



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



# Inventaire national des matières et déchets radioactifs

CATALOGUE DESCRIPTIF  
DES MATIÈRES 2024

Ce document présente une description de l'ensemble des catégories de matières nucléaires, tel que défini dans l'arrêté du 16 mars 2017. Chaque année, les stocks de matières entreposées en France au 31 décembre de l'année précédente sont déclarés.

Le catalogue descriptif des matières est complété, tous les cinq ans, dans le cadre de la nouvelle édition de l'*Inventaire national des matières et déchets radioactifs*, par des « inventaires prospectifs » qui fournissent des estimations des quantités de matières selon un ou plusieurs scénarios contrastés liés au devenir des installations et à la politique énergétique de la France à long terme.

Il s'agit d'un outil précieux pour le pilotage de la politique de gestion des matières et déchets radioactifs.



L'ensemble des données de l'*Inventaire national* est disponible

sur le site web dédié  
[inventaire.andra.fr](http://inventaire.andra.fr)



en *open data* sur  
[data.gouv.fr](http://data.gouv.fr)

# INTRODUCTION

L'Andra recense annuellement l'ensemble des matières radioactives présentes sur le territoire français au 31 décembre de l'année précédente, sur la base des informations fournies par leurs détenteurs. Il s'agit de substances pour lesquelles une utilisation ultérieure est prévue ou envisagée, le cas échéant après traitement, à l'exception des sources scellées qui font l'objet d'un inventaire par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), en vertu de l'article R.133-154 du code de la santé publique.

Les détenteurs de matières sont essentiellement, pour les matières fissiles, les acteurs du cycle du combustible nucléaire, tous les exploitants de réacteurs nucléaires (électronucléaire, défense nationale, recherche) et les acteurs de l'industrie chimique détenant des matières radioactives dans le cadre de leur activité (extraction de terres rares par exemple).

Les matières étrangères présentes sur le territoire français, visées à l'article L. 542-2-1 du code de l'environnement sont comptabilisées dans les stocks et prévisions.

## L'unité de mesure

L'unité utilisée pour présenter les quantités de matières radioactives est la tonne de métal lourd (tML), unité représentative de la quantité d'uranium, de plutonium ou de thorium contenue dans les matières. Seule exception, les matières de la défense nationale sont exprimées en tonne d'assemblages (t) pour des raisons de confidentialité.

L'article 4 de l'arrêté du 9 octobre 2008, modifié le 4 avril 2014 et le 16 mars 2017, définit les 25 catégories de matières selon lesquelles les déclarations faites à l'Andra doivent être distinguées. La liste de ces catégories est disponible ci-dessous.

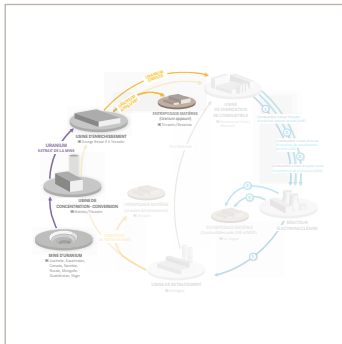
Catégorie	Libellé de la catégorie	Page
1	Combustibles UNE avant utilisation	14
2	Combustibles UNE en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	15
3	Combustibles UNE usés, en attente de retraitement	16
4	Combustibles URE avant utilisation	21
5	Combustibles URE en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	22
6	Combustibles URE usés, en attente de retraitement	23
7	Combustibles mixtes uranium-plutonium avant utilisation ou en cours de fabrication	26
8	Combustibles mixtes uranium-plutonium en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	27
9	Combustibles mixtes uranium-plutonium usés, en attente de retraitement	28
10	Rebuts de combustibles mixtes uranium-plutonium non irradiés en attente de retraitement	29
11	Rebuts de combustibles uranium non irradiés en attente de retraitement	17
12	Combustibles usés RNR, en attente de retraitement	36
13	Combustibles des réacteurs de recherche avant utilisation	34
14	Combustibles en cours d'utilisation dans les réacteurs de recherche	35
15	Autres combustibles usés civils	37
16	Combustibles usés de la défense nationale	38
17	Plutonium séparé non irradié sous toutes ses formes physico-chimiques	25
18	Uranium naturel extrait de la mine, sous toutes ses formes physico-chimiques	10
19	Uranium naturel enrichi, sous toutes ses formes physico-chimiques	11
20	Uranium enrichi issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques	20
21	Uranium issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques	19
22	Uranium appauvri, sous toutes ses formes physico-chimiques	12
23	Thorium, sous la forme de nitrates et d'hydroxydes	31
24	Matières en suspension (sous-produits du traitement des minerais de terres rares)	32
25	Autres matières	39

Afin d'en faciliter la lecture et la compréhension, ces catégories font l'objet de regroupement en chapitre selon leur positionnement dans le cycle du combustible, tel qu'actuellement mis-en-œuvre en France.

**Pour en savoir plus** P.06

**Glossaire** P.08

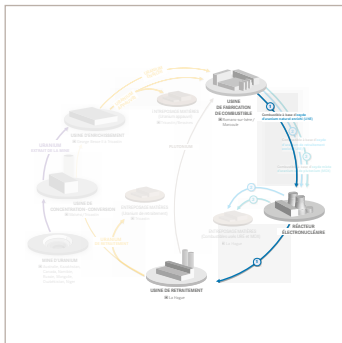
01



**L'amont du cycle du combustible** P.09

- P.10 \_\_\_ Uranium naturel extrait de la mine, sous toutes ses formes physico-chimiques  
 P.11 \_\_\_ Uranium naturel enrichi, sous toutes ses formes physico-chimiques  
 P.12 \_\_\_ Uranium appauvri, sous toutes ses formes physico-chimiques

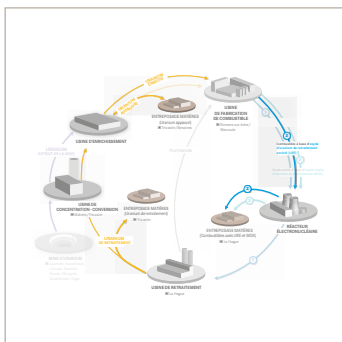
02



**Utilisation et entreposage des combustibles UNE** P.13

- P.14 \_\_\_ Combustibles UNE avant utilisation  
 P.15 \_\_\_ Combustibles UNE en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires  
 P.16 \_\_\_ Combustibles UNE usés, en attente de retraitement  
 P.17 \_\_\_ Rebutis de combustibles uranium non-irradiés en attente de retraitement

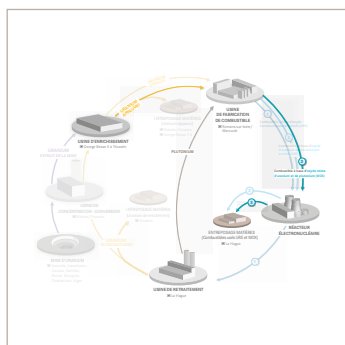
03



**Retraitement des combustibles irradiés : de l'URT au combustible URE** P.18

- P.19 \_\_\_ Uranium issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques  
 P.20 \_\_\_ Uranium enrichi issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques  
 P.21 \_\_\_ Combustibles URE avant utilisation  
 P.22 \_\_\_ Combustibles URE en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires  
 P.23 \_\_\_ Combustibles URE usés, en attente de retraitement

04



## Retraitement du plutonium : de la séparation aux combustibles mixtes U-Pu P.24

- P.25 \_\_\_ Plutonium séparé non irradié sous toutes ses formes physico-chimiques
- P.26 \_\_\_ Combustibles mixtes U-Pu avant utilisation ou en cours de fabrication
- P.27 \_\_\_ Combustibles mixtes U-Pu en cours d'utilisation dans les centrales
- P.28 \_\_\_ Combustibles mixtes U-Pu usés, en attente de retraitement
- P.29 \_\_\_ Rebutis de combustibles mixtes U-Pu non-irradiés en attente de retraitement

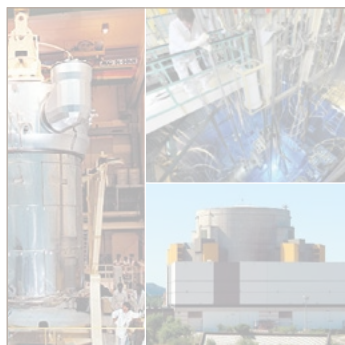
05



## Matières valorisables dans une filière thorium P.30

- P.31 \_\_\_ Thorium, sous la forme de nitrates et d'hydroxydes
- P.32 \_\_\_ Matières en suspension (sous-produits du traitement des minerais de terres rares)

06

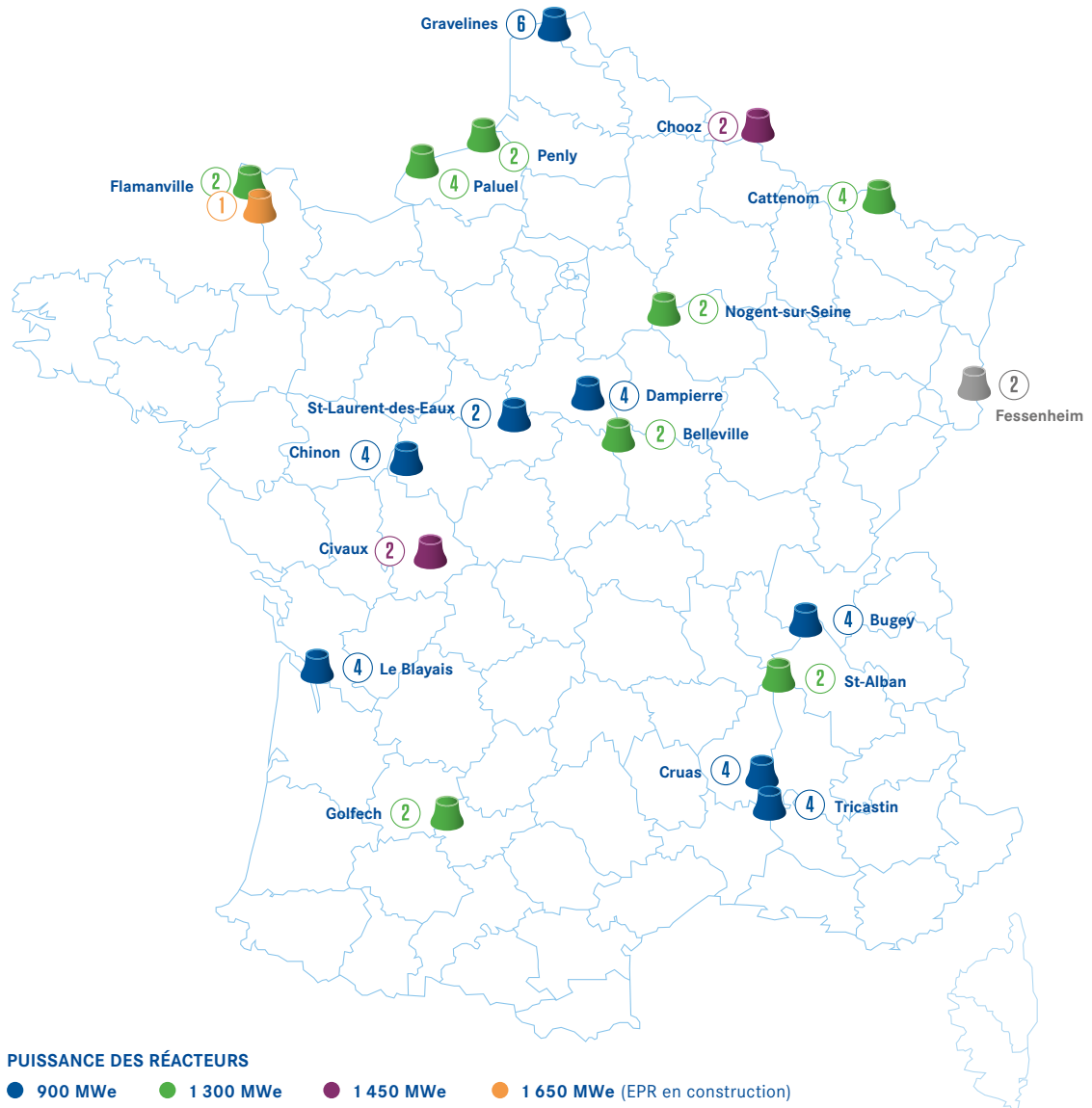


## Autres combustibles hors filière électronucléaire P.33

- P.34 \_\_\_ Combustibles des réacteurs de recherche avant utilisation
- P.35 \_\_\_ Combustibles en cours d'utilisation dans les réacteurs de recherche
- P.36 \_\_\_ Combustibles usés RNR, en attente de retraitement
- P.37 \_\_\_ Autres combustibles usés civils
- P.38 \_\_\_ Combustibles usés de la Défense Nationale
- P.39 \_\_\_ Autres matières



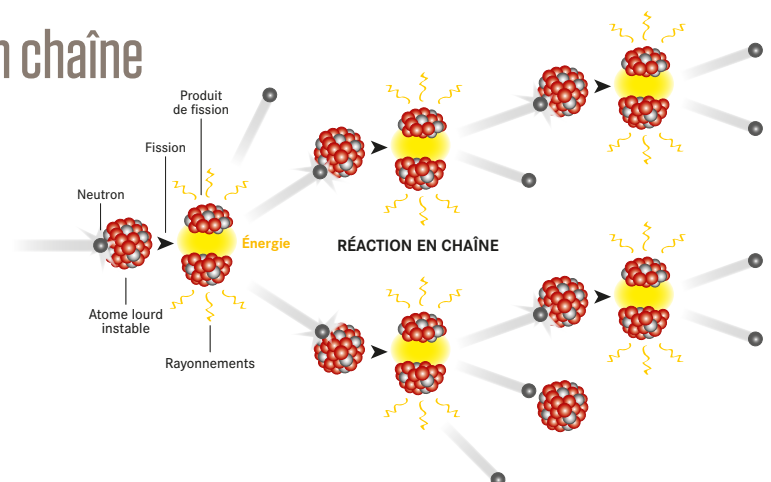
## La composition du parc nucléaire actuel



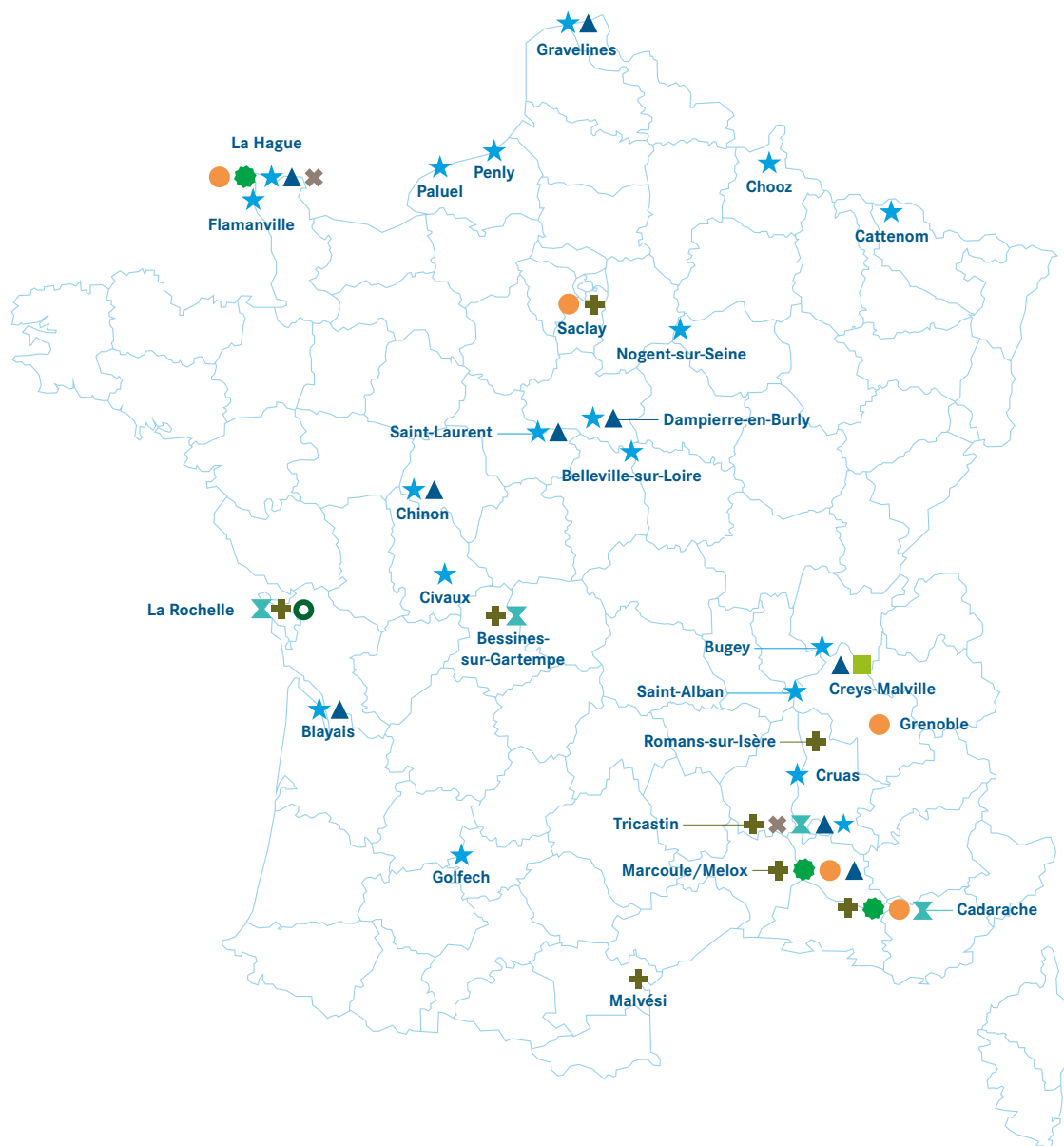
## Le principe de réaction en chaîne

La réaction en chaîne est au centre de la technologie d'un réacteur nucléaire.

De manière générale, il s'agit d'obtenir un état dans lequel chaque fission engendre exactement une fission.



## La localisation des matières radioactives sur le territoire français au 31/12/2022



- |   |  |   |                        |
|---|--|---|------------------------|
| + | URANIUM NATUREL                                    | ⚡ | THORIUM                |
| × | URANIUM ISSU DU RETRAITEMENT DES COMBUSTIBLES USÉS | ○ | MATIÈRES EN SUSPENSION |
| ★ | COMBUSTIBLES À BASE D'OXYDE D'URANIUM (UNE, URE)   | ● | PLUTONIUM              |
| ▲ | COMBUSTIBLES À BASE D'OXYDE MIXTE (MOX, RNR)       | ■ | AUTRES MATIÈRES        |
| ● | COMBUSTIBLES DES RÉACTEURS DE RECHERCHE            |   |                        |

Les combustibles de la défense nationale ne sont pas représentés sur cette carte. En effet, en vertu de la protection des informations dont la communication porterait atteinte aux intérêts mentionnés à l'article L. 124-4 du code de l'environnement, les localisations de matières ne peuvent être communiquées.

# Glossaire

- **ACTINIDES :**  
famille d'éléments du tableau périodique de numéro atomique compris entre 89 et 103.
- **ACTINIDES MINEURS :**  
actinides produits, avec le plutonium, par capture neutronique en réacteur.
- **CNPE :**  
Centre nucléaire de production d'électricité.
- **ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM :**  
procédé par lequel la teneur en uranium 235 est augmentée.
- **MOX :**  
mélange d'oxydes (ou mixed oxides), un combustible à base de plutonium et d'uranium appauvri.
- **PARC ACTUEL :**  
les 56 réacteurs en fonctionnement au 31 décembre 2022 et l'EPR de Flamanville.
- **PRODUITS DE FISSION :**  
éléments produits par fission d'un noyau lourd (généralement par paires).
- **PUREX :**  
Plutonium Uranium Reduction Extraction, procédé d'extraction du plutonium et de l'uranium du combustible irradié.
- **REP :**  
réacteur à eau pressurisée, technologie du parc électronucléaire actuel.
- **RNR :**  
réacteur à neutrons rapides.
- **SURGÉNÉRATION :**  
phénomène par lequel, dans un réacteur à neutrons rapides (RNR), la production de matière fissile dans l'enveloppe excède la consommation de matière fissile dans le cœur.
- **UAPP :**  
uranium appauvri.
- **UNAT :**  
uranium naturel.
- **UNE :**  
uranium naturel enrichi.
- **UOx :**  
oxyde d'uranium.
- **URE :**  
uranium de retraitement enrichi.
- **URT :**  
uranium de retraitement.

- **Les fiches explicatives** de chaque catégorie de matière radioactive sont accompagnées d'une carte précisant la localisation des sites en détenant (à fin 2022) ou susceptibles d'en détenir.  
Cette localisation des sites est associée à leurs détenteurs et les secteurs économiques concernés.

## Légende



- Site(s) détenant des matières radioactives (à fin 2022)
- Site(s) susceptible(s) de détenir des matières radioactives



## 01

L'amont du cycle  
du combustible

Uranium naturel extrait de la mine, sous toutes ses formes physico-chimiques

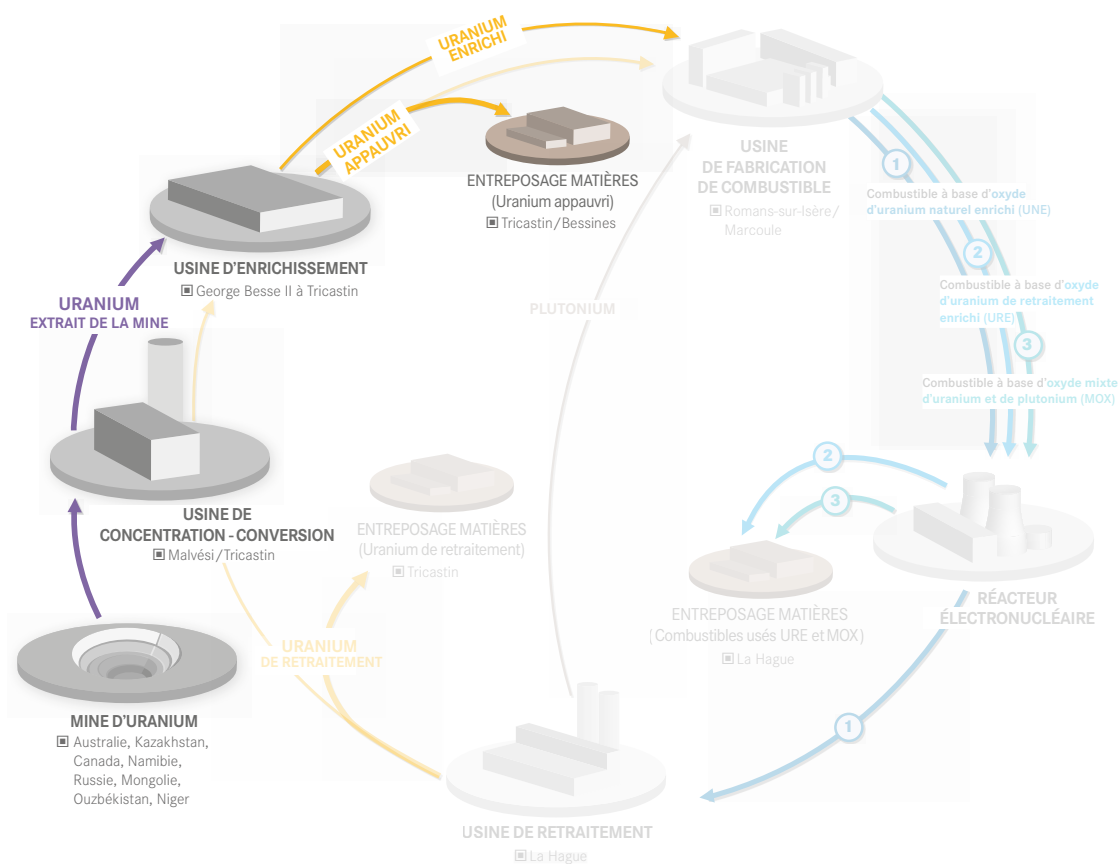
10

Uranium naturel enrichi, sous toutes ses formes physico-chimiques

11

Uranium appauvri, sous toutes ses formes physico-chimiques

12



Le parc nucléaire français utilise en premier lieu, pour produire de l'énergie, les propriétés de fission de l'isotope 235 de l'uranium. Le combustible nucléaire dit « à l'uranium naturel enrichi » (UNE) est composé d'oxyde d'uranium, dont la teneur en isotope 235 est portée à environ 4 % alors qu'elle n'est que de 0,7 % dans l'uranium naturel ; l'autre isotope, l'uranium 238, présent à 99,3 % dans l'uranium naturel, n'est pas fissile.

Les propriétés chimiques des isotopes d'une même espèce étant identiques, les procédés de séparation isotopique reposent sur la différence de masse entre les isotopes de l'uranium. À l'usine Georges Besse II, Orano pratique l'enrichissement de l'uranium sous forme hexafluorure par centrifugation en phase gazeuse. Au sein des centrifugeuses, les molécules contenant un uranium 238 migrent préférentiellement en périphérie tandis que les molécules contenant un uranium 235, plus léger, migrent vers l'axe de rotation.

En pratique, cette opération est répétée en cascade pour un enrichissement de l'ordre de 3 à 5 %. Ce pourcentage représente la teneur en uranium 235 à la fin du processus : c'est le taux d'enrichissement.

Environ 1 200 tonnes de combustible UNE sont chargées annuellement dans les réacteurs du parc nucléaire. Ce dernier est obtenu à partir de l'enrichissement d'environ 7 800 tonnes d'uranium naturel. Cette opération d'enrichissement génère par ailleurs environ 6 720 tonnes d'uranium appauvri chaque année.

# Uranium naturel extrait de la mine, sous toutes ses formes physico-chimiques

## La matière première du cycle du combustible

L'uranium est un élément naturel se composant des isotopes de nombre de masse 238 (99,3 %), 235 (0,7 %) et 234 (à l'état de trace). Tous les isotopes de l'uranium sont naturellement radioactifs.

L'uranium est relativement répandu dans l'écorce terrestre. L'extraction s'effectue principalement dans des mines, à ciel ouvert ou souterraines. Par le passé, des mines d'uranium ont été exploitées en France. Cependant, il a été décidé de mettre fin à leur exploitation au début des années 90, pour des raisons d'épuisement ou de rentabilité économique. L'uranium est aujourd'hui extrait depuis le Niger, le Kazakhstan et le Canada.

Comme la plupart des minerais, l'uranium n'est pas extrait sous sa forme pure, mais sous forme d'oxydes, de nitrates, de sulfates ou de carbonates. Tout au long de l'amont du cycle, l'uranium est converti sous les formes chimiques les plus adaptées aux différentes opérations. Ainsi, l'uranium est d'abord transporté sur le site Orano de Malvési, en charge de la première phase de conversion consistant à purifier le minerai d'uranium naturel en tétrafluorure d'uranium ( $UF_4$ ). Il est ensuite converti en hexafluorure d'uranium ( $UF_6$ ) sur le site Orano de Tricastin.

La composition isotopique de l'uranium naturel n'est pas favorable à la mise en place d'une réaction en chaîne de fissions nucléaires. Il subit alors une opération appelée « enrichissement », visant à augmenter la teneur en uranium 235 par des procédés de séparation isotopique.

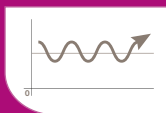


Yellow Cake

## Tendance des dernières années



Le stock d'uranium naturel est relativement stable dans le temps : il est extrait au même taux que son exploitation. Entre 2017 et 2021, le stock était en augmentation pour des raisons économiques. Il est en légère baisse depuis 2021.



## En chiffres

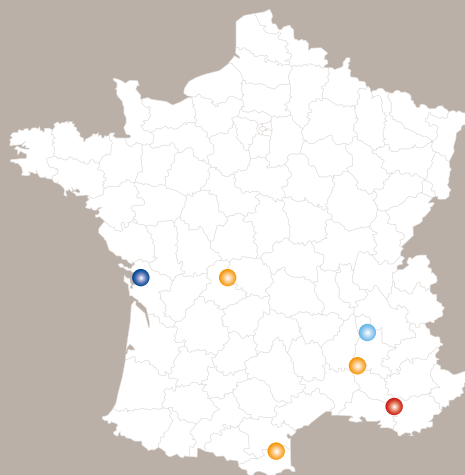
### ► STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	35 900	37 800	37 800



## En savoir plus

L'uranium naturel est purifié à l'usine Orano de **Malvési** (11) avant d'être converti à l'usine Orano de **Tricastin** (26).



Secteur(s) économique(s)

Électronucléaire  
Non - électronucléaire

Détenteur(s)

CEA • Framatome  
Orano • Solvay

# Uranium naturel enrichi, sous toutes ses formes physico-chimiques

## Une composition isotopique favorable à la fission

Parmi les isotopes de l'uranium naturel (catégorie 18), seul l'uranium 235 est exploité pour ses propriétés fissiles dans les réacteurs à eau pressurisée, constituant le parc électronucléaire français actuel. La concentration de cet isotope étant insuffisante pour entretenir une réaction en chaîne dans les réacteurs actuels, une étape d'enrichissement est nécessaire afin que l'uranium naturel puisse servir de combustible.

Cette opération, conduisant à une teneur en uranium 235 comprise entre 3 % et 5 %, est menée sur l'usine d'enrichissement George Besse II à Tricastin par un procédé de centrifugation. Il s'agit du plus grand site d'enrichissement de l'uranium en Europe.

À l'issue de cette étape, l'uranium enrichi, sous forme d' $UF_6$ , est conditionné pour les transports et transformé en oxyde d'uranium enrichi ( $UO_2$ ) lors d'une opération appelée défluoration. Même enrichi, l'uranium non irradié en réacteur ne nécessite pas de protection biologique particulière.

Chaque année, environ 7 800 tonnes d'uranium naturel (catégorie 18) sont enrichies. Cette opération produit environ 6 720 tonnes, selon le taux d'enrichissement final, d'uranium dit « appauvri », dont la teneur en uranium 235 est plus faible que celle de l'uranium naturel. Cet uranium appauvri est également considéré comme une matière valorisable (catégorie 22), soit dans le domaine nucléaire, soit dans d'autres industries, où sont exploitées par exemple ses propriétés d'atténuation des rayonnements, ou sa forte densité.

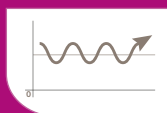


Enrichissement  
par centrifugation

## Tendance des dernières années



Le stock d'uranium enrichi est relativement stable dans le temps : il est produit au même taux que son exploitation.



## En chiffres

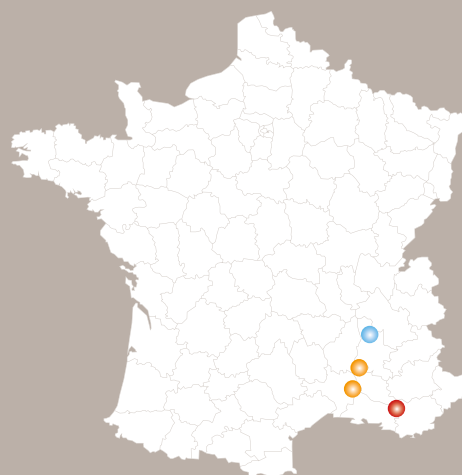
### ► STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	3 540	3 410	3 390

► Les prévisions à 2030 et 2040 ne correspondent pas à une stratégie industrielle, mais à une projection basée sur les tendances passées.

## *i* En savoir plus

L'enrichissement de l'uranium est effectuée à l'usine Georges Besse 2 sur le site Orano de **Tricastin** (26). De l'uranium enrichi est également détenu par Framatome sur le site de **Romans-sur-Isère** (26) en vue de la confection d'assemblages combustibles.



Secteur(s) économique(s)

Électronucléaire

Détenteur(s)

CEA • Framatome • Orano

# Uranium appauvri, sous toutes ses formes physico-chimiques

## Pas fissile, mais fertile

L'enrichissement de l'uranium génère de l'hexafluorure d'uranium ( $UF_6$ ) appauvri en isotope uranium 235 (de 0,2 à 0,3 %). Celui-ci est entreposé après « défluoration » en  $U_3O_8$  sur le site du Tricastin ou sous sa forme hexafluorure.

En effet, la matière appauvrie, quelle que soit sa teneur, contient toujours de l'uranium 235 et est donc toujours valorisable soit directement par ré-enrichissement soit pour une utilisation dans les générations actuelles de réacteurs (combustible mixte U-Pu, catégorie 7). Par ailleurs, les réacteurs à neutrons rapides (RNR) peuvent exploiter l'uranium appauvri grâce au caractère fertile de l'uranium 238. En effet, les RNR permettent d'exploiter les captures fertiles sur l'uranium 238 qui produisent du plutonium 239. Une telle technologie permettrait de régénérer les éléments fissiles consommés : on parle alors d'isogénération.

Enfin, l'uranium appauvri est employé dans des industries non électronucléaires en guise de blindage radiologique ou de contrepois et Orano mène un programme d'étude et de recherche pour évaluer les possibilités d'autres utilisations non électronucléaires (batteries, catalyseurs thermoélectriques, stockage thermo-chimique réversible de chaleur).



Entreposage  
d'uranium appauvri

## Tendance des dernières années



Le stock d'uranium appauvri est en constante augmentation car la technologie actuelle ne permet pas de le consommer en réacteur. Il s'accumule du fait de l'enrichissement continu de l'uranium naturel (catégorie 18).



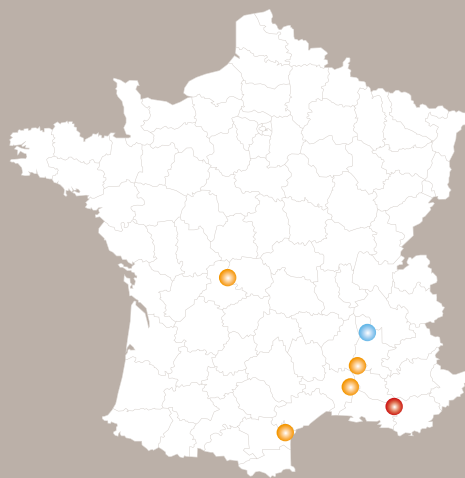
## En chiffres

### ► STOCK ET PRÉVISION

	Stock	Prévisions (cumul)	
Date	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	331 000	471 000	569 000

## *i* En savoir plus

L'uranium appauvri est généré par le procédé d'enrichissement de l'uranium naturel sur le site Orano de **Tricastin** (26) et est principalement entreposé sur le site Orano de **Bessines** (87).



Secteur(s) économique(s)

Électronucléaire

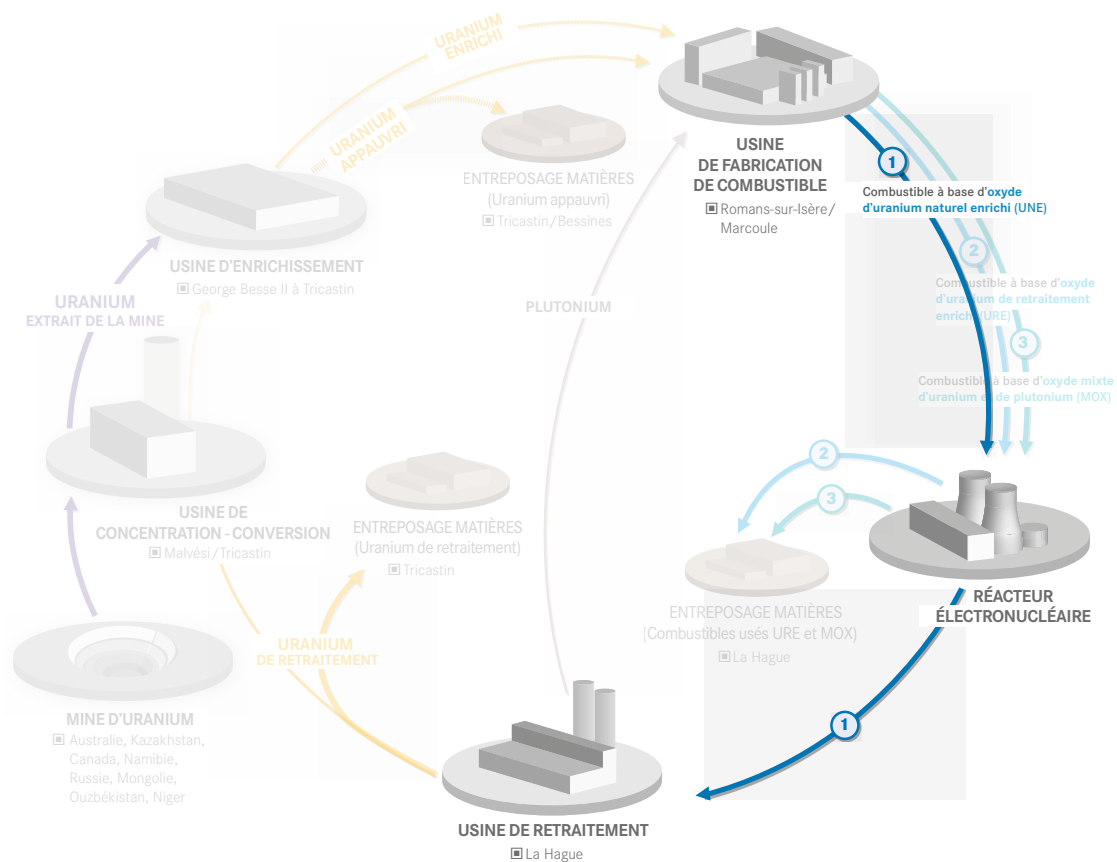
Détenteur(s)

CEA • Framatome • Orano

## 02

# Utilisation et entreposage des combustibles UNE

Combustibles UNE avant utilisation	14
Combustibles UNE en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	15
Combustibles UNE usés, en attente de retraitement	16
Rebuts de combustibles uranium non-irradiés en attente de retraitement	17



La production électronucléaire française ainsi que la propulsion navale sont assurées par des réacteurs à eau légère pressurisée.

Dans un réacteur de ce type, le combustible principal est l'uranium 235 et dans une moindre mesure le plutonium 239. La fission d'un de ces éléments requiert une collision avec un neutron lent, aussi appelé thermique car son énergie est proche de l'énergie d'agitation thermique. Cependant, les neutrons émis lors d'une fission sont rapides : pour que chaque fission engendre une fission sur un autre noyau, il est nécessaire de modérer, c'est-à-dire ralentir, les neutrons. Cette modération est assurée par l'eau du circuit primaire.

Le second rôle de cette eau est de servir de source chaude pour vaporiser l'eau du circuit secondaire. Elle tient donc la place de fluide caloporteur en plus de celle de modérateur neutronique.

## Le principe de réaction en chaîne dans un REP

Dans le cas des REP, chaque fission émet 2 à 3 neutrons rapides. Un modérateur permet de thermaliser (ralentir) ces neutrons. En moyenne, dans le réacteur, un neutron parmi les 2 à 3 émis va déclencher une autre fission. Les autres neutrons vont soit s'échapper du cœur, soit être absorbés par un matériau présent dans le cœur (**voir schéma page 6**).

Deux ans environ séparent l'extraction de l'uranium naturel de l'utilisation en réacteur de cet uranium sous forme de combustible à l'uranium enrichi. Ensuite, à l'issue d'une période de 4 ans en réacteur, le combustible est entreposé avant transport pour une durée de 1 à 3 ans, auquel s'ajoute une durée d'entreposage avant traitement de 5 à 10 ans.



# Combustibles UNE

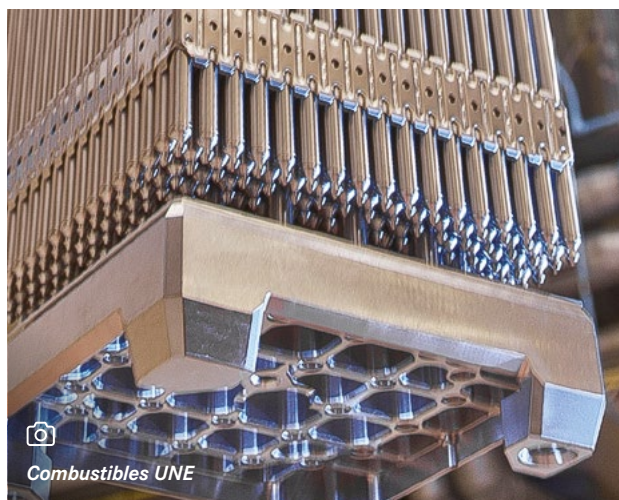
## avant utilisation

### Le combustible principal des réacteurs nucléaires actuels

La poudre d'UO<sub>2</sub> enrichie (catégorie 19) subit un ensemble d'opérations de préparation puis de compactage afin d'obtenir des pastilles qui sont enfin soumises à un traitement thermique de consolidation par frittage. Celles-ci sont placées dans des « crayons » parfaitement étanches en alliage de zirconium. Les crayons sont « assemblés » par lots de 264 pour former un assemblage combustible. Ce dernier contient environ 500 kg de matière nucléaire et constitue la première barrière de sûreté du réacteur.

Le transport des assemblages de combustibles se fait grâce à des moyens de transports agréés pour le transport des matières radioactives, routiers ou ferroviaires. Peu radioactifs avant utilisation, ils peuvent être manutentionnés sans protection radiologique particulière.

Parmi les différents sites de fabrication du combustible UNE, celui de Romans-sur-Isère est le seul en France. Lors de la fabrication du combustible à partir de l'uranium naturel enrichi, des assemblages combustibles UNE peuvent être rebutés. Il s'agit de rebuts de production (catégorie 11), comme il en existe dans toute industrie, dont le client n'a pas accepté la livraison pour des raisons contractuelles ou industrielles.

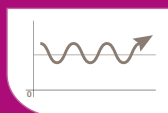


Combustibles UNE

### Tendance des dernières années



Cette catégorie est globalement stable car elle est pilotée par la consommation des réacteurs utilisant ce type de combustible.



### En chiffres

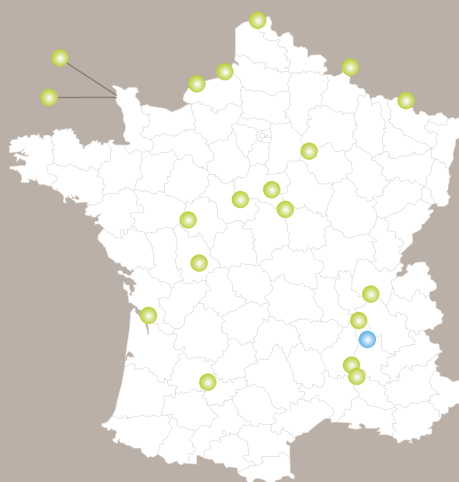
#### ► STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	874	341	286

► Une diminution du stock de combustibles UNE avant utilisation est attendue du fait de l'utilisation de combustibles URE et MOX.

### *i* En savoir plus

Les combustibles produits à **Romans-sur-Isère (26)** sont entreposés dans les piscines des bâtiments combustibles au sein des différents CNPE avant leur utilisation en réacteur.



Secteur(s) économique(s)

Électronucléaire

Détenteur(s)

EDF • Framatome



# Combustibles UNE

## en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires

### Siège de diverses réactions nucléaires

Les assemblages combustibles sont chargés dans le cœur du réacteur au moment où celui-ci est à l'arrêt. Ils produisent, pendant une période de 3 à 4 ans, l'énergie nécessaire à la production d'électricité.

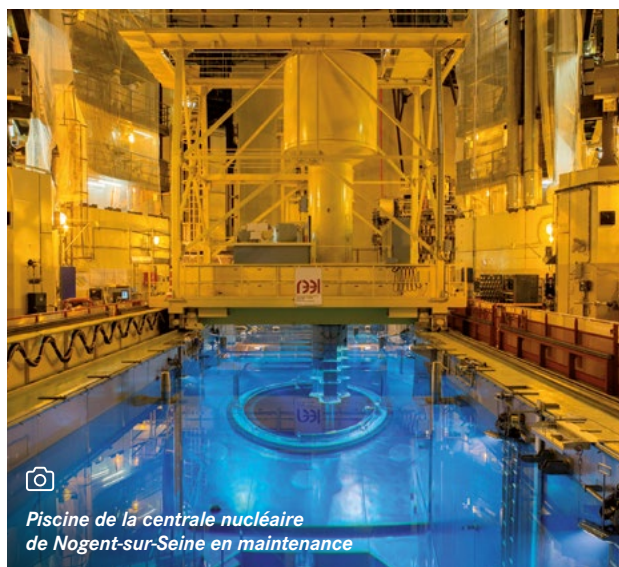
L'énergie produite provient de la fission des noyaux d'uranium 235 contenus dans le combustible UNE. Le phénomène de réaction en chaîne vient d'un équilibre au cours duquel chaque fission engendre une autre fission.

L'énergie dégagée par les fissions successives se traduit sous forme de chaleur et est utilisée pour produire de l'électricité.

En réacteur, la fission conduit donc à une consommation progressive de l'uranium 235 présent dans le combustible UNE et à la production de produits de capture (actinides mineurs et plutonium) et de produits de fission.

En moyenne, le parc électronucléaire consomme environ 1 200 tonnes de combustible par an pour la production d'environ 420 TWh/an.

Après l'irradiation des combustibles UNE, les assemblages sont fortement exothermiques. Pour cette raison, les assemblages de combustibles UNE usés (catégorie 3) ne sont pas transportés directement : ils sont entreposés dans les bâtiments combustibles en piscine de désactivation, au sein desquelles la puissance thermique diminue par décroissance radioactive.



Piscine de la centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine en maintenance

### Tendance des dernières années



Le stock de combustibles UNE en cours d'utilisation est lié au nombre de réacteurs utilisant ce type de combustible et au fonctionnement de ces derniers.

À nombre de réacteurs identiques, le stock reste du même ordre de grandeur d'une année sur l'autre et fluctue en fonction de la production annuelle.



### En chiffres

#### ► STOCK ET PRÉVISION

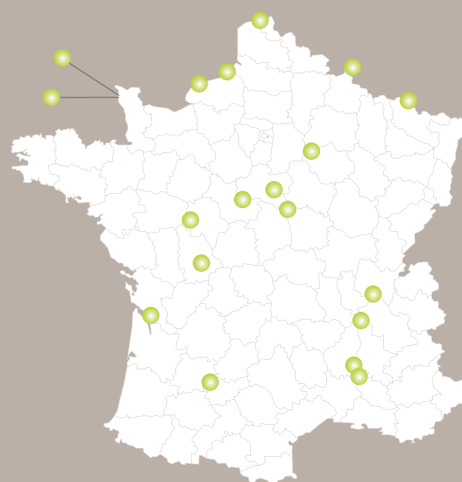
Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	3 490	3 410	2 860

► Une diminution du stock de combustibles UNE en cours d'utilisation est attendue du fait de l'utilisation de combustibles URE et MOX.



### En savoir plus

Ces combustibles sont utilisés dans tous les CNPE français.



Secteur(s) économique(s)

Électronucléaire

Détenteur(s)

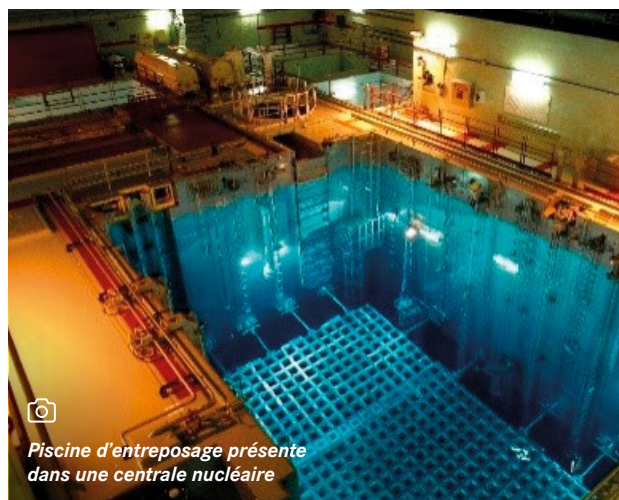
EDF

# Combustibles UNE usés, en attente de retraitement

## Mise en sommeil des combustibles avant leur recyclage

Après 3 à 4 cycles d'utilisation en réacteur, les assemblages de combustibles irradiés contiennent toujours des matières valorisables : une partie de l'uranium initial, qui n'a pas été consommé, ainsi que du plutonium, dont la concentration énergétique est 100 fois supérieure à celle de l'uranium et qui a été produit par capture neutronique. Les assemblages de combustibles sont déchargés du réacteur et entreposés un à deux ans dans la piscine de désactivation du bâtiment combustible de la centrale nucléaire.

Ce délai permet la baisse de la radioactivité et de la puissance thermique des assemblages, et ainsi leur refroidissement, afin d'en faciliter le transport vers l'usine de traitement. Au moment de son déchargement du cœur du réacteur, l'assemblage combustible est fortement exothermique. Après son entreposage en piscine de désactivation, l'assemblage peut être transporté dans un emballage de protection adapté jusqu'à l'usine de retraitement d'Orano à La Hague.

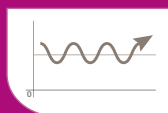


 Piscine d'entreposage présente dans une centrale nucléaire

## Tendance des dernières années



Le stock de combustibles UNE usés est relativement stable dans le temps : en effet, le retraitement des combustibles se fait de manière continue à la suite de leur irradiation.



## En chiffres

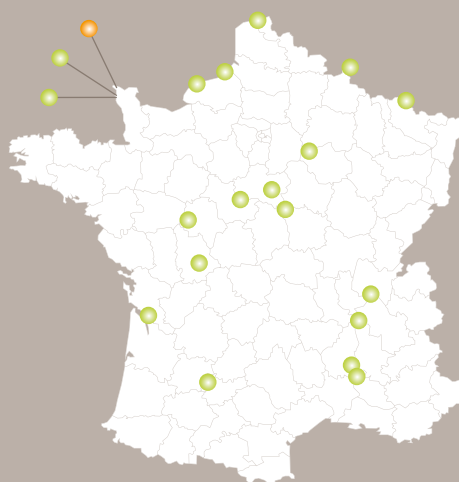
### ► STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	11 500	11 200	8 900

► Une diminution du stock de combustibles UNE usés est attendue entre 2030 et 2040, liée à la moindre utilisation de ce type de combustibles.

## En savoir plus

Les combustibles UNE irradiés sont d'abord refroidis en piscine sur différents CNPE, puis transportés à l'usine Orano de **La Hague** (50) où ils sont entreposés avant leur retraitement.



Secteur(s) économique(s)

Électronucléaire

Détenteur(s)

EDF • Orano

# Rebut de combustibles uranium non-irradiés en attente de retraitement

## Des combustibles non conformes, mais recyclés

Lors de la fabrication du combustible UNE (catégorie 1), des assemblages peuvent être produits et rebutés. Il peut s'agir de rebuts de fabrication tels qu'il en existe dans toute activité de production industrielle, conditionnés principalement sous forme d'assemblages, comme des combustibles UNE dont le client final n'a pas accepté la livraison pour des raisons contractuelles ou industrielles.

Ces rebuts sont généralement repris pour la confection d'un nouvel assemblage et cette catégorie de matière ne s'accumule pas.



## Tendance des dernières années



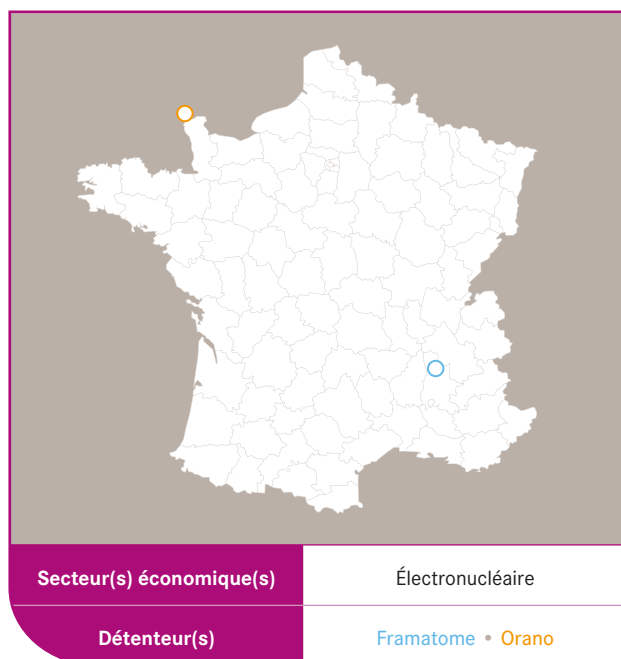
Cette catégorie de matière ne s'accumule pas du fait de la reprise des rebuts pour recyclage.



## En chiffres

### ► STOCK ET PRÉVISION

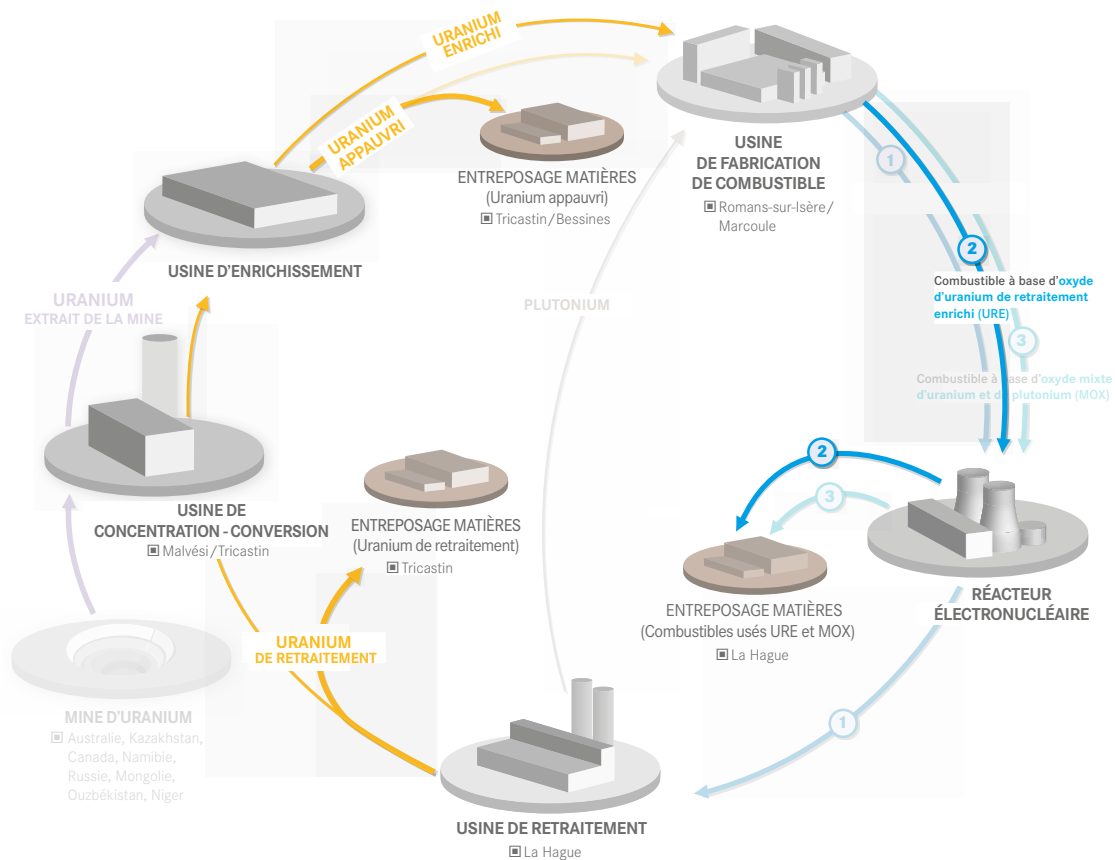
Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	-	0	0



## 03

# Retraitement des combustibles irradiés : de l'URT au combustible URE

Uranium issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques	19
Uranium enrichi issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques	20
Combustibles URE avant utilisation	21
Combustibles URE en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	22
Combustibles URE usés, en attente de retraitement	23



Au cours d'une fission, un noyau d'uranium se scinde en deux noyaux plus légers appelés « produits de fission ». Ce sont des noyaux généralement très instables et fortement radioactifs. Ils représentent une grande variété de radionucléides : on y trouve notamment le strontium 90, l'iode 129 ou le césium 137.

Certains neutrons sont également absorbés par des noyaux d'uranium 238 sans provoquer de fission. Les noyaux concernés peuvent alors transmuter en éléments plus lourds, appelés actinides, qui peuvent eux même être sujets à des captures neutroniques. Parmi les actinides produits, on trouve notamment le plutonium dont l'isotope 239 est une ressource énergétique extrêmement dense. D'autres actinides sont également produits dans de moindres quantités et sont qualifiés de mineurs à ce titre. Il s'agit principalement du neptunium 237, de l'américium (241 à 243) et du curium (242 à 245).

Le taux de production des actinides est de l'ordre de 600 grammes par tonne de combustible irradié, selon le taux de combustion (de l'ordre de 45 GWj/tML en moyenne).

Le procédé PUREX (Plutonium Uranium Reduction Extraction) permet d'extraire les matières valorisables du combustible. Il s'agit du plutonium

formé par capture et de l'uranium initial restant. L'uranium ainsi extrait est appelé uranium de retraitement et son isotopie est légèrement différente de celle d'un uranium naturel.

Les assemblages sont d'abord cisailés, puis le combustible est dissous dans une solution d'acide nitrique, laissant la gaine vide sous forme de coques. Cette solution va ensuite subir une extraction liquide-liquide au cours de laquelle le plutonium et l'uranium seront transférés dans un solvant organique. Le plutonium est ensuite séparé de la solution uranium-plutonium par réduction. Enfin, l'uranium et le plutonium sont purifiés et concentrés avant d'être chimiquement transformés dans une forme entreposable.

## Gestion des déchets du procédé

La solution de produits de fission dont l'uranium et le plutonium ont été extraits est calcinée, vitrifiée puis conditionnée en colis de type CSD-V pour entreposage, en attendant leur stockage définitif.

Les coques sont compactées en galettes pour un conditionnement en colis de type CSD-C. Ils sont également entreposés en attendant leur stockage définitif.



# Uranium issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques

## De l'uranium recyclé

L'usine de retraitement d'Orano à La Hague est le siège d'opérations de séparation visant à valoriser les matières potentiellement réutilisables, tel que l'uranium ou le plutonium contenus dans le combustible nucléaire irradié (catégorie 3). Ces matières représentent 96 % du combustible irradié. Le procédé PUREX permet de séparer l'uranium et le plutonium des produits de fission par une méthode d'extraction liquide-liquide. L'uranium ainsi extrait est appelé uranium de retraitement (URT).

L'URT a des caractéristiques comparables à celles de l'uranium naturel. Il contient encore de l'ordre de 0,9 % d'isotope 235, malgré une composition isotopique plus complexe due notamment à la présence d'uranium 234 et 236.

L'uranium de retraitement (URT) est entreposé sur le site Orano du Tricastin sous forme d' $U_3O_8$ .

Entre 1994 et 2013, environ un tiers de l'uranium de retraitement était enrichi puis consommé dans les quatre réacteurs de la centrale de Cruas sous forme de combustible URE (catégorie 4). Les deux tiers restants servaient à constituer une réserve pour un emploi dans certains réacteurs.

EDF a décidé de reprendre, à partir de 2023, le recyclage de l'URT dans certains de ses réacteurs. Cette reprise a pour objectif d'utiliser au mieux les matières nucléaires issues du traitement du combustible UNE usé et de stabiliser puis réduire à terme le stock d'URT.



Roue du dissolvant  
de l'usine de La Hague

## Tendance des dernières années

En l'absence de valorisation depuis 2013 et jusqu'en 2022 dans des réacteurs, le stock d'uranium issu de retraitement des combustibles usés était en augmentation du fait de la production courante par le retraitement des combustibles UNE usés (catégorie 3).



## En chiffres

### STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	34 640	29 900	17 700

EDF a décidé de reprendre la valorisation de l'uranium issu du retraitement des combustibles usés à partir de 2023 et dans un nombre adapté de réacteurs. Selon la stratégie actuelle d'EDF, ce stock devrait désormais baisser à l'avenir.

## En savoir plus

L'uranium de retraitement est entreposé sur les sites Orano de **Tricastin** (26) et de **La Hague** (50).



Secteur(s) économique(s)

Électronucléaire

Détenteur(s)

Orano

# Uranium enrichi issu du retraitement des combustibles usés, sous toutes ses formes physico-chimiques

## Une isotopie défavorable menant à des taux d'enrichissement élevés

Comme l'uranium naturel (catégorie 18), l'uranium de retraitement (catégorie 21) n'est pas exploitable dans son isotopie initiale. Il est donc nécessaire d'augmenter sa teneur en uranium 235 pour une consommation en REP.

La présence d'uranium 236, absorbant neutronique agissant comme un poison à la fission nucléaire, impose d'enrichir à des teneurs supérieures à celles nécessaires pour de l'uranium naturel, de manière à compenser la perte de réactivité.

Après une interruption de la filière entre 2013 et 2023, l'enrichissement de l'uranium de retraitement (URT) avait cessé et le stock était nul. EDF ayant décidé de reprendre la valorisation de l'URT, celui-ci est désormais enrichi dans les seules installations disponibles à ce jour, situées en Russie, avant de pouvoir disposer, le cas échéant, d'une filière française ou européenne. Une première livraison d'uranium de retraitement enrichi a eu lieu et Framatome en détient à fin 2022. Ce stock servira à la fabrication d'assemblages combustibles.

L'enrichissement de l'uranium de retraitement génère, au même titre que celui de l'uranium naturel, de l'uranium appauvri (catégorie 22).

En revanche, à cause de sa radioactivité, celui-ci est généralement incompatible avec les usages non nucléaires pour lesquels l'uranium appauvri est communément employé.



## Tendance des dernières années



EDF a décidé de reprendre le recyclage de l'URT en 2023. À ce titre, une livraison d'uranium de retraitement enrichi (URE) a eu lieu en novembre 2022.

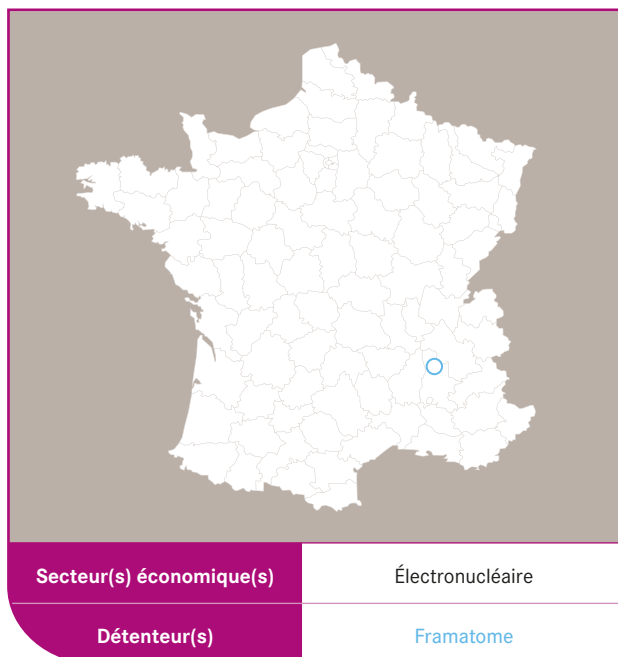


## En chiffres

### ► STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	22	-	-

► Le stock d'uranium de retraitement enrichi n'a pas fait l'objet de prévision malgré la reprise de la filière. Cette matière étant immédiatement convertie sous forme de combustible, il est difficile de prédire les stocks avant la reprise de la filière. Le stock d'uranium de retraitement enrichi devrait néanmoins demeurer faible du fait de la fabrication de combustibles au fur et à mesure de sa production.





# Combustibles URE avant utilisation

## Un combustible issu du recyclage

L'URE (catégorie 20) produit par l'enrichissement de l'URT (catégorie 21) est ensuite utilisé pour la fabrication de nouveaux assemblages combustibles, dans le cas de la France dans l'usine FBFC de Romans-sur-Isère. Tous les combustibles URE produits ont été consommés entre 1994 et 2013. Suite à l'arrêt de la filière entre 2013 et 2023, la production de combustible URE neuf a cessé et le stock est nul. La reprise de la filière URT par EDF va faire évoluer ce stock dans le futur.

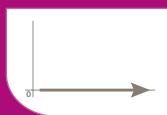


Centrale nucléaire  
de Cruas-Meysse

## Tendance des dernières années



Le stock de combustibles URE neufs est stabilisé à une quantité nulle depuis 2013.



## En chiffres

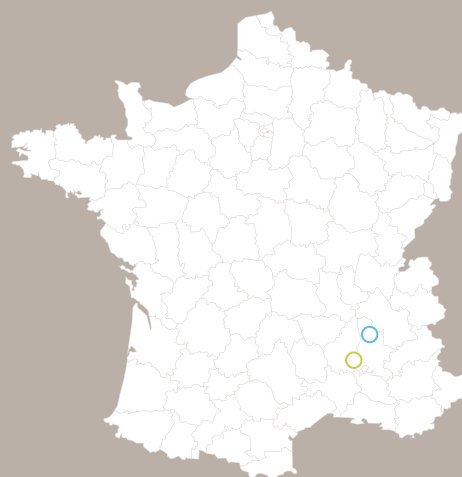
### ► STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	-	80	122

► Avec la reprise de la filière URE, une production de combustibles URE est attendue.

## *i* En savoir plus

Les combustibles neufs seront entreposés en bâtiment combustible sur le site d'EDF de **Cruas** (07), où ils seront utilisés.



Secteur(s) économique(s)

Électronucléaire

Détenteur(s)

EDF • Framatome

# Combustibles URE

## en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires

### Consommation de l'uranium recyclé

En France, le combustible URE a été utilisé dans quatre réacteurs de Cruas (900 MWe), après autorisation à cet effet. Jusqu'en 2009, le combustible URE était utilisé dans deux tranches d'EDF (réacteurs 3 et 4). Entre 2010 et 2012, les quatre tranches étaient alimentées en URE. En 2013, l'utilisation de combustible URE a été suspendue pour des raisons industrielles, économiques et environnementales. En conséquence, il n'y a plus de combustible URE en cours d'utilisation dans les centrales à ce jour.

EDF a décidé récemment de reprendre, à partir de 2023, le recyclage de l'uranium de retraitement (catégorie 21) dans certains de ses réacteurs afin d'utiliser au mieux les matières nucléaires issues du traitement des combustibles URE usés (catégorie 3) et de stabiliser puis réduire, à terme, le stock d'uranium de retraitement actuellement entreposé sur le site d'Orano du Tricastin. EDF prévoit également d'ajouter trois réacteurs de 1 300 MWe au programme de relance de la filière URE.

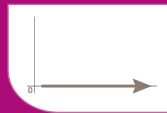
L'emploi d'uranium de retraitement enrichi en réacteur permettrait à EDF d'économiser 20 à 25 % de ses besoins en uranium naturel (catégorie 18), sachant qu'aujourd'hui l'économie réalisée grâce à la filière MOX (catégories 7-8-9) est de 10 %.



### Tendance des dernières années



Le stock de combustible URE en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires est stabilisé à une quantité nulle depuis 2013.

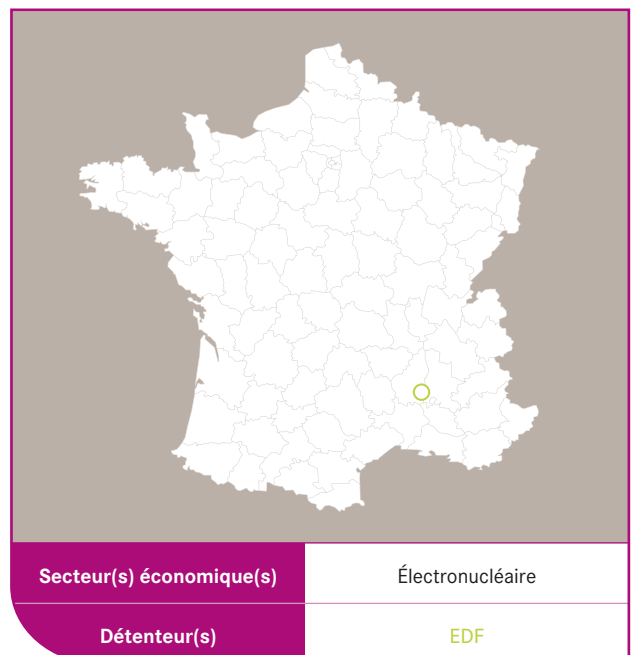


### En chiffres

#### ► STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	-	805	1 220

► Avec la reprise de la filière URE, une consommation de combustibles URE est attendue.



# Combustibles URE usés, en attente de retraitement

## Utilisable par une future génération de réacteurs

Bien que l'usine Orano de La Hague soit autorisée à recevoir, entreposer et traiter ce type de combustibles depuis février 2005, le recyclage des matières issues des combustibles à l'URE usés (Pu et URT) nécessiterait des opérations plus complexes et l'intérêt technico-économique n'est pas jugé suffisant pour un deuxième recyclage dans les réacteurs actuels.

Après cette seconde vie, il est donc entreposé en piscine dans l'attente de nouveaux recyclages, réalisables dans une nouvelle génération de réacteurs.

La politique énergétique française prévoit la mise en place d'un multi-recyclage en REP (MRREP) pour permettre de recycler la totalité des combustibles usés au sein d'un parc REP, avant le déploiement de réacteurs de prochaine génération. Cette stratégie vise à réduire la quantité et la nocivité des déchets radioactifs à vie longue.



Piscine d'entreposage  
d'Orano de La Hague

## Tendance des dernières années



Le stock de combustibles URE usés est stable depuis 2013 puisque EDF a cessé l'exploitation des combustibles URE.



## En chiffres

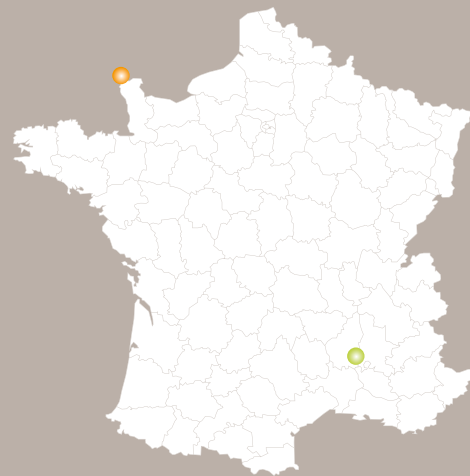
### ► STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	628	815	2 736

► Avec la reprise de la filière URE, une production de combustibles URE usés est attendue.

## *i* En savoir plus

Les stocks de combustibles URE irradiés se situent à l'usine Orano de **La Hague** (50) dans leur grande majorité, le reste étant entreposé sur le site d'EDF de **Cruas** (07).



Secteur(s) économique(s)

Électronucléaire

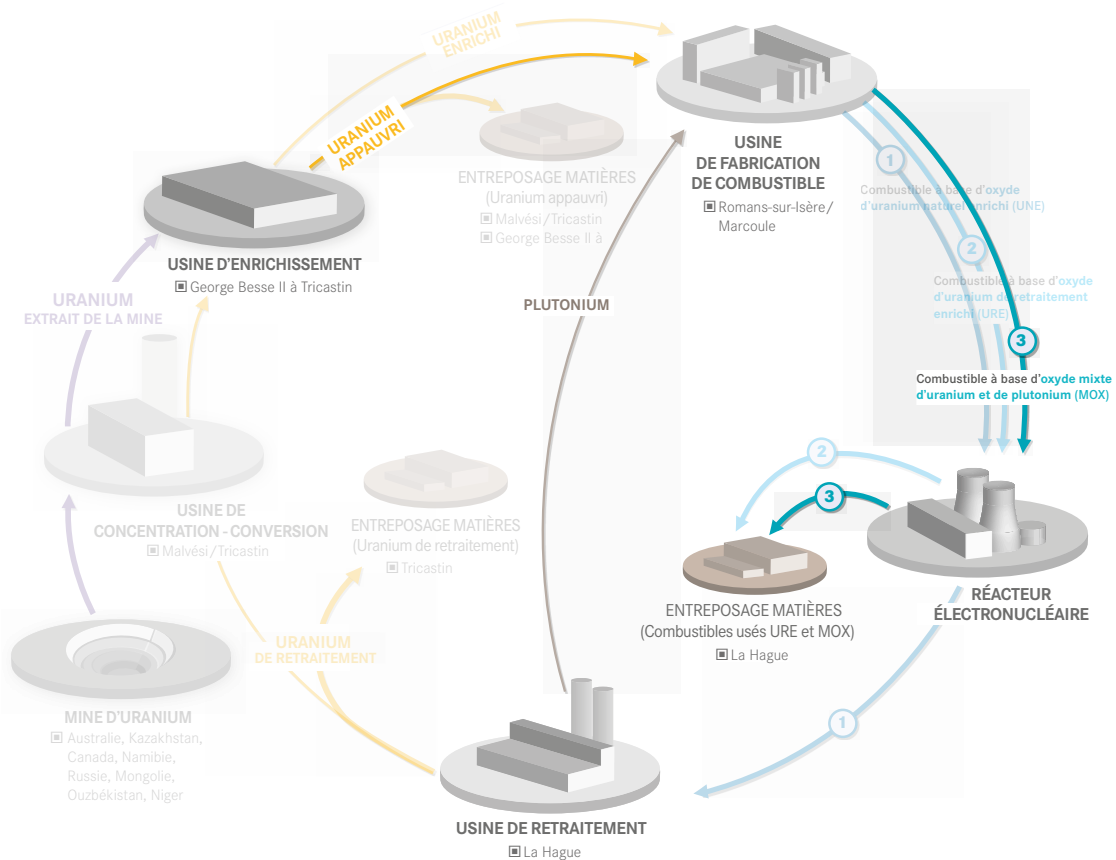
Détenteur(s)

EDF • Orano

## 04

# Retraitement du plutonium : de la séparation aux combustibles mixtes U-Pu

Plutonium séparé non irradié sous toutes ses formes physico-chimiques	25
Combustibles mixtes U-Pu avant utilisation ou en cours de fabrication	26
Combustibles mixtes U-Pu en cours d'utilisation dans les centrales	27
Combustibles mixtes U-Pu usés, en attente de retraitement	28
Rebuts de combustibles mixtes U-Pu non-irradiés en attente de retraitement	29



En plus de l'uranium de retraitement, le procédé PUREX sépare le plutonium des combustibles irradiés. Le plutonium est un élément fissile utilisé dans les combustibles mixtes à hauteur de 8,5 % environ, le reste étant constitué d'uranium appauvri. Les combustibles mixtes, aussi appelés « MOX », sont historiquement une alternative à la surgénération pour maîtriser le stock français de plutonium. Lors de la combustion, une partie de l'uranium 238 est sujette à des captures neutroniques, produisant ainsi du plutonium fissile supplémentaire.

L'emploi de ces combustibles permet de valoriser le plutonium généré par les réacteurs du parc électronucléaire et ainsi réduire la part de déchets à vie longue tout en réduisant le besoin en ressources naturelles et donc les impacts environnementaux. L'utilisation dans les réacteurs du plutonium issu du traitement des combustibles irradiés permet de limiter le stock courant de plutonium qui constitue une matière sensible.

# Plutonium séparé non irradié

## sous toutes ses formes physico-chimiques

### Un élément très énergétique, introuvable dans la nature

Un combustible usé à l'uranium de type eau légère (catégorie 3) contient environ 1 % de plutonium (en masse). Le plutonium n'est d'ailleurs produit que par capture neutronique sur de l'uranium : sa génération requiert un réacteur nucléaire.

De même que pour l'URT (catégorie 21), le retraitement des combustibles usés à l'usine Orano de La Hague permet de séparer le plutonium produit dans les réacteurs nucléaires par le procédé PUREX (procédé de séparation de l'uranium résiduel et du plutonium des combustibles irradiés). Celui-ci est ensuite valorisé au titre de ses propriétés fissiles. En effet, une fois mis en solution, extrait et séparé des autres matières contenues dans le combustible usé, le plutonium est purifié et conditionné sous forme stable de poudre d'oxyde  $PuO_2$ .

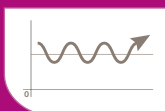
Le plutonium est utilisé dans le combustible MOX (mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium, catégorie 7) pour son fort potentiel énergétique, environ 100 fois supérieur à celui de l'uranium.



### Tendance des dernières années



Le stock de plutonium est habituellement stable puisqu'il est valorisé au fur et à mesure de sa production.



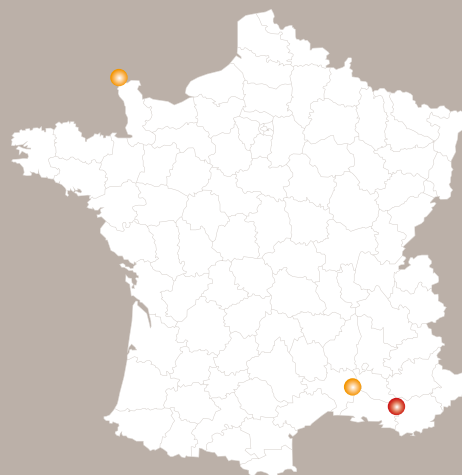
### En chiffres

#### ► STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	70	59	43

### *i* En savoir plus

Le plutonium séparé est principalement entreposé à l'usine Orano de La Hague, et dans une moindre mesure sur le site de **Mélox à Marcoule** (30) où est fabriqué le combustible MOX. Le CEA détient également un stock de plutonium sur le site de **Cadarache** (13).



Secteur(s) économique(s)

Électronucléaire

Détenteur(s)

CEA • Orano



# Combustibles mixtes U-Pu

## avant utilisation ou en cours de fabrication

### Valorisation des combustibles irradiés du parc actuel

Le plutonium séparé (catégorie 17) est utilisé pour fabriquer, dans l'usine Mélox de Marcoule, du combustible MOX (mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium), utilisé aujourd'hui dans les REP de 900 MWe.

Le combustible mixte U-Pu est constitué d'environ 8,7 % de plutonium et 91,5 % d'uranium appauvri provenant de l'enrichissement de l'uranium naturel.


La fabrication du combustible MOX est similaire à celle des assemblages UNE et URE. La présence de plutonium implique cependant quelques différences dans le procédé.

La préparation de la poudre d'oxyde de plutonium est faite par deux mélanges successifs (procédé MIMAS : Micronized MASTerblend). Le premier mélange à 30 % de Pu sert à obtenir le vecteur isotopique de la fabrication. Le second mélange sert à ajuster la teneur par « zonage » (position dans l'assemblage pilotant la teneur en plutonium).

Les opérations de préparation de poudre, de pastillage et de crayonnage sont faites en boîtes à gants. Les assemblages étant constitués de crayons de différentes teneurs en plutonium (« zonage »), une identification des crayons est nécessaire.

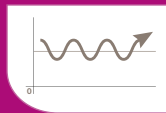
Le site de Melox fabrique ainsi les MOX qui sont utilisés depuis 1972 dans des réacteurs à eau sous pression (REP) et eau bouillante (REB) de centrales nucléaires de différents pays (France, Allemagne, Belgique, Suisse, Japon, États-Unis, Pays-Bas, etc.).



 Crayons de combustibles mixtes U-Pu

### Tendance des dernières années

➤ Le stock de combustibles MOX est relativement stable dans le temps car la production de combustible MOX se fait au même taux que leur mise en réacteur.



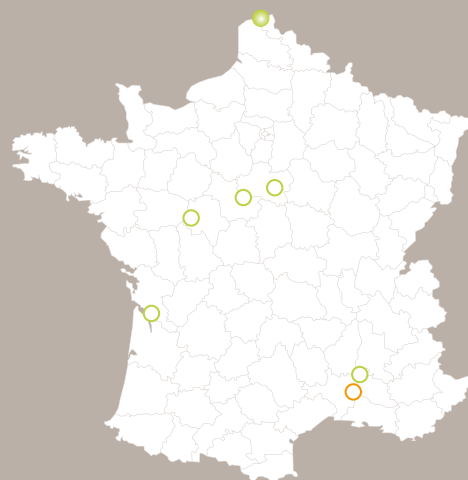
### En chiffres

#### ► STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	25	44	50

### En savoir plus

Les combustibles MOX neufs sont entreposés sur les sites des CNPE habilités à les utiliser en réacteur.



Secteur(s) économique(s)

Électronucléaire

Détenteur(s)

EDF • Orano



# Combustibles mixtes U-Pu en cours d'utilisation dans les centrales

## Recyclage en REP et économie de matière première

24 réacteurs de 900 MWe sont autorisés à recevoir du combustible MOX. Depuis 1987, environ 5 000 assemblages MOX ont été chargés en réacteur (la plupart après 1997), ce qui correspond au recyclage d'environ 170 tonnes de plutonium (catégorie 17) et représente une économie de plus de 16 000 tonnes d'uranium naturel (catégorie 18).

Actuellement, pour les réacteurs d'EDF, la consommation annuelle d'uranium naturel est de l'ordre de 1 200 tonnes et celle de combustibles MOX de 100 à 120 tonnes, soit une économie annuelle d'environ 900 tonnes d'uranium naturel.

Ce combustible est chargé dans les réacteurs adaptés, à hauteur de 30 % d'assemblages combustibles MOX dans un cœur, le reste du cœur du réacteur étant constitué d'assemblages combustibles UNE (catégorie 1).

Au fur et à mesure de la combustion, une partie de l'uranium 238 présent dans le combustible est transmutée en plutonium 239 sous l'effet de l'irradiation, réduisant d'autant le besoin en enrichissement.

Bien que les combustibles MOX soient destinés aujourd'hui à 24 réacteurs de 900 MWe, EDF envisage de « moxer » certains réacteurs de 1300 MWe.

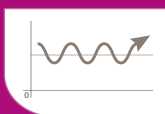


Centrale nucléaire  
de Saint-Laurent-des-Eaux

## Tendance des dernières années



Le stock de combustibles MOX en cours d'utilisation fluctue sans tendance nette et dépend des centrales en fonctionnement au 31 décembre de chaque année.



## En chiffres

### ► STOCK ET PRÉVISION

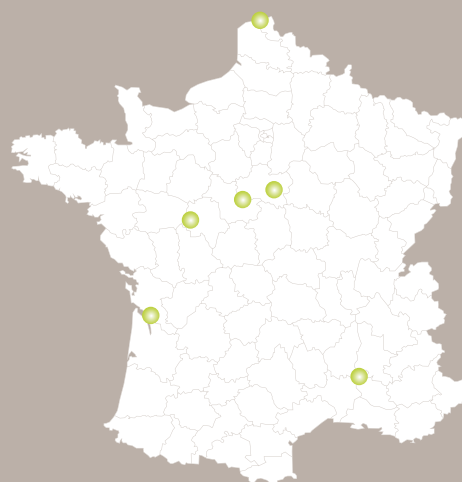
Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	190	441	503

► Une augmentation du stock de combustibles MOX en cours d'utilisation est attendue dans les prochaines décennies, en lien avec le nombre de tranches autorisées à en consommer.



### En savoir plus

Parmi les 24 réacteurs autorisés à utiliser du combustible MOX, 22 répartis sur 6 CNPE en consomment effectivement.



Secteur(s) économique(s)

Électronucléaire

Détenteur(s)

EDF

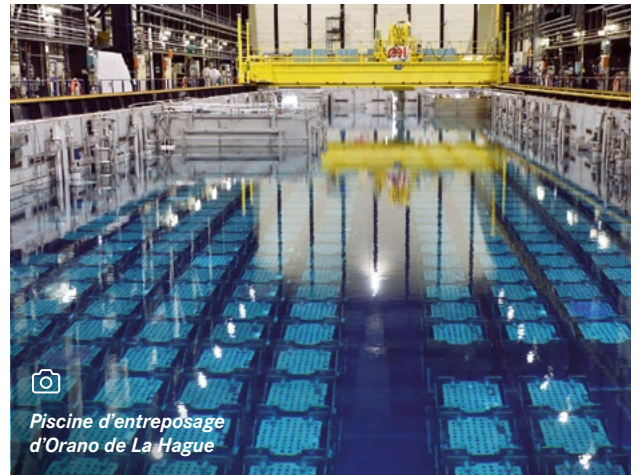
# Combustibles mixtes U-Pu usés, en attente de retraitement

## Vers une valorisation des assemblages MOX irradiés

Les combustibles MOX irradiés sont entreposés à l'usine Orano de La Hague après quelques années de refroidissement en piscine sur CNPE afin d'être transportables dans les emballages de transport adaptés. Ils ne sont pas traités aujourd'hui et restent entreposés dans l'attente de la valorisation future des matières qu'ils contiennent.

Même si techniquement le traitement des combustibles MOX irradiés est possible à l'usine Orano de La Hague, les caractéristiques de la matière contenue dans ces assemblages sont telles que le traitement des MOX à un niveau industriel nécessite d'être étudié. Par ailleurs, si les matières contenues dans les assemblages MOX usés sont plus adaptées pour une utilisation dans des réacteurs de technologie RNR, cette dernière ne se sera pas disponible à l'échelle industrielle d'ici la fin du siècle.

Sans attendre la disponibilité de RNR, des études de valorisation dans les réacteurs actuels de type REP des matières contenues dans les assemblages MOX usés sont déjà en cours, en cohérence avec les exigences de la Programmations pluriannuelles de l'énergie (PPE) actuelle.

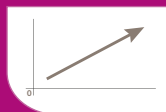


 Piscine d'entreposage d'Orano de La Hague

## Tendance des dernières années



Le stock de combustibles MOX irradiés est en constante augmentation du fait de l'absence de retraitement.



## En chiffres

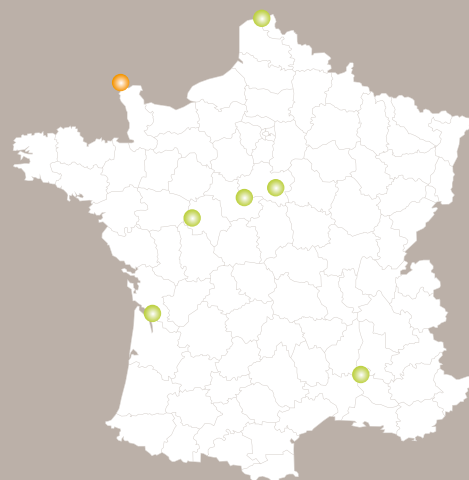
### ► STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	2 460	2 980	4 010

► Une augmentation de la production de combustibles MOX est attendue au cours des prochaines décennies, en lien avec le nombre de tranches autorisées à en consommer.

## En savoir plus

Les combustibles MOX irradiés sont entreposés sur les sites des différents CNPE habilités à en consommer avant d'être expédiés à l'usine Orano de **La Hague** (50), où ils seront entreposés en attendant leur retraitement pour une utilisation ultérieure.



Secteur(s) économique(s)

Électronucléaire

Détenteur(s)

EDF • Orano

# Rebuts de combustibles mixtes U-Pu non-irradiés en attente de retraitement

## Des combustibles non conformes mais au potentiel énergétique élevé

Lors de la fabrication du combustible MOX (catégorie 7), des assemblages peuvent être produits et rebutés. Il peut s'agir de rebuts de fabrication tels qu'il en existe dans toute activité de production industrielle, conditionnés sous forme de pastilles ou d'assemblages, comme des combustibles MOX dont le client final n'a pas accepté la livraison pour des raisons contractuelles ou industrielles.

La fabrication du combustible mixte U-Pu passe par la production d'un mélange de poudres d'oxyde de plutonium et d'oxyde d'uranium. Cette étape permet de recycler certains rebuts de fabrication. Les rebuts qui ne peuvent être recyclés directement sont envoyés à l'usine Orano de La Hague en vue de leur traitement. Le taux de rebut représente de l'ordre de 3 à 5 % à Mélox.

Bien que le traitement des rebuts de combustibles mixtes soit démontré faisable, il n'est pas effectif à 100 % aujourd'hui, contrairement à celui des rebuts de combustible UNE (catégorie 11).



Pastilles de combustibles mixtes U-Pu

## Tendance des dernières années



Le stock de rebuts de combustibles MOX est en constante augmentation du fait de l'absence de retraitement actuellement.



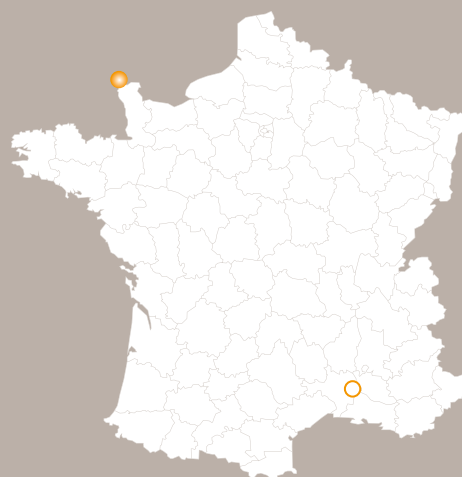
## En chiffres

### ► STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	359	328	377

## *i* En savoir plus

Les rebuts de combustibles MOX sont entreposés à l'usine Orano de **La Hague** (50) en attendant leur recyclage.



Secteur(s) économique(s)

Électronucléaire

Détenteur(s)

Orano

## 05

## Matières valorisables dans une filière thorium

Thorium, sous la forme de nitrates et d'hydroxydes

31

Matières en suspension (sous-produits du traitement des minerais de terres rares)

32



Bien que la technologie actuelle ne le permette pas, l'usage de thorium comme combustible nucléaire est possible. Le thorium 232 est en effet un isotope fertile et abondant. Un cycle du combustible au thorium permettrait de générer une moindre quantité de déchets à vie longue car il produirait peu de plutonium et d'actinides mineurs.

Le thorium peut également servir à la production de plomb 212, utilisé comme source pour l'alphathérapie ciblée par Orano.



# Thorium, sous la forme de nitrates et d'hydroxydes

## Le thorium : alternative énergétique à l'uranium

Le recours à un autre élément naturel que l'uranium afin d'alimenter un parc nucléaire est théoriquement possible. Il s'agit du thorium. En effet, bien que non fissile, celui-ci est fertile car il se transforme dans le cœur d'un réacteur, par capture d'un neutron, en uranium 233.

Quelques pays réfléchissent à l'utilisation de ce combustible, dont l'Inde qui en possède des réserves très importantes. Les avantages théoriques des réacteurs au thorium sur les réacteurs REP du parc électronucléaire français sont une moindre production d'actinides mineurs et l'absence de production de plutonium, ce qui est un avantage dans la gestion à long terme des déchets radioactifs. Cependant, l'atteinte d'une maturité industrielle de la « filière thorium » nécessiterait de forts investissements de R&D pour un intérêt potentiel sur le long terme.

## Le thorium en France : produit valorisable de l'extraction de terres rares

Le thorium se présente sous la forme d'hydroxyde de thorium ou de nitrate de thorium. Dans le cadre de ses activités de traitement de minerai de terres rares, la société Solvay a produit :

- entre 1970 et 1987, un composé issu du traitement en voie chlorure de la monazite : l'hydroxyde brut de thorium (HBTh), éventuellement valorisable (voir ci-dessus) ;
- jusqu'en 1994, du nitrate de thorium, issu du traitement en voie nitrate de la monazite.

L'inventaire d'Orano, quant à lui, constitue la matière de base pour les applications en cours d'Orano Med dans le secteur médical.

## Tendance des dernières années



Le stock de thorium est relativement stable dans le temps du fait de l'absence de production et d'une valorisation lente.



## En chiffres

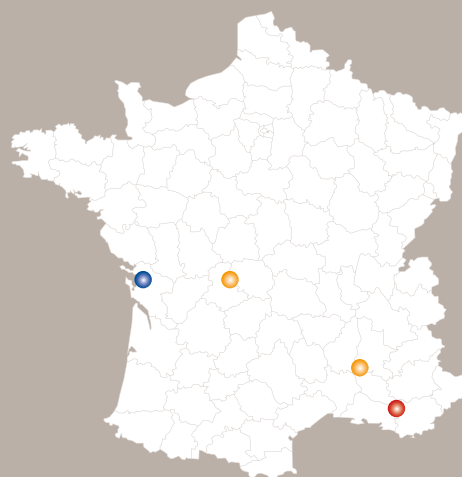
### ► STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	8 510	8 020	7 540



## En savoir plus

Le thorium est entreposé sur le site de l'usine de Solvay de **La Rochelle** (17), sur le site CEA de **Cadarache** (13) et sur les sites d'Orano de **Bessines** (87) et du **Tricastin** (26).



Secteur(s) économique(s)

Électronucléaire  
Non-électronucléaire

Détenteur(s)

CEA • Orano • Solvay

# Matières en suspension

## (sous-produits du traitement des minerais de terres rares)

### Matières issues de l'extraction de terres rares

Les matières en suspension (MES) issues du traitement de neutralisation des effluents chimiques produits sur l'usine de Solvay à La Rochelle (17) contiennent en moyenne 25 % de sous-produits valorisables. La valorisation de ces matières porte sur leur contenu en terres rares, en thorium et en uranium.

Bien qu'elles ne soient pas encore mises en œuvre industriellement, des pistes sont envisagées pour valoriser ces éléments, notamment dans des secteurs non électronucléaires. Par exemple, en ce qui concerne le thorium, dans le domaine médical pour le traitement de cancers en radio-immunothérapie alpha, le plomb 212 issu de la désintégration des thoriums 232 et 228 est greffé à un anticorps qui reconnaît spécifiquement certaines cellules cancéreuses. Le rayonnement alpha du plomb 212 permet alors de détruire ces cellules.

L'oxyde de thorium peut également être utilisé dans des verres à fort indice de réfraction par exemple.



Entreposage de résidu Solide Banalisé RSB (Solvay)

### Tendance des dernières années



Le stock de matières en suspension commence à diminuer du fait de leur évacuation vers un centre de déchets agréé.



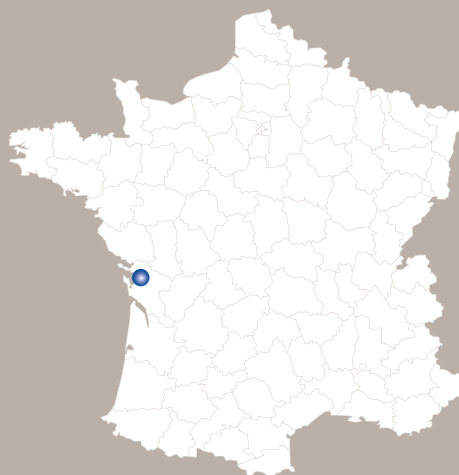
### En chiffres

#### ► STOCK ET PRÉVISION

	Stock	Prévisions (cumul)	
Date	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	5	0	0

### *i* En savoir plus

Les matières en suspension issues du traitement des minerais de terres rares sont entreposées sur le site de l'usine de Solvay de **La Rochelle** (17).



Secteur(s) économique(s)

Non-électronucléaire

Détenteur(s)

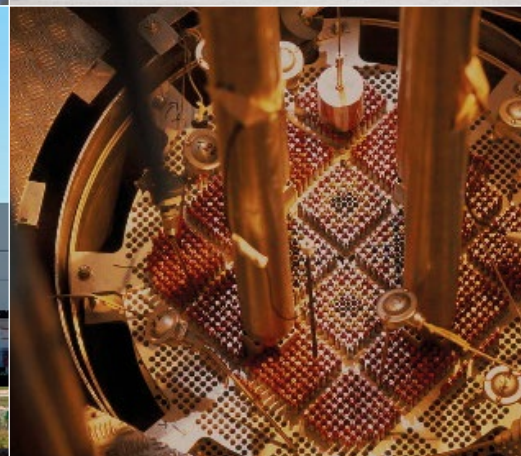
Solvay



## 06

## Autres combustibles hors filière électronucléaire

Combustibles des réacteurs de recherche avant utilisation	34
Combustibles en cours d'utilisation dans les réacteurs de recherche	35
Combustibles usés RNR, en attente de retraitement	36
Autres combustibles usés civils	37
Combustibles usés de la Défense Nationale	38
Autres matières	39



Ce chapitre concerne les combustibles nucléaires dédiés à la recherche, aux activités de défense et aux réacteurs à neutrons rapides historiques. De nombreux réacteurs sont concernés, certains en fonctionnement et d'autres historiques, dont les combustibles usés n'ont à ce jour pas fait l'objet d'un traitement.

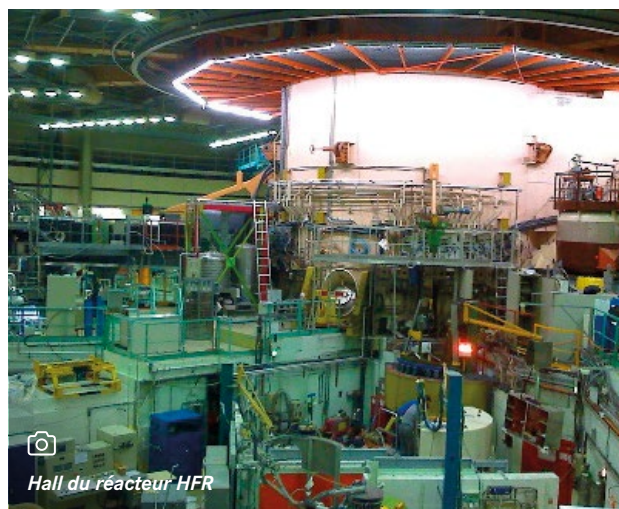
# Combustibles des réacteurs de recherche avant utilisation

## Le nucléaire dans le domaine des sciences : focus sur l'institut Laue-Langevin

Actuellement, cette catégorie de matières concerne exclusivement les stocks de combustibles neufs du réacteur à haut flux (RHF) de l'institut Laue-Langevin (ILL), situé à Grenoble.

Il s'agit d'un réacteur de recherche d'une puissance de 58 MW, modéré à l'eau lourde, utilisé pour produire des faisceaux de neutrons de grande intensité. Le combustible est constitué d'uranium hautement enrichi, au-delà des 5 % de l'industrie électronucléaire.

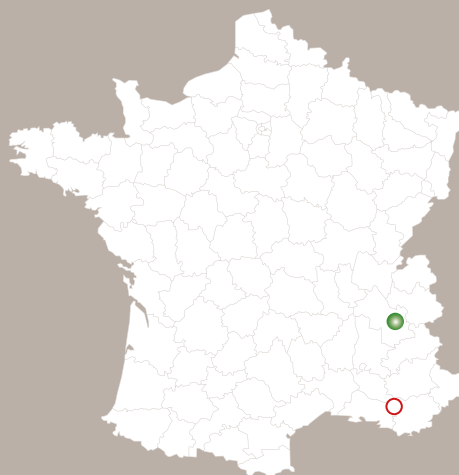
La mise en service du réacteur d'irradiation Jules Horowitz (RHJ), qui devrait intervenir au début de la décennie prochaine, va conduire à la fabrication d'éléments combustibles du cœur à l'usine CERCA de Romans-sur-Isère. Ceux-ci seront entreposés sur le site de Cadarache dans l'attente de leur utilisation en réacteur.



Hall du réacteur HFR

### *i* En savoir plus

Les combustibles neufs destinés à la recherche sont exclusivement entreposés à l'institut Laue-Langevin à **Grenoble** (38), ils sont dédiés au réacteur à haut flux (RHF).



Secteur(s) économique(s)

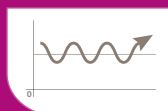
Recherche

Détenteur(s)

CEA • ILL

## Tendance des dernières années

➤ Le stock de combustibles neufs des réacteurs de recherche est stable dans le temps car leur production suit leur consommation.



## En chiffres

### ► STOCK ET PRÉVISION

	Stock	Prévisions (cumul)	
Date	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	0,06	0,027	0

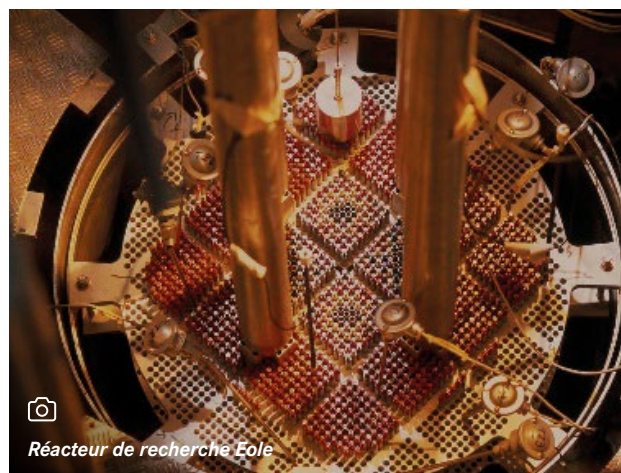
# Combustibles en cours d'utilisation dans les réacteurs de recherche

## Le nucléaire dans le domaine des sciences : focus sur le CEA

Actuellement, cette catégorie de matières concerne essentiellement les stocks de combustibles en cours d'utilisation par le CEA et par l'institut Laue-Langevin (ILL) sur les sites de Cadarache et de Grenoble.

L'objectif du réacteur d'essais Cabri, dernier réacteur expérimental du CEA encore en fonctionnement, est de reproduire un fonctionnement en situation accidentelle d'un réacteur industriel afin d'étudier le comportement du combustible dans ce type de situations hypothétiques.

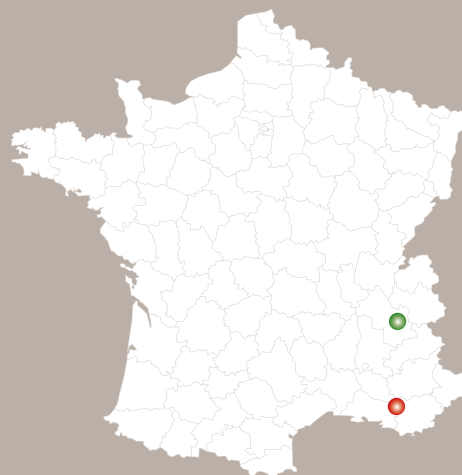
Un nouveau réacteur de recherche, le réacteur d'irradiation Jules Horowitz (RJH), sera mis en service au début de la décennie prochaine et servira à l'irradiation de nouveaux combustibles et matériaux nucléaires en vue de leur emploi ultérieur en réacteur électrogène.



### *i* En savoir plus

Les combustibles en cours d'utilisation dans les réacteurs de recherche se situent exclusivement sur les sites nucléaires de recherche en fonctionnement.

À fin 2022, cela concerne le réacteur à haut-flux de l'institut Laue-Langevin à **Grenoble** (38) et le centre CEA de **Cadarache** (13).



Secteur(s) économique(s)

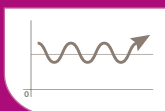
Recherche

Détenteur(s)

CEA • ILL

## Tendance des dernières années

➤ Le stock de combustible de recherche en cours d'utilisation ne suit pas de tendance particulière et dépend fortement du nombre de réacteurs de recherche en service au 31 décembre de chaque année.



## En chiffres

### ► STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	1	0	0,1



# Combustibles usés RNR, en attente de retraitement

## Héritage de la recherche sur la filière RNR de 1967 à 1997

En France, des réacteurs à neutrons rapides (RNR) appartenant à la filière des réacteurs rapides à caloporteur sodium ont été exploités comme Phénix et Superphénix.

Le combustible utilisé est un mixte U-Pu. En cela, il se rapproche du combustible MOX (catégorie 7) utilisé actuellement dans l'industrie électronucléaire. De même que pour celui-ci, la faisabilité technique de son traitement est établie. En effet, plusieurs dizaines de tonnes de combustibles usés RNR ont déjà été traitées, tant à l'usine Orano de La Hague qu'à Marcoule. Le traitement des combustibles RNR irradiés est envisagé pour la fin du siècle, à la reprise de la filière RNR.

Aujourd'hui, les combustibles usés RNR sont entreposés soit à l'usine Orano de La Hague, soit sur le site d'EDF à Creys-Malville.

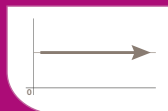
Il a été décidé, par arrêté ministériel le 30 décembre 1998, de mettre fin à l'exploitation de Superphénix. Ce réacteur disposait d'une recharge de combustible qui n'a pas été consommée et qui reste entreposée dans l'attente de la valorisation ultérieure des matières qu'elle contient. Il s'agit d'un cœur d'assemblages combustibles fissiles de type MOX et d'assemblages fertiles, constitués d'uranium naturel ou appauvri, destinés à « envelopper » le cœur pour y produire de la matière fissile. Ces combustibles n'ayant pas été irradiés relèvent d'une catégorie différente (catégorie 25).



Réacteur Superphénix

## Tendance des dernières années

➤ La France ne disposant plus de réacteurs à neutrons rapides et ne pratiquant pas le retraitement des combustibles RNR irradiés pour le moment, le stock de ces combustibles est stable.



## En chiffres

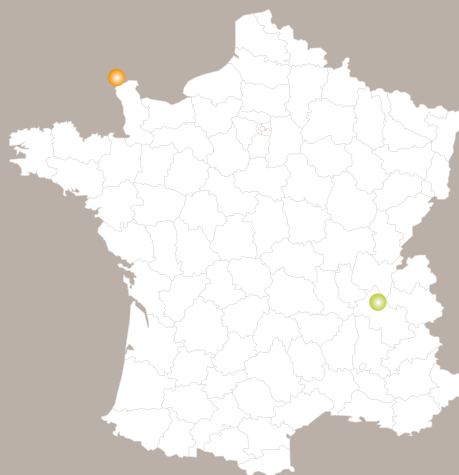
### ► STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	125	130	130

► L'augmentation du stock de combustibles RNR usés entre fin 2022 et fin 2030 tient à un changement de régime administratif du stock de combustibles usés de Phénix, détenus par le CEA, hors contrôle Euratom à ce jour.

## *i* En savoir plus

Les combustibles RNR irradiés sont principalement entreposés dans la piscine de l'APEC sur le site EDF de **Creys-Malville** (38) et dans une moindre quantité à l'usine Orano de **La Hague** (50) en attendant leur retraitement.



Secteur(s) économique(s)

Recherche

Détenteur(s)

EDF • Orano

# Autres combustibles usés civils

## Une grande variabilité, témoin de la recherche menée ces dernières décennies

Melusine, Siloé, Siloette, Ulysse, Osiris, Isis, Orphée, Scarabée, EL3, EL4, Phebus, Cabri, Rapsodie, RHF, RJH... autant de réacteurs nucléaires français arrêtés, en cours d'exploitation et futurs dont les caractéristiques varient autant que les combustibles utilisés. Bien que la quasi-totalité soit de type oxyde  $UO_2$ , certains types moins conventionnels figurent également (nitride, carbure ou uranium métallique).

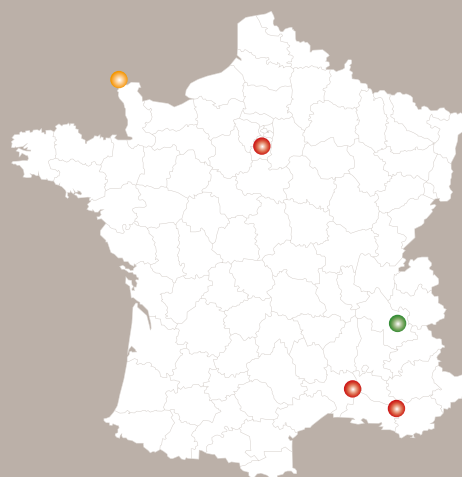
Entre traitement dans les ateliers existants et entreposage, l'avenir de ces combustibles usés se décide au cas par cas en fonction de la nécessité de nouveaux équipements. Ceux-ci font l'objet d'études dans le cadre d'accord entre le CEA et Orano.



Réacteur nucléaire Osiris

### *i* En savoir plus

Ces combustibles irradiés sont entreposés sur divers sites : les centres CEA de **Saclay** (91), **Marcoule** (30) et **Cadarache** (13), l'institut Laue-Langevin à **Grenoble** (38) et l'usine Orano de **La Hague** (50).



Secteur(s) économique(s)

Recherche

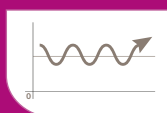
Détenteur(s)

CEA • ILL • Orano

## Tendance des dernières années



Le stock de ces combustibles usés est variable en fonction des réacteurs en cours de fonctionnement et de leur traitement ponctuel.



## En chiffres

### ► STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	61	59	59



# Combustibles usés de la Défense nationale

## Réacteurs embarqués : assurer la propulsion des sous-marins et porte-avions

Depuis la divergence du réacteur nucléaire situé sur le premier sous-marin nucléaire lanceur d'engin français « le Redoutable » en 1969, deux natures différentes de combustibles ont été utilisées : un alliage métallique uranium-zirconium (jusqu'en 1996) et du dioxyde d'uranium  $UO_2$  (depuis 1975).

Tous les éléments combustibles UZr usés de la Défense nationale sont aujourd'hui conditionnés et entreposés dans l'installation CASCAD à Cadarache. Les éléments combustibles  $UO_2$  usés sont quant à eux entreposés à nu en piscine.

La faisabilité technique du traitement et recyclage de ces combustibles est acquise mais nécessitera toutefois de nouveaux équipements dans l'usine Orano de La Hague.

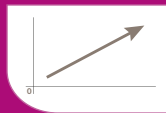


Cuve du réacteur nucléaire  
Le Triomphant

## Tendance des dernières années



Le stock de combustibles irradiés issus des activités de la Défense Nationale est en constante augmentation du fait de l'absence de retraitement aujourd'hui.



## En chiffres

### ► STOCK ET PRÉVISION

	Stock	Prévisions (cumul)	
Date	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	203	260	335

## *i* En savoir plus

Ces combustibles usés sont entreposés par la direction des applications militaires du CEA.

Les combustibles de la Défense nationale ne sont pas représentés sur cette carte.

En effet, en vertu de la protection des informations dont la communication porterait atteinte aux intérêts mentionnés à l'article L. 124-4 du code de l'environnement, les localisations de matières ne peuvent être communiquées.

Secteur(s) économique(s)

Défense

Détenteur(s)

CEA

# Autres matières

## Héritage de la fermeture du prototype de réacteur à neutron rapide Superphénix

Cette famille concerne les matières nucléaires qui ne peuvent pas être rattachées à des familles existantes.

Il s'agit exclusivement du cœur neuf de Superphénix, devant remplacer à terme le combustible utilisé pendant le fonctionnement de la centrale. Étant donné l'arrêt définitif de Superphénix, décidé par arrêté ministériel le 30 décembre 1998, cette recharge de combustible n'a jamais été utilisée et n'a donc pas été irradiée.

Superphénix utilisait des assemblages fissiles en guise de cœur et des assemblages fertiles en guise d'enveloppe. La différence entre ces deux types d'assemblages réside dans l'isotopie de l'uranium et la présence de plutonium. Les assemblages fissiles contiennent un uranium naturel ou appauvri couplé à du plutonium (combustible de type MOX), tandis que les assemblages fertiles contiennent un uranium naturel ou appauvri, dont la teneur en uranium 235 est encore plus faible que celle des combustibles fissiles.

L'intérêt de ces assemblages fertiles était de produire du plutonium 239, fissile, à partir des neutrons rapides s'échappant du cœur, en plus grande quantité que la matière fissile consommée : c'est le mécanisme de surgénération.

Le traitement des combustibles RNR est envisagé pour la fin du siècle, à la reprise de la filière RNR.

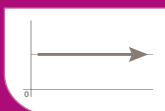


Bâtiment réacteur de Superphénix, sur le site nucléaire de Creys-Maville

## Tendance des dernières années



Le stock est stable dans le temps en l'absence de retraitement effectif aujourd'hui et de l'arrêt de superphénix.



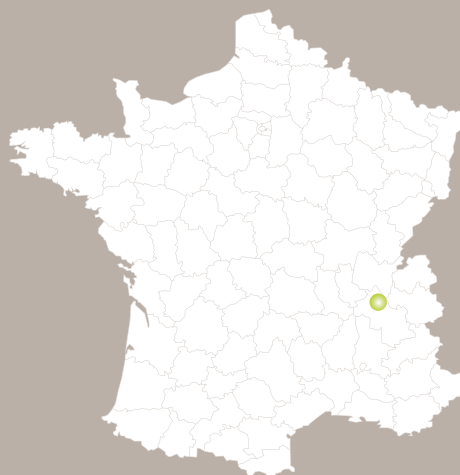
## En chiffres

### ► STOCK ET PRÉVISION

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	Fin 2022	Fin 2030	Fin 2040
Quantités (tML)	70	70	70

## *i* En savoir plus

Le cœur neuf de Superphénix est actuellement entreposé sur le site d'EDF à **Creys-Malville** (38).



Secteur(s) économique(s)

Recherche

Détenteur(s)

EDF

# Toutes les données sur les matières et déchets radioactifs sont sur **inventaire.andra.fr**



Les Essentiels  
2024



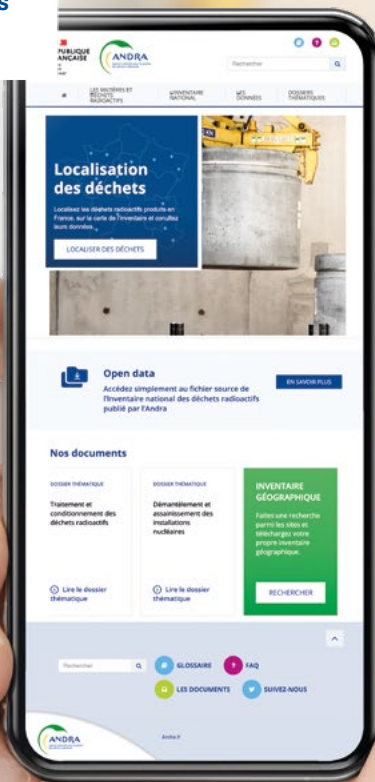
Catalogue  
des familles



Qu'est-ce que  
l'Inventaire national ?



Localisation  
des déchets



Catalogue  
des matières