

L'URANIUM

1. INTRODUCTION

A l'origine, un combustible était une substance qui, en se combinant avec l'oxygène lors d'une réaction chimique, produisait de la chaleur (feu de bois), la forme la plus classique de l'énergie. Par similitude, l'URANIUM, qui produit de l'énergie lors des réactions de fission est appelée « **combustible nucléaire** ».

Partout présent dans la croûte terrestre à l'état de traces (2 ppm¹) ou dans l'eau des océans (3 ppb²) l'uranium peut atteindre des concentrations allant jusqu'à ±1% dans les roches primaires (granites & schistes) ou tertiaires (calcaires), qui constituent les gisements miniers répartis sur tous les continents, dont la pechblende est l'une des formes les plus répandues. Mais il faut rappeler que la première utilisation de l'uranium a été la faïence et la céramique où il servait à la préparation de pigments jaune, orange et vert par extraction d'oxydes (uraninite, vanadate, carnotite) ou de phosphates (autunite).

Comme pour le charbon ou le pétrole, entre l'extraction et l'utilisation en combustible dans une centrale thermique, la production d'énergie par l'uranium est soumise à plusieurs étapes. Ces étapes industrielles constituent l'amont du cycle du combustible nucléaire (voir la rubrique sur www.energetique.com) :

- **prospection** des gisements
- **extraction** du minerai
- **concentration** en uranium des minerais sur les lieux d'extraction (le minerai d'origine ne contient généralement que ±1 % d'uranium)
- **conversion** du concentré d'uranium sous forme d'hexafluorure (UF₆)
- **enrichissement** de l'UF₆ en isotope ²³⁵U pour passer de la concentration naturelle de 0,72 % de ²³⁵U/²³⁸U à environ 3 à 4 % (en fonction du type de réacteur d'utilisation)
- **fabrication** du combustible par conversion de l'UF₆ en pastilles frittées d'UO₂ empilées dans les crayons, lesquels sont regroupés en assemblage.

2. CARACTÉRISTIQUES DE L'URANIUM

Sur le plan chimique, l'uranium, élément de numéro atomique Z = 92 fait partie de la famille des actinides [qui compte quinze éléments de l'actinium (Z = 89) au lawrencium (Z = 103)]. C'est l'élément naturel le plus lourd.

L'uranium comprend de nombreux isotopes (voir tableau 1 ci-après), dont les plus importants sont l'²³⁸U (fertile) à raison de 99,27 %, l'²³⁵U (fissile) en proportion de 0,72 % et l'²³⁴U, en proportion de 0,005 %, plus quelques autres isotopes tels que ²³²U, ²³³U, ²³⁶U, ²³⁷U et ²³⁹U.

Le tableau 2 ci-dessous fournit la chaîne complète de décroissances radioactives des isotopes de l'uranium.

La capacité de fission spontanée de l'²³⁵U peut conduire à des réactions très dangereuses : la criticité, lorsqu'il est concentré sous une géométrie sphérique avec un réflecteur d'eau. Les masses critiques conduisant au déclenchement de la réaction sont de 22,8 kg pour l'²³⁵U métal, 11 kg pour ²³⁵UO₂ et 0,810 pour l'²³⁵U en solution aqueuse.

A l'état élémentaire, l'uranium est un métal avec une masse volumique très élevée : ρ = 19,04 kg/dm³. Ayant des similitudes avec le chrome et le tungstène, en contact avec l'eau et l'air il produit des réactions pyrophoriques extrêmement violentes.

¹ Deux parties par million, 2. 10⁻⁶ ou encore 2 millièmes de la masse de matériau observée.

² Trois parts par billion, soit 3 milliardièmes ou 3. 10⁻¹².

Isotope	Période de fission spontanée	Période de désintégration (T1/2)	Désintégrations mode, énergie en MeV, (%)
²³² U	8.10 ¹³ an	68,9 an	α 5,32 (68,6 %) ; α 5,26 (31,2 %) ; γ 0,058
²³³ U	1,7.10 ¹⁷ an	1,6.10 ⁵ an	α 4,82 (82,7 %) ; α 4,78 (14,9 %) ; γ 0,097
²³⁴ U	2.10 ¹⁶ an	2,5.10 ⁵ an	α 4,77 (72 %) ; α 4,72 (23%)
²³⁵ U	3,5.10 ¹⁷ an	7,0.10 ⁸ an	α 4,40 (57 %), α 4,38 (18 %), γ 0,19
²³⁶ U	2.10 ¹⁶ an	2,3.10 ⁷ an	α 4,49 (74 %) ; α 4,46 (14,9 %)
²³⁷ U		6,75 jours	β ⁻ 0,52 ; g 0,06
²³⁸ U	8,2.10 ¹⁵ an	4,5.10 ⁹ an	α 4,20 (77 %) ; α 4,15 (23 %)
²³⁹ U		23,5 minutes	β ⁻ 1,29 ; γ 0,075

Tableau 1 : Caractéristiques des isotopes de l'uranium

Chaînes de décroissance											
²³⁸ U						²³⁵ U					
²³⁸ U 4,2 MeV 4,5.10 ⁹ a		²³⁴ U 4,8 2,4.10 ⁵ a				Z 92	²³⁵ U 4,4 7.10 ⁸ a				
↓	²³⁴ Pa [↗] 0,5 6,7 h	↓				91	↓	²³¹ Pa 5,0 3,3.10 ⁴ a			
²³⁴ Th [↗] 0,2 24 j		²³⁰ Th 4,7 7,5.10 ⁴ a				90	²³¹ Th [↗] 0,3 25,5 h	↓	²²⁷ Th 6 18,7 j		
		↓				89		²²⁷ Ac [↗] 0,04 21,8 a	↓		
		²²⁶ Ra 4,8 1600 a				88			²²³ Ra 5,7 11,4 j		
		↓				87			↓		
		²²² Rn 5,5 3,8 j				86			²¹⁹ Rn 6,8 3,96 s		
		↓				85			↓		
		²¹⁸ Po 6 3 min		²¹⁴ Po 7,7 164 ms	²¹⁰ Po 5,3 138 j	84			²¹⁵ Po 7,4 1,8 ms		
		↓	²¹⁴ Bi [↗] 1,5 19,9 min	↓	²¹⁰ Bi [↗] 1,2 5 j	83			↓	²¹¹ Bi 6,6 2,2 min	
		²¹⁴ Pb [↗] 0,7 26,8 min		²¹⁰ Pb [↗] 0,02 22,3 a	²⁰⁶ Pb Stable	82			²¹¹ Pb [↗] 1,4 36,1min	↓	²⁰¹ Pb Stable
						81				²⁰⁷ Tl [↗] 1,4 4,8 min	

²³⁸U = isotope - 4,2 = énergie en MeV- 4,510⁹ a = période (T1/2) - désintégrations ↓ = α, ↗ = β⁻

Tableau 2 : Chaînes de décroissance des isotopes de l'uranium

3. PROSPECTION DE L'URANIUM

Après avoir rassemblé toutes les données géologiques et minières existantes, la recherche des gisements exploitables débute par les techniques d'imagerie radiométrique (détection des gammas du radon, descendant de l'uranium) soit à pied, en automobile, par avion, hélicoptère ou même l'imagerie par satellite.

Suite à leur interprétation, les zones identifiées sont confirmées par des investigations directes faisant appel à l'ensemble des techniques utilisées en géophysique, qui seront complétées par l'analyse en laboratoire de prélèvements obtenus par sondage. Ces opérations durent plusieurs années et coûtent de l'ordre de 50 M€.

S'ensuit l'étape de délimitation du gisement, d'évaluation des ressources (confirmées et additionnelles estimées) et des coûts d'exploitation.

Si la décision d'exploiter le gisement est prise, débute alors une longue démarche administrative et juridique (permis de recherche, concession, permis de construire et de mise en exploitation, création de l'usine de traitement, amélioration des accès, etc.) qui peut prendre une dizaine d'années et coûter de 200 à 500 M€.

4. EXTRACTION MINIÈRE

L'uranium est exploité sur tous les continents (sauf l'Antarctique) à partir de mines dans une carrière à ciel ouvert ou d'une galerie souterraine.

Le CEA puis sa filiale la COGEMA, devenue une branche du groupe industriel AREVA, a commencé à exploiter les zones uranifères du Limousin en 1949. Les 28 mines ouvertes dans le Massif Armoricain, le Massif Central, les Vosges et dans les bassins de l'Aquitaine et de Lodève, peu riches en teneur et en quantité, ont progressivement été fermées à partir des années 90 et la dernière, celle de JOUAC (Haute-Vienne), a cessé son activité en 2001. Au total, pour extraire en France 72 000 tonnes d'uranium.

COGEMA a extrait de l'ordre de 52 millions de tonnes de minerai. Après exploitation, les excavations sont généralement comblées par les roches stériles et recouvertes de terres végétales. Des mines à ciel ouvert peuvent être inondées et transformées en lacs. L'exploitation en galerie souterraine fait l'objet de précautions particulières (ventilation) vis-à-vis des émanations de radon (gaz radioactif issu de la désintégration de l'uranium).

Le gisement actuellement le plus riche et le plus important en cours d'exploitation avec environ 30 % de la production mondiale est canadien, dans la province de Saskatchewan, avec des teneurs de quelques pour cent et parfois plus de 10 %. Viennent ensuite les mines australiennes et africaines (Afrique du Sud et Afrique Centrale). La mise en exploitation récente d'un gisement d'uranium au Kazakhstan par AREVA répond à la volonté du groupe de poursuivre sa stratégie de diversification de ses sources d'approvisionnement.

5. CONCENTRATION DES MINERAIS

La faible concentration en uranium des minerais conduit à les traiter sur le site de la mine, afin de réduire les coûts de transport, de laisser les « stériles » sur leur lieu de production et de fournir un produit marchand, le « yellow-cake ».

Après concassage et broyage du minerai, l'uranium est extrait par réactions chimiques (acides ou basiques) dans une solution aqueuse.

La solution uranifère, avec un taux de récupération d'uranium supérieur à 90 % est ensuite traitée par précipitation ou extraction sur des résines échangeuses d'ions afin de purifier et de concentrer l'uranium.

Ce concentré est alors précipité sous forme d'uranate qui constitue finalement le « yellow-cake » $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ titrant entre 65 et 70 % en masse d'uranium stable. Cet aggloméré de poudre, chimiquement très stable, est alors mis en conteneurs aisément transportables.



Echantillon de poudre de « yellow-cake »

6. CONVERSION EN UF6

Les galettes de « yellow-cake » produites sur les cinq continents sont dirigées sur les quelques usines de raffinage et de conversion existantes dans le monde : Etats Unis, Grande Bretagne, Russie ainsi qu'en France dans les usines de COMURHEX de Malvési et de Pierrelatte.

Les opérations de conversion consistent à transformer les concentrés miniers en hexafluorure d'uranium (UF₆) tout en lui donnant la pureté indispensable à la fabrication du combustible nucléaire. Ces opérations constituent une étape essentielle dans le cycle du combustible, entre les activités minières et l'enrichissement de l'uranium.

Le procédé de conversion se déroule en deux étapes :

- **transformation de l'uranium en tétrafluorure d'uranium (UF₄)**
Le concentré minier est dissout par de l'acide, puis purifié. Après précipitation-calcination, on obtient de la poudre de trioxyde d'uranium (UO₃) qui est ensuite hydrofluorée à l'aide d'acide fluorhydrique. L'uranium se transforme ainsi en une substance de couleur verte à l'aspect granuleux, appelée tétrafluorure d'uranium (UF₄). Ces opérations sont réalisées dans l'usine COMURHEX-Malvési.
- **transformation du tétrafluorure d'uranium (UF₄) en hexafluorure d'uranium (UF₆)**
L'UF₄ est, dans un second temps, converti en hexafluorure d'uranium (UF₆) par fluoration, à l'aide de fluor obtenu par électrolyse d'acide fluorhydrique. L'UF₆ est fabriqué par contact de fluor gazeux avec la poudre d'UF₄. La réaction chimique se fait à très haute température dans un réacteur à flammes. Une dernière étape consiste à faire passer l'UF₆ obtenu de l'état solide à l'état gazeux. Il est alors possible de l'enrichir. Ces opérations sont réalisées dans l'usine COMURHEX du Tricastin.

L'UF₆ a le mérite de se présenter sous forme solide à une température et à une pression ambiantes et se gazéifie à température modérée (60 °C). Le fluor est un élément naturel mono-isotopique (¹⁹F) ce qui limite l'UF₆ à seulement trois molécules isotopiquement différentes (²³⁴UF₆, ²³⁵UF₆, et ²³⁸UF₆) particulièrement bien adaptées aux opérations de séparation pour obtenir l'enrichissement.

7. ENRICHISSEMENT

Deux méthodes sont couramment employées industriellement pour "enrichir" une partie de l'UF₆ en ²³⁵U (l'isotope fissile) au détriment de l'autre partie qui sera qualifiée "d'appauvrie" : la diffusion gazeuse et l'ultracentrifugation (voir article GASN « Arrêt de l'Usine EURODIF »).

Une troisième méthode a été développée par le CEA, le procédé SILVA, consistant à ioniser sélectivement les atomes d'²³⁵U à l'aide de rayonnement laser, mais n'a pas fait l'objet de réalisation industrielle.

7.1. PROCÉDÉ D'ENRICHISSEMENT PAR DIFFUSION GAZEUSE

Il s'agit d'un procédé d'enrichissement basé sur la différence de masse, très faible, existant entre les molécules d'hexafluorure d'uranium 235, plus légères que celles d'hexafluorure d'uranium 238.

En les faisant filtrer à travers des membranes adaptées, on arrive en multipliant suffisamment le nombre de cycles à obtenir de l'uranium enrichi.

La diffusion gazeuse requiert environ 60 fois plus d'énergie que le procédé d'ultracentrifugation, soit 6 % de l'énergie qui sera finalement produite avec l'uranium enrichi résultant.

Cette technologie de diffusion gazeuse était utilisée dans l'usine française d'EURODIF (Georges BESSE I) situés sur le site du Tricastin jusqu'en 2012 (10,8 millions d'UTS/an). Elle continue à être pratiquée à l'usine américaine de Paducah (11,3 millions d'UTS/an) ainsi qu'à l'usine chinoise de Lanzhou (0,45 million d'UTS/an).

7.2. PROCÉDÉ D'ENRICHISSEMENT PAR CENTRIFUGATION

Ce procédé consiste à utiliser des centrifugeuses tournant à très grande vitesse.

Les molécules les plus lourdes (²³⁸UF₆) se retrouvent projetées à la périphérie, alors que les plus légères (²³⁵UF₆) migrent vers le milieu de la centrifugeuse. Comme pour la diffusion gazeuse, le traitement doit être appliqué de nombreuses fois pour obtenir un enrichissement suffisant. Les centrifugeuses sont donc montées en cascades, le gaz passant de l'une à la suivante en augmentant progressivement sa teneur.

Ce procédé appelé URENCO, est utilisé industriellement depuis 1992 en Allemagne (Gronau : 1,3 million d'UTS/an), au Japon (Rokkasho : 1,05 millions d'UTS/an), dans les Pays-Bas (Almelo : 1,5 million d'UTS/an), en Russie (4 usines pour un total de 20 millions d'UTS/an), au Royaume-Uni (Capenhurst : 2 millions d'UTS/an) ainsi qu'en Chine (Shaanxi : 0,45 millions d'UTS/an). Il donne les meilleures garanties d'économie d'énergie, de maîtrise de l'impact environnemental et aussi de compétitivité.

Cette technologie est à la base du projet de l'usine Georges Besse II, qui est entré en production en avril 2011 et dont la pleine capacité de production est prévue pour 2016.

8. FABRICATION DU COMBUSTIBLE

La préparation des combustibles pour réacteurs électrogènes à eau légère repose sur des techniques de métallurgie des poudres. Ces poudres sont comprimées dans des presses pour former de petites pastilles qui sont ensuite frittées à très haute température (1973 K) sous atmosphère réductrice (argon/hydrogène).

Après rectification les pastilles d'UO₂ se présentent sous forme de cylindres : h = 15 mm, Ø = 8,2 mm. Elles sont alors empilées dans des tubes de zircaloy 4, longs de 4 mètres, placés sous pression d'hélium et forment ainsi les aiguilles combustibles. Ces aiguilles sont rassemblées dans des assemblages de 17 x 17 selon le standard d'EDF.

La fabrication des assemblages de combustible est répartie sur 6 sites en Europe et aux Etats-Unis, approvisionnant les électriciens du monde entier :

- **Allemagne** (sites de Karlstein et de Lingen; ce dernier produisant de la poudre d'oxyde d'uranium, des pastilles de combustible, des crayons et des assemblages pour réacteurs REP et REB).
- **Belgique** (site de Dessel, qui fabrique notamment les assemblages de combustible MOX).
- **Etats-Unis** (site de Richland qui produit de la poudre d'oxyde d'uranium, des pastilles de combustibles, des crayons et des assemblages pour réacteurs REP et REB, ainsi que des crayons de poison consommable (B₄C) et site d'Erwin qui assure la conversion de nitrate d'uranyle faiblement enrichi en oxyde d'uranium (fissile) et le livre à l'usine de Richland aux fins de mise en pastille pour la fabrication du combustible).
- **France** (site de Romans qui produit de la poudre d'oxyde d'uranium, des pastilles de combustible, des embouts, des crayons et des assemblages pour réacteurs REP, site de Pierrelatte qui fabrique des grilles et des grappes de commande pour assemblages). Implantée sur les sites de Pierrelatte et Romans, **CERCA** (Compagnie pour l'Etude et la Réalisation de Combustibles Atomiques) est leader mondial pour la fabrication et la fourniture du combustible pour réacteurs de recherche. Elle fournit également des sources de référence radioactives pour l'industrie, la médecine et la recherche.

9. RESSOURCES ET MARCHÉ

Le tableau 3 ci-dessous donne la répartition de la production mondiale d'uranium.

Pays	(%)
Australie	24
Kazakhstan	17
Canada	13
Afrique du Sud	9
Russie	6
Namibie	6
USA	4
Niger	3
Ouzbékistan	3

Tableau 3 : Ressources mondiales en uranium disponibles

■ Evaluation du coût de l'uranium

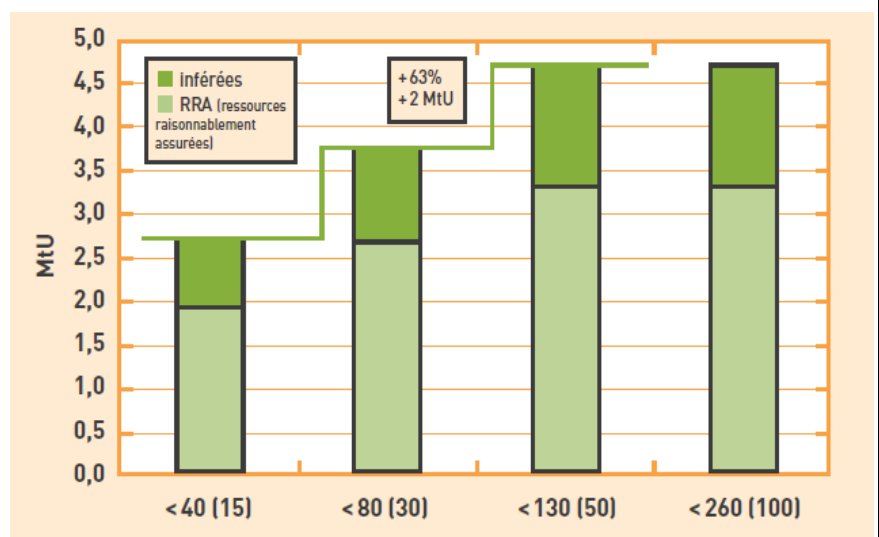
Les ressources mondiales d'uranium exploitables dépendent des coûts d'accès.

A titre d'exemple, pour un coût inférieur à 80 \$/kg elles sont évaluées à environ 2,5 Mt (millions de tonnes).

Ces ressources peuvent être portées à 3,3 Mt pour un coût de 130 \$/kg (cf. graphe 1 ci-contre).

A ce jour environ 1,2 millions de tonnes ont été utilisées, 800 millions de tonnes constituent les stocks et le parc électronucléaire actuel consomme environ 50.000 t par an.

La production mondiale d'uranium doit réussir à passer du niveau actuel d'un peu plus de 40 ktU par an à un niveau d'au moins 60 ktU/an à l'horizon 2015.



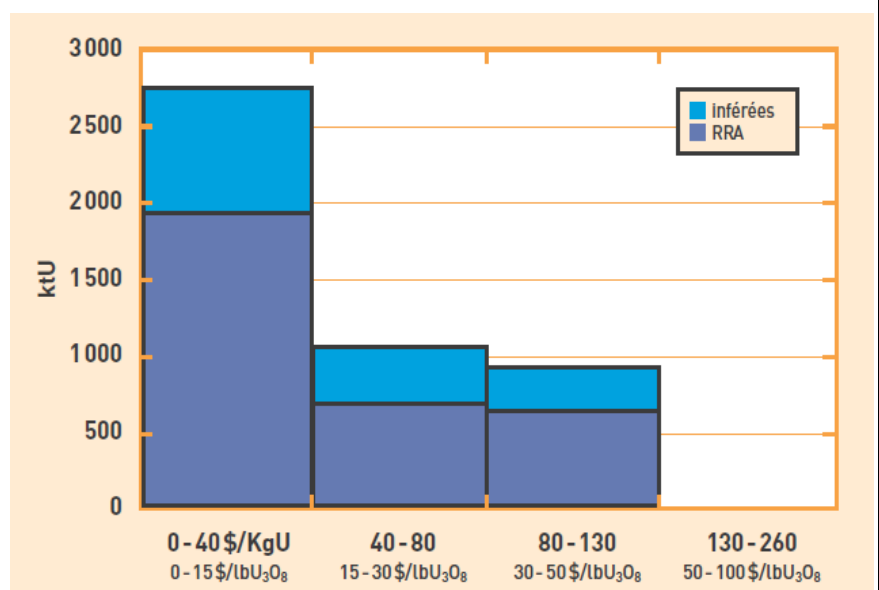
Graphe 1 : Ressources mondiales d'uranium identifiées par catégorie de coût

■ Quelles sont les ressources disponibles à long terme ?

Les données sur les "ressources" se subdivisent en diverses catégories par degrés de connaissance géologique et par catégorie de coût de récupération de l'uranium.

Elles comportent **des ressources identifiées**, regroupement de ressources raisonnablement assurées (RRA, statistiquement proches des "réserves") et de **ressources "inférées"**, autrement dit les gisements découverts, étudiés et correctement évalués, ainsi que leurs prolongements immédiats.

Le graphe 2 ci-contre montre les évolutions de ces quantités « RRA » et « Inférées » en fonction du coût d'accès.



Graphe 2 : Ressources mondiales d'uranium identifiées, selon le coût d'accès

Le monde dispose aujourd'hui d'un total de 4,75 MtU de ressources identifiées, assez pour alimenter un parc de réacteurs de la taille de l'actuel pendant plus de 70 ans.

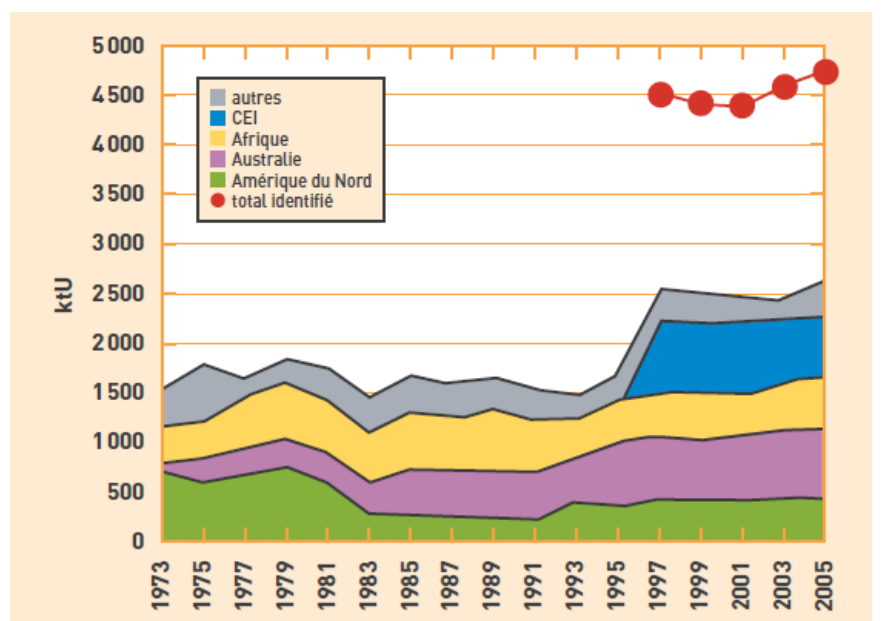
S'y ajoutent potentiellement 10 MtU de "ressources non découvertes", sans même mentionner des ressources non conventionnelles représentant des quantités très significatives.

La réduction des arsenaux nucléaires stratégiques libère d'importantes quantités d'U très enrichi, tandis que l'évolution des technologies des réacteurs en permet une meilleure utilisation.

Mais surtout deux ressources énormes sont d'ores et déjà disponibles :

- la technologie des réacteurs à neutrons rapides (RNR) (voir [fiche GASN N°22](#)).
- l'utilisation du thorium.

Elles portent la disponibilité des ressources d'énergie nucléaire à plusieurs milliers d'années, c'est-à-dire bien supérieures au pétrole, au gaz et au charbon réunis, tout en évitant leurs nuisances pour l'environnement.



Graphique 3 : Évolution des ressources en uranium dans le monde (RRA) et total des ressources identifiées

10. SOURCES

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economique

CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

WIKIPEDIA