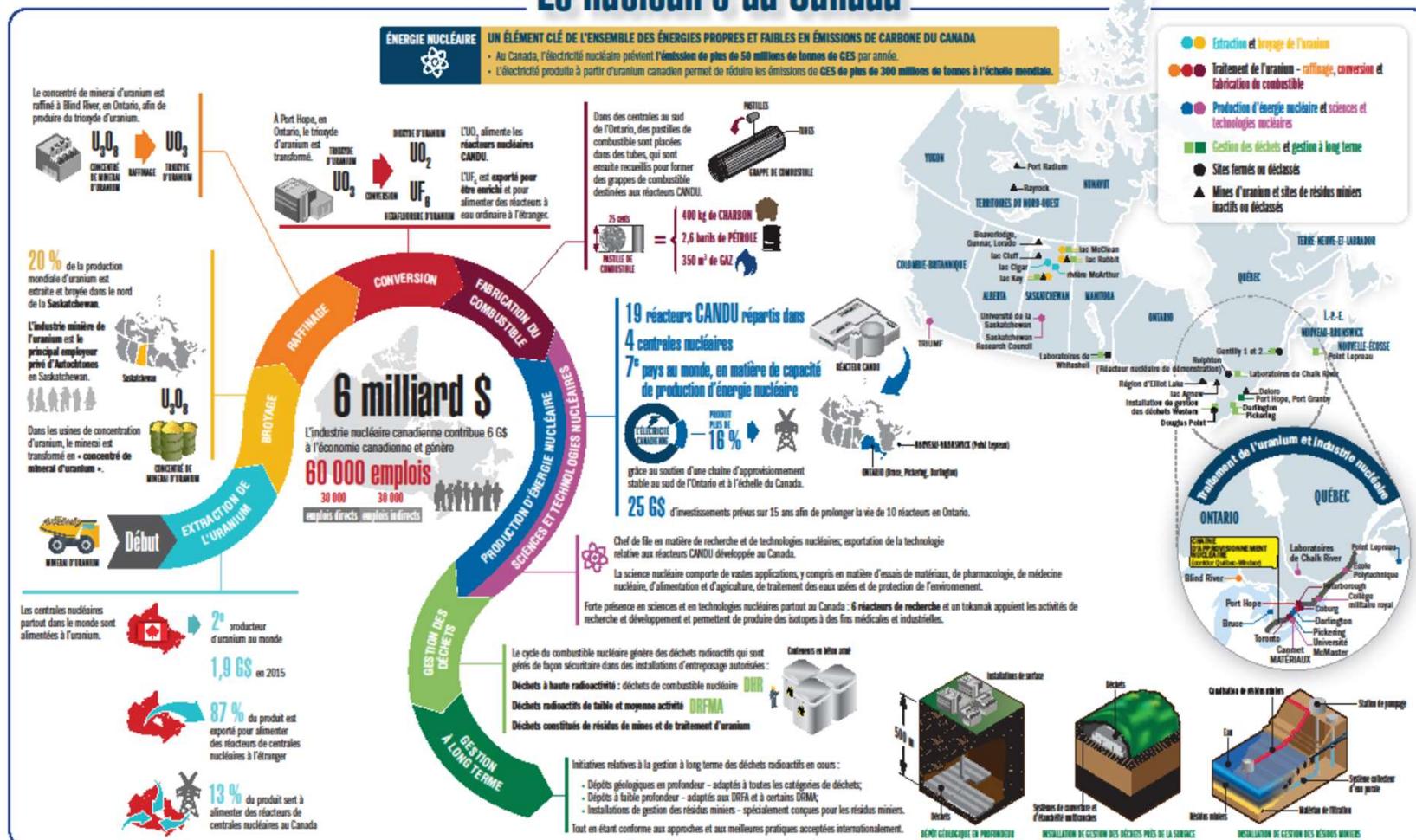
CYCLE DU COMBUSTIBLE (CANADA les installations)



Academy



Le nucléaire au Canada

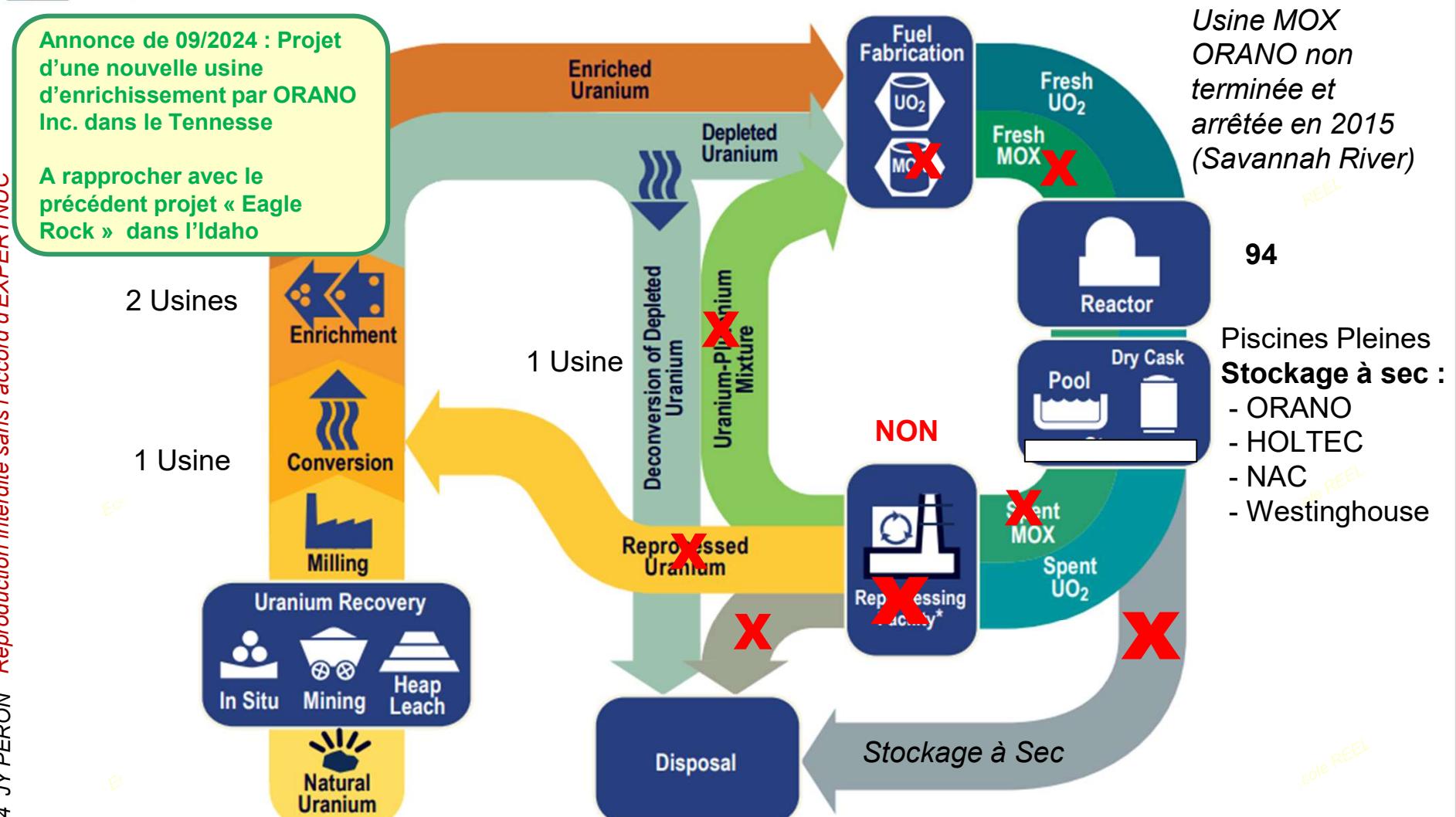


Des acteurs du nucléaire au Canada :

- AtkinsRéalis (le détenteur de la technologie Candu)
 - BWXT Canada

Canada

ENERGIE NUCLEAIRE CYCLE DU COMBUSTIBLE (USA)



* Reprocessing of spent nuclear fuel, including mixed-oxide (MOX) fuel, is not practiced in the United States.
Note: The NRC has no regulatory role in mining uranium.

L'Uranium possédait de nombreux isotopes, tous radioactifs. Ils ont été formés lors de la création du système solaire mais seuls ceux qui ont une période suffisamment longue subsistent encore sur la terre. Les seuls isotopes demeurant en quantité significative dans l'Uranium Naturel sont :

- L'**U235** abondance **0,72 %** - Isotope fissile (le seul nucléide fissile)
- L'**U238** abondance **99,275 %** - Isotope fertile (*)

(*) Si on bombarde de neutrons l'Uranium 238, il devient de l'U239 puis par désintégration, du Plutonium 239 fissile

C'est la période radioactive de l'U238, beaucoup plus longue que celle de l'U235 qui fait qu'il est le plus abondant dans l'Uranium naturel

C'est cette insuffisante de la disponibilité de l'U235 matière fissile qui est citée comme le facteur qui limiterait le développement, à grande échelle, de l'énergie nucléaire de fission.

Mais la répartition de l'Uranium naturel sur terre (et des autres matières premières métalliques) est le plus souvent continue. C'est, en moyenne, **3gr /tonne** d'Uranium dans la croûte terrestre.

Il y a une crainte infondée concernant les réserves d'Uranium. Plus le prix monte et plus les réserves augmentent. Le coût du combustible est négligeable pour le coût de fonctionnement d'un réacteur.

Aujourd'hui, on est pratiquement à l'équilibre entre production et consommation. Il reste aussi le stock d'Uranium appauvri à exploiter ainsi que le Plutonium (Combustible MOX).

Les besoins tournent autour de **62 500t /an (2021)**. **112 300t** prévues en **2040**.

Si la production est moindre (**47 700t en 2020**) le reste du besoin est assuré par les « sources secondaires » comme l'Uranium récupéré lors du traitement des Combustibles Usés.

ENERGIE NUCLEAIRE

MINES D'URANIUM

L'extraction de l'Uranium est une industrie minière qui va de la prospection initiale jusqu'au produit transportable appelé « **Yellowcake** ». Elle comprend les opérations suivantes :

- La préparation d'un site pour l'exploitation d'un gisement (autorisations, conception et installation des équipements, construction éventuelle des ouvrages d'accès) ;
- L'extraction du mineraï, seul ou en coextraction avec de l'or, du cuivre du phosphate,....
- Le traitement du mineraï (concassage, broyage, dissolution de l'uranium) pour concentrer l'uranium sous forme de « **Yellowcake** » majoritairement composé de U_3O_8 (U308 Octoxyde de Triuranium - 75% d'Uranium métal). Taux de récupération de l'uranium après traitement supérieur à 90 %.
- Le transport sécurisé vers les centres de conversion.

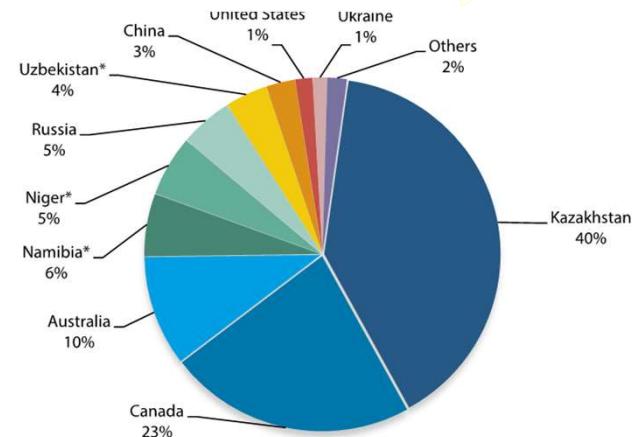
Les trois premiers pays producteurs d'Uranium dans le monde sont le **Kazakhstan**, le **Canada**, l'**Australie** et la **Russie** (2/3 de la production mondiale). On peut aussi citer le **Niger** et la **Namibie**.

Un gisement est exploitable si la concentration en Uranium est supérieure à 1000 PPM (0,1%). L'Uranium naturel ne contient que 0,7 % de matière fissile, l'Isotope Uranium 235. Les 99,7 % sont de l'Uranium 238. Autre mineraï le Thorium 232 mais sans matière fissile et non soluble dans l'eau.

Méthode d'extraction (Mines) :

- Carrières (à ciel ouvert)
- Mines souterraines: Galeries
- ISL** (« Lixiviation In Situ ») :
Puits avec injection d'acide et dissolution du mineraï

ORANO est un grand producteur d'Uranium (le 2^{ième}) et exploite des mines au Niger, au Kazakhstan,...



Production mondiale annuelle : 49 à 60 000t

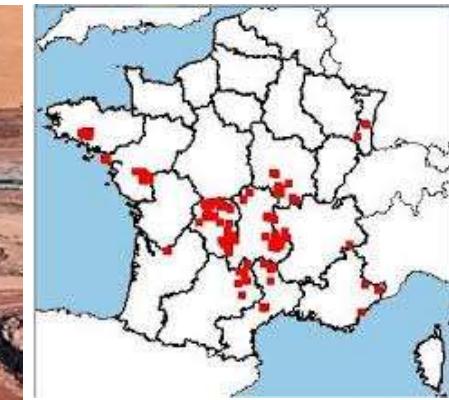
Production depuis l'origine : 3 000 000t

ENERGIE NUCLEAIRE

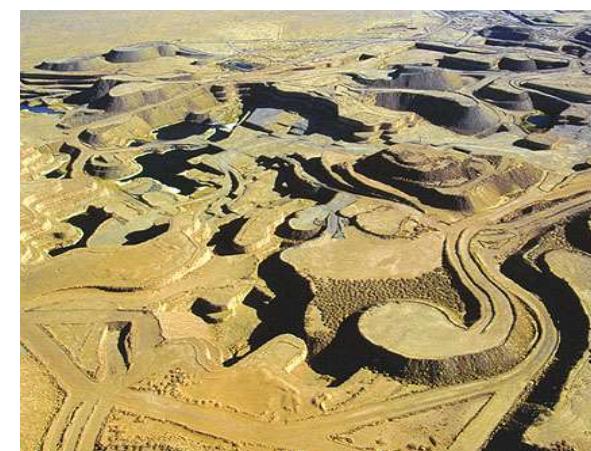
MINES D'URANIUM



Mines à ciel ouvert



En France : Limousin et Auvergne. 200 sites déjà exploités principalement dans le Massif Central. Plus de 75000 t extraits jusqu'en 2003. Aujourd'hui tout est importé. Le besoin français est de 9000t/an.



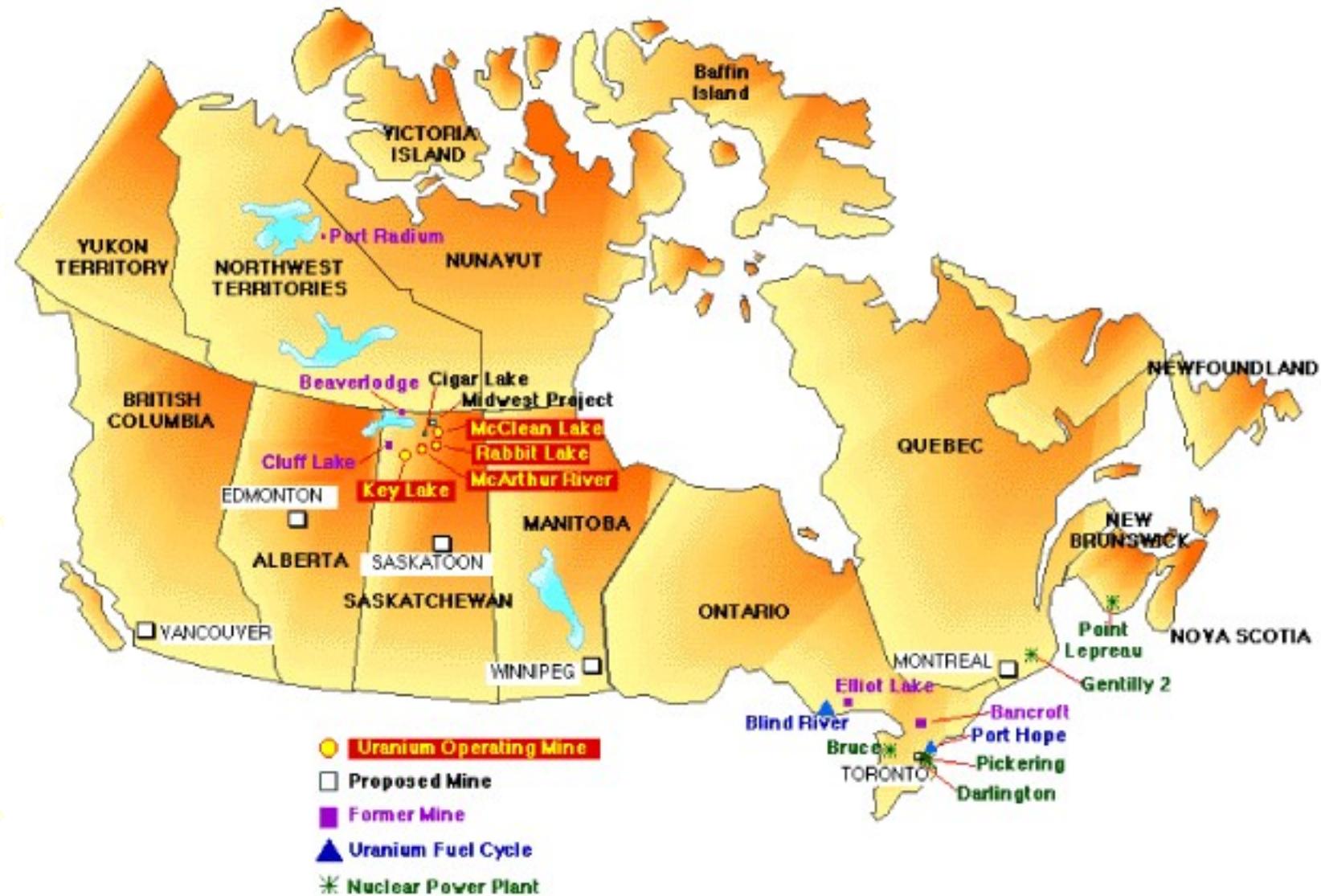
ENERGIE NUCLEAIRE

**MINES D'URANIUM
(Canada)**

Ecole REI

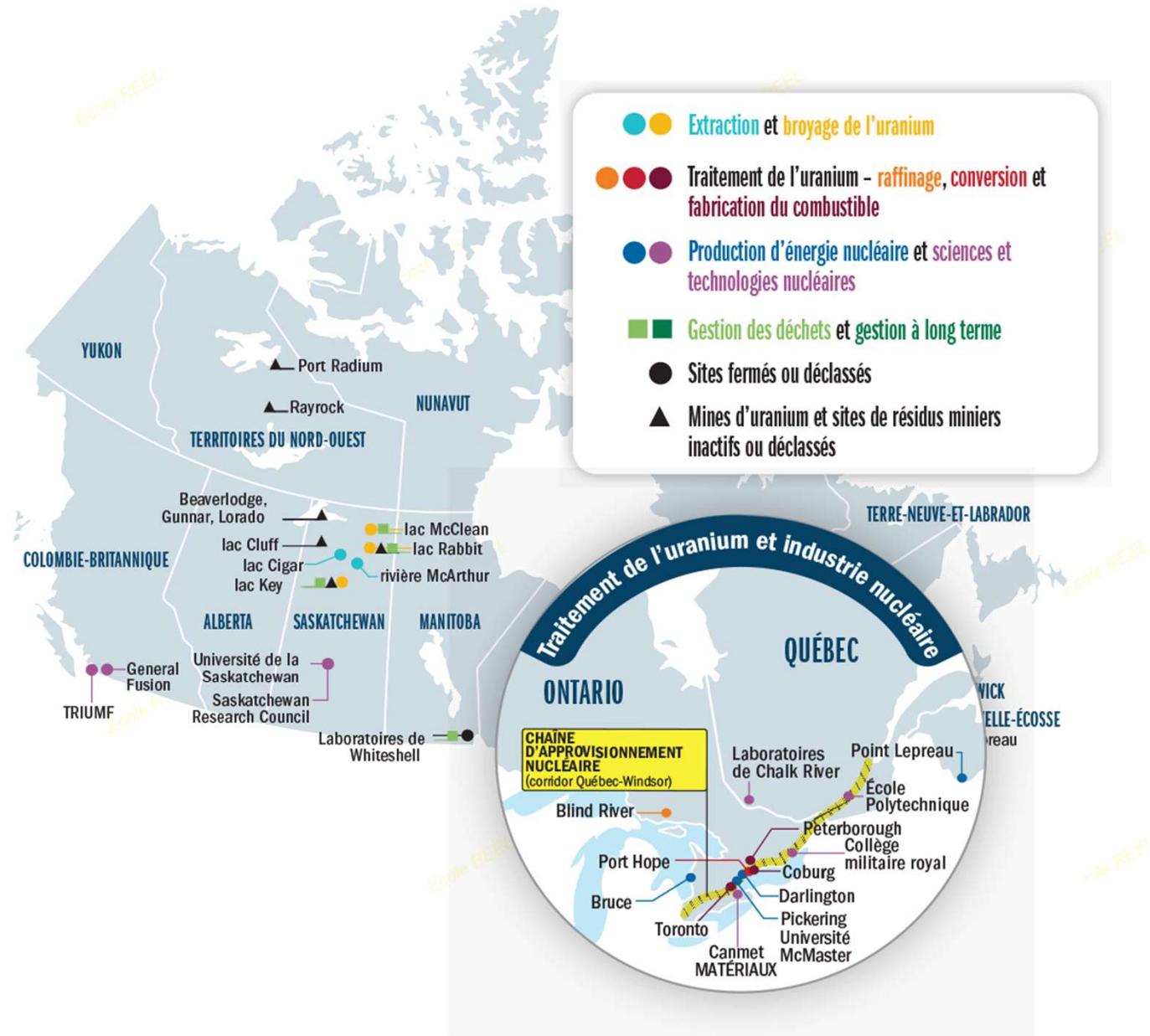
Ecole F

Ecole



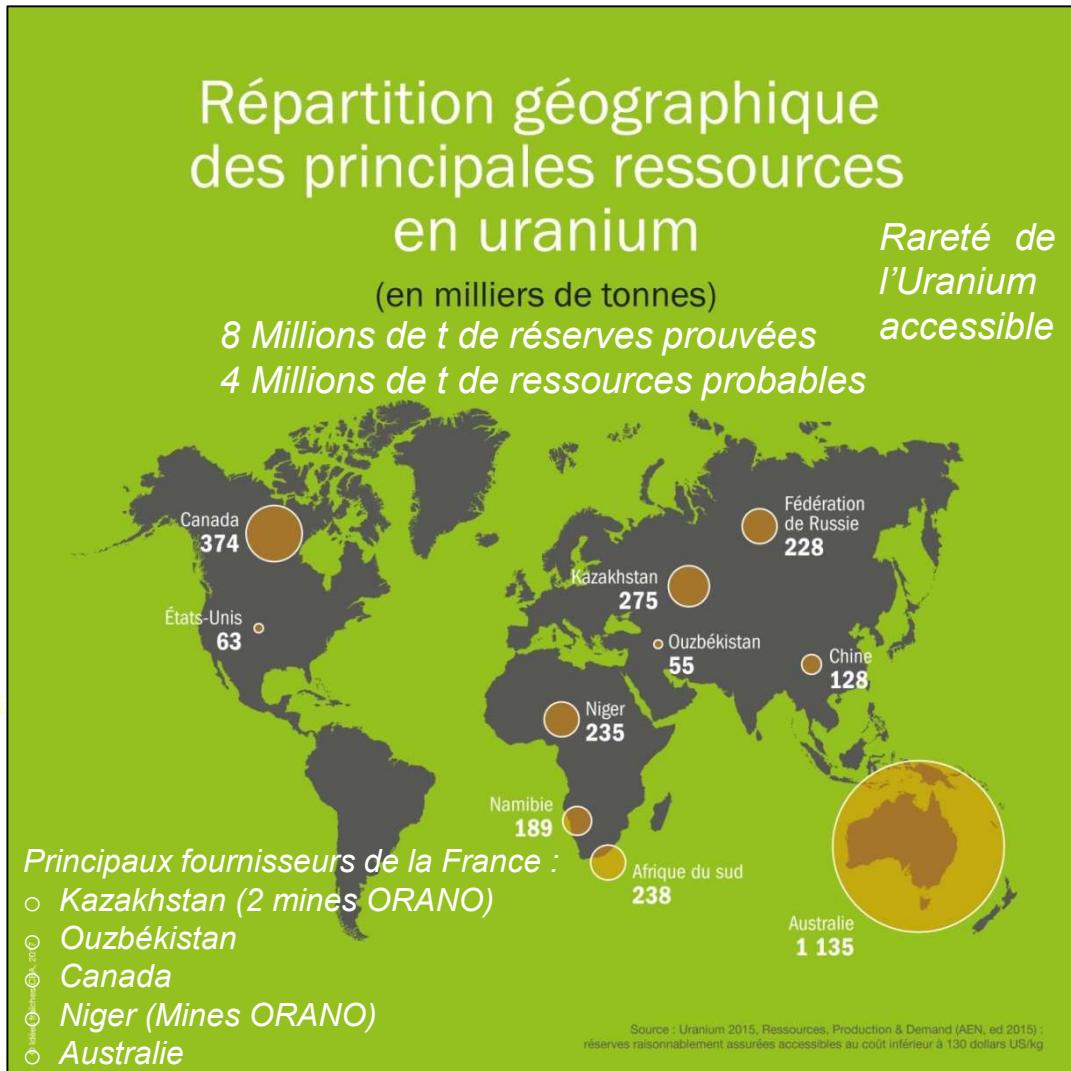
ENERGIE NUCLEAIRE

MINES D'URANIUM (Canada)



ENERGIE NUCLEAIRE

MINES D'URANIUM



MINERAIS D'URANIUM



Les réserves prouvées dans le monde sont estimées à 6,1 millions de tonnes. Au rythme actuel ces réserves permettent de couvrir les besoins de l'industrie nucléaire pendant environ 120 ans

L'Uranium, le Thorium et le Plutonium sont les actinides (métaux lourds) les plus abondants sur terre, les 2 premiers étant des éléments primordiaux tandis que le Plutonium est synthétisé par l'industrie. Tous les actinides sont radioactifs et sont tous fissiles en neutrons

ENERGIE NUCLEAIRE

ENRICHISSEMENT (Conversion)

L'enrichissement de l'uranium par un procédé de séparation isotopique – Avant la diffusion gazeuse avec Eurodif et aujourd'hui l' **Ultracentrifugation avec GB2** - passe par l'étape préalable de la **Conversion**.

Il s'agit d'obtenir un gaz d'uranium, sous la forme d'un composé fluoré, l'hexafluorure d'uranium (**UF6**).

Cet hexafluorure (très corrosif) devient gazeux une fois chauffé (plus de 80°C). Sous cette forme, on peut alors passer à la séparation isotopique proprement dite par ultracentrifugation.



Dernière unité de conversion mise en route par ORANO en 2018

Seuls la France, les Etats Unis, le Canada, la Russie et la Chine possèdent les usines de conversion dans le monde

ENERGIE NUCLEAIRE

ENRICHISSEMENT (Conversion)

RAFINAGE

- 1 - « Yellowcake » dissous dans l'acide nitrique
- 2 - Filtration
- 3 - Extraction par solvant



Solution de Nitrate d'Uranyle

Nitrate d'Uranyle pur (99,95 %)

CONVERSION

- 1 - Précipitation de Nitrate d'Uranyle par l'ammonia



Diuranate d'Ammonium

- 2 - Calcination du diuranate d'ammonium vers 400 °C



- 3 - Réduction de l' UO_3 par Hydrogène



- 4 - Hydrofluoruration d' UO_2 par l'acide fluorhydrique (en four)

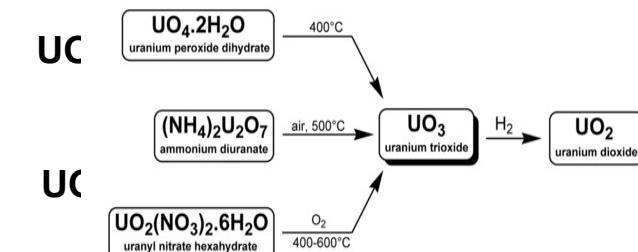


Tétra fluorure d'Uranium UF_4

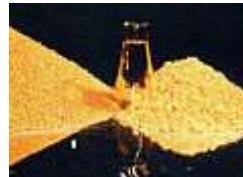
- 5 - Réduction de l' UF_4 avec du calcium



Uranium Métallique pur



Yellowcake +
Nitrate d'Uranyle



+ Diuranate



+ Dioxyde d'Uranium



Tetrafluorure
d'Uranium
(UF_4)

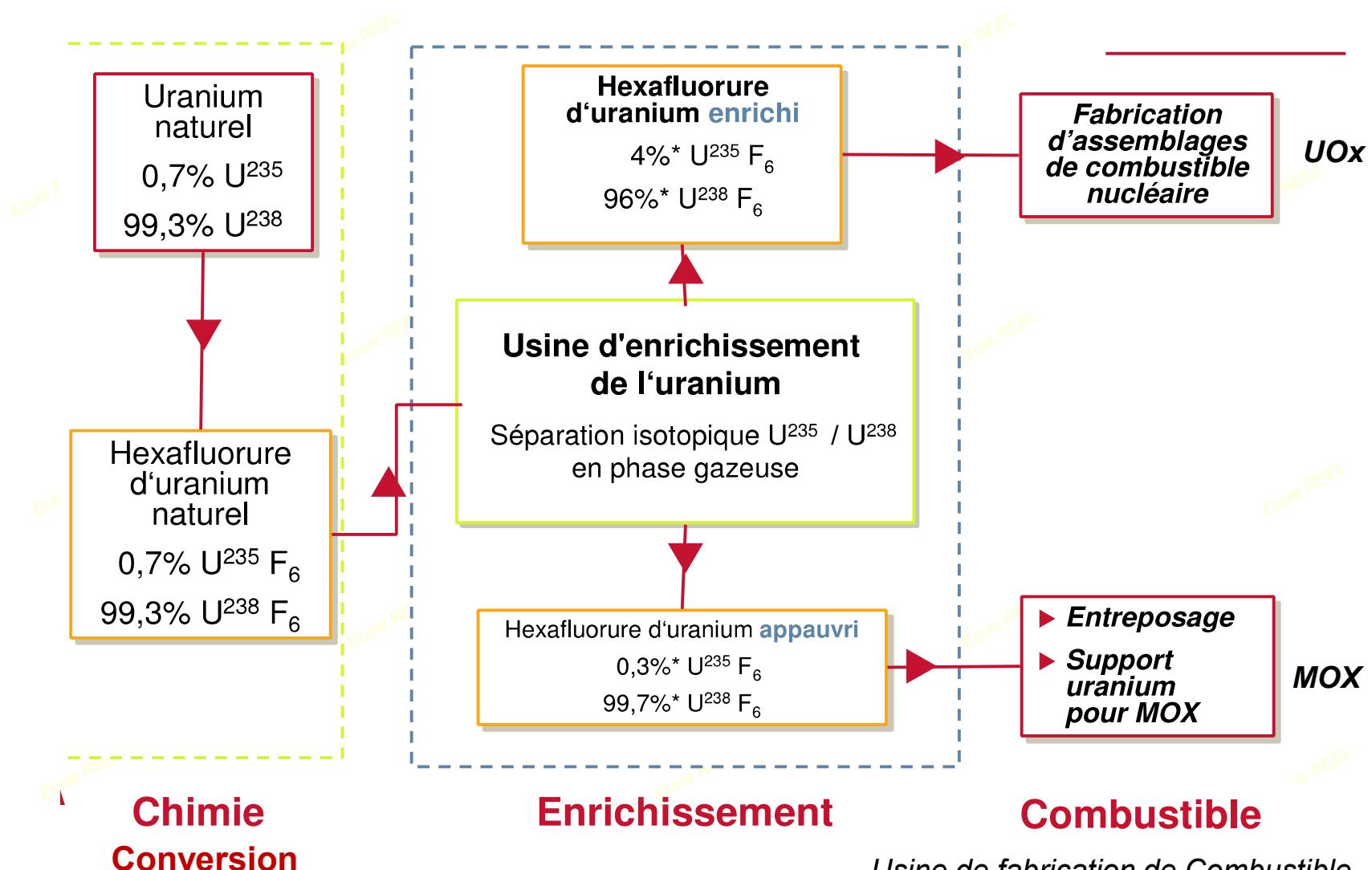


Uranium Métallique

ENERGIE NUCLEAIRE

CYCLE DU COMBUSTIBLE

L'enrichissement



ENERGIE NUCLEAIRE

ENRICHISSEMENT

Il est plus facile de faire marcher un réacteur avec de l'**uranium enrichi** qu'avec de l'uranium naturel. Le nombre de neutrons secondaires produits en moyenne par neutron lent capturé dans l'uranium du combustible augmente avec la richesse en isotope 235 fissile de cet uranium. Pour que la réaction en chaîne soit possible, ce nombre doit dépasser nettement 1 pour tenir compte des pertes : cette condition est vérifiée confortablement avec du **combustible enrichi à 3.5 %** ou plus comme celui des réacteurs REP mais marginalement avec de l'uranium naturel qui ne contient que 0.7 % d'Uranium-235

L'enrichissement est donc nécessaire pour avoir une activité du combustible suffisante avant son épuisement.

- Le Combustible des chaufferies nucléaire est lui enrichi à 20 % ou plus (93%) pour une durée d'exploitation du cœur de plus de 8 ans (voire 50 ans pour Etats Unis) avant son épuisement.
- Pour la bombe c'est un enrichissement à plus de 99 %. Arrêté en France car on est passé à l'arme thermonucléaire et il y a un stock d'uranium hautement enrichi pour les détonateurs.

L'enrichissement de l'uranium par un procédé de séparation isotopique – Aujourd'hui **ultracentrifugation** - passe par l'étape préalable de la **Conversion**. Il s'agit d'obtenir un gaz d'uranium, sous la forme d'un composé fluoré, l'hexafluorure d'uranium (UF₆).

Cet hexafluorure (très corrosif) devient gazeux une fois chauffé (plus de 80°C). Sous cette forme, on peut alors passer à la séparation isotopique proprement dite par ultracentrifugation.



PRODUCTION DE COMBUSTIBLES HAUTEMENT ENRICHIS

Combustible dit **HALEU** (High Assay Low Enriched Uranium) avec un taux d'enrichissement en U235 à moins de **20%**. Pour une utilisation dans les réacteurs de Nouvelles Générations.

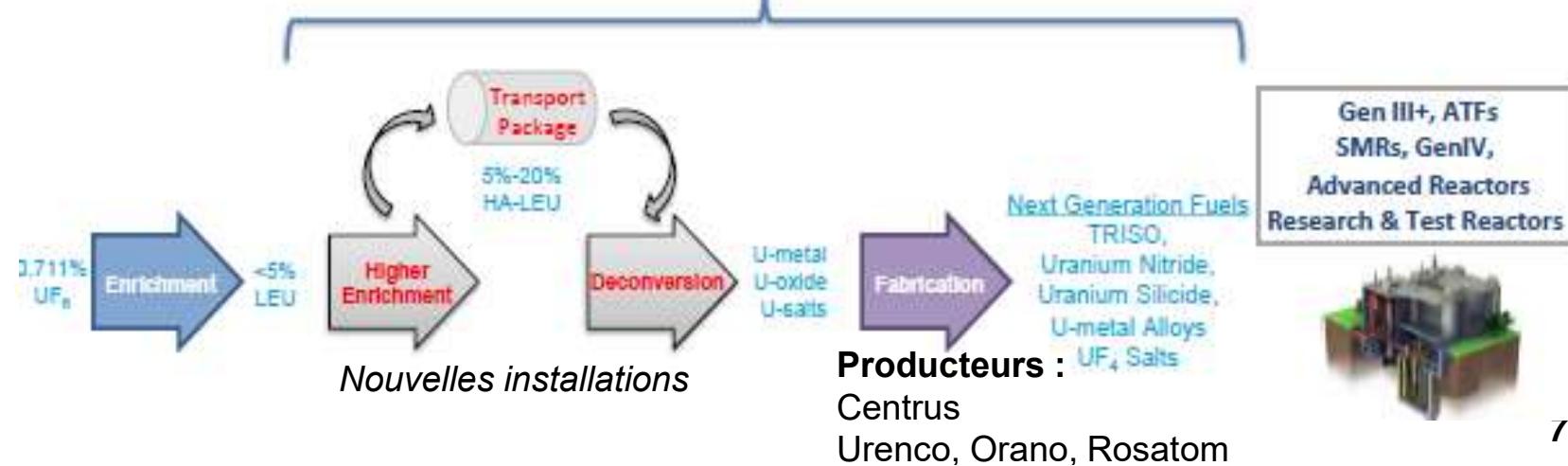
Pour les chaufferies nucléaires aux USA, au Royaume Uni et en Russie on parle de combustible très enrichi ou **HEU** (un taux à plus de 20 %). A plus de 80 % on parle de qualité militaire, utilisable pour fabriquer une arme nucléaire en relation avec la masse critique nécessaire (50kg).

Chaine actuelle de fabrication du Combustible Nucléaire



Nouvelle chaîne de fabrication du Combustible Hautement Enrichi

Gaps in the Future Nuclear Fuel Supply Chain



Producteurs :
Centrus
Urenco, Orano, Rosatom

ENERGIE NUCLEAIRE

ENRICHISSEMENT (Ultracentrifugation)

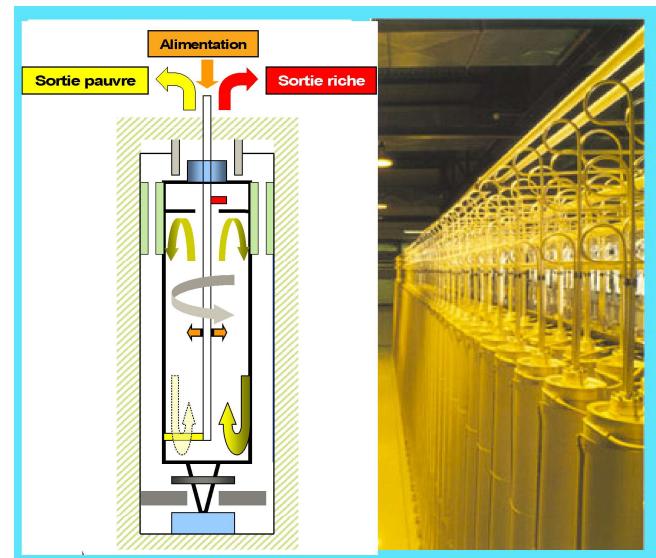
L'**ultracentrifugation** consiste à faire tourner à très haute vitesse (Plus de 50 000 tr/min) un cylindre creux dans un carter étanche. Par l'effet de la force centrifuge, les molécules d'hexafluorure les plus lourdes sont envoyées à la périphérie (et en partie basse), l'U235 près de l'axe, créant un effet de séparation isotopique. Bien que le gaz doive passer dans des milliers de centrifugeuses pour être enrichi à la concentration voulue, la centrifugation consomme très peu d'énergie par rapport au procédé précédent de **diffusion gazeuse** (EURODIF). C'est 50 fois moins.

Peu de maintenance. Les centrifugeuses tournent pendant 25 ans sans s'arrêter.

C'est l'usine d'enrichissement **Georges Bess 2** en France et l'usine au Canada



GB2 : Pont automatique de manutention des fûts d'UF₆



Cascade de centrifugeuses

Les 20 % d'enrichissement sont les plus difficiles à obtenir

REEL a fourni des équipements de manutention sur GB2 (Portiques extérieurs) ainsi que le système de pesée des fûts

IRAN : Accord sur le nucléaire. Limitation de l'enrichissement à **3,67 %** pour un usage uniquement civil.

L'**IRAN** vient de mettre en route une quarantaine de centrifugeuses de nouvelle génération et aurait dépassé le seuil d'enrichissement imposé par l'accord avec 20 % et viserait un taux de **60 %**.

Nouvelle technique : Enrichissement au laser.

L'enrichissement de l'uranium

- ▶ L'énergie nucléaire est produite à partir d'**uranium 235**, qui représente seulement 0,7% de l'uranium naturel, le reste étant de l'**uranium 238**
- ▶ Le processus d'enrichissement **augmente la proportion d'U-235** en le séparant de l'U-238

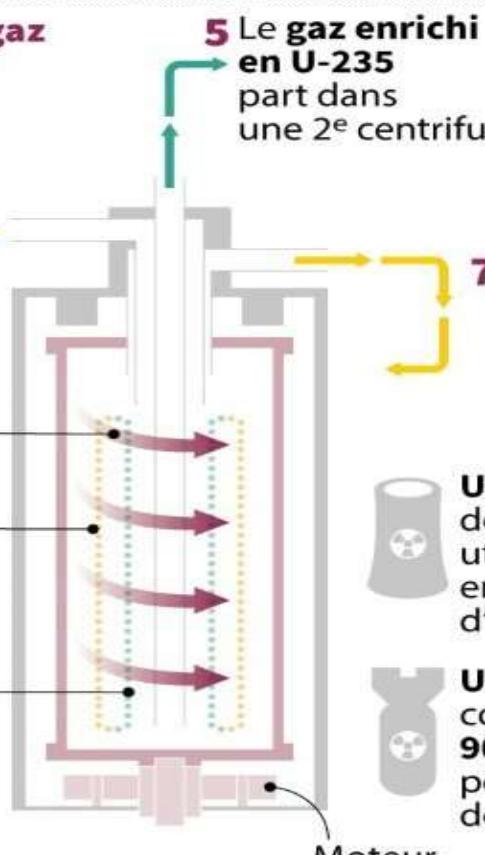
Centrifugeuse à gaz

1 L'uranium à l'état gazeux est introduit dans une **centrifugeuse**

2 Les molécules sont **séparées** grâce à la force centrifuge

3 L'**U-238**, plus **lourd**, est repoussé vers l'extérieur

4 L'**U-235**, plus **léger**, reste au centre



5 Le **gaz enrichi en U-235** part dans une 2^e centrifugeuse

6 Répétition du processus pour plus de concentration

7 Le gaz légèrement **appauvri** en U-235 est à nouveau utilisé pour la première étape

Usage civil : la majorité des centrales nucléaires utilisent de l'uranium enrichi **de 3,5 à 5% d'U-235**



Usage militaire : une concentration d'au moins **90% d'U-235** est nécessaire pour fabriquer des armes nucléaires

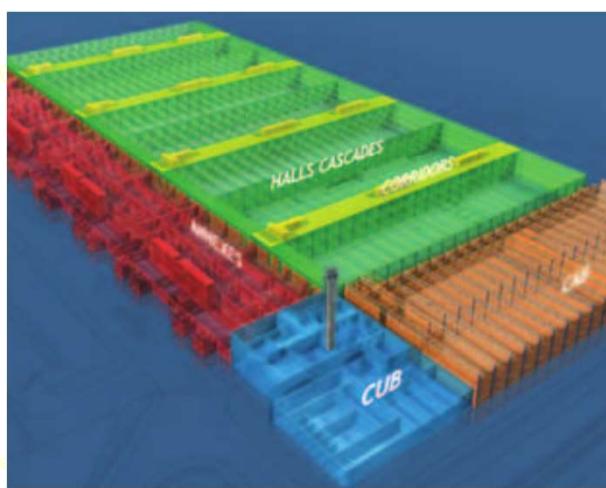


L'Iran veut enrichir à 60 % !!!

ENERGIE NUCLEAIRE

ENRICHISSEMENT (Ultracentrifugation)

Extension de l'usine ORANO GB2 pour une augmentation de capacité de plus de 30% et passer de 7,5 à 11 millions SWU (4 cascades de centrifugeuses en plus). Projet approuvé pour une mise en service en 2028



Vue des cascades de centrifugeuses (zone verte) et des cellules chaudes et froides (zone rouge). Près de **6000** centrifugeuses dont la conception et l'assemblage sont confidentiels.

L'assemblage des centrifugeuses se fait sur place dans un local hautement sécurisé afin d'assurer la confidentialité de la conception.

Le poids de l'Uranium à l'entrée et à la sortie est très contrôlé avec une surveillance « tiers » d'EURATOM.

Le marché de l'enrichissement se partage entre : **ORANO** (France – 12%), **URENCO** (Allemagne, Etats-Unis, Pays Bas et Royaume Uni – 30%), **TENEX** (Russie - 46%) et **CNNC** (Chine – 12%)



ENERGIE NUCLEAIRE

FABRICATION COMBUSTIBLE

Après enrichissement, l'hexafluorure d'uranium (UF_6) est transformé en une **poudre noire d'Oxyde d'uranium (UO_2)**

Cette poudre est ensuite comprimée en petites pastilles qui cuisent dans un four à 1 700°C et acquièrent alors leur solidité et leur densité définitive. Chacune d'elles – un cylindre de 13 mm de hauteur et d'un diamètre de 8,5 mm – ne pèse que 10,5 grammes

Les pastilles (environ 300) sont introduites dans de longs tubes (ou gaines) de 4,5 mètres de long, faits d'un alliage à base de **zirconium**. Chaque gaine est scellée aux extrémités par deux bouchons.

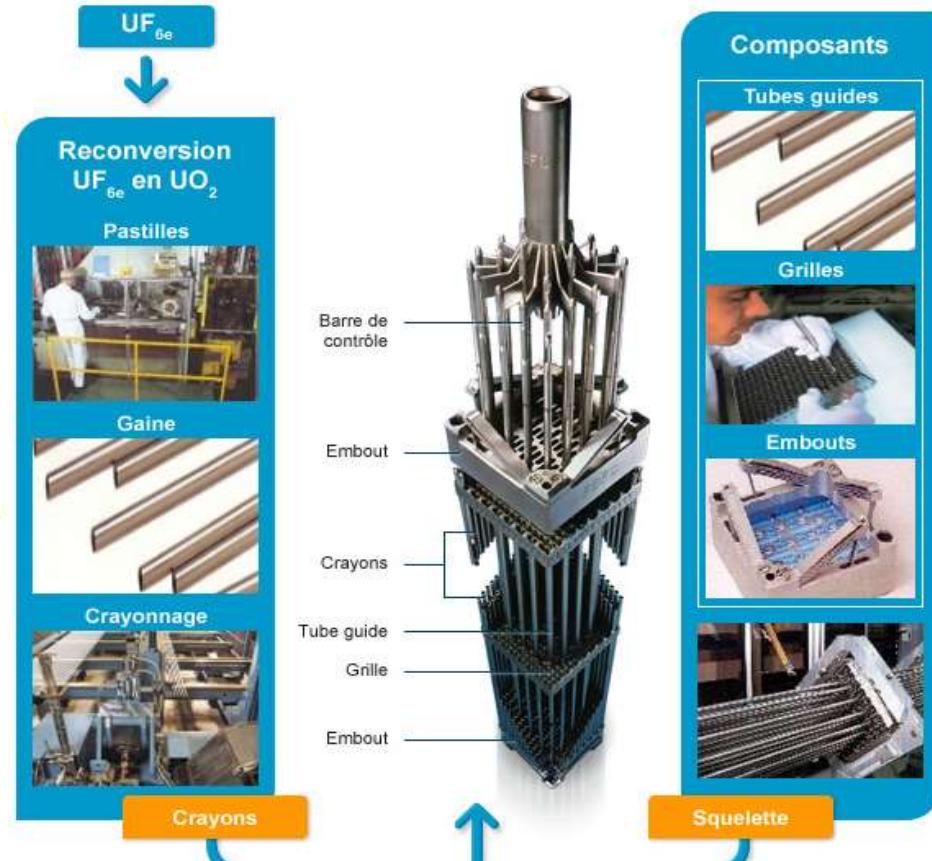
L'ensemble constitue le « **crayon** ».

Les crayons sont maintenus dans une structure métallique (le squelette) réalisée le plus souvent en alliage de zirconium et liés en "faisceaux" de section carrée pour constituer un **Assemblage de Combustible**.

Un Assemblage 17x17 comporte 264 crayons.

Pour les REPs, le cœur comprend entre 157 (900 MW) et 241 (EPR) Assemblages Combustibles. Plus de 800 pour les nouveaux REB (ABWR)

1 kg de U235 enrichi à 4% permet de produire autant d'énergie que 10 à 15t de pétrole ou que 20t de charbon.



R&D sur l'amélioration de la performance et de la tenue des Assemblages Combustible : L'E-ATF (accident tolérant) avec gaine revêtue de Cr

ENERGIE NUCLEAIRE

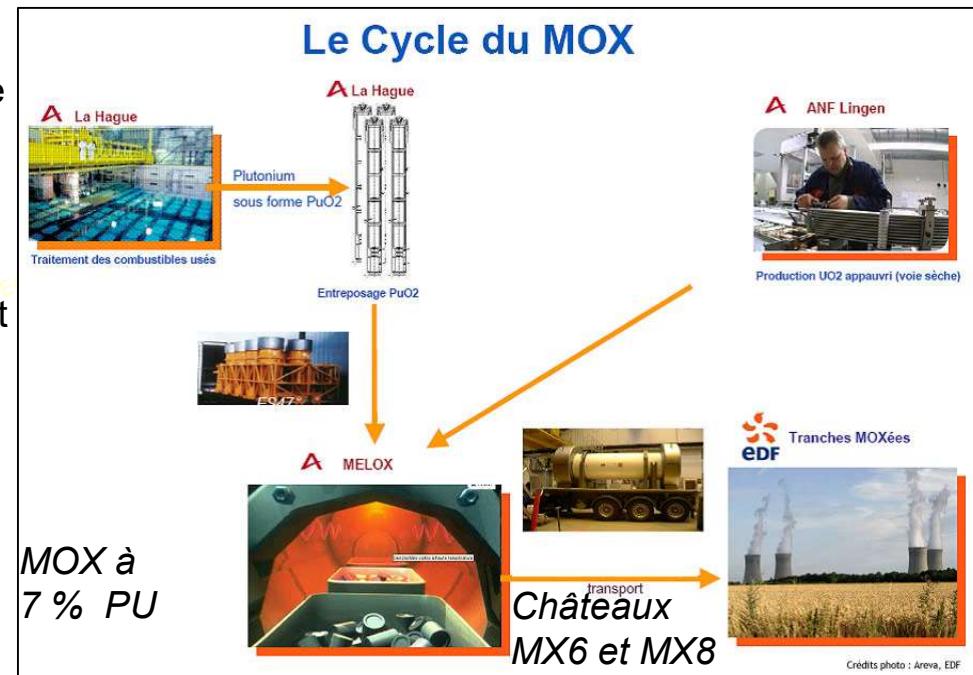
FABRICATION COMBUSTIBLE

MOX pour « Mixed Uranium & Plutonium » permet de recycler potentiellement jusqu'à 96 % des combustibles usés tout en divisant par 5 les volumes des déchets de haute activité. 120t de MOX remplacent 120t d'uranium naturel soit 1000t de réserves de minerai. En France, 22 réacteurs 900 MW utilisent du combustible MOX. Le recyclage permet de produire 10 % de l'électricité nucléaire. 20% du PU dans un MOX est « brûlé ». La France a exporté du MOX au Japon (utilisés sur un des réacteurs de Fukushima) et aux USA. Reprise des expéditions vers le Japon.

L'usine MELOX fabrique le combustible MOX.

La « copie MELOX » aux USA vient d'être arrêtée à 70 % de finition (Dépassement budgétaire – Intérêt géostratégique non justifié pour le recyclage du Plutonium militaire)

REEL a fabriqué des installations de procédé de l'usine MELOX

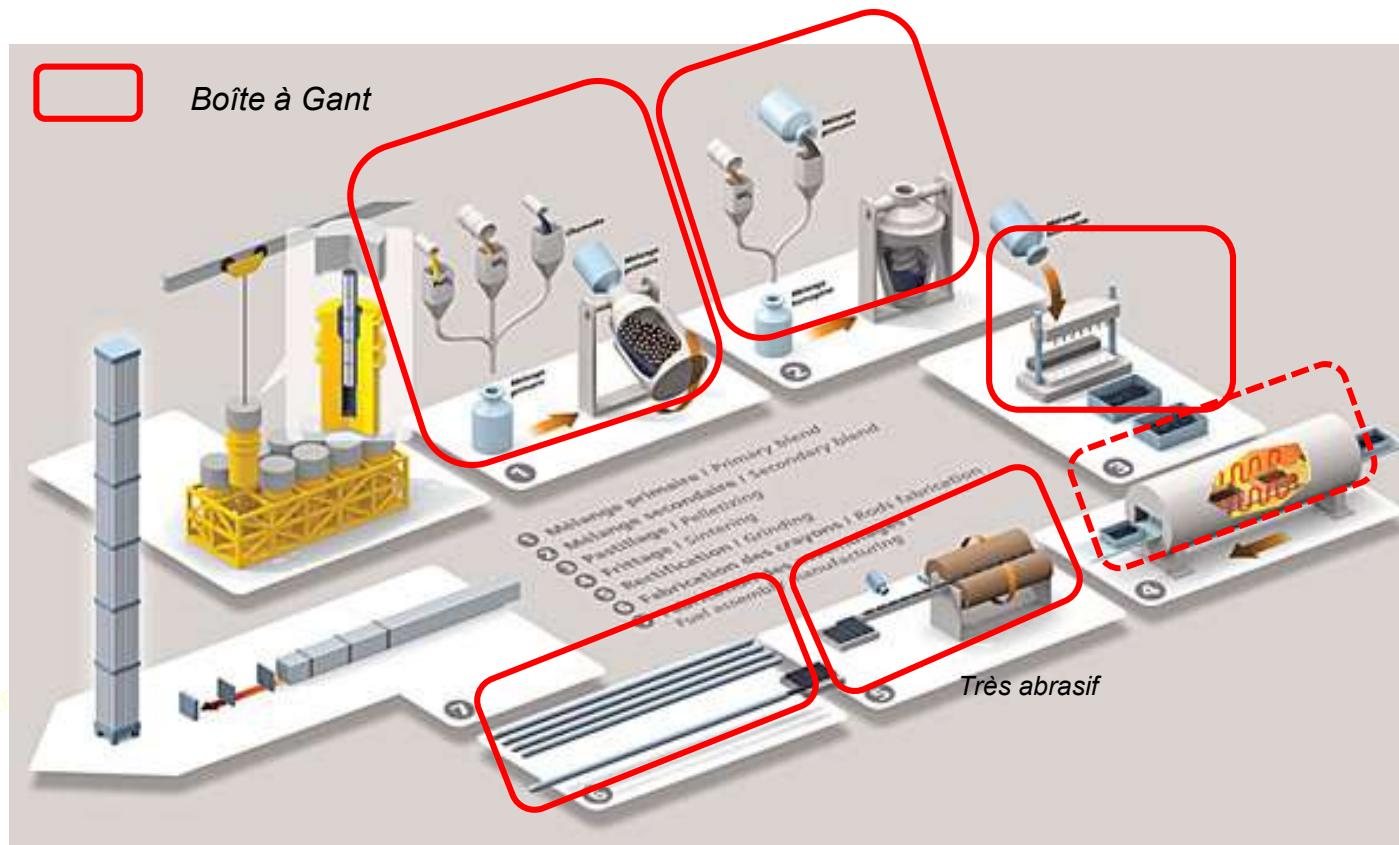


Château MX6

REEL fabrique des châteaux de transport de combustibles MOX (MX6, MX8 et FS65)

ENERGIE NUCLEAIRE

FABRICATION COMBUSTIBLE Cas du MOX



Production annuelle :
130 à 150t
Contrôle stricte des quantités de matière Entrée / Sortie par L'AIEA et Euratom

Grosses rénovations prévues sur MELOX

Installation soumise aux risques d'accident de criticité compte tenu de la masse de matière considérée et l'échauffement

1 - Le mélange des poudres : Constitution d'un **mélange primaire**, à partir de poudres d'oxyde de plutonium, d'oxyde d'uranium appauvri (0,1 à 0,3 %) venant de l'enrichissement et de "chamotte" obtenue à partir de pastilles de rebut.

2 – Le mélange des poudres (le savoir faire) : De l'Uranium appauvri est ajouté à ce mélange primaire afin d'obtenir la teneur précise requise par les clients. Ce mélange final est appelé **mélange secondaire**. La teneur en Plutonium de l'assemblage combustible - peut varier de **3% à 12%** - en fonction des spécifications du Client.

3 - Le pastillage : Le mélange obtenu est compacté sous forme de pastilles.

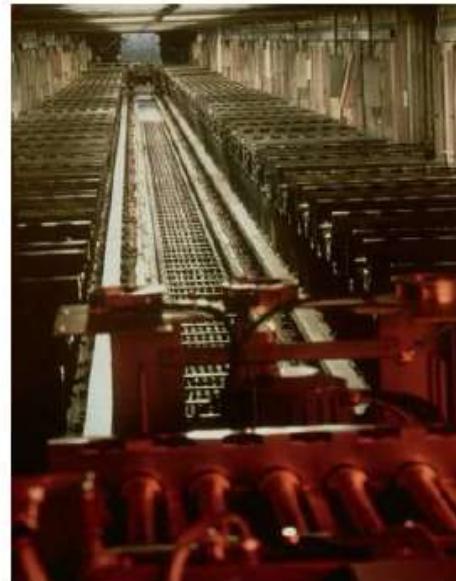
4 - Le Frittage Celles-ci sont cuites dans un four à haute température (1700 °C) pour être converties en céramique.

5 - La rectification : les pastilles sont rectifiées entre deux meules afin d'obtenir le diamètre requis, au micron près. Les pastilles non conformes sont renvoyées en amont pour y être recyclées.

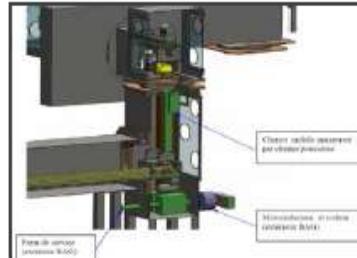
6 - Le gainage : les pastilles sont ensuite insérées dans des tubes en alliage de zirconium appelés "crayons". Chaque crayon mesure environ 4 mètres de long et est composé d'environ **320** pastilles en fonction des exigences des clients. Les crayons sont ensuite soigneusement nettoyés, puis contrôlés.

7 - Assemblage final : Les crayons sont insérés par nappe dans la structure (Pied, Tête, tube de grappe, grilles) de l'Assemblage

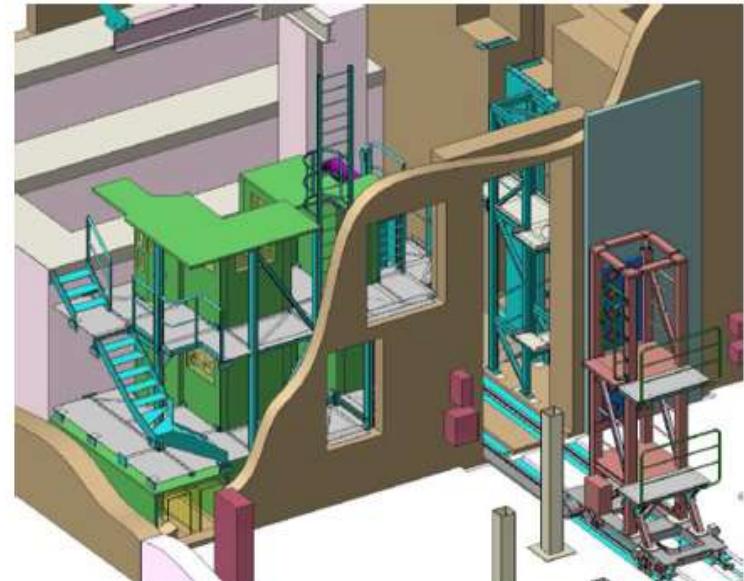
NFM systems fournisseur de l'usine MELOX.
REEL a également fourni des équipements (stockage des pastilles)



Tunnel de
manutention des
poudres de Melox



Système de
manutention en
boîte à gants

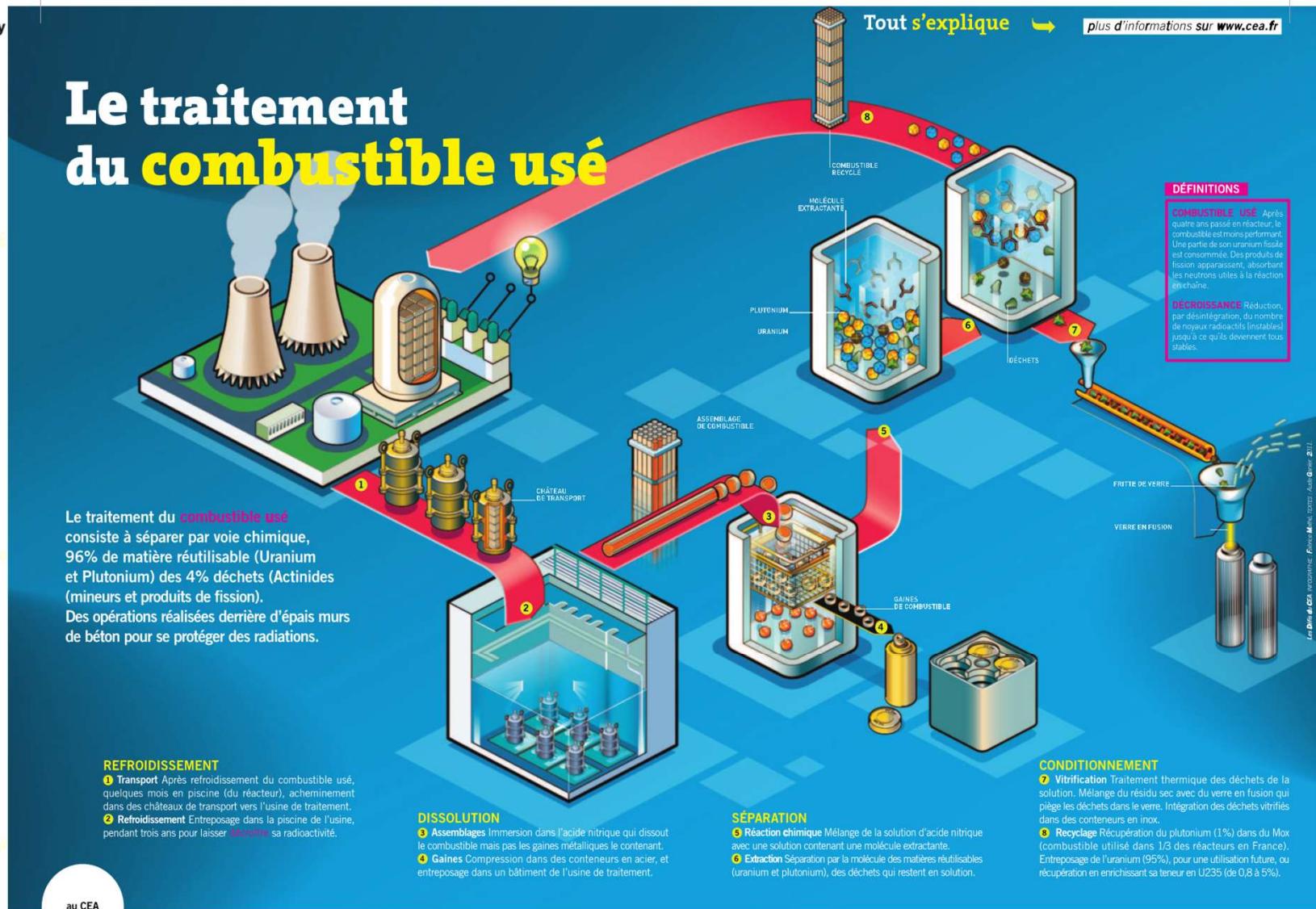


Rack de stockage équipement de transfert
d'assemblage Mox et porte de protection
radiologique

ENERGIE NUCLEAIRE

CYCLE DU COMBUSTIBLE

Le traitement du combustible usé



ENERGIE NUCLEAIRE

RETRAITEMENT



À l'usine de la Hague, le traitement du combustible usé est organisé au sein de deux usines de plutonium (**UP2** et **UP3**).

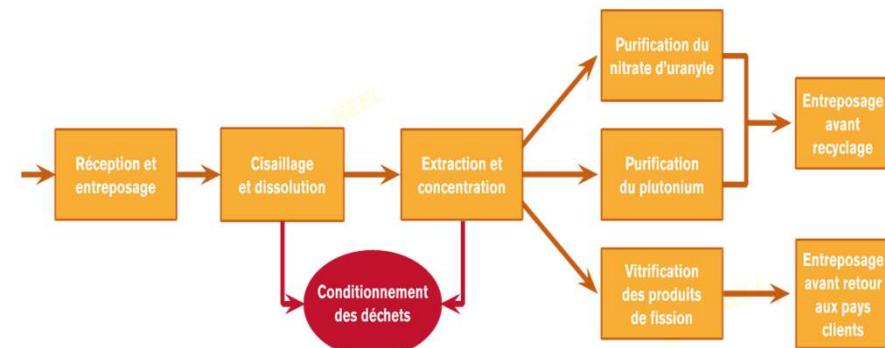
Ces usines comprennent plusieurs ateliers :

- **Ateliers de tête** (R1,T1) pour le cisaillage et la dissolution du combustible
- **Atelier d'extraction** pour séparer l'uranium et le plutonium des produits de fission et des actinides mineurs
- **Ateliers de purification** pour l'uranium ou le plutonium
- **Atelier de vitrification** des déchets de Haute Activité (Produits de fission incorporés dans des matrices de verre et coulés dans des conteneurs étanche en INOX.

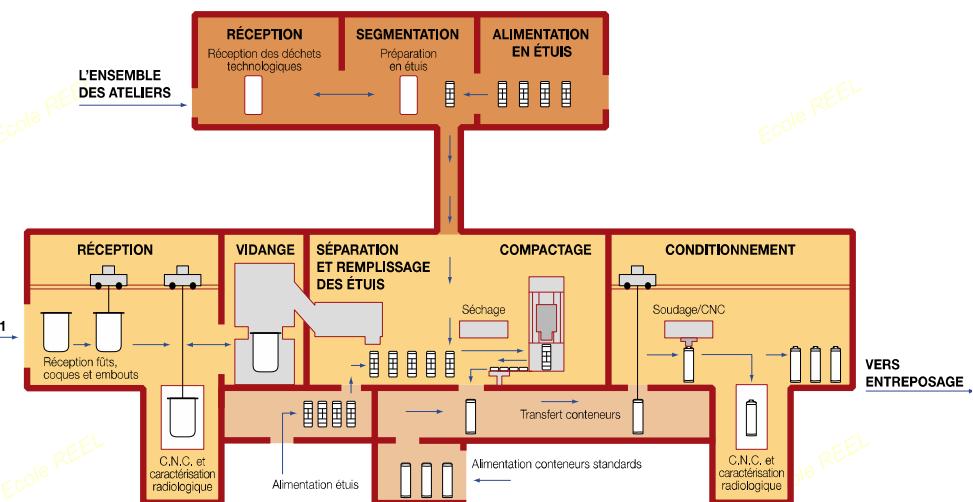
Vitrification : Un savoir faire unique

- **Atelier de stockage** de l'uranium ou du plutonium
- **Atelier de conditionnement des déchets** (ACC - AD2) de faible ou moyenne activité
- **Atelier de traitement des effluents liquides** (STE3)

Technologies exportées au Japon et peut être bientôt en Chine



La Hague : Le seul outil industriel de retraitement au monde qui fonctionne
 (Rokkashomura au Japon est une copie de La Hague)

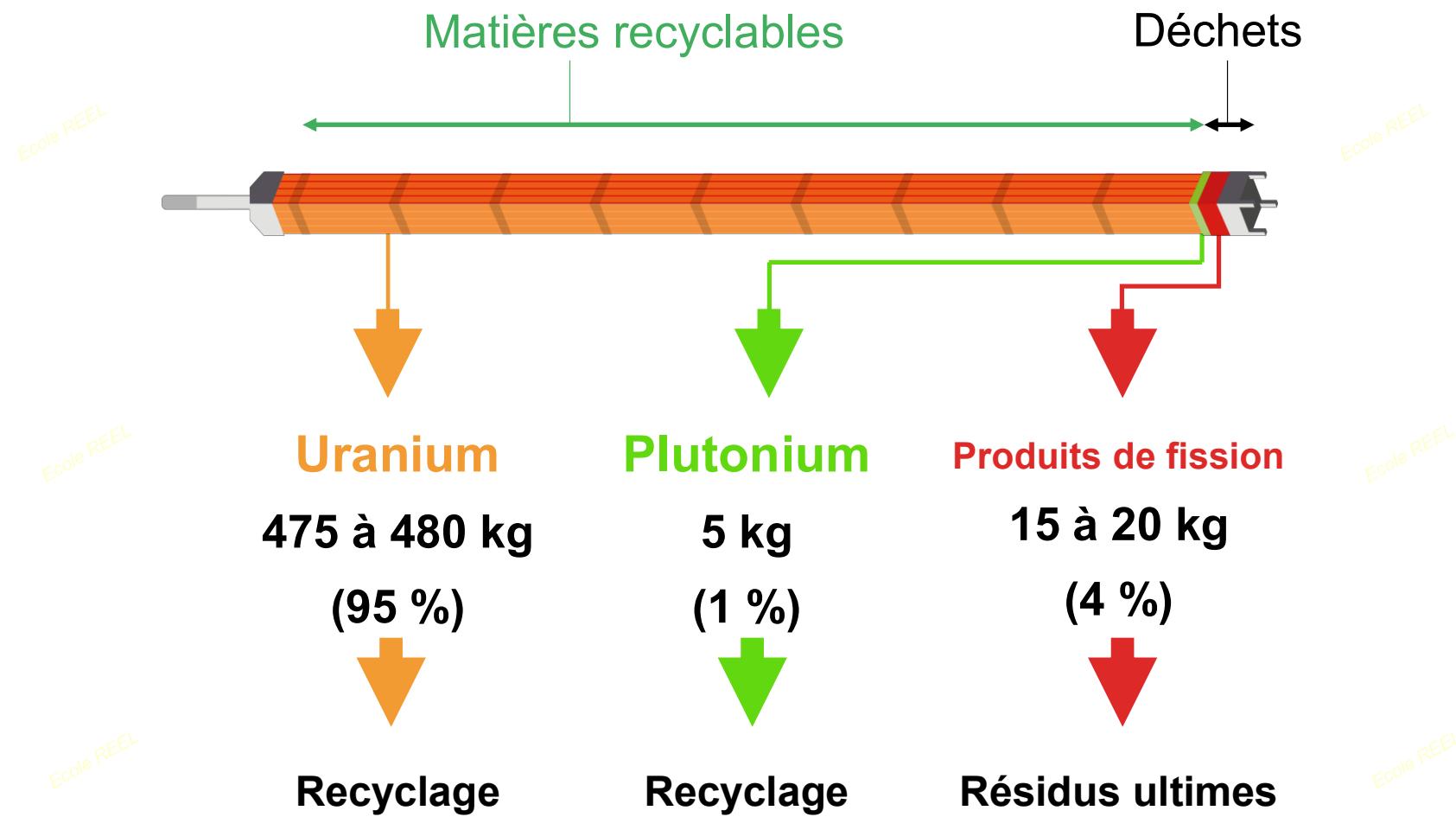


Atelier de Compactage des Coques et Embouts (ACC)

Cet atelier traite aussi les déchets technologiques de haute activité

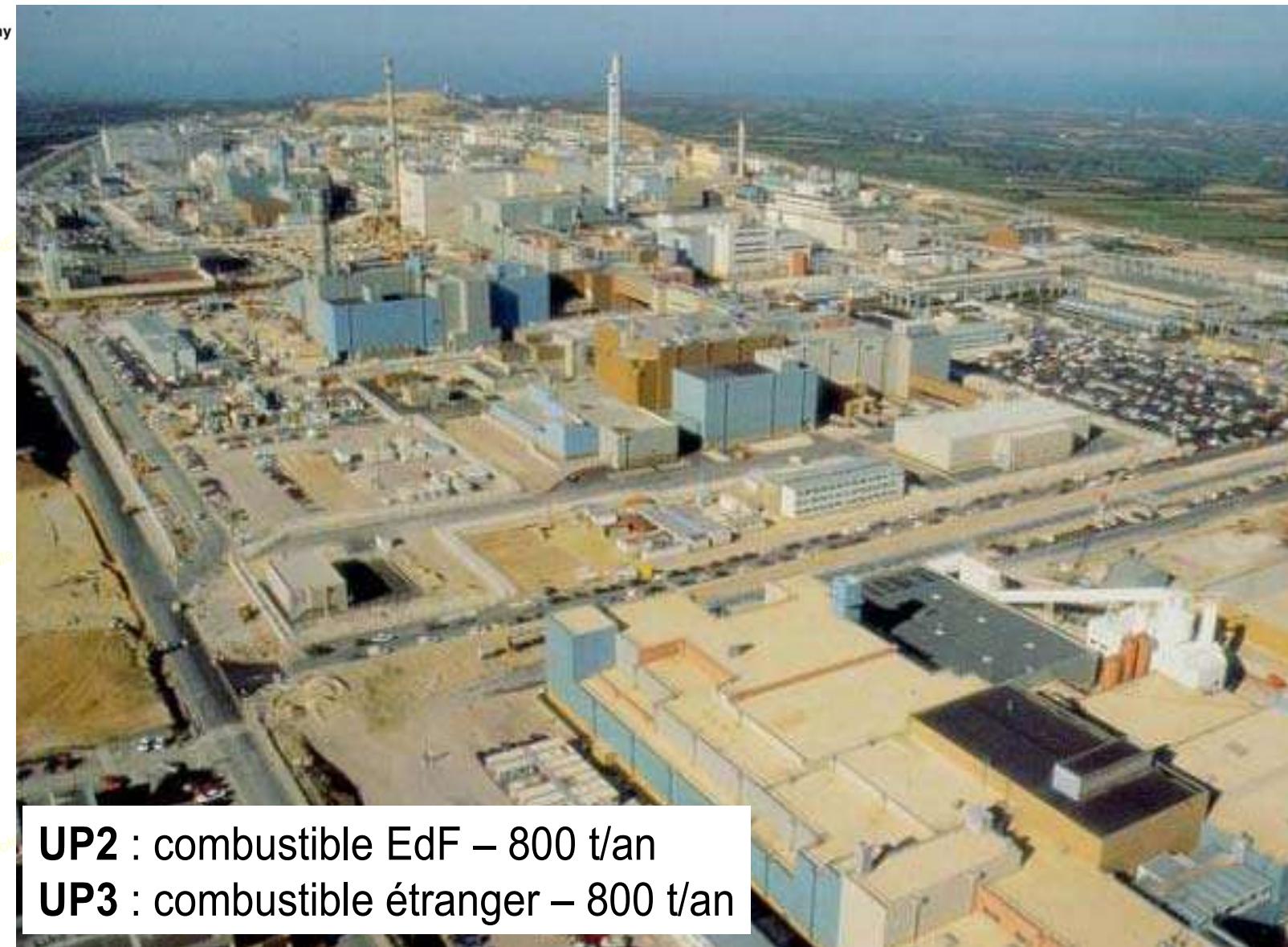
ENERGIE NUCLEAIRE

**Structure du Combustible après irradiation
(valeurs dépendantes du taux de combustion)**



ENERGIE NUCLEAIRE

RETRAITEMENT



UP2 : combustible EdF – 800 t/an

UP3 : combustible étranger – 800 t/an

ENERGIE NUCLEAIRE

CYCLE DU COMBUSTIBLE RAPPEL

URANIUM NATUREL

Uranium Naturel extrait de la mine :

Métal radioactif naturellement présent dans certaines roches sous forme de minéral. Il est extrait et mis sous forme d'un concentré solide d'uranium appelé « **Yellow Cake** »

Uranium Naturel Enrichi (UNE)

Il est obtenu en augmentant la concentration en Uranium 235 de l'Uranium Naturel. Cette concentration passe alors de 0,7 % à plus de 4 %, voire 99 %. Il sert à la fabrication des combustibles pour les réacteurs nucléaires à fission

Uranium Appauvri

Obtenu lors du procédé d'enrichissement de l'Uranium Naturel. Il est transformé en matière solide, chimiquement stable, incombustible, insoluble et non corrosive. Il se présente sous la forme d'une poudre noire.

Il est utilisé pour la fabrication de combustibles à base d'Oxyde mixte d'Uranium et de Plutonium (le MOX). Utilisé également dans les Réacteurs à Neutrons Rapides (et les munitions)

URANIUM ISSU DU RETRAITEMENT DES COMBUSTIBLES USÉS (URT)

Uranium récupéré lors du retraitement des combustibles usés. Il peut servir à la fabrication de nouveaux combustibles

PLUTONIUM

C'est un élément radioactif **ARTIFICIEL** généré par la combustion des combustibles Uranium dans les réacteurs nucléaires. Il est récupéré au même titre que l'Uranium lors du retraitement des combustibles usés. Il sert pour la fabrication de combustible MOX

Voir page 61

ENERGIE NUCLEAIRE

RETRAITEMENT Projet CHINE

Description du projet: Retraitemet et Usine Mox

- Référence : La Hague - Melox avec technologie moderne et adaptée à la Chine
- Site côtier
- Modèle de coopération : Orano fournit le design, les équipements cœur de procédé, des services et garantit les performances sur 3 ans d'exploitation
- Scope Orano : de l'ordre de 2 000 personnes, jusqu'à 350 personnes en Chine

La Chine confirme le recyclage des combustibles usé avec une optimisation du traitement et du stockage des déchets radioactifs

Les Jalons du projet orano

- Début des discussions en 2007
- Memorandum of Commercial Agreement de janvier 2018 : Volonté des deux parties de signer le contrat fin 2018
- Discussions se poursuivent activement
- Si démarrage du Design en 2019, début construction en 2024 démarrage usine en 2030 - 2032, fin de projet 2035
- Compétition avec le projet de technologie chinoise d'une capacité de 200 t

Retard de plus de 2 ans.
 Incertitude sur le vouloir de la Chine.
 Protocole signé lors de la visite de Macron en Chine en 09/2020 pour un accord sur les conditions de réalisation et choix du site en **2022** ?
 Projet de 20 milliards € (dont 10 investis par ORANO)



Projet Chine (CNNC)



La Hague (ORANO)

Le site (en principe bord de mer) reste à choisir (il y a des opposants)

L'industrie française associée à ce projet

- Filière industrielle à développer au sens capacitaire en France et à bâtir en Chine
- Des besoins en ingénierie pour soutenir Orano Projets en France et en Chine
- Des fournisseurs d'équipements historiques à qualifier en Chine (HAF 604)
- La filière Zirconium à réactiver
- Perspectives : d'autres usines de traitement recyclage à construire :
 - Vision en 2030 : 120 à 140 GW de capacité de production nucléaire installée soit 23 500 t de combustibles usés en Chine

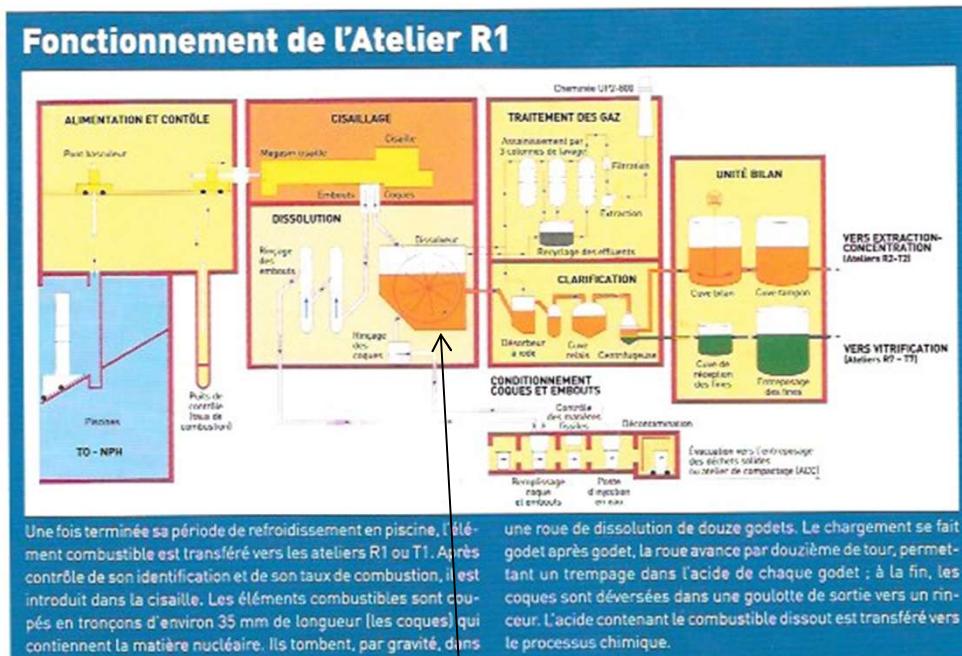
REEL a signer un « contrat cadre » avec ORANO pour la fourniture d'une série d'équipements. La localisation sera certainement un enjeu. Qualifications HAF 604 à renouveler

C'est le grand projet « Aval » des prochaines années si il se confirme. **La crise COVID-19 retarde le processus de décision. A priori abandonné !**

Ecole REEL

ENERGIE NUCLEAIRE

RETRAITEMENT (Une opération de rénovation)



Opération de rénovation réalisée par **REEL**.

La Hague Usine UP2 – Atelier R1

Changement de roue sur un *dissolveur*
Manutention et transfert (avec le
Chariot de Changement de Roue dit
CCR) vers la cellule chaude Zone 4
par **REEL**

Diamètre de 4 m

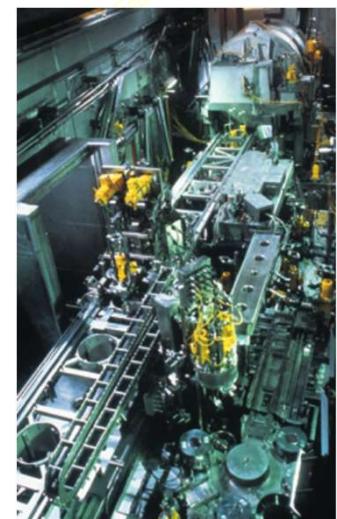
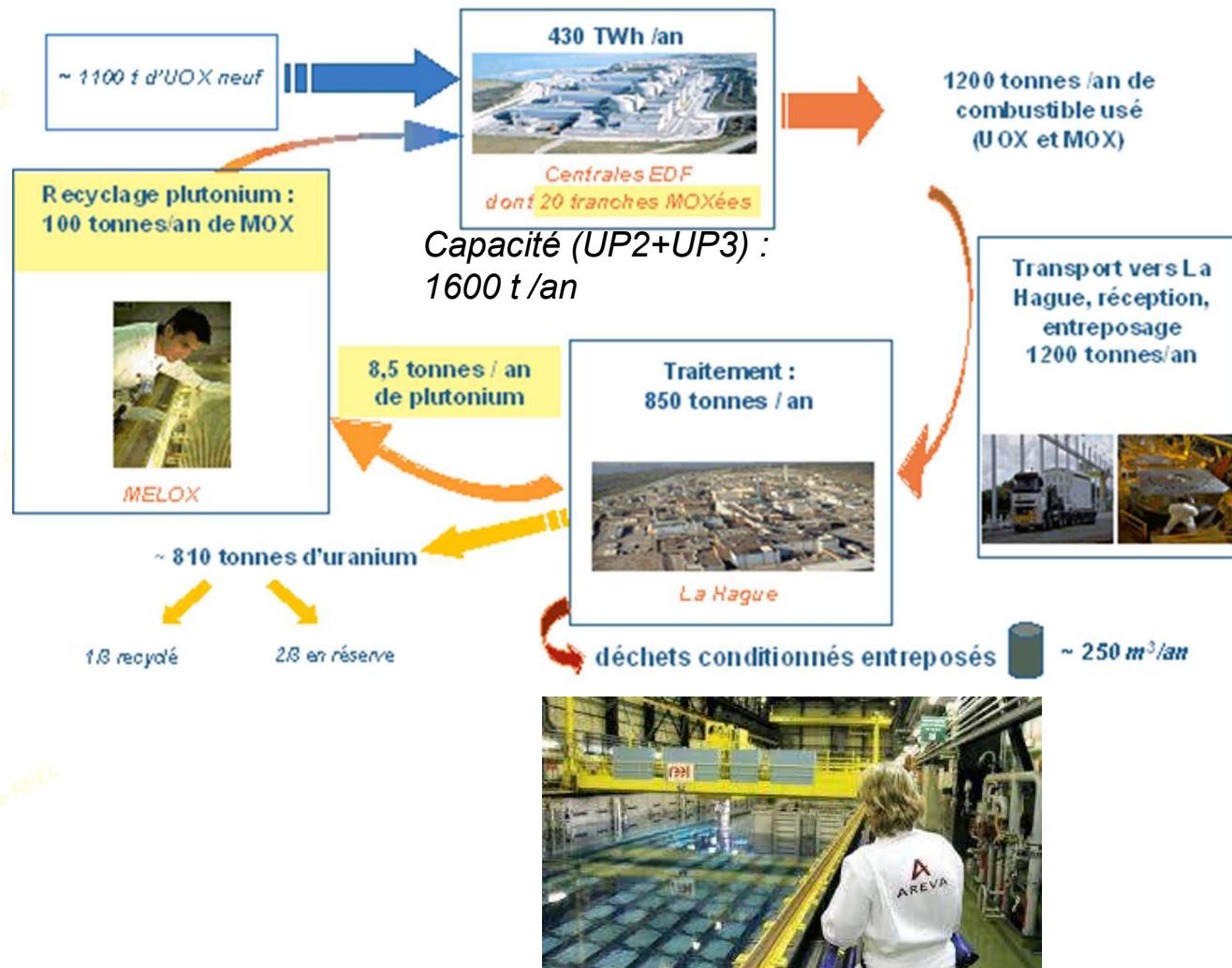
Poids = 3,6t

Une première pour ce type d'installation
réalisée au 1^{er} semestre 2019



ENERGIE NUCLEAIRE

RETRAITEMENT



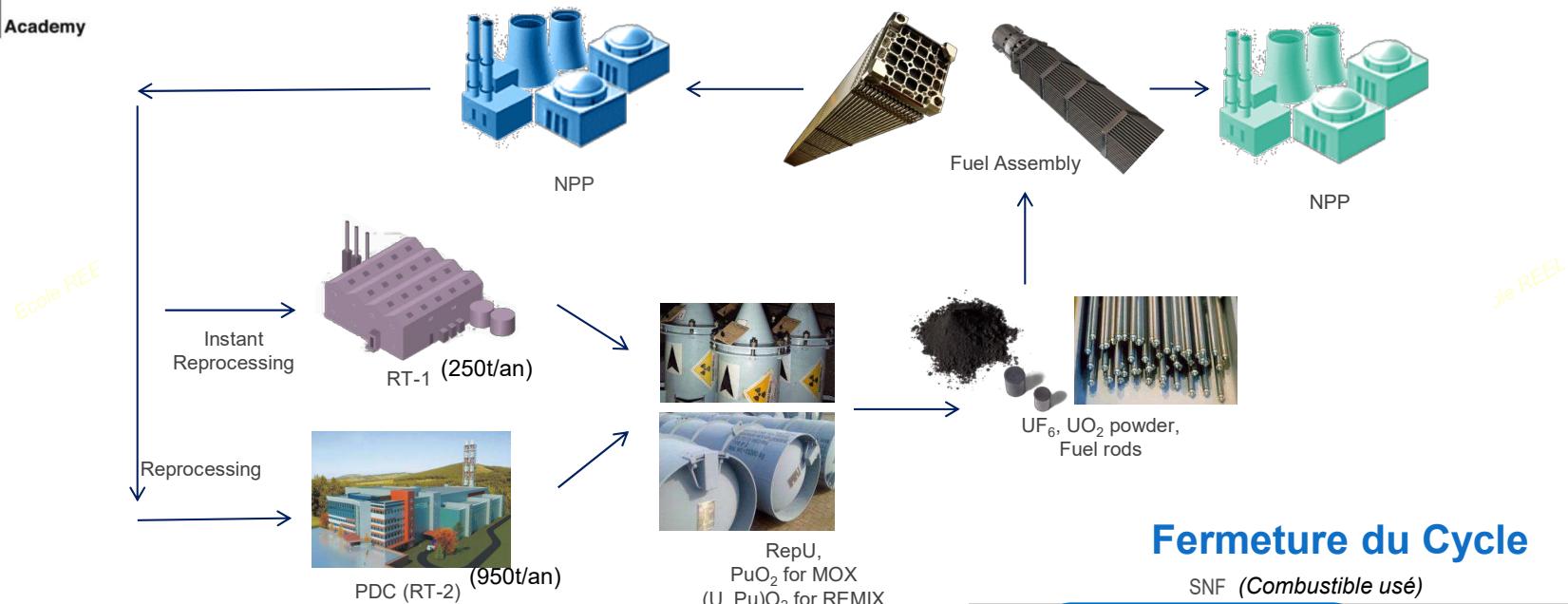
**Ateliers
de
Compactage
Des
Coques**



ENERGIE NUCLEAIRE

CYCLE DU COMBUSTIBLE (RUSSIE)

LE CYCLE en RUSSIE :



Traitement du combustible usé

Modernizing existing infrastructure



New generation of reprocessing technologies

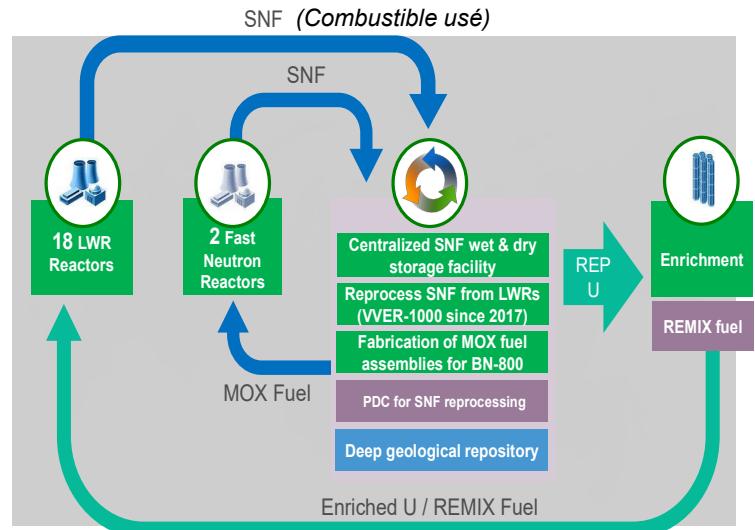
Dry storage at MCC



Pilot Demonstration Center for SNF Reprocessing



Fermeture du Cycle



Usine RT N°2 : 950t de combustible usé traité par an

REMIX (MOX type) avec 1% ²³⁹PU et 4% ²³⁵U

ENERGIE NUCLEAIRE

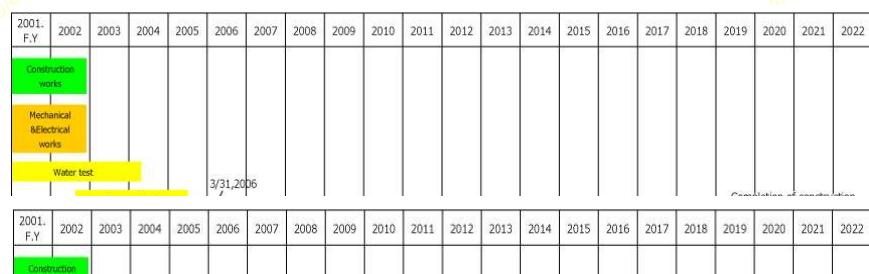
RETRAITEMENT (Japon)

ROKKASHO (JFNL) : Installation de retraitement du combustible usé similaire à celle de La Hague et construite en partenariat ([Transfert de technologie - Ingénierie](#)) avec AREVA (aujourd'hui ORANO dont JFNL est actionnaire). Le procédé de vitrification a été réalisé par JFNL.
Tous les matériels ont été produits au Japon.

Capacité de retraitement : 800 t/an (de quoi supporter l'exploitation de 40 réacteurs) pour une production de Plutonium de 8t/an.

Nombreux retards. Nombreux incidents techniques et manquements. Les coûts ont explosés et la rentabilité de l'installation est en question.

Stock de 45t de Plutonium au Japon.



1989 : License

04/1993 : Démarrage de la construction

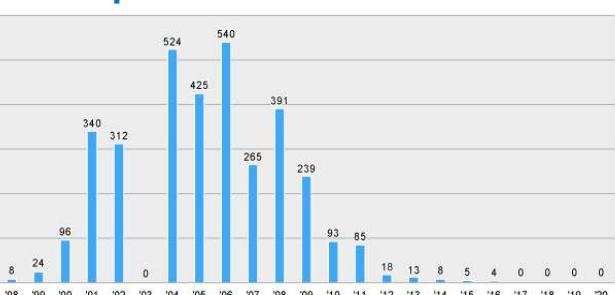
12/1999 : Début de la réception des AC Usés

11/2006 : Début de la production de MOX

06/2013 : Accord avec AREVA pour l'exploitation

10/2013 : Complétion de l'atelier de vitrification

Réception des combustibles usés



Conséquences des séismes de 2011 sur le centre de Rokkasho (Nord Est de l'ile de Honshû).

A la suite du black-out électrique causé par le séisme du 11mars 2011 d'une magnitude 9, le centre a fonctionné à partir du 11mars 2011 sur des générateurs diesel de secours. Ces générateurs ne sont pas prévus pour fonctionner sur une longue durée. Le centre contenait alors plus de 3000 tonnes de combustible nucléaire usés susceptibles de fondre en cas d'arrêt des systèmes de refroidissement piscine.

Le 13 mars 2011, une fuite de 600 litres de matériaux radioactifs ce serait produite.

L'alimentation électrique du centre a été restauré à partir du 14 mars 2011. La réplique sismique du 7 avril 2011 a aussi causé un arrêt de l'alimentation électrique.

Depuis tout est a priori rentré dans l'ordre mais les contrôles de l'installation et les nouvelles normes post-Fukushima de sûreté ont retardé la complétion du projet.

En cours d'essais. Un démarrage « industriel » n'est pas prévu avant **2026 - 2027**.

ENERGIE NUCLEAIRE

LES DECHETS (en France)

Pour l'opinion publique, c'est la principale contrainte (à 58%) du nucléaire due à leur forte toxicité et longue durée de vie.

Substance radioactive = Substance qui contient des radionucléides, naturels ou artificiels, dont l'activité ou la concentration justifie un contrôle de radioprotection

Matière radioactive = substance radioactive pour laquelle une utilisation ultérieure est prévue

Combustible nucléaire est regardé comme combustible usé lorsque, après avoir été irradié dans le cœur du réacteur, il est définitivement retiré

Déchets radioactifs = substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue

Déchets radioactifs ultimes = déchets radioactifs qui ne peuvent plus être traités et recyclés

La substance radioactive est caractérisée par son activité et sa concentration

On classe les déchets en 5 catégories :

- 1 : Très faible faible activité (**TFA**)
- 2 : Faible Activité et durée de Vie Courte (**FMA-VC**)
- 3 : Faible Activité et durée de Vie Longue (**FA-VL**)
- 4 : Moyenne Activité et Vie Longue (**MA-VL**)
- 5 : Haute Activité (**HA**)

CATÉGORIE	STOCKS À FIN 2013	PRÉVISIONS À FIN 2020	PRÉVISIONS À FIN 2030	PRÉVISIONS À TERMINAISON
HA	3 200	4 100	5 500	10 000
MA-VL	44 000	48 000	53 000	72 000
FA-VL	91 000	92 000	120 000	180 000
FMA-VC	880 000	1 000 000	1 200 000	1 900 000
TFA	440 000	650 000	1 100 000	2 200 000
TOTAL	~1 460 000	~1 800 000	~2 500 000	~4 300 000

1 700 000 m³ fin 2020 (dont 3 880 HA). Comment les gérer ?

Des nouveaux sites de stockage ? Recyclage des déchets TFA possible dans le domaine public (Décret du 15/02/2022).



Période / Activité	Très courte durée de vie (< 100 jours)	Courte durée de vie (< 30ans)	Longue durée de vie (> 30 ans)
Très Faiblement Actif (27 %)	Décroissance radioactive	Stockage en surface « TFA » ou recyclage (Centre de l'Aude)	Stockage en sub-surface (CIGEO (MA VL & HA VL))
Faiblement Actif (volume : 6 %)			
Moyennement Actif Volume : 3% Radioactivité : 4 %			



ENERGIE NUCLEAIRE

LES DECHETS (au Canada)

Tableau 1 – Inventaire des déchets radioactifs au Canada

Type de déchets	Inventaire des déchets à la fin de 2016	Inventaire des déchets projeté en 2050	Inventaire des déchets projeté en 2100
Déchets des mines et des usines de concentration d'uranium	387 millions de tonnes	s.o. ^a	s.o. ^a
Déchets radioactifs de faible activité	2 395 385 m ³ (944 piscines olympiques ^b)	2 768 635 m ³	3 095 035 m ³
Déchets radioactifs de moyenne activité	33 155 m ³ (14 piscines olympiques)	58 430 m ³	82 824 m ³
Déchets radioactifs de haute activité	11 089 m ³ (5 piscines olympiques)	20 262 m ³	21 835 m ³

Notes :

a. Aucune projection n'est disponible pour les déchets des mines et des usines de concentration d'uranium, car l'inventaire dépend des niveaux de production.

b. Une piscine olympique équivaut à 2 500 m³.

Une autre estimation

Catégorie de déchets	Stocks de déchets à la fin de 2019	Stocks projetés des déchets en 2022	Stocks projetés des déchets en 2030	Stocks projetés des déchets en 2050	Stocks projetés des déchets en 2100
DRHA	12 718 m ³	13 580 m ³	15 805 m ³	21 015 m ³	22 856 m ³
DRMA	15 681 m ³	18 361 m ³	24 927 m ³	30 087 m ³	32 324 m ³
DRFA	2 524 670 m ³	2 616 087 m ³	2 732 717 m ³	3 082 690 m ³	3 410 478 m ³
Résidus issus du traitement de l'uranium	218 millions de tonnes	S. O.*	S. O.*	S. O.*	S. O.*
Stériles issus de l'extraction de l'uranium	167 millions de tonnes	S. O.*	S. O.*	S. O.*	S. O.*

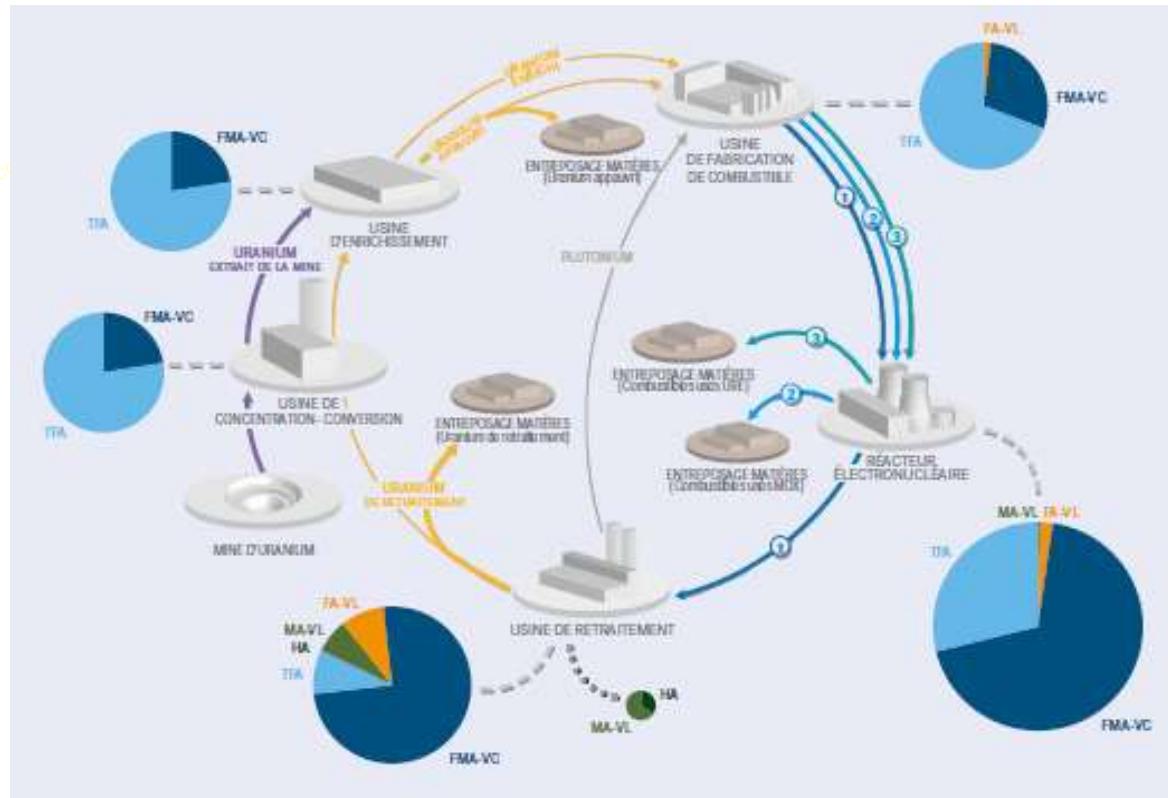
*S. O. Aucune projection n'est fournie pour les stocks de résidus de traitement de l'uranium ou des stériles puisque toute hausse des stocks est fonction des niveaux de production, lesquels sont sujets aux fluctuations des prix du marché de l'uranium. Voir la section 7.4.

ENERGIE NUCLEAIRE

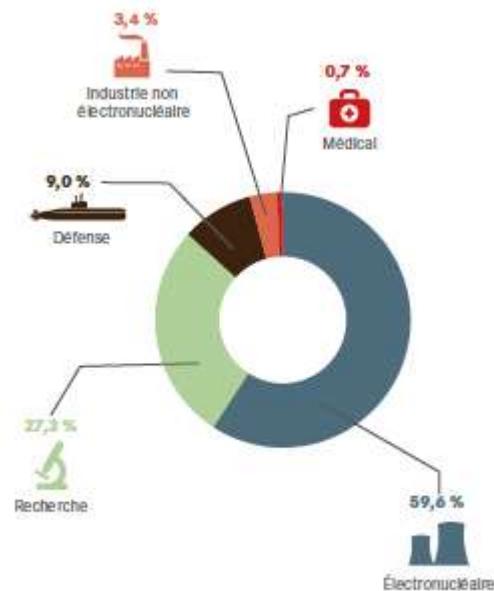
LES DECHETS
(en France)

D'où viennent-ils

1 - Dans le cycle du Combustible



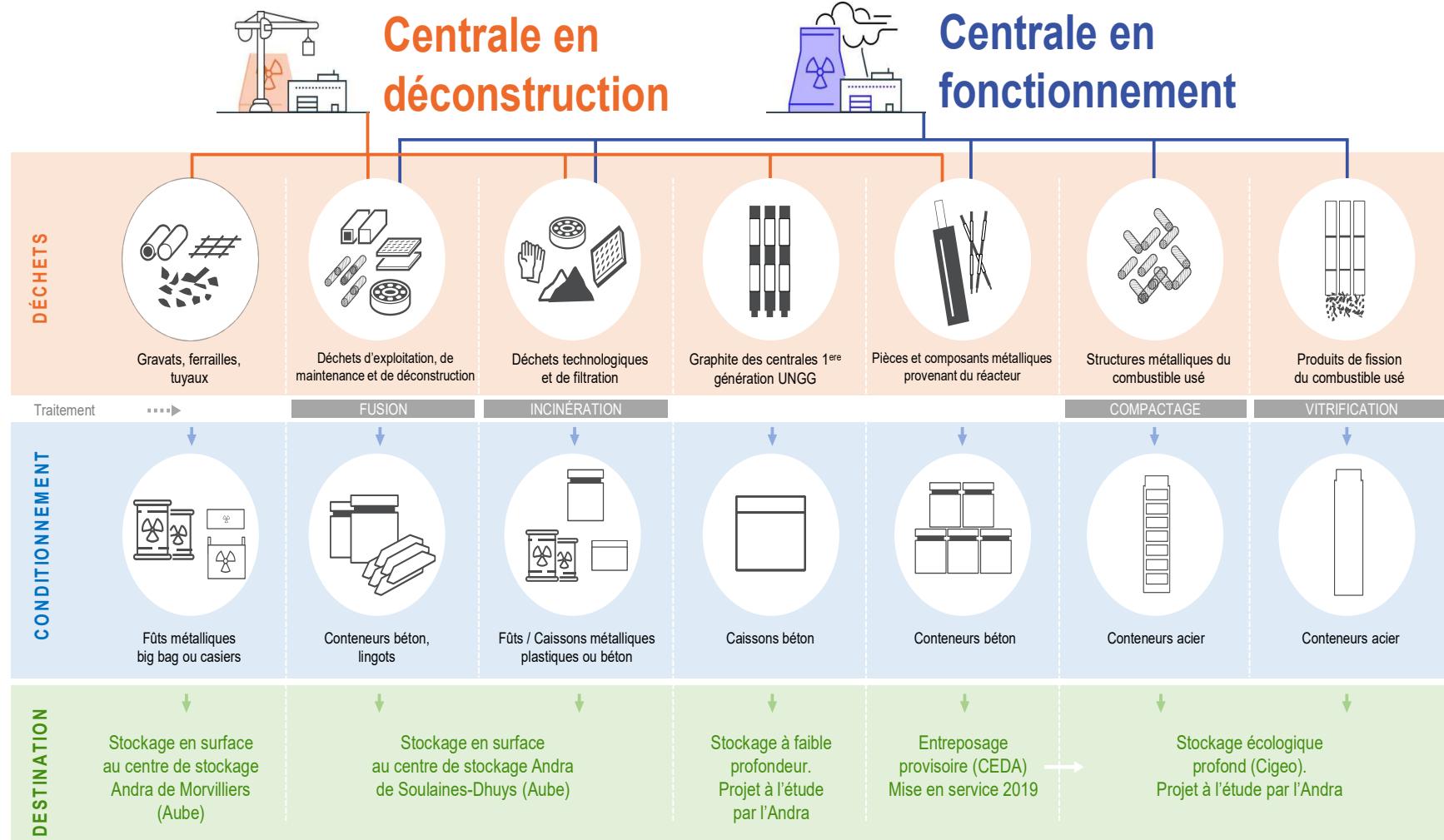
2 - Globalement



ENERGIE NUCLEAIRE

LES DECHETS
(en France)

LA GESTION DES DECHETES RADIOACTIFS DANS LES CENTRALES NUCLEAIRES



ENERGIE NUCLEAIRE

LES DECHETS (en France)



Academy

Les déchets HA et MA-VL représentent de l'ordre de **3 % (0,2 % pour les HA)** du volume des déchets radioactifs français existants et concentrent plus de **99 %** de la radioactivité totale de ces déchets.

Ils sont actuellement entreposés sur leurs sites de production (La Hague, Marcoule et Cadarache essentiellement).

Les déchets HA sont produits par le traitement des combustibles usés des centrales nucléaires. Ils sont conditionnés dans une matrice en verre coulée dans un colis en inox. Ils concentrent plus de **95 %** de la radioactivité et représentent moins de **10t**.

Les déchets MA-VL correspondent aux structures métalliques qui entourent le combustible ou aux résidus liés au fonctionnement des installations nucléaires. Ils sont conditionnés dans des colis métalliques ou en béton. Ils représentent **3 %** du volume des déchets et concentrent **4 %** de la radioactivité.



Entreposage au Centre de l'Aube



Colis HA après Vitrification

- 400 kg de verre
- 70 kg de déchets

10% de l'électricité est produite par le recyclage des déchets HAVL

750 conteneurs de verre produits chaque année représentent un volume de moins de 150m³ par an

ENERGIE NUCLEAIRE

LES DECHETS

EN RESUME, LES DECHETS C'EST QUOI EN TERME DE VOLUME & TOXICITE

Ecole REEL

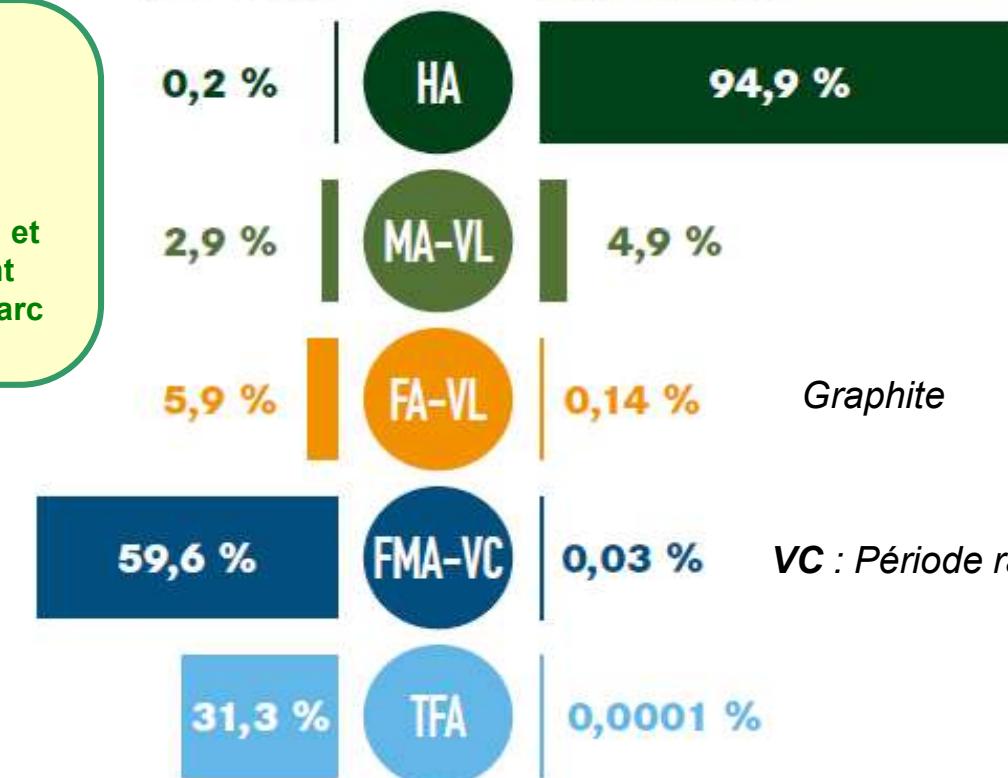
0,2 % de HAVL
c'est 4000 m³
(un hangar de
20x20x20 m)

60 % des MA-VL et
40% des HA sont
déjà produits (parc
actuel)

Ecole REEL

Stockage en Surface

Volume de déchets radioactifs



Niveau de radioactivité



Graphite

VC : Période radioactive ≤31 ans

Source : ANDRA 2018



ENERGIE NUCLEAIRE

ENTREPOSAGE DES DÉCHETS

EVACUATION, ENTREPOSAGE ET STOCKAGE DES COMBUSTIBLES USÉS ET AUTRES DÉCHETS

En France l'entreposage des Assemblages Combustibles (AC) usés se fait uniquement sous eau (*adapté aux AC plus chauds*)

Le premier entreposage a lieu dans la piscine de désactivation du réacteur sur site après déchargement du cœur. Cet entreposage, de l'ordre de 2 ans, permet sous eau une décroissance de la puissance thermique (300 à 400 °C) avant transport vers le centre de retraitement (Usine de La Hague).

Les Assemblages Combustibles usés sont donc transportés sur le site de La Hague et également placés dans une piscine centralisée. Les piscines sont semi-enterrées (*mais non « bunkerisées »*) et il y en a actuellement quatre (4) interconnectées d'une capacité de 2830 emplacements.

Un projet de piscine centralisée pour recevoir des AC MOX et URE en cours qui devrait se concrétiser à l'horizon 2030. A ce jour, **il n'y pas de recyclage du combustible MOX.**

Après environ 4 ans, environ 90 % de AC UO_x sont retraités pour recycler le plutonium et l'Uranium et devenir des AC MOX ou AC URE (*uranium issu du retraitement*).

Les Assemblages Combustibles MOX (enrichi au plutonium) et les Assemblages Combustibles UO_x usés issus du retraitement ainsi que le reliquat des Assemblages UO_x non retraités sont entreposés sous-eau dans les piscines de La Hague (pour un retraitement différé).

Le transport des Assemblages Combustibles se fait à sec par emballage de transport. Les Emballages TN24 d'ORANO TN peuvent être configurés pour le transport (équipés d'amortisseurs) et l'entreposage (**Entreposage à sec**).

ENERGIE NUCLEAIRE

ENTREPOSAGE DES DECHETS



LE TRANSPORT DES DECHETS NUCLEAIRES

Portique
fourni par
REEL

SYNOPTIQUE DU TRANSPORT



Réalisation : Agence IDÉ



Emballage avec amortisseurs pour transport routier

Manutention d'un TN24

ENERGIE NUCLEAIRE

ENTREPOSAGE DES DECHETS

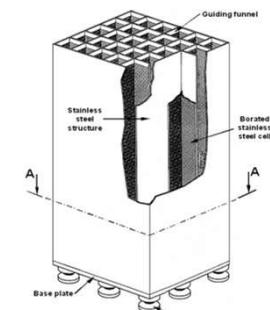
ENTREPOSAGE SOUS EAU EN PISCINE

La piscine assure la sûreté de l'entreposage :

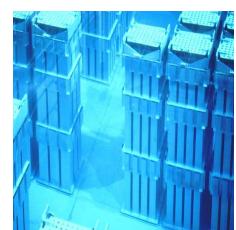
- 1 - Le refroidissement des AC (un circuit de refroidissement de l'eau de la piscine avec contrôle de la température et du niveau d'eau) avec température extérieure de gaines en-dessous de 50°C.
- 2 - Le positionnement des AC dans des râteliers afin d'assurer :
 - Le maintien de leur intégrité face aux risques sismiques
 - La condition de sous-criticité par leur positionnement les uns vis à vis des autres (maillage avec pas et distances) avec l'absorption des neutrons par l'eau, complétée si nécessaire par l'action d'un matériau neutrophage (plaques d'acier boré par exemple) placé entre les AC et qui fait partie des râteliers
- 3 - Le confinement (en partie par la structure béton et le cuvelage de la piscine) et la radioprotection (hauteur d'eau et distance des AC par rapport au plancher de service).



Ecole REEL



Module 5x6 de râtelier de stockage



Piscine centralisée et les paniers (La Hague)

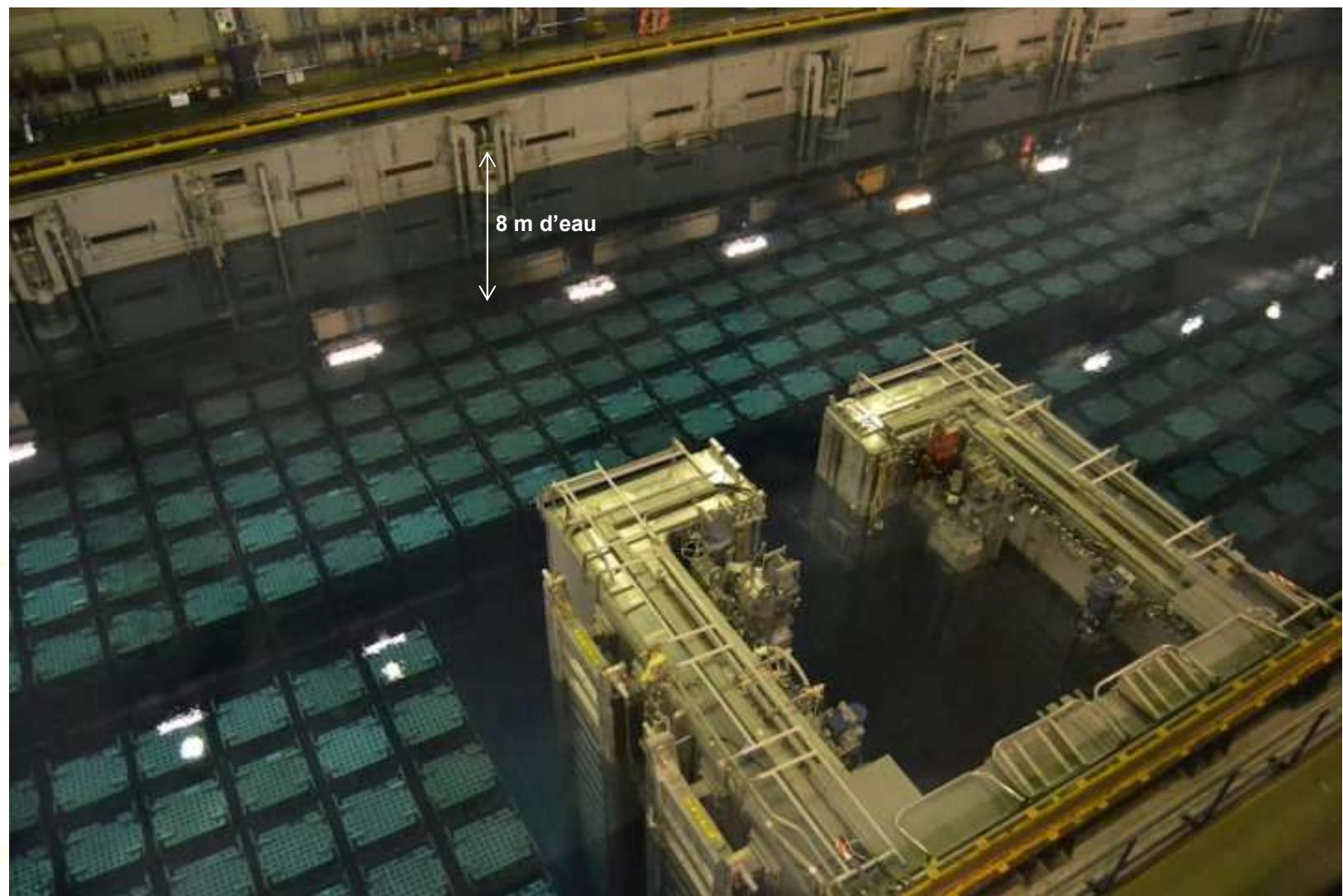


Ecole REEL

Piscine BK d'un réacteur nucléaire

ENERGIE NUCLEAIRE

ENTREPOSAGE DES DECHETS



*Piscine d'entreposage de La Hague (8 m d'eau au-dessus des Assemblages Combustibles)
(En cours de densification avec REEL comme intervenant)*

ENTREPOSAGE SOUS EAU EN PISCINE CENTRALISEE

Projet de piscine d'entreposage de combustible usé :

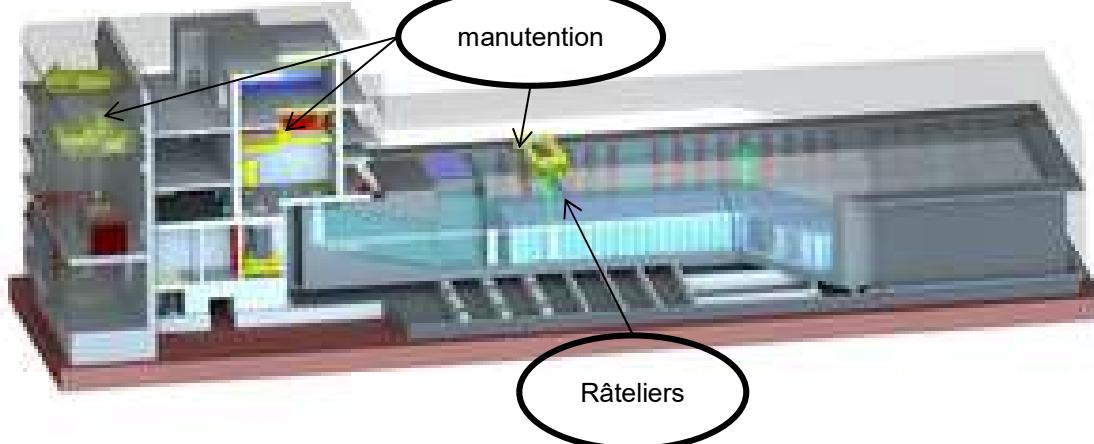
Compte tenu d'une saturation possible des piscines des Tranches en exploitation, EDF projette la construction d'une piscine centralisée avec deux bassins d'une capacité totale d'environ 21 000 Assemblage Combustibles. Premier bassin d'une capacité de 6500t. Cet entreposage, à partir de 2035, ne pourrait concerter que les AC MOX (qui ne sont pas recyclés).

Un projet présenté par EDF le 18/02/2021. Le site est choisi : Le site d'ORANO La Hague où il existe déjà 4 piscines. Budget prévu : 1,25 milliard d'Euros.

L'ASN a donné un avis favorable le 28 juillet 2019 mais avec une demande de justifications supplémentaires concernant la conception et la maîtrise de la fabrication afin de garantir, sur la durée, l'étanchéité et la robustesse de la piscine.

Une Demande d'Autorisation de Création (DAC) prévue fin 2022. **Projet très contesté par les défenseurs de l'environnement et les anti-nucléaires !!!**

Mise en service d'un premier bassin en 2034 ? Un second bassin est prévu ultérieurement



- Intérêts pour REEL :**
- Râteliers de stockage
 - Engins de manutention
 - Engins de logistique (chariot de transfert)

ENTREPOSAGE SOUS EAU EN PISCINE



Après Fukushima, l'entreposage sous eau en piscine de désactivation est regardé de plus près. La piscine d'entreposage est vue, par les antinucléaires, comme une zone à très hauts risques (en particulier vis à vis du terrorisme) d'où leurs actions récentes (intrusion) pour sensibiliser l'opinion.

Cela concerne : Les piscines des centrales nucléaires de génération II qui ne sont pas « bunkerisées ». Pour l'EPR la piscine est protégée par la coque avion. Par ailleurs les piscines des centrales nucléaire sont en hauteur dans la structure du bâtiment (*particulièrement pour les REB*) . Voir Section 2 et Section 4

Cela concerne aussi les piscines centralisées et interconnectées de La Hague

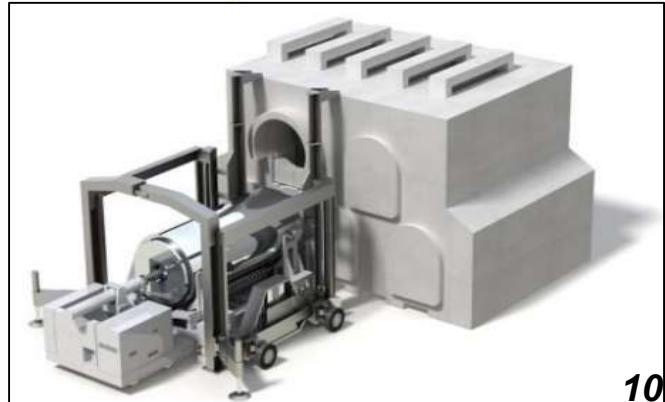
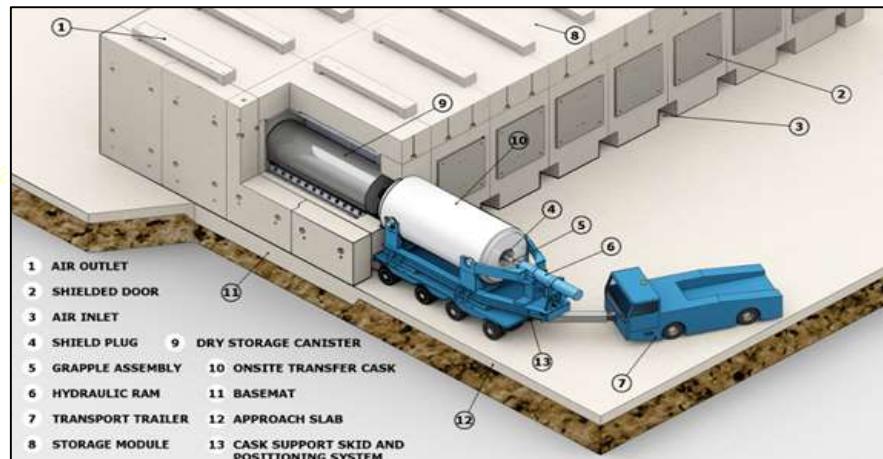


ENTREPOSAGE INTERIMAIRE A SEC

En attente de stockage définitif, les combustibles usés sont transportés des centrales nucléaires vers des centres d'entreposage intérimaires souvent situés à proximité des centrales elles-mêmes ou dans des endroits relativement isolés. C'est la stratégie actuelle des USA faute d'avoir une installation de retraitement. La plupart de ces entreposages sont des **entreposages à sec (réversibilité assurée pour près de 300 ans)** à contraria d'un entreposage en piscines (et donc sous eau) centralisées.

Principaux acteurs de l'entreposage à sec :

- ORANO TN (Fr – USA) avec son procédé **NUHOMS** (ci-après le nouveau NUHOMS)
- HOLTEC (USA) avec son procédé **HI-STORM, HI -STAR**
- GNS (A) avec son procédé **CASTOR**



ENERGIE NUCLEAIRE

ENTREPOSAGE DES DECHETS

ENTREPOSAGE INTERIMAIRE A SEC



NUHOMS® MATRIX :

La configuration unique du NUHOMS® MATRIX - horizontale à deux niveaux et modulaire - réduit de 45 % la surface au sol occupée par l'installation d'entreposage, ce qui baisse son coût de construction et optimise sa capacité, dans un contexte où l'espace est limité sur les sites nucléaires. Sa conception permet de contenir des emballages de différentes tailles et d'entreposer des combustibles usés à taux de combustion élevé et refroidissement rapide, ce qui représente un atout pour les réacteurs nucléaires à l'arrêt. De nouveaux dispositifs permettent également le contrôle complet de l'emballage sans qu'il soit nécessaire de le retirer du module, ce qui répond aux enjeux de contrôle du vieillissement de l'emballage.

« Avec le LASER, on peut réduire la radioactivité d'un million d'années à 30 minutes »
Gérard MOUROU, prix NOBEL de physique 2018

Technique laser CPA (Chirped Pulse Amplification) : Génération d'impulsions optiques ultra-courtes de haute intensité. Déjà utilisé dans la chirurgie de l'œil (chirurgie femto seconde de l'œil et de la cornée)

Quelques acteurs du stockage à Sec

- ORANO TN (Nuhoms, TN ®)
- HOLTEC
- GNS (Castor)
- NAC

Actualités ORANO NPS

Acquisition des activités nucléaires de Daher en Allemagne et aux USA. Investissement dans un atelier de fabrication (de type 4.0) du nouvel emballage « multipurpose » TN Eagle sur le port de Cherbourg

Première installation de MATRIX au CNPE de **Wolf Creek** dans le Kansas. Chargement de l'étage au 7/11/2023

ENERGIE NUCLEAIRE

ENTREPOSAGE DES DECHETS

Le dernier né des EMBALLAGES d'ORANO NPS : EAGLE TN

Emballage de type « **dual-purpose** » pour le transport et l'entreposage à sec (50 ans) d'Assemblages Combustible usés.

Première réalisation en 2023 dans la nouvelle unité de fabrication sur le port de Cherbourg
Capacité initiale de l'unité de fabrication : 10 emballages par an puis portée à 30 emballages.

Particularités de l'emballage :

Fabrication sans soudure en moins de 15 mois

Virole de forte épaisseur avec fond en acier au carbone forgé.

Cavité fermée par 2 couvercles indépendants munis de joints d'étanchéité métalliques

Les éléments (résine et anneaux de blindage métallique) assurant la protection radiologique sont fixés autour de la virole

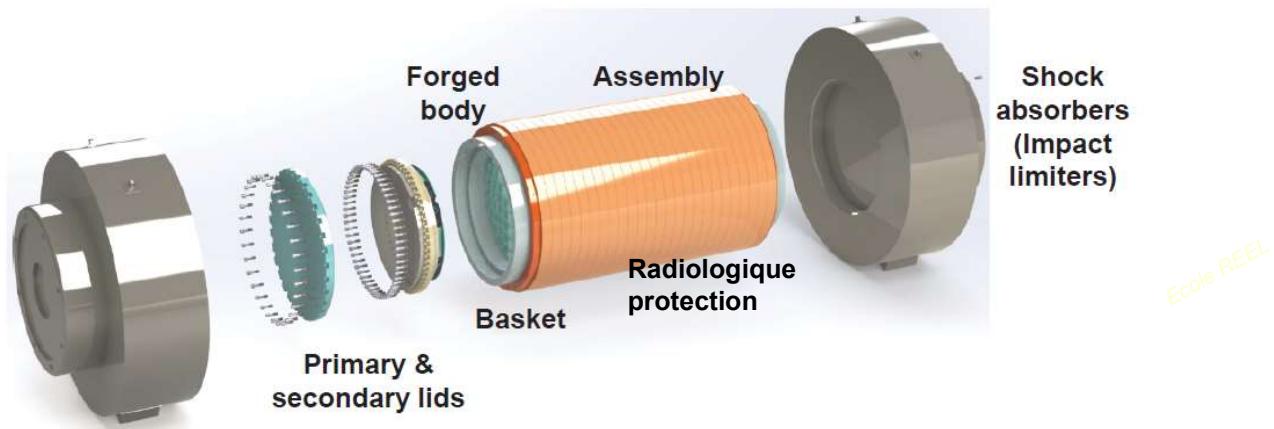
Le couvercle primaire est équipé d'un système amortisseur

Un panier placé à l'intérieur de la virole reçoit les AC usés :

- Capacité REP : 32 AC usés de type UO₂ (haut taux d'épuisement avec « credit burn up »)
- Capacité REB : 76 AC usés de type UO₂ (haut taux d'épuisement avec « gadolinium credit burn up »)

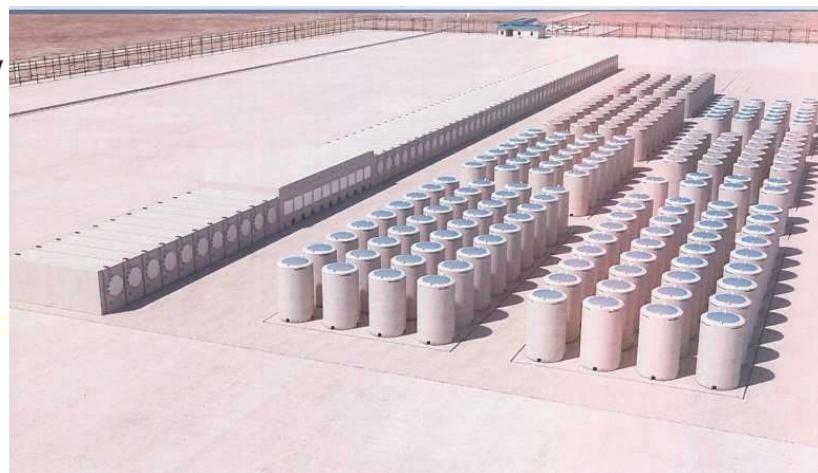
A chaque extrémité du corps de l'emballage : canot amortisseur (blocs de bois dans enveloppe métallique)

Un système de manutention (palonnier avec prise sans tourillons) est étudié par REEL (Nantes)

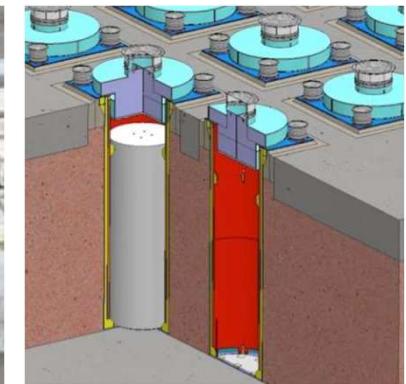


ENERGIE NUCLEAIRE

ENTREPOSAGE DES DECHETS



Ecole RE



Concept de silos semi-enterrés à chargement vertical avec des conteneurs aciers (24 à 68 AC par conteneur selon le type d'AC)



Ecole



Emballages type CASTOR



Ecole

Emballages type TN24

Entreposage à sec en conteneurs béton ou acier (emballages)



Ecole REEL

Entreposage à sec centralisé en casemates ou puits de type CASCAD à Cadarache



ENERGIE NUCLEAIRE

STOCKAGE DES DECHETS (Projet CIGEO)

CIGEO : Stockage définitif en couche géologique profonde - 500 m des déchets HA & MA-VL issus du retraitement.

Sous réserve de l'obtention des autorisations nécessaires, l'**ANDRA** propose de suivre le calendrier prévisionnel suivant :

La Finlande (POVISA site d'Onkalo) et la Suède (SKB Forsmark) sont en avance

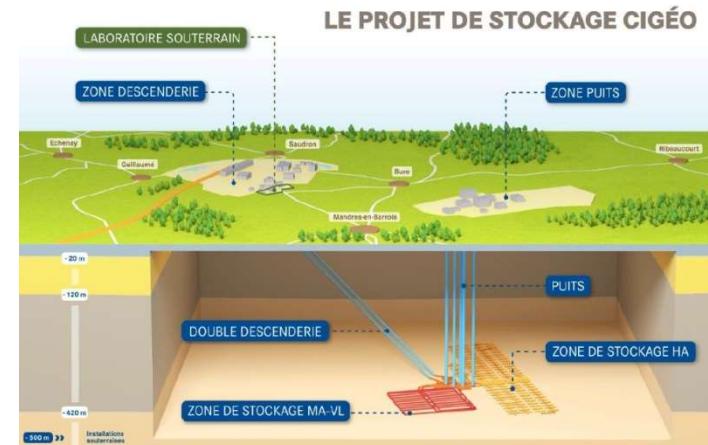
- **2015**, remise à l'Etat d'une proposition de plan directeur pour l'exploitation de **Cigéo** et à l'Autorité de Sûreté Nucléaire d'un dossier d'options de sûreté et d'un dossier d'options techniques de **Réversibilité / Récupérabilité (pendant la phase d'exploitation jusqu'en 2150)** pour préparer l'instruction du Dossier d'Utilité Publique et de la Demande d'Autorisation de Création ;
- **2018 (01)**, l'ASN donne un avis favorable sur les options de sûreté;
- **2019**, dépôt de la Déclaration d'Utilité Publique (**Fait au 03/08/2020**)
 - DUP (Décret d'Utilité Publique) en fin 2021 et Déclaration au JO le **8/07/2022**
 - DAC (Décret d'Autorisation de Création) en 2027. Recevabilité le **22/06/2023**
- **2027** : démarrage de la construction du stockage (au plus tôt); **10/2023 : Le Conseil Constitutionnel confirme que le projet prend en compte le droit des générations futures**
- **2040**, démarrage de l'installation par une phase industrielle pilote (2040 – 2050 au plus tôt).



Chaîne de gestion des déchets :

- Inventaire (tous les 3 ans)
- Conditionnement
- Stockage

Coût du projet **Cigéo** estimé à **25 milliards d'euros**. Ce montant représente de 1 à 2 % du coût de production. Le financement du projet est assuré par les producteurs de déchets (EDF, ORANO, CEA) et s'appuie sur un mécanisme de provisions financières sécurisées et constituées sous le contrôle du ministère de l'énergie. Montants audités par la cours des comptes.



ENERGIE NUCLEAIRE

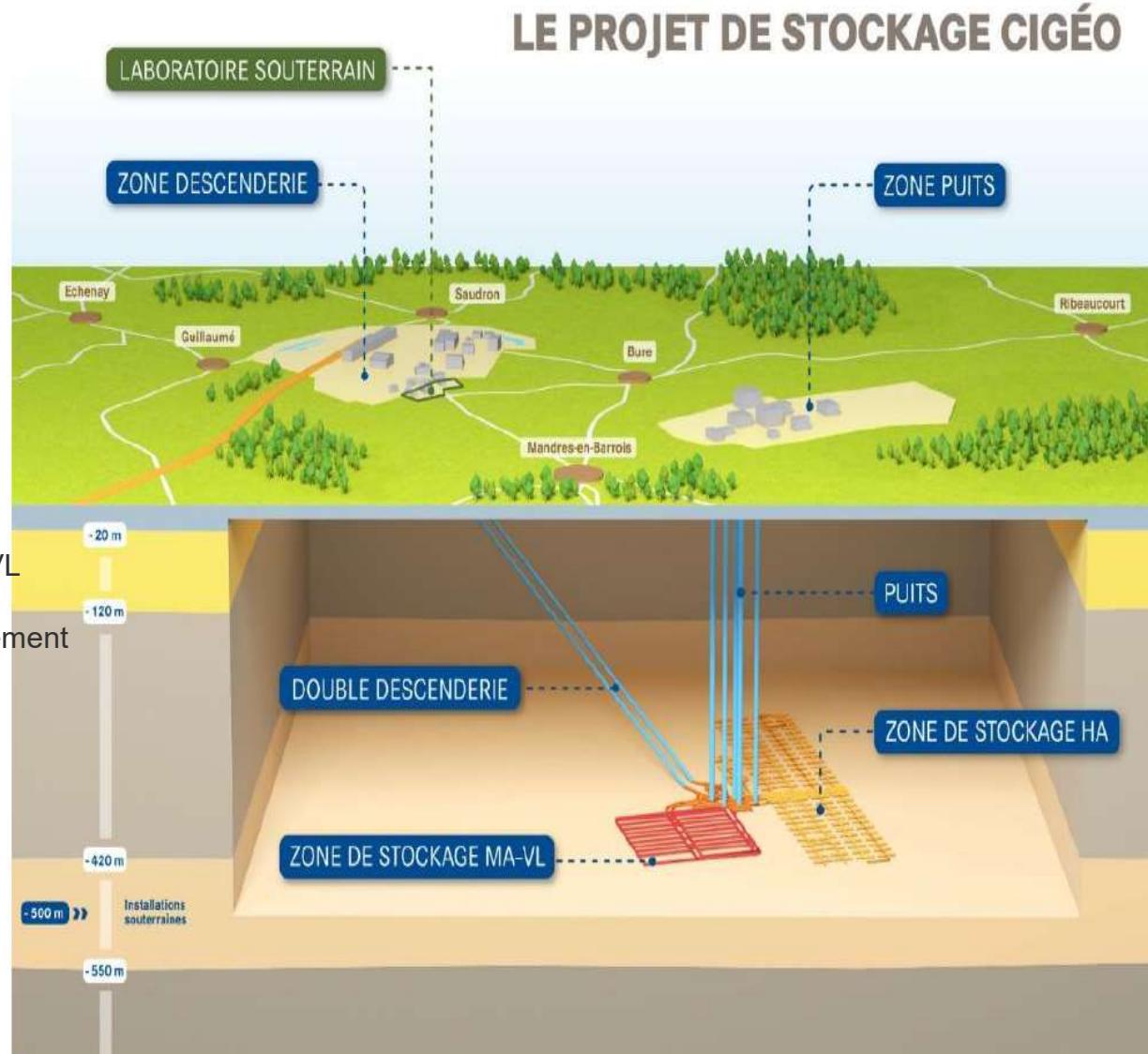
STOCKAGE DES DECHETS (Projet CIGEO)

- 500** Mètres de profondeur
- 15 km²** De galeries souterraines
- 82 000 m³** de déchets
70000 m³ MA-VL
12000 m³ HA
Issus du retraitement
- 120** Ans d'exploitation
- 25 Mds** d'euros

Ecole REI

Ecole RI

Ecole F

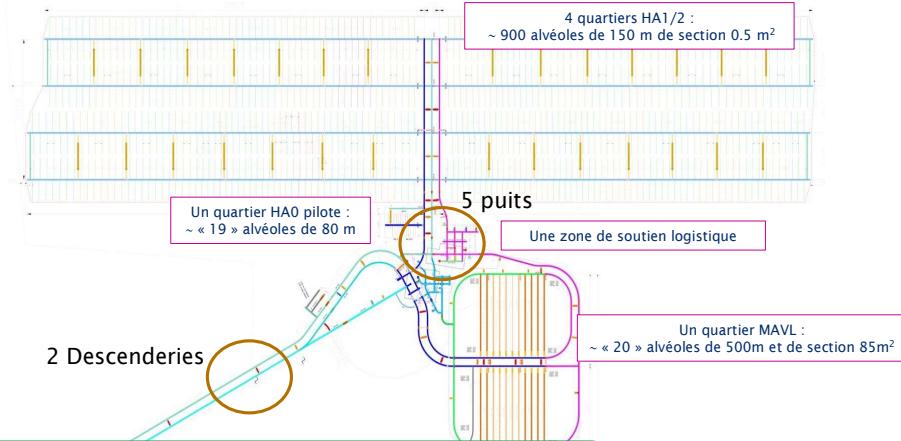


Programme de Mémoire du stockage pour les générations futures

ENERGIE NUCLEAIRE

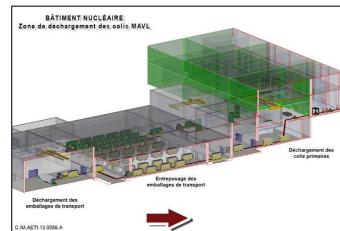
STOCKAGE DES DECHETS (Projet CIGEO)

Le Projet Cigéo Illustration de l'installation fond à terminaison

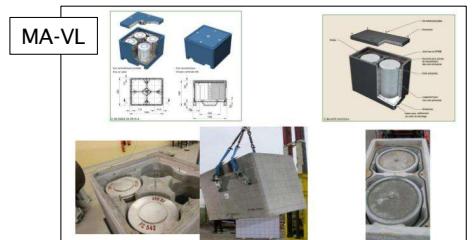


**Conteneurs MA-VL : 4 en sur-conteneur béton
Conteneurs HA : En sur-conteneur acier épais.**

Le projet Cigéo Le bâtiment nucléaire en zone descenderie



- Un bâtiment nucléaire « classique »
- Déchargement/entreposage des emballages de transport
 - Contrôle des colis primaires
 - Mise en colis de stockage des colis primaires (hors stockage direct)
 - Conteneur Béton pour les MA-VL
 - Conteneur en acier pour les HA



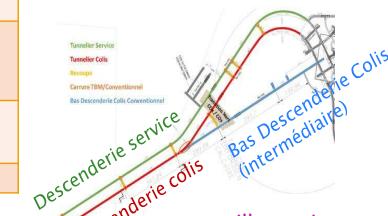
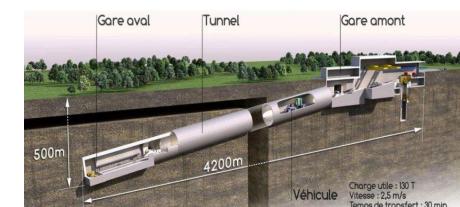
illustrations

Descenderies	
Tranche T1 (horizon 2034)	
Assurer la liaison surface-fond vers la zone « exploitation » pour les flux de colis et de service	
Diamètre utile/excavé	8,4 m/10,4 m
Descenderie Service (longueur)	4200 m (dont 3500 m hors roche hôte) Tunnelier
Descenderie colis (longueur)	4200 m (dont 3500 m hors roche hôte) Tunnelier + conventionnel sur 1200 m
Moyen de creusement	<ul style="list-style-type: none"> • 90% tunnelier • 10% machine à attaque ponctuelle + explosif
Volume d'excavation	~ 765 000 m ³

Illustration

Les Rendez-Vous Nuclear Valley - Lyon
15 novembre 2018

Ce document est la propriété de l'Andra.
Il ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation expresse et préalable.



Illustration



**Durée d'exploitation (phase de stockage):
70 ans après la fin d'exploitation de FA3, soit
au alentour de 2150. Après, le site est fermé
et surveillé.**

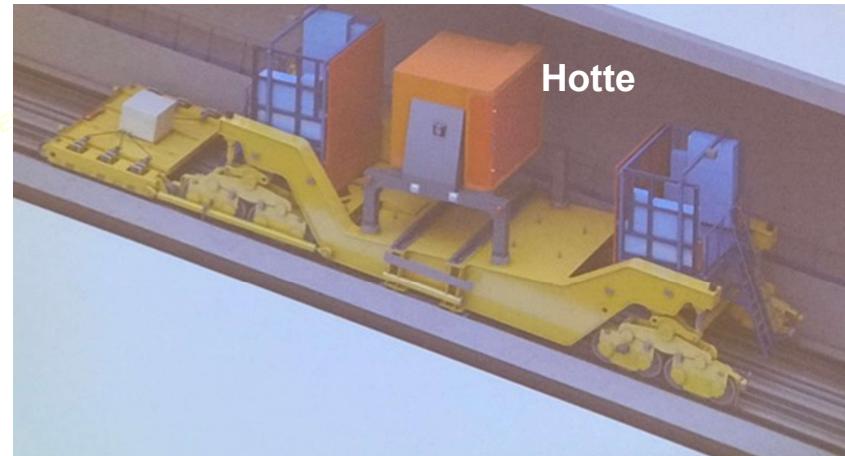
ENERGIE NUCLEAIRE

STOCKAGE DES DECHETS (Projet CIGEO)

CHARIOT DE DESCENDERIE (2 descenderies)

Réalisés par **POMA** (Groupe HTI-LEITNER), leader des systèmes de transport par câble.
Un démonstrateur en cours d'évaluation

C'est un funiculaire de 80t qui récupérera en surface une hotte contenant un colis nucléaire . Cette hotte pèsera 130 t. Le chariot, mu par des câbles, descendra en ligne droite les 4200 m de tunnel de la descenderie à un vitesse de 2,5m/seconde le long d'une pente de 12%.



Démonstrateur





PONT STOCKEUR

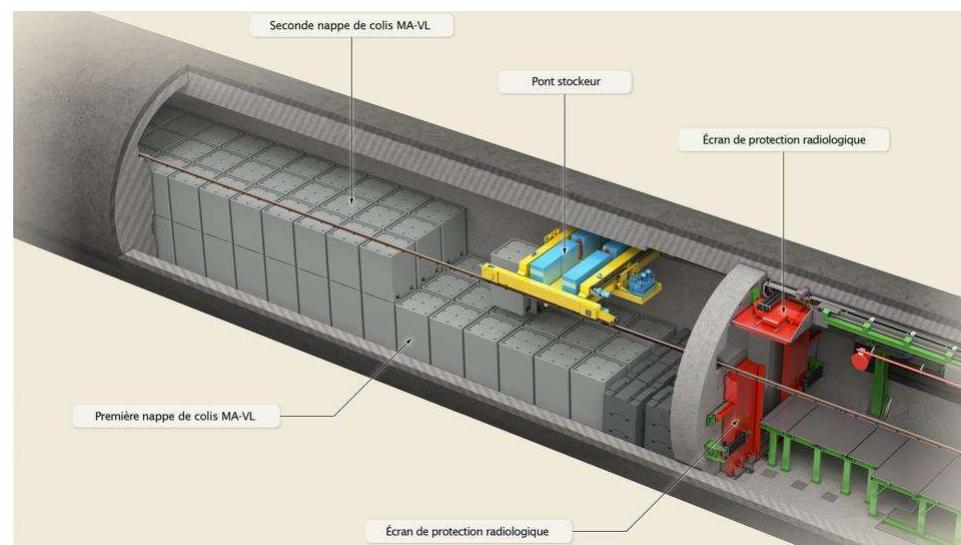
Manutention des colis MA-VL.

- Colis en béton cubiques de 16t
- Colis cylindriques de 2,6 t

Les colis seront empilés les uns sur les autres en 3 couches dans une vingtaine d'alvéoles.

Le pont stockeur permettra de les déplacer et de les installer avec une grande précision grâce à un système laser. Le pont sera aussi en mesure d'assurer le retrait des colis dans le cadre de la réversibilité du stockage.

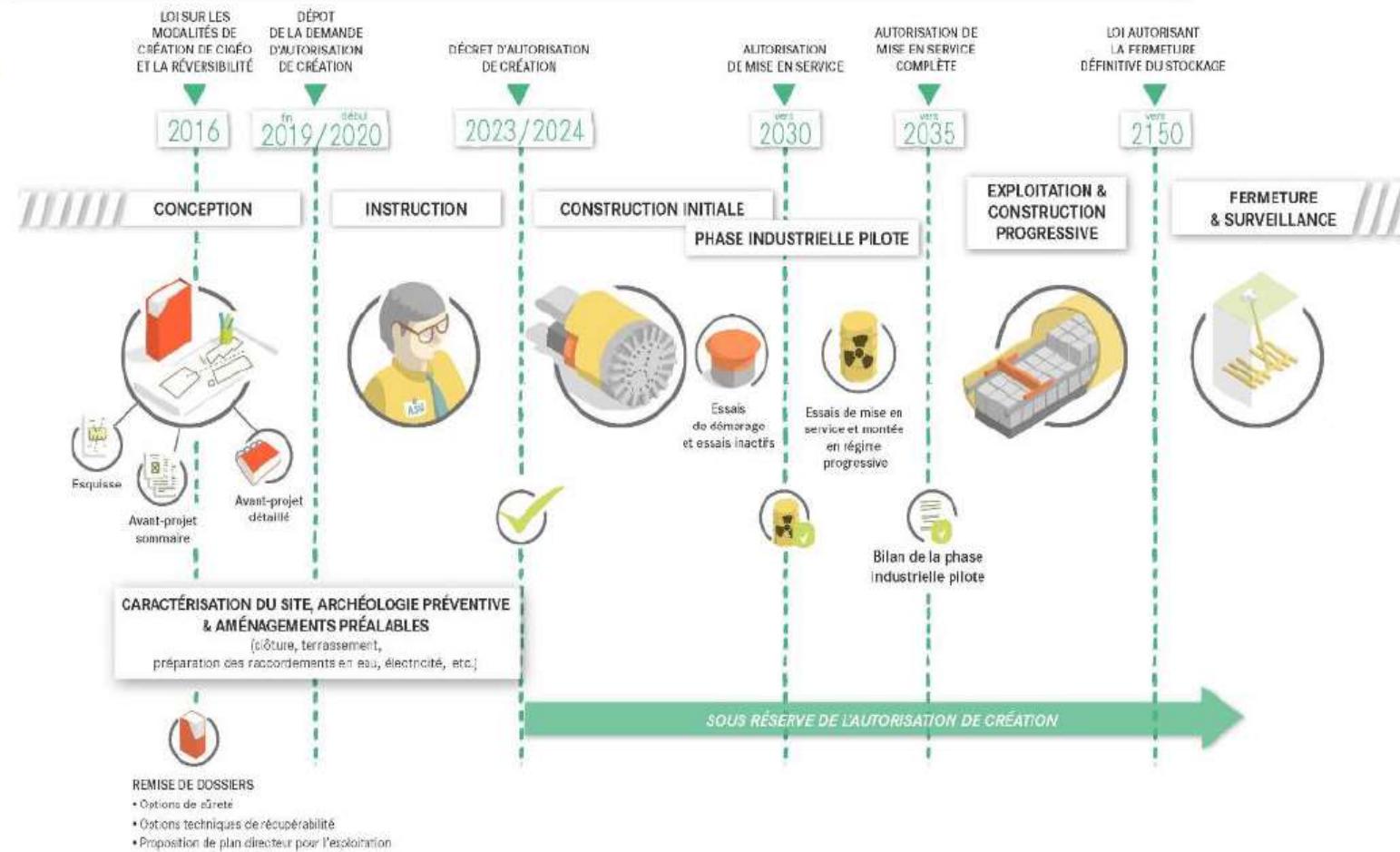
Portée (rails) de 5 m. Hauteur : 7m . Translation de 40 m pour les essais mais prévue à 500 m pour l'installation finale.
Système de rapatriement en cas de panne



ENERGIE NUCLEAIRE

STOCKAGE DES DECHETS (Projet CIGEO)

Calendrier du projet



ENERGIE NUCLEAIRE

STOCKAGE DES DECHETS (ICEDA)

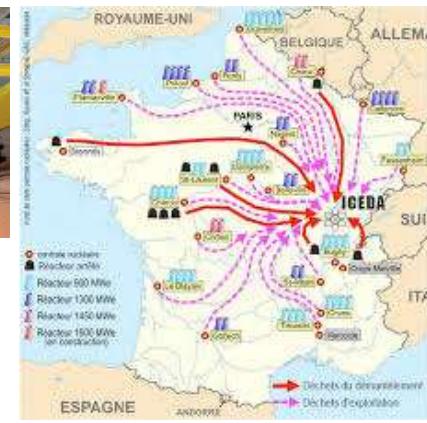
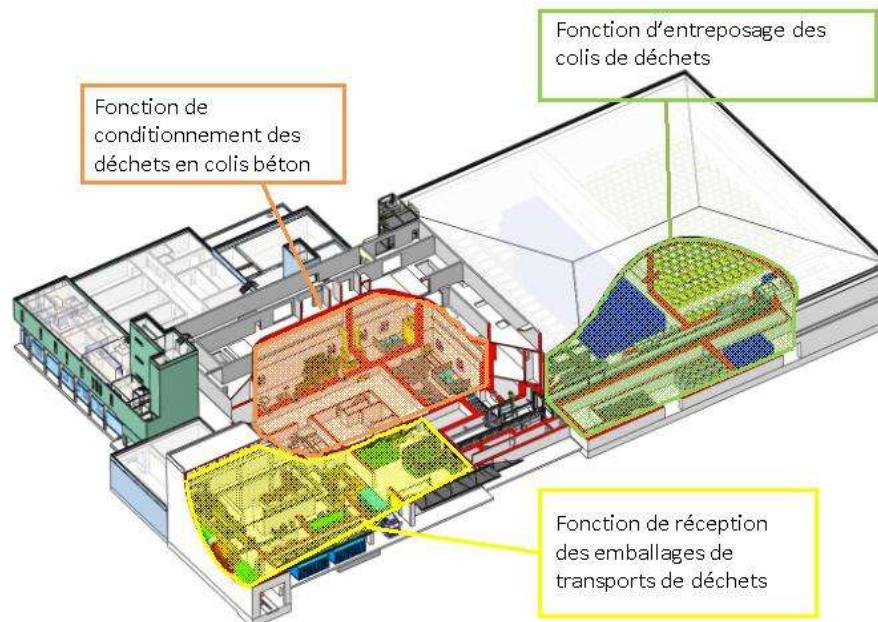
INSTALLATION DE CONDITIONNEMENT ET D'ENTREPOSAGE DE DÉCHETS ACTIVÉS (ICEDA)

Afin de respecter ses engagements et d'assurer ses responsabilités d'industriel en conformité avec son programme de déconstruction, EDF (par le CIDEN) a construit une installation temporaire (durée d'exploitation de 50 ans), appelée ICEDA, sur le site de la **Centrale du Bugey**. Elle permettra de conditionner et d'entreposer une partie des déchets issus des 9 réacteurs EDF (dont Bugey 1) en cours de déconstruction. Ces déchets seront ensuite évacués vers le centre de stockage définitif (CIGEO) de l'ANDRA.

ICEDA permettra de conditionner et d'entreposer les déchets moyennement radioactifs à vie longue (**MA-VL** avec une période radioactive supérieure à 30 ans) provenant des neuf centrales nucléaires EDF en déconstruction. Ces déchets représentent moins de 0,1% du total des déchets de déconstruction, soit environ 500 tonnes.

ICEDA accueillera aussi des déchets métalliques issus de l'exploitation des centrales en fonctionnement (1500 tonnes environ), qui seront eux aussi évacués ensuite vers le centre de stockage définitif.

ICEDA permettra aussi de faire transiter les déchets graphites issus de la déconstruction du réacteur de Bugey 1 avant leur évacuation vers le futur centre de stockage définitif de l'ANDRA.



Principaux fournisseurs :
 INGEROP, RAZEL-BEC,
 CEGELEC, COMETE, ATRIX Group

Les déchets TFA et les déchets FMA-VC sont stockés en surface

1 - Déchets TFA

Le **Cires** (Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage) est un centre de stockage des déchets TFA. Situé dans l'Aube à *Morvilliers* et ouvert en 2000. Un projet (Acaci) pour 2022 : Augmenter la capacité de stockage



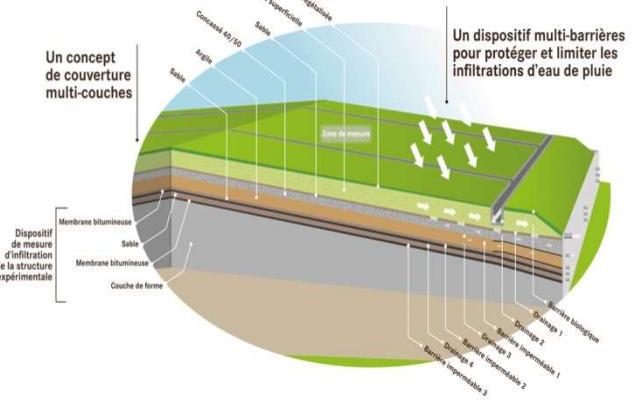
2 - Déchets FMA-VC

Premier centre de stockage : Centre de Surface de la Manche (**CSM**) ouvert en 1969, plein et fermé en 1994. En phase de fermeture avec surveillance active.

Deuxième centre de stockage : Centre de *Soulaines-Dhuys* dans l'Aube (**CSA**) créé en 1992

Les déchets sont stockés en surface dans des ouvrages en béton de 25 m de long et 8 m de haut. Une fois remplis, les ouvrages sont fermés par dalle béton sur laquelle est ensuite posé un revêtement imperméable puis une couverture définitive de plusieurs mètres de haut pour confiner la décroissance de la radioactivité (300 ans)

Des déchets de grandes dimensions sont stockés au CSA : Télémanipulateurs – Couvercles de Cuves



ENERGIE NUCLEAIRE

STOCKAGE DES DECHETS (POSIVA - FINLANDE)

FINLANDE - POSIVA site d'Onkolo (Olkiluoto) – STOCKAGE DES DECHETS

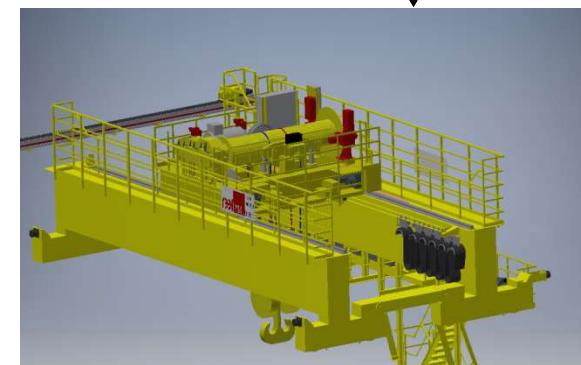
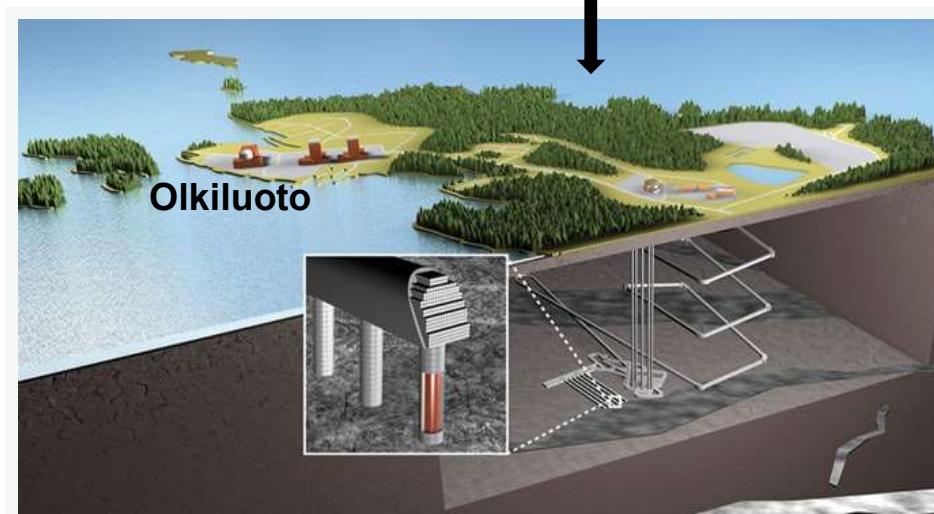
Stockage des Combustibles Irradiés provenant des réacteurs d'Olkiluoto dans un **massif granitique**

Plus tard : les composants issus du démantèlement des réacteurs



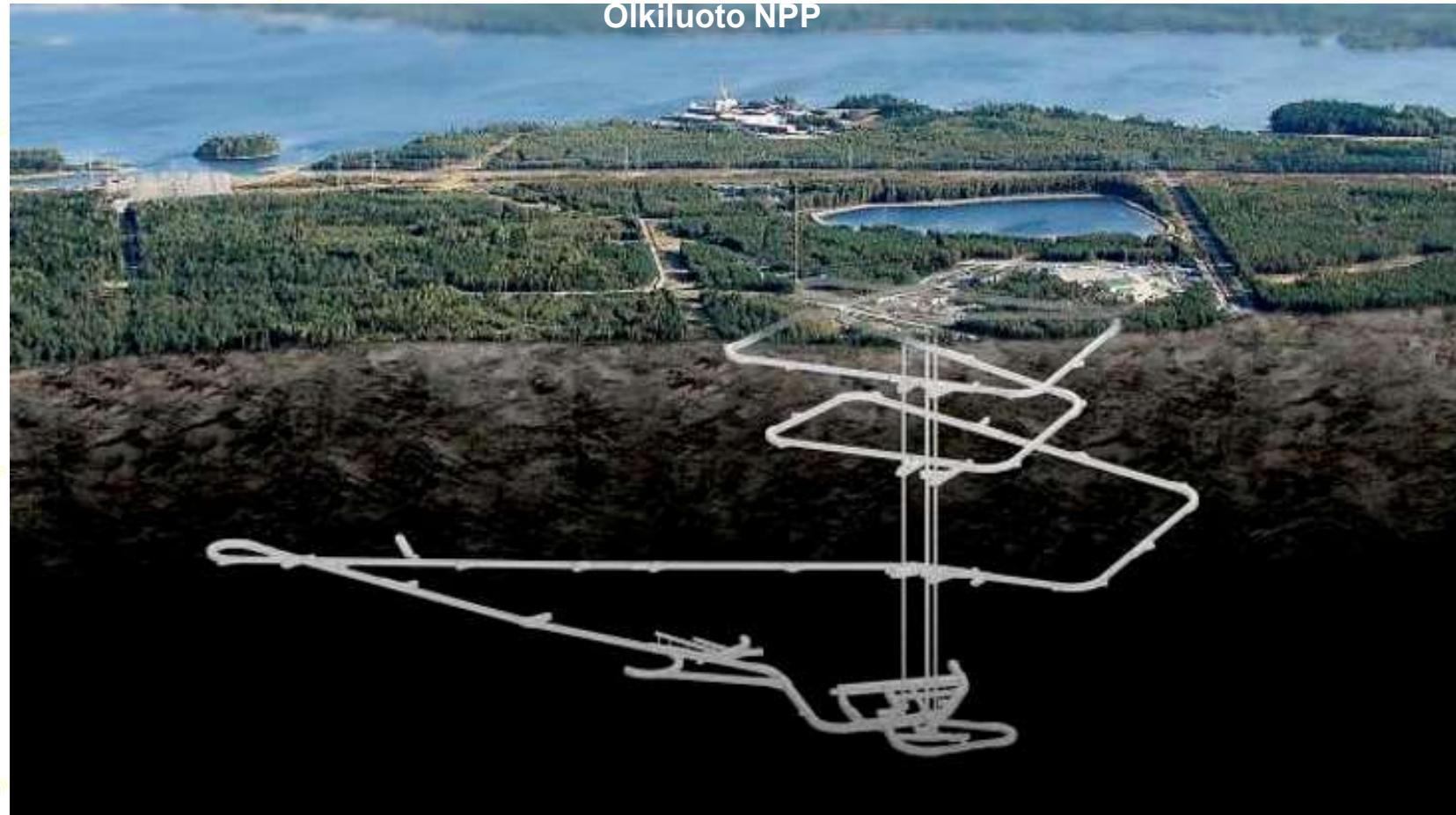
POSIVA

Exploitant du site (équivalent à l'ANDRA en France)



NKM NOELL : Pont 140t du hall de réception des colis. Fabrication par REEL Villefranche.

CNIM fournit la chaîne de manutention 115



ENERGIE NUCLEAIRE

STOCKAGE DES DECHETS (POSIVA - FINLANDE)

FINLANDE - POSIVA site d'Onkolo (Olkiluoto) – STOCKAGE DES DECHETS FOURNITURES Groupe REEL

Ecole REEL



Ecole REEL



Ecole REEL



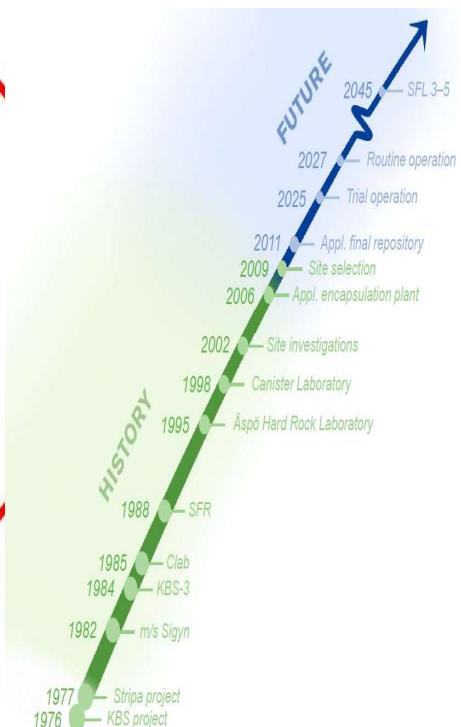
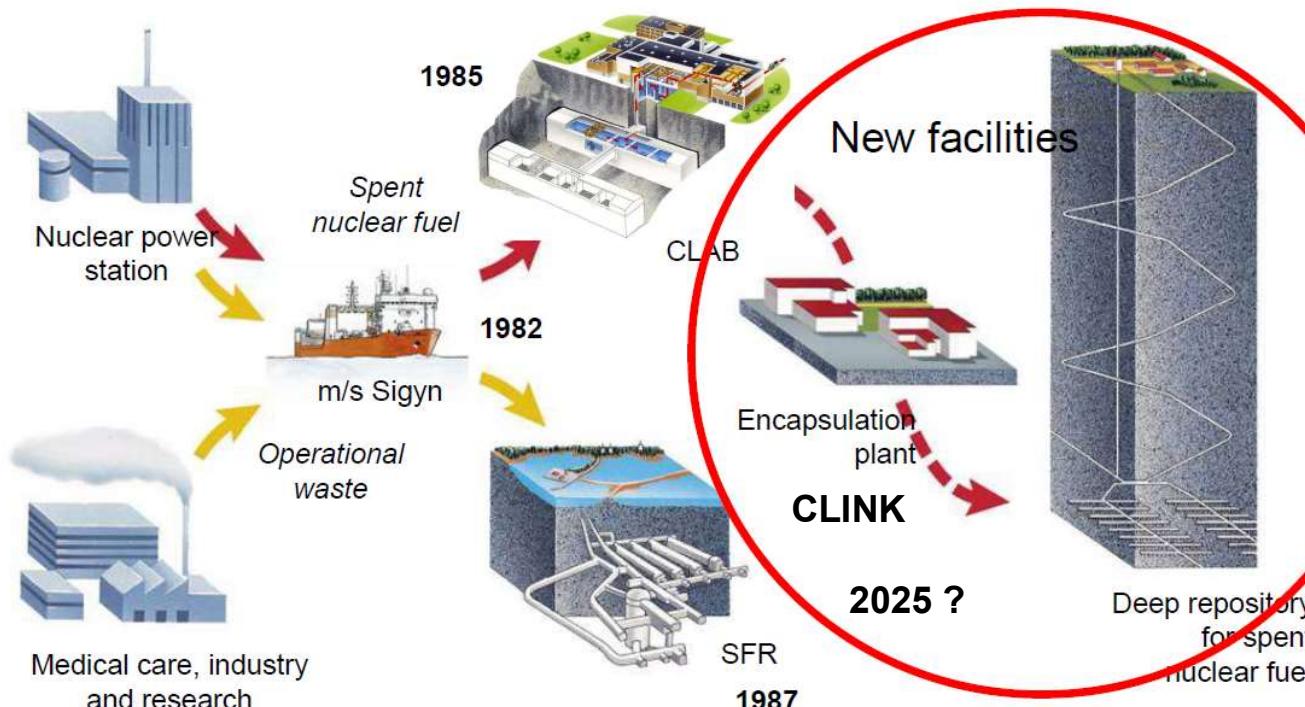
NKM NOELL : Pont 140t du hall de réception des colis. Fabriqué à REEL Villefranche.

CNIM SI : Chariot de transfert des châteaux

ENERGIE NUCLEAIRE

STOCKAGE DES DECHETS (CLAB-CLINK SUEDE)

SUEDE SKB - CLAB (Installation CLINK) – Stockage des Combustibles Usés
Mise en conteneurs (encapsulation) et piscines souterraines (Entreposage intérimaire)
Stockage définitif en couche géologique profonde (granite). La Suède : UN BON ELEVE



NKM NOELL : Travaille avec BNG sur les études de conception du projet **CLINK**
 (Partie manutention : Machine de Chargement et ponts nucléarisés)

REEL a fourni 6 Ponts Perche sur le **CLAB**. **NKMNOELL vient de les rénover.**

Juin 2023 : Permit accordé à SKB pour accroître la capacité du CLAB de 8000 t à 11000 t.

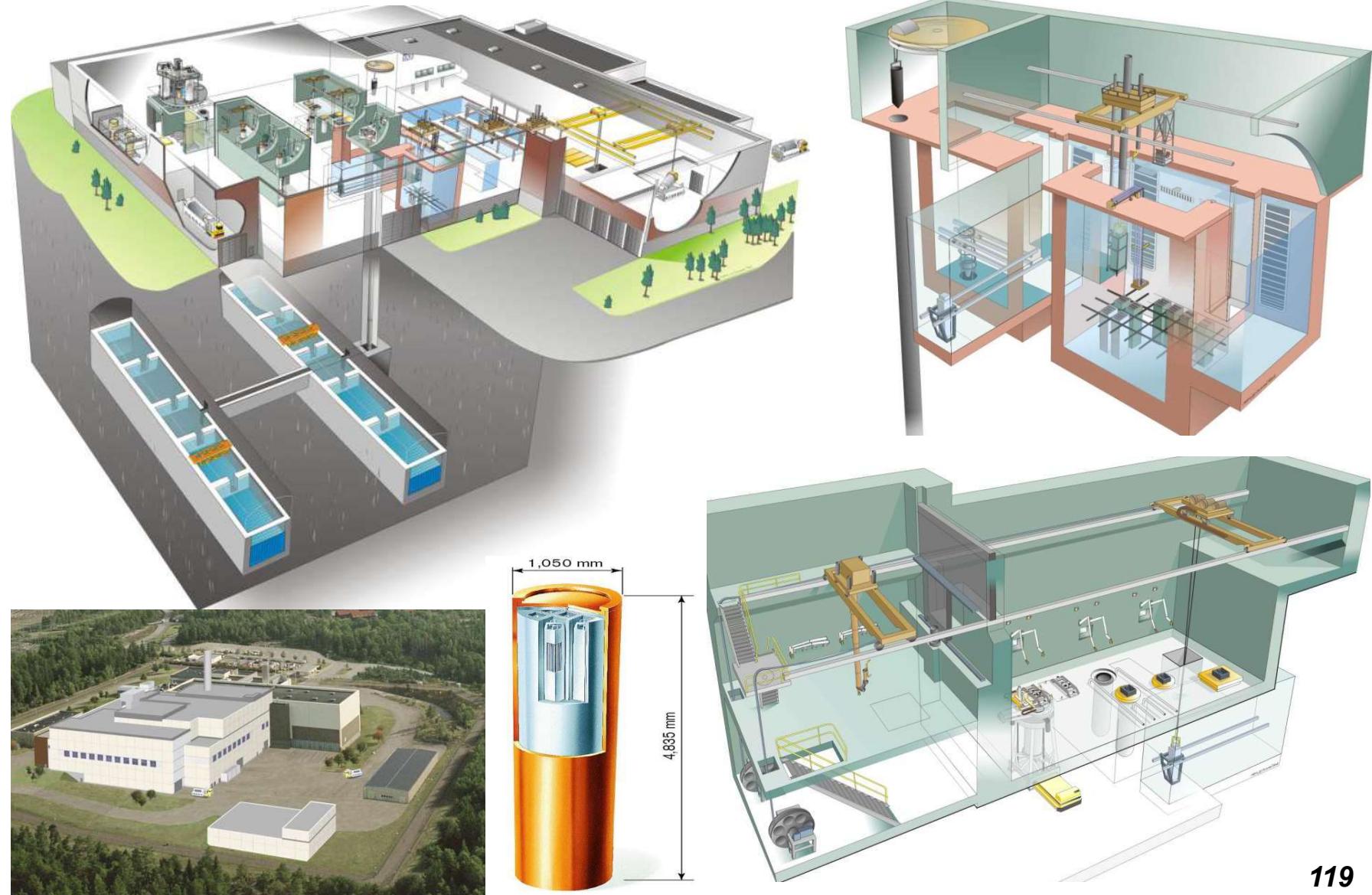
Le programme :
AS favorable

Au 05/2020 :En cours
d'obtention d'autorisation
01/2022 : autorisation 118

ENERGIE NUCLEAIRE

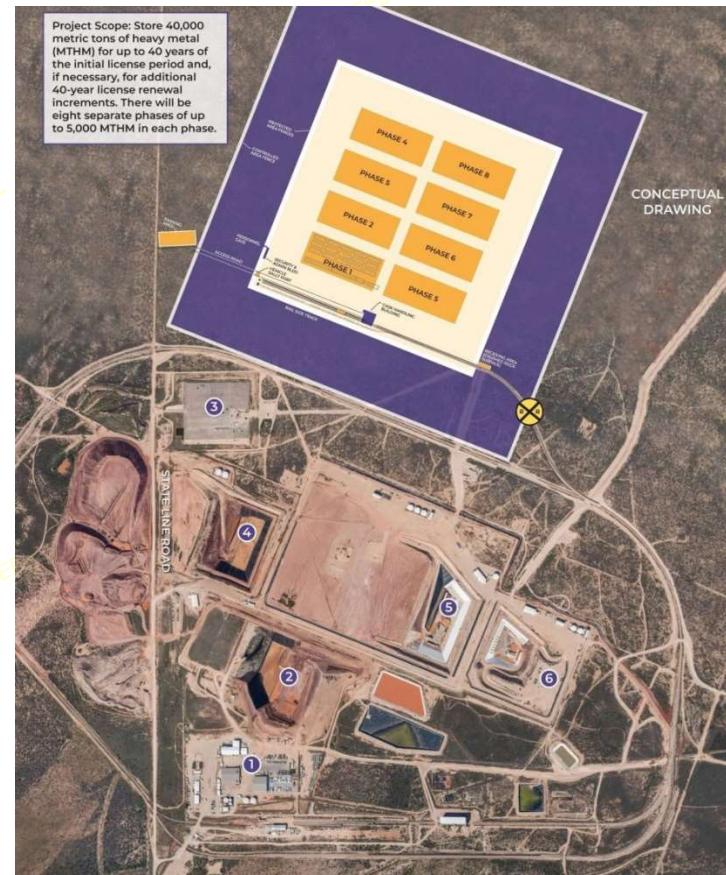
STOCKAGE DES DECHETS (CLAB-CLINK SUEDE)

SUEDE SKB – CLAB et CLINK – Stockage des Combustibles Usés
Mise en conteneurs (encapsulation) et piscines souterraines (Entreposage intérimaire)



ENERGIE NUCLEAIRE

Entreposage Combustibles (ISP – Etats Unis)



L'US NRC vient d'accorder la licence à ISP pour la construction d'un nouveau centre d'entreposage du combustible usé. Mais il y a de l'opposition pour la construction du centre.

C'est la première fois qu'une licence est accordée pour un site hors d'une Centrale Nucléaire

ISP (*Interim Storage Partners*) est une JV entre Waste Control Specialist (WCS) et ORANO USA

Le centre d'entreposage utilisera le système NUHOMS (ORANO TN) et les Châteaux de **NAC international**.

Le site est situé au Texas, Andrews County, à 563 km ouest de Dallas, près de la frontière du Nouveau-Mexique.

La capacité du centre sera de **5000t** de combustibles usés puis à terme **40000t** en 8 phases.



ENERGIE NUCLEAIRE

STOCKAGE DES DECHETS (WIPP – Etats Unis)

USA - WIPP (*Waste Isolation Pilot Plant*) : Géré par un consortium **NWP** : URS, B&W, ORANO
 Stockage profond de déchets radioactifs à **Vie Longue d'Origine Militaire**, principalement le **Plutonium**

Stockage dans des **dômes de sel** à 650 m de profondeur

Pas de stockage de combustible irradié

Contenance : L'équivalent de 156 000 fûts de 200 litres

Actif jusqu'en 2070

Signalisation d'un « site dangereux à ne pas approcher »



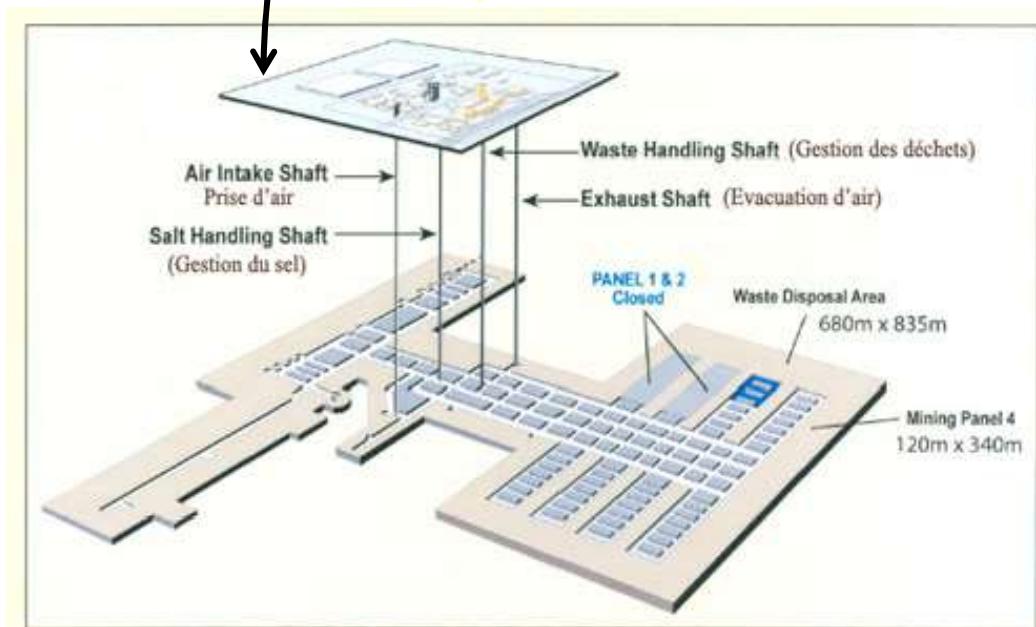
Stockage de Châteaux



Mise en place d'un conteneur



Installation de surface (Nouveau-Mexique)



ENERGIE NUCLEAIRE

STOCKAGE DES DECHETS (Canada)

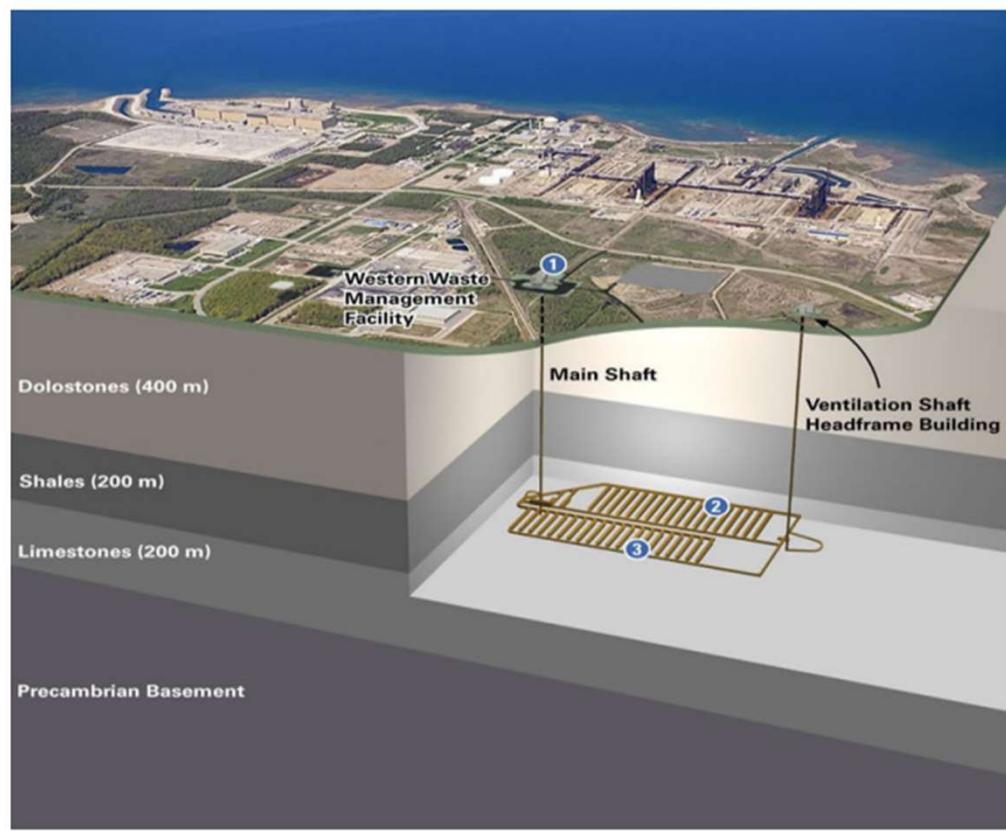
Au Canada, le combustible usé représente 3 % du volume des déchets nucléaires dans le monde. La quantité totale de grappes de combustible usé remplirait 6 patinoires de hockey jusqu'à la hauteur des bandes !!!

Pour le stockage des combustibles usé, la **SGDN** (Société de Gestion des Déchets Nucléaires créée en 2002) étudie un site de Dépôt Géologique Profond (550 m).

En 2020, la SGDN a finalement sélectionné deux régions pour l'implantation du DGP :

- Ignace dans le Nord Ouest de l'Ontario
- La municipalité de South Bruce dans le sud de l'Ontario

Deux régions de la Nation Ojibway

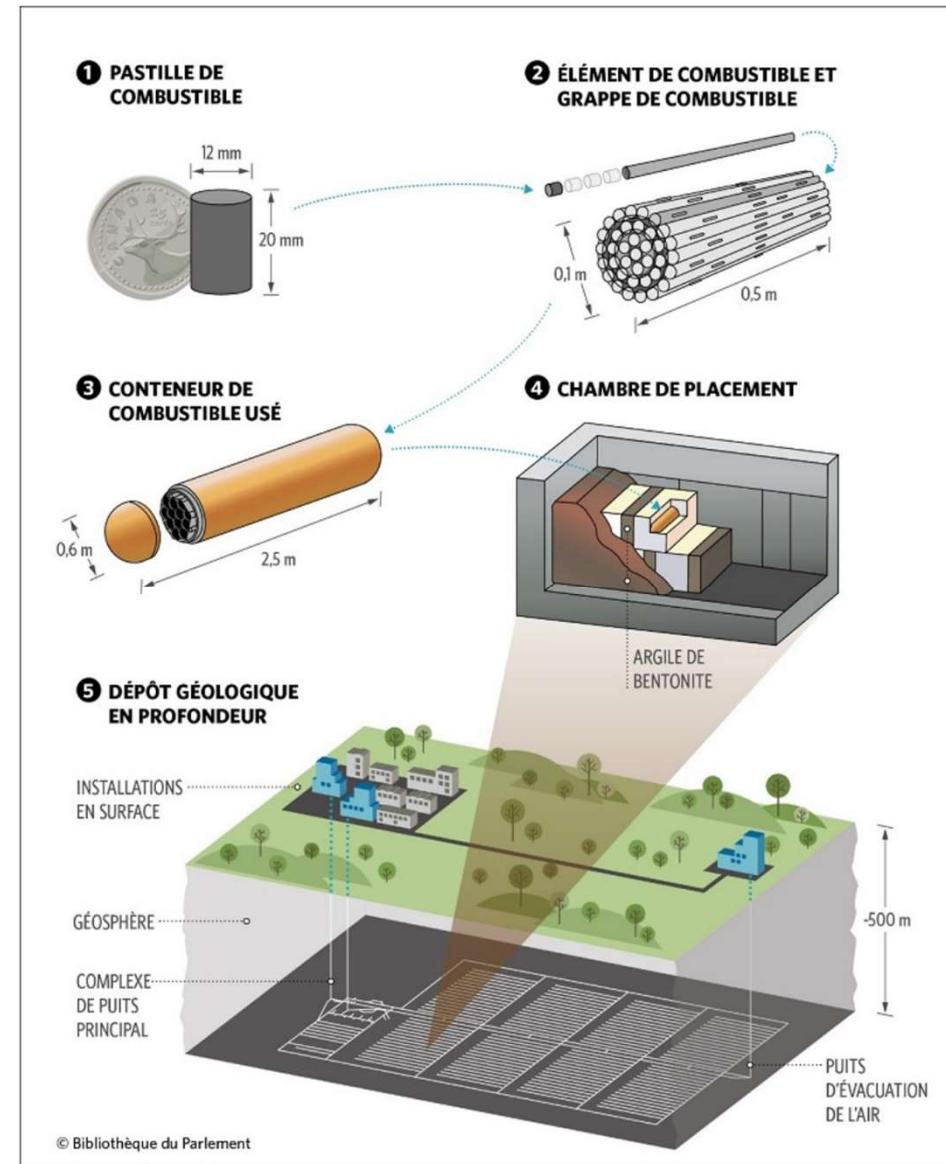


Décision sur le site fin 2024 – Approbations règlementaires 2034 – Fin de construction du stockage 2044
Au mieux opérationnel en 2050 puis surveillé pendant 70 ans pour enfin être scellé

ENERGIE NUCLEAIRE

STOCKAGE DES DECHETS (Canada)

Les barrières multiples pour le stockage des Combustibles usés



Waste2Glasses

Une JV entre **EDF** (Cyclife) et **Véolia** (Asteralis) pour développer une nouvelle filière de traitement des déchets radioactifs complexes basée sur la technologie de vitrification **Geomelt** de Véolia.

Geomelt

Cette technologie produit un verre ultra-stable qui est environ 10 fois plus résistant que le béton et plus durable que le granite et le marbre. Sa résistance à la lixiviation est l'une des plus élevées de tous les matériaux. Des radionucléides emprisonnés dans cette matrice de verre ne seront plus libérés dans l'environnement même après des années de ruissellement.

Particulièrement bien adapté à la vitrification pour les déchets solides de faible et moyenne activité. Le procédé permet la réduction du volume des déchets due à la densification atteinte (2,2 pour le verre).

Stockage géologique profond

En dehors de la Finlande, la suède et la France, seuls la Suisse et le Canada étudient un projet.

La Suisse vient de choisir son site d'enfouissement. Le Canada a présélectionné 2 sites.

ENERGIE NUCLEAIRE

TRAITEMENT DES DECHETS (Transmutation)

TRAITEMENT DES DECHETS – TRANSMUTATION – UN AVENIR

Voir aussi dans la **Partie 4**, la R&D avec MYRRA et ESS

Les lasers pour traiter les déchets radioactifs (HA et MA).

En projetant un laser superpuissant sur les atomes, il est possible de modifier les neutrons et donc la propriété de l'atome lui-même. La radioactivité pourrait passer d'un million d'année à quelques minutes !!! **Ce Rêve peut-il devenir réalité !!!!**

C'est la technique **CPA** (« *Chirped Pulse Amplification* ») découverte par G. Mourou, qui pourrait être utilisée car avec les CPA, on peut produire des puissances considérables de l'ordre du pétawatt (10×15 Watts). Cela remplace les accélérateurs de particules.

Gérard MOUROU, Prix Nobel de physique (2018) à travailler sur un laser de 1 Térawatt (1000 Milliards de Watts soit 1000 fois la puissance d'un réacteur de 1000 MWe).

Un autre laser (Thales) en fonctionnement en Roumanie de 10 pétawatts, 10 000 fois plus puissant. Ce laser travaillera sur le traitement des déchets radioactifs (projet **Extreme Light Infrastructure**)

Dans le cadre d'ELI, construction en Chine d'un laser de 100 pétawatts.

Certains scientifiques estiment que l'on pourrait faire un usage industriel de cette technique d'ici 2030 pour traiter les déchets nucléaires !!! Très ambitieux à moins de mettre en place un projet international type Manhattan pour le traitement des déchets

Il faut néanmoins pouvoir séparer les différents éléments radioactifs qui composent les déchets



ENERGIE NUCLEAIRE

NOTES



ENERGIE NUCLEAIRE

NOTES



ENERGIE NUCLEAIRE

NOTES