

LES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX DES PROJETS NUCLEAIRES ACTUELS ET FUTURS

Jacky ROUSSELLE

Ingénieur Ecole Centrale de Lyon, Ingénieur du Génie Atomique

Membre de la Société Géologique de France

PLAN

- 1) LES BESOINS PRESENTS ET FUTURS EN URANIUM
- 2) LES RESSOURCES ET LA PRODUCTION D'URANIUM
- 3) LES RISQUES GLOBAUX ET DETAILLES DES PROJETS NUCLEAIRES DONT LES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX
- 4) ZOOM SUR LES ACTINIDES MINEURS GENERES DANS LES REACTEURS
- 5) ZOOM SUR LES DECHETS RADIOACTIFS ET LEURS SITES DE STOCKAGE
- 6) LE FUTUR DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

1) LES BESOINS PRESENTS ET FUTURS EN URANIUM

1.1 LES BESOINS ACTUELS EN FRANCE pour le parc nucléaire d' EDF

- 7 000 tU/an d'uranium naturel (~10% demande mondiale)
- **7000 tU/an uranium converti en UF₆**
- **6 MUTS/an services d'enrichissement**

Source:présentation Jean-Michel Quilichini (EDF/DCN) à la Convention de printemps SFEN du 28 mars 2024

- Approvisionnement en majorité par EDF avec marchés long terme avec fournisseurs .
- Approvisionnement en faible quantité avec marché spot

1) LES BESOINS PRESENTS ET FUTURS EN URANIUM

1.2 LES BESOINS ACTUELS DANS LE MONDE

Au 1er Janvier 2019, **450 réacteurs nucléaires (396 Gwe)** ont demandé environ **59 200 tU/an** (Livre Rouge 2020 p12).

Consommation mondiale d'uranium en 2020 avec les principaux consommateurs:

USA : 18000 tonnes

Chine: 10800 tonnes

France : 8700 tonnes

Russie: 6200 tonnes

Corée du sud: 5100 tonnes

Japon : 2300 tonnes

Ukraine: 1900 tonnes

Royaume-Uni : 1800 tonnes

Canada : 1400 tonnes

Espagne: 1200 tonnes

Cours de l'uranium U₃O₈ depuis 10 ans en USD au 21/3/2024 de la livre (environ 450 g)



Source:
https://www.boursorama.com/bourse/matieres-premieres/cours/_UX/

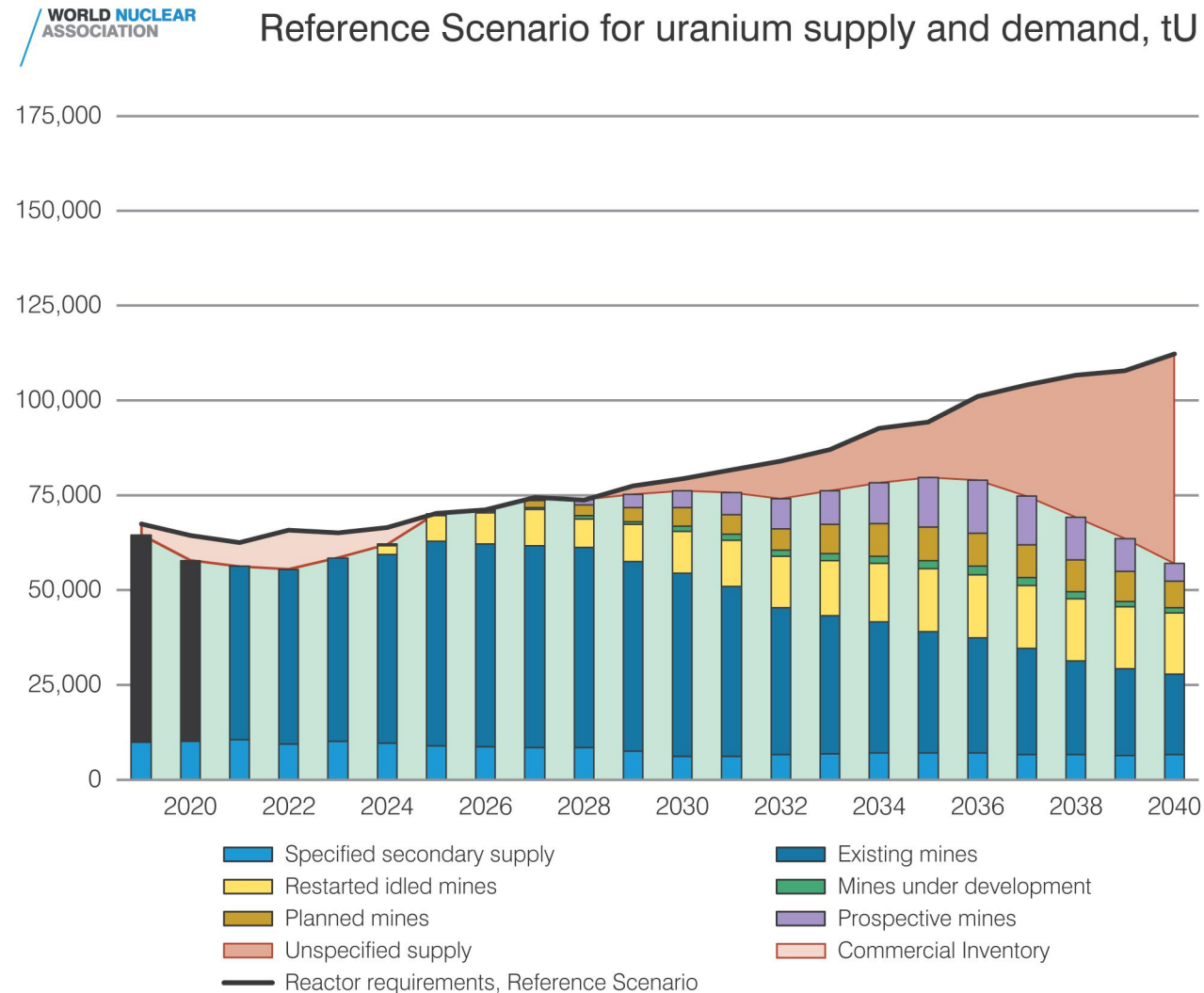
1) LES BESOINS PRESENTS ET FUTURS EN URANIUM

1.3 LES BESOINS FUTURS DANS LE MONDE

- En Europe: **ALLIANCE EUROPEENNE DU NUCLEAIRE**: 15 pays européens signataires en 2023 :
Visée de 150 Gwe en 2050 au lieu de 100 Gwe actuellement
- Suite à la COP28 , **NUCLEAR ENERGY SUMMIT (NES)** les 21 et 22 mars 2024 à Bruxelles avec 37 pays du Monde.
- Prospective 2024 (courbe d'Orano) : **en 2040 besoins mondiaux de 100 ktU au lieu de 55 ktU en 2024**
- Red Book (Livre Rouge) 2020 p.12 et 13: en 2040 (en excluant MOX) :
 - scénario bas: 354 Gwe soit 56640 tU ,
 - scénario haut: 626 GWe soit 100225 tU

1) LES BESOINS PRESENTS ET FUTURS EN URANIUM

1.3 LES BESOINS FUTURS DANS LE MONDE



WNA
(World Nuclear Association)
Scénario de référence
updated: 06/10/2022
16:06:55

1) LES BESOINS PRESENTS ET FUTURS EN URANIUM

1.3 LES BESOINS FUTURS DANS LE MONDE

Scénario de référence WNA 2023 :

Consommation mondiale attendue 2025-2040	Consommation extrapolée 2041-2100
1,4 Million tU	12,7 Million tU

2) LES RESSOURCES ET PRODUCTION D'URANIUM

2.1 RESSOURCES RECENSEES PAR LE LIVRE ROUGE 2020 – AEN/AIEA

Les données doivent être considérées avec précaution car elles proviennent d'informations communiquées par les Etats.

Le Livre Rouge 2020 distingue les :

-Ressources conventionnelles (identified resources) : 8 Mt en 2020 (<USD 260/kgU)

pour soit 135 ans consommation 2020 d'après livre rouge 2020

-Ressources non découvertes :

7 220 300 tU au 1/1/2019

-Ressources non conventionnelles (production provenant d'autres matières dont les phosphates, la lignite,): 39 MtU

$1\% \text{ U}_{308} = 0.848\% \text{ U}$

(pound) = 0,453 592 37 kg

$1 \text{ USD/lb U}_{308} = \text{USD } 2.6/\text{kg U}$

rappel: 1 livre lb

Global distribution of identified recoverable conventional uranium resources (<USD 130/kgU as of 1 January 2021)

URANIUM 2022: RESOURCES, PRODUCTION AND DEMAND, NEA No. 7634, © OECD 2023



* Secretariat estimate or partial estimate.

The global distribution of identified recoverable conventional uranium resources in the <USD 130/kgU cost category among 15 countries, which are either major uranium producers or have significant plans for growth of nuclear generating capacity, illustrates the widespread distribution of these resources. Together, these 15 countries are endowed with 95% of the global resource base as specified above (the remaining 5% are distributed among another 24 countries). The widespread distribution of uranium resources is an important geographic aspect of nuclear energy in light of security of energy supply.

2.2 PRODUCTION D'URANIUM DES MINES:

*Au 1er Janvier 2019, 16 pays ont rapporté produire pour un total de **53 516 tU** (Livre Rouge 2020 p.11)*

En 2021, la matière était extraite de 15 pays :

- **45% :Kazakhstan**
- **7% : Ouzbékistan**
- **10% : ensemble Australie, Namibie, Canada**
- **5% : Russie**
- **4% : Niger**
- **4% : Chine**

La moitié de la production provient de 10 mines dans le Monde.

Le site de Cigar Lake au Canada produit plus que la Russie et le Niger réunis.

Source: <https://www.vie-publique.fr/parole-dexpert/290647-luranium-une-ressource-strategique>

L'industrie minière mondiale de l'uranium est concentrée sur 15 entreprises (95% des extractions):

- **Kazatoprom** : 25% des extractions
- **China National Nuclear Corporation (CNNC) et China General Nuclear Power Corporation (CGNPC) ensemble:**
16% extractions
- **Rosatom:** 16% extractions
- **Canadien Cameco** : 15% extractions
- **Français Orano** : 9% extractions
- **Ouzbek Navoiï:** 7% extractions
- **Autres cumul:** 7% extractions

Source: <https://www.vie-publique.fr/parole-dexpert/290647-luranium-une-ressource-strategique>

CONCLUSIONS SUR RESSOURCES EN URANIUM:

- Les dépenses d'exploration suivent les cours et les découvertes sont liées à ces dépenses ⁽¹⁾
Coûts d'exploration de l'ordre de 8 US\$ /kgU. Ils se stabilisent dans le temps. ⁽¹⁾
- Ressources moyennes par nouveau gisement : 15ktU ⁽¹⁾
- La mine d'Olympic Dam en Australie contient 2,2 MtU ⁽¹⁾
- Prix revient minimum pour exploiter une nouvelle mine en 2024:
Price Cost Index (Tradetech) 147 US\$/ kgU ⁽¹⁾

Des techniques innovantes d'exploration et de production se développent:

- Bio Heap Leaching à Sotkamo (Finlande). 250tU/an à 0,0018% U₃O₈ ⁽¹⁾
- Technique SABRE d'ORANO : forage de production gisements profonds peu étendus

Une importante exploration , des techniques innovantes, des investissements à temps sont nécessaires pour transformer les ressources en uranium raffiné.

(1) Présentation Christian Polak d'Orano- Convention SFEN 28/3/2024

3) RISQUES GLOBAUX ET DETAILLES DES PROJETS NUCLEAIRES

Les risques environnementaux s'insèrent dans l'ensemble des risques d'un projet nucléaire, aussi il faut rappeler les risques globaux

3.1) LES MODES DE FINANCEMENT DES PROJETS DEPENDENT DES RISQUES GLOBAUX EVALUES PAR LA COMMUNAUTE FINANCIERE

Le **MODELE D'EQUILIBRE DES ACTIFS FINANCIERS (MEAF)** ou **CAPITAL ASSET PRICING MODEL (CAPM)** est le modèle le plus largement appliqué en ingénierie financière afin de déterminer le coût du capital.

Il se base sur une **approche systématique de l'analyse des risques**.

L'objectif est de minimiser le coût du capital en optimisant le management des risques. Cf rapport

Agence de l'Energie Nucléaire 2022 n°76525.

Les risques globaux surtout évalués par la communauté financière dans ce cadre sont:

- **les risques de construction**
- **Les risques du marché électrique**
- **Les risques politiques**

3.2) RISQUES DETAILLES LIES A LA CHAINE DE VALEUR

La chaîne de valeur du nucléaire est très complexe, que ce soit en construction ou en exploitation.

Nous avons constaté récemment combien un événement de dommages mécaniques sur des équipements (corrosion sous contrainte de tuyauteries en acier inoxydable) avait dégradé l'exploitation du parc nucléaire.

Il faut noter que la France maîtrise cette chaîne de valeur du nucléaire de la mine d'uranium jusqu'aux sites de stockage, en passant par le retraitement du combustible nucléaire. Ce qui est un atout majeur. Mais il faut poursuivre les efforts de maîtrise en permanence pour les risques détaillés en vue de la sûreté nucléaire et la disponibilité des tranches nucléaires.

Citons les critères d'analyse sous forme de grille d'analyse en conception ou en revue de conception: © Jacky Rousselle

Garantie approvisionnement de matières premières, de pièces et d'équipements spécifiques , minimisation ou suppression des risques géopolitiques , pérennité des fournisseurs, simplification, minimisation en masse des matières employées, minimisation de l'énergie dépensée, standardisation des équipements, équipements standards disponibles, qualité technique, innovations qualifiées, maîtrise des interfaces occasionnées par le lotissement de contrats d'un projet ou d'interfaces à l'intérieur d'un contrat de fournitures ou de travaux, standardisation d'interfaces, durabilité/fiabilité des pièces et des équipements, démontabilité pour maintenance ou remplacement, continuité de fournitures de pièces de rechange dans le temps, compétences adaptées et formées en permanence, respect des plannings et des budgets, contre-réactions négatives en température de la réactivité à tout régime d'exploitation, intégrité des barrières en toute condition normale et accidentelle, ne pas permettre la prolifération nucléaire, production électricité, chaleur.

Critères spécifiquement environnementaux: © Jacky Rousselle

- Mieux transformer en matière fissile la matière fertile, en particulier avec réacteurs rapides RNR,
- Mieux consommer la matière fissile , en particulier avec réacteurs rapides, RNR
- Non utilisation ou minimisation d'emploi de métaux critiques, rares ou stratégiques,
- Recyclage des matériaux ou emploi de matériaux recyclés dans la mesure du possible,
- Minimisation de matières premières pour réacteur et cycle combustible,
- Minimisation des déchets industriels banaux , dangereux et spéciaux,
- Minimisation de l'activation radioactive des matériaux en regard des irradiations neutroniques, gamma, alpha par l'emploi d'éléments chimiques ad hoc,
- Minimisation de la contamination radioactive dans les installations nucléaires
- Etudes de criticité pour matériaux fissiles et fertiles,
- Minimisation des déchets radioactifs en rejets et de tout type à stocker ,
- Si possible réversibilité des sites de stockage des déchets radioactifs pour récupérer matières à terme (en plus de CIGEO)

Matières premières critiques (2020)

Antimoine	Germanium	Silicium
Barytine	Graphite	Strontium
Bauxite	Hafnium	Tantale
Béryllium	Indium	Terres rares légères
Bismuth	Lithium	Terres rares lourdes
Borate	Magnésium	Titane
Cobalt	Niobium	Tungstène
Charbon	Iridium	Vanadium
Fluorine	Phosphorite	
Gallium	Phosphore	
Gomme naturelle	Scandium	

Liste de l'Union Européenne des matières premières critiques (2020) ci-dessus

MÉTAUX RARES

Le tableau périodique des éléments chimiques est présenté, avec les métaux rares (lanthanides et actinides) en évidence. Les lanthanides sont les éléments de la série 4f, et les actinides sont les éléments de la série 5f. Les métaux rares sont également les éléments de la série 3d, qui sont les métaux de transition.

Matières premières critiques: matières premières essentielles pour l'économie d'un pays et qui présentent des possibilités d'approvisionnement restreintes.

Critical Raw Material Act de l'UE de 2023

Métaux stratégiques:

Produits par un nombre restreint d'entreprises ou de pays, appliqués dans des usages de haute technologie, peu ou pas substituables dans leurs utilisations ou encore difficilement collectés en vue de leur recyclage.

Comité pour les Métaux Stratégiques (COMES) créé en 2011.

Le **COMES** et ses membres ont ainsi réalisé » Un nouveau système d'information : **www.mineralinfo.fr**
Facilement accessible, pour structurer et rassembler la **connaissance et les compétences sur les ressources minérales**.

Un outil d'autodiagnostic pour permettre aux entreprises d'évaluer leur vulnérabilité à l'approvisionnement en matières premières critiques

Les différentes méthodologies existantes d'analyse de risques ne permettent ni comparaison, ni travail commun sur la gestion des risques par mutualisation à l'intérieur d'une filière industrielle ou en intersectoriel.

L'outil COMES comble cette lacune en permettant de développer un langage commun, propice à une gestion réactive et dynamique des risques. Cet outil, gratuit et librement téléchargeable, a été testé par plusieurs industriels. www.dgcis.redressement-productif.gouv.fr/secteurs-professionnels/industrie/chimie/metaux-strategiques

CONTACTS

metauxstrategiques.dgcis@finances.gouv.fr ou votre fédération professionnelle

BASE DE DONNEES PROJETS DE REACTEURS DANS LE MONDE DE L'IAEA: <https://aris.iaea.org/>



Exemple: Rapport Advances in Small Modular Reactor Technology Developments – A Supplement to IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), 2020 Edition

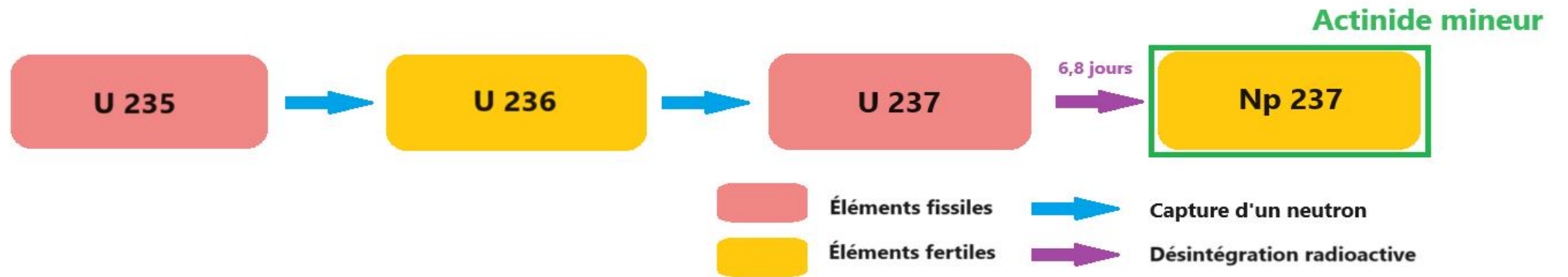
4) ZOOM SUR LES ACTINIDES MINEURS GENERES DANS LES REACTEURS

Principaux actinides mineurs, déchets hautement radioactifs à vie longue (HAVL):

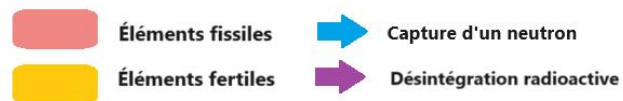
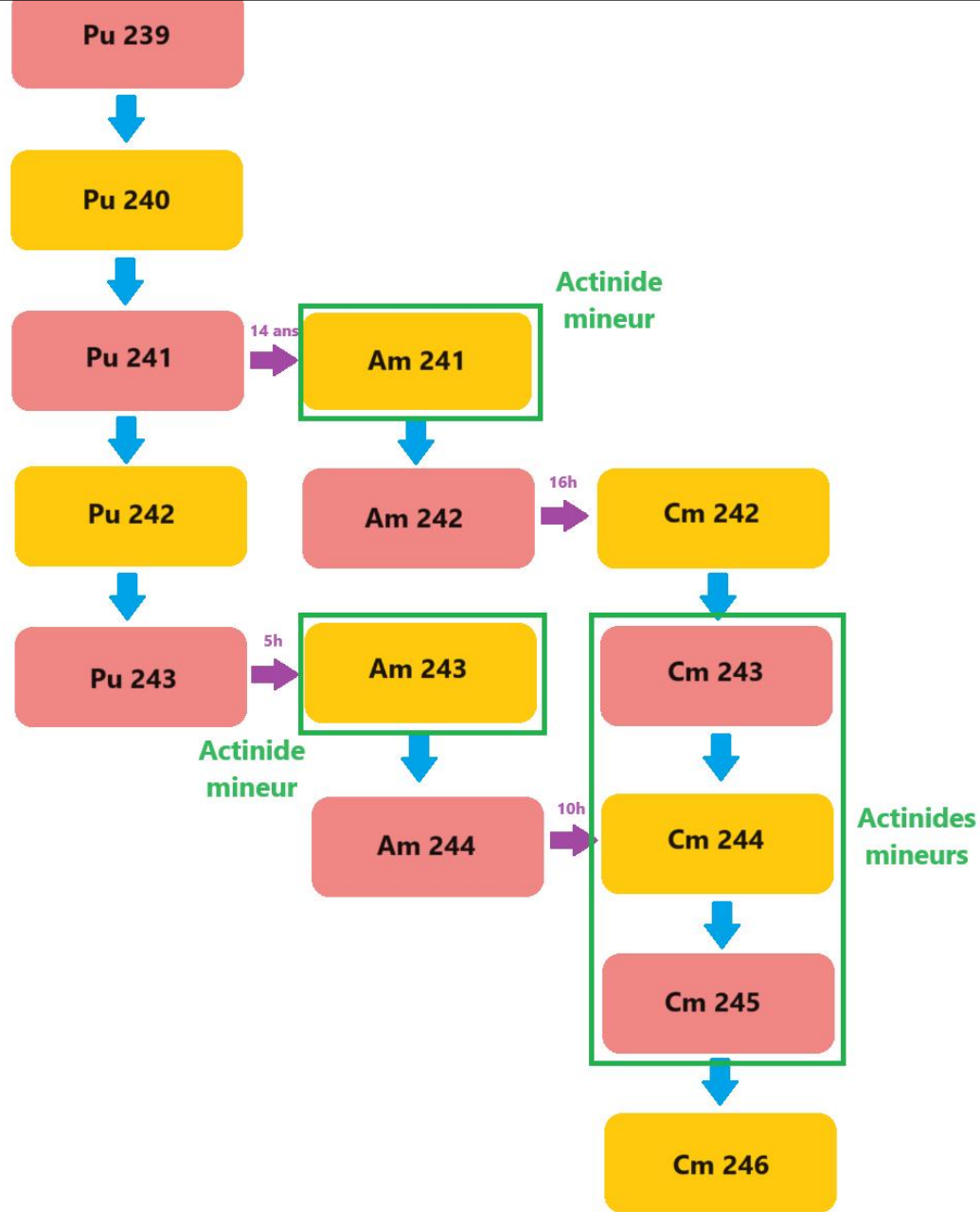
Element	Période ou temps demi-vie	Niveau d'activité radioactive	Observations
Neptunium-237	2,15 Ma	Assez faible	
Américium-241	432 ans	Hautement radioactif	Passé le demi-siècle et jusqu'à quelques milliers d'années, est l'élément concentrant le plus d'activité
Américium- 243	7370 ans		
Curium-244	18 ans		En sortie de réacteur concentre environ 60% de l'activité

Le projet de recherche RTG (Radio-isotopic Thermal Generator), lancé en 2017 et accompagné par l'Andra dans le cadre du programme « Nucléaire de Demain », a pour objectif de développer des systèmes d'alimentation électriques autonomes avec une source d'Am 241.

SCHEMA SIMPLIFIE DE LA FORMATION DU NEPTUNIUM-237



Source: https://www.sfen.org/vos-questions/quest-ce-quun-actinide-mineur/?utm_source=RGN_Hebdo&utm_medium=email&utm_campaign=Hebdo









SCHEMA SIMPLIFIE DE LA FORMATION DES ISOTOPES DE L'AMERICIUM ET DU CURIUM

https://www.sfen.org/vos-questions/quest-ce-quun-actinide-mineur/?utm_source=RGN_Hebdo&utm_medium=email&utm_campaign=Hebdo

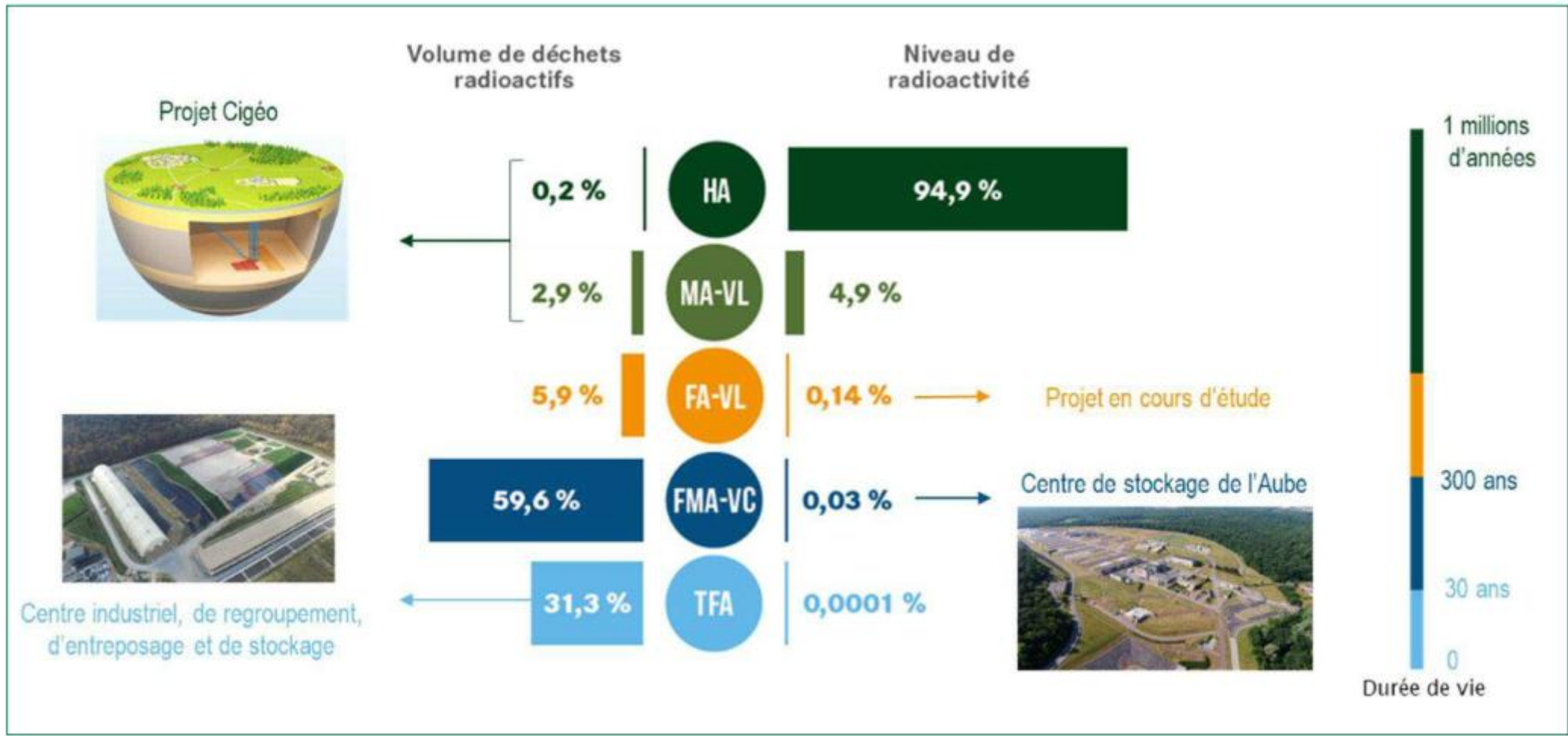
5) ZOOM SUR LES DECHETS RADIOACTIFS ET LEUR SITES DE STOCKAGE

La gestion des matières radioactives et déchets radioactives est défini dans le Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs (PNGMDR).

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

Catégories des déchets radioactifs et filières de gestion associées de l'ANDRA.

Source: Annales Mines n°113 –janvier 2024- La gestion durable et responsable des déchets radioactifs-
Pierre-Marie Abadie DG Andra



Volume des déchets radioactifs et niveau de radioactivité associée des différentes catégories de l'Andra

Source: Annales Mines n°113 –janvier 2024- La gestion durable et responsable des déchets radioactifs-

Pierre-Marie Abadie DG Andra

6) LE FUTUR DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE DU CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLEAIRE EN FRANCE

6.1 AVAL DU CYCLE ACTUEL EN FRANCE

- EDF effectue **150 à 200** transports pour l'évacuation des combustibles usés ainsi que 1 500 transports de déchets radioactifs à vie courte ;
- EDF assure **1 100 tonnes de retraitement de combustible usé**

Source : EDF/DCN

Dans numéro CentraleSupélec Alumni n°16 –mai/juin 2023 – article de Jean-Michel Quilichini (EDF-DCN)

- 11 t de Pu extrait
- 120 à 130 t de MOX à produire
- 1045 t d'Uranium de Retraitement (URT) extrait
- 25% d'achat d'uranium naturel économisé
- 96% de matière recyclée

Source:présentation Jean-Michel Quilichini (EDF/DCN) à la Convention de printemps SFEN du 28 mars 2024

6) LE FUTUR DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE DU CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLEAIRE EN FRANCE

6.2 FUTUR DE L'AVANT DU CYCLE EN FRANCE

- Le Conseil de Politique Nucléaire de février 2024 a acté de la prolongation du retraitement des combustibles usés en France de 2040 à 2100 sur le site de La Hague.
- ORANO étudie et devrait investir pour du multirecyclage d'assemblages usés : MOX usé, URE (Uranium de Retraitement Enrichi) usé...
- ORANO étudie et devrait investir dans une nouvelle usine de fabrication de combustibles MOX qui serait basée à La Hague:
MOX à partir de UNE (Uranium Naturel Enrichi) usé, MOX2 à partir de MOX usé, fabrication de combustibles pour les RNR : MOX-RNR (en option) et tout type AMR,..
- ORANO étudie le Maintien En Conditions Opérationnelles (MCO) à moyen terme de l'usine de retraitement actuelle de La Hague.
- ORANO étudie et devrait investir dans deux nouveaux modules de retraitement UNE/URE/MOX/MOX-MR(Multirecyclage) des Réacteurs à Eau Légère (REL) et en option d'une ligne de traitement MOX-RNR, lignes AMR,...