



**La disponibilité de l'Uranium  
pourra-t-elle couvrir la croissance  
du nucléaire civil ?**

# À propos des auteurs



## Alessandro Giraudo

Expert Institut Sapiens

Alessandro Giraudo a étudié à Turin, Gènes, Berkeley et Salzburg et a été le World Chief Economist du Groupe Tradition à Turin, Milan, New York, Genève, Zurich, Amsterdam et Paris. Spécialiste des marchés des matières premières depuis plus de 40 ans, il fait partie du Cercle Cyclope. Il est membre de la SEP et de l'Association Italienne des Économistes de l'Énergie. Il enseigne dans une Grande École à Paris et à Polytechnique Turin. Il est l'auteur de 19 livres parmi lesquels « Histoires Extraordinaires des Matières Premières » (1&2) et « Matières Premières : géopolitique, économie, histoire et anecdotes ».



## Philippe Charlez

Philippe Charlez est ingénieur des Mines de l'École Polytechnique de Mons (Belgique) et Docteur en Physique de l'Institut de Physique du Globe de Paris. Expert internationalement reconnu en énergie, il est l'auteur de nombreux ouvrages sur la transition énergétique. Philippe Charlez enseigne à Dauphine, Mines Paris Tech. Il est éditorialiste régulier pour Valeurs Actuelles, Le Figaro et Atlantico.



# A propos de l'Institut Sapiens

L'Institut Sapiens est un *think tank* (laboratoire d'idées) indépendant et non partisan réfléchissant aux nouvelles conditions d'une prospérité partagée à l'ère numérique. L'humanisme est sa valeur fondamentale. Son objectif est d'éclairer le débat économique et social français et européen.

Il fédère un large réseau d'experts issus de tous horizons, universitaires, avocats, chefs d'entreprise, entrepreneurs, hauts fonctionnaires, autour d'adhérents intéressés par les grands débats actuels. Sapiens s'attache à relayer les recherches académiques les plus en pointe.

Les travaux de Sapiens sont structurés autour de **onze observatoires thématiques** : développement durable ; agriculture ; IA et éthique ; science et société ; santé et innovation ; travail, formation et compétences ; politiques, territoire et cohésion sociale ; innovation économique et sociale ; droit social ; immobilier ; échanges internationaux.

Pour en savoir plus, visitez notre site internet : [institutsapiens.fr](http://institutsapiens.fr)



# Résumé

Traditionnellement extrait dans des mines souterraines ou à ciel ouvert, l'Uranium est aujourd'hui massivement produit par lixiviation à l'acide sulfurique. Cette méthode est notamment appliquée de façon extensive au Kazakhstan premier producteur mondial. La production d'Uranium est pour cette raison conditionnée par la production du soufre. Finement broyé puis traité chimiquement sous forme de « *yellow cake* », l'Uranium est ensuite enrichi puis conditionné en petites pastilles cylindriques.

## *Réserves et production*

Estimées à 6 millions de tonnes, les réserves mondiales d'Uranium sont concentrées aux deux tiers en Australie, Kazakhstan, Canada, Russie et Namibie. Après une période de croissance continue jusqu'à un maximum de 60000 t/an en 2016, la production s'est contractée dû notamment à la pandémie du COVID19 (fermeture temporaire de nombreuses mines). En 2022, la production s'est légèrement redressée mais restait inférieure à 50000 tonnes. 5 pays (Kazakhstan, Canada, Namibie, Australie et Ouzbékistan) concentrent 85% de la production mondiale dont 43% pour le seul Kazakhstan. 80% de la production mondiale d'Uranium est dans les mains d'organismes publics et gouvernementaux contre seulement 20% dans le privé. L'un des grands paradoxes de l'Uranium est que 90% de l'Uranium est consommé dans des pays qui n'en produisent pas. La production primaire (i.e. minière) d'Uranium ne couvre aujourd'hui que les 5/6 de la demande mondiale estimée à 60000 tonnes par an. Le complément (i.e. secondaire) provient principalement du recyclage du combustible usé ainsi que de la progressive dénucléarisation des arsenaux militaires.

## *Nouvelle géopolitique*

Engagée dans une méga-décarbonation, la Chine poursuit une politique agressive d'exploration et d'exploitation minière mais aussi d'enrichissement. La Chine est en train d'effectuer une véritable OPA sur les réserves d'Uranium en Namibie, en Égypte, au Zimbabwe et au Botswana.



## Contrats

Comme le gaz, l'Uranium se négocie principalement à travers des contrats long terme (plus de 85% des volumes échangés), mais aussi via un marché spot (moins de 15% des volumes). Sur la durée, les marchés long terme lissent les prix par rapport aux valeurs spots. Après avoir atteint des sommets en 2007 (record historique de 137 \$/lb) les prix sont restés déprimés entre 2010 et 2020. Depuis, les cours se sont largement ressaisis atteignant 50 \$/lb début 2023 puis 107 \$/lb en janvier 2024, plus haut niveau depuis 17 ans.

## *L'offre et la demande à l'horizon 2040*

La construction de nombreux réacteurs pourrait multiplier la demande par deux d'ici 2040 pour atteindre 110 000 tU/an. Le socle développé et des développements aujourd'hui décidés ne pourront satisfaire ces besoins prospectifs. Pour satisfaire la demande future, la NEA compte sur de nombreux développements envisagés chez les producteurs historiques mais aussi chez des « *new comers* » comme le Botswana, le Groenland-Danemark, la Finlande, la Mauritanie, la Mongolie et la Tanzanie. En rajoutant à ces nouveaux développements les 10000 tonnes annuelles de ressources secondaires disponibles dans les pays consommateurs, on arriverait à couvrir les besoins anticipés à l'horizon 2040. Malgré cette croissance significative, la part électronucléaire représentant aujourd'hui 9% de la production totale d'électricité n'évoluera que très peu : elle devrait couvrir 12% à l'horizon 2040.



## L'Uranium

Élément chimique 92 du tableau de Mendeleïev, l'Uranium se trouve à l'état naturel dans les roches granitiques et sédimentaires. Il y coexiste principalement sous forme de deux isotopes : l'Uranium 238 (99,3 %) et l'Uranium 235 (0,7%).

L'Uranium est un radioactif émettant naturellement des rayons alpha. Sa période de vie est très longue (4,5 milliards d'années pour l'<sup>238</sup>U et 700 millions pour l'<sup>235</sup>U Leur radioactivité ajoutée à celle du Thorium 232 et du Potassium 40 contribue au maintien de la température dans le manteau terrestre.

L'écorce terrestre contient mille milliards de tonnes d'Uranium, soit bien davantage que l'Argent et l'Or. Dans les formations granitiques et sédimentaires on le trouve avec des teneurs moyennes d'environ 2,7 ppm (soit 2,7 g/t) très variables suivant le type de roche : de 0,1 ppm dans les carbonates à 350 ppm dans les phosphates. Ainsi, si vous excavez le sous-sol de votre jardin sur 20 m de côté et 10 m de profondeur, vous pourrez récupérer 24 kg d'Uranium. L'Uranium est aussi contenu dans l'eau de mer à hauteur de 3,3 mg/m<sup>3</sup>, soit un total de 4,5 milliards de tonnes dissous dans les océans. Les eaux douces en contiennent également en diverses concentrations. Provenant essentiellement de la dissolution des roches uranifères

des Alpes, l'Uranium est contenu dans le Rhône avec une teneur de 0,5 mg/m<sup>3</sup> soient 30 tonnes y transitant annuellement. L'immense majorité de cette masse d'Uranium n'est pas exploitable économiquement. L'exploitation économique d'un gisement uranifère demande une teneur moyenne comprise entre 0,2% et 2 %.

La pechblende (oxyde d'uranium U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) est le minerai uranifère le plus commun. Identifié dès la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, il fût dénommé « *Urane* » ou encore « *Uranite* » en hommage à l'astronome allemand William Herschel, premier à identifier la planète Uranus. Renommé « *Uranium* » en 1790, ce minerai fût au départ très recherché en verrerie pour sa fine fluorescence jaune verdâtre. Découvrant en 1841 que l'urane était un oxyde métallique, le chimiste français Eugène-Melchior Péligot isola l'Uranium sous sa forme atomique et estima sa masse volumique à 19,05 g/cm<sup>3</sup>. C'est un autre Français, Henri Becquerel, qui, en 1896, constata que des plaques photographiques placées à côté de sels d'uranium étaient noircies par les rayonnements émis. Pierre et Marie Curie isolèrent deux autres éléments de la pechblende : le Polonium et le Radium.

## Usages, intérêt énergétique et stratégique

L'Uranium a initialement été utilisé en verrerie pour donner aux verres, céramiques et faïences de profonds reflets verts ou jaunes. Du fait de ses hautes densité et dureté, l'Uranium appauvri est aussi utilisé sous forme d'alliage métallique dans des têtes d'obus conventionnels destinés à perforer le blindage de chars ou d'abris en béton. Hautement enrichi il intervient comme traceur en imagerie médicale.

Mais, c'est en tant que combustible dans les réacteurs nucléaires civils que son usage domine largement. En bombardant l'<sup>235</sup>U « fissile » avec des neutrons, on libère des quantités très significatives de chaleur permettant de produire de grandes quantités d'électricité. Un gramme d'uranium produit autant d'énergie que 2,9 tonnes de charbon, 1,9 tonnes de pétrole et 1,7 tonnes de gaz. Par ailleurs, il a l'énorme avantage d'une logistique et d'un transport hyper simples. Sachant qu'une centrale thermique consomme de l'ordre de 9000 tonnes de charbon par jour, il faudra sur l'année trente vraquiers de 110000 tonnes/an (soit environ un tous les 12 jours) pour approvisionner la centrale. A puissance équivalente, deux wagons ferroviaires une fois par an suffiront pour approvisionner une centrale nucléaire.

Contrairement au gaz, au pétrole et au charbon qui sont surtout des métiers d'OPEX<sup>1</sup> (le coût de la matière représente 60% à 90% du coût du MWh électrique), le nucléaire est un business de CAPEX<sup>2</sup> où le combustible uranifère compte pour moins de 5% dans le prix du MWh électrique. Contrairement au gaz, le MWh électrique est donc peu sensible aux éventuelles fluctuations du prix de l'Uranium. En revanche, les investissements sont extrêmement élevés, les temps de construction très longs et les coûts pour garantir la sécurité des centrales onéreux.

## Extraction, raffinage et enrichissement

Traditionnellement, l'Uranium était extrait par excavation de la roche dans des mines souterraines ou à ciel ouvert. Toutefois une autre méthode est aujourd'hui très utilisée : l'extraction par lixiviation (i.e. dissolution) à l'acide sulfurique<sup>3</sup>. Elle consiste à injecter via un puits une solution d'acide sulfurique dans le gisement uranifère puis à collecter en surface via un autre puits le soluté contenant de l'uranium dissous. Cette méthode représente aujourd'hui 57% de l'Uranium produit dans le monde. L'extraction de l'Uranium est alors conditionnée par la disponibilité de l'acide sulfurique, ce dernier étant fabriqué à partir du soufre provenant en majorité de la désulfuration du pétrole ou du gaz auxquels il est associé sous forme d'acide sulfhydrique H<sub>2</sub>S (très peu de soufre est encore aujourd'hui extrait dans les mines<sup>4</sup>). La lixiviation est appliquée de façon extensive au Kazakhstan premier producteur mondial pesant pour environ 43% de la production globale.

En sortie de mine, le minerai est finement broyé puis traité chimiquement pour en extraire un Uranium très concentré, sous forme d'une poudre jaune appelée « *yellow cake* »<sup>5</sup> (octaoxyde de triuranium, U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>). Pour 1000 tonnes de minerai, on obtient suivant les cas entre 1,5 et 10 tonnes de yellow cake contenant 75% d'Uranium. Le yellow cake est ensuite débarrassé de ses impuretés pour obtenir de l'Uranium pur.

A ce stade, le yellow cake raffiné est composé de 99,3% g d'U<sup>238</sup> et de seulement 0,07% U<sup>235</sup>. Ce mélange est beaucoup trop peu concentré en isotope fissile (seul l'isotope <sup>235</sup>U est fissile) pour être utilisé directement dans les centrales nucléaires. Il doit être enrichi pour atteindre des concentrations de l'ordre de 4% en U<sup>235</sup>.

---

1 OPEX = OPERational EXpenditures soient coûts de fonctionnement

2 CAPEX = CAPerational EXpenditures soient coûts d'investissement

3 <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01908704/document/>

4 L'écrivain naturaliste italien Verga a rédigé des pages dramatiques sur les mineurs de soufre en Sicile, à la fin du XIXe siècle

5 <https://www.edf.fr/groupe-edf/comprendre/production/nucleaire/uranium-combustible-nucleaire>



L'enrichissement se réalise rarement dans les pays producteurs. Ce sont au contraire les grands pays consommateurs (France, Etats-Unis, Russie) qui ont la main sur cette filière (i.e. Orano en France) hautement stratégique. L'opération d'enrichissement comporte trois étapes successives.

La **conversion** transforme l'uranium naturel sous forme liquide en hexafluorure d'Uranium ( $UF_6$ ), point d'entrée de l'enrichissement. Seules onze usines dans le monde peuvent réaliser cette opération d'où un potentiel goulet d'étranglement.

Vient ensuite l'opération d'**enrichissement** propre réalisée par diffusion gazeuse ou centrifugation. Seuls 12 pays sont capables de mener à bien l'enrichissement. Toutefois, ce marché libéralisé étant en surcapacité, la Russie a pu profiter de ses faibles coûts de production pour en contrôler 36%.

La troisième étape est l'**assemblage**. Elle consiste à transformer l'hexafluorure d'uranium enrichi en oxyde d'uranium conditionné en petites pastilles cylindriques qui seront empilées dans de longs tubes métalliques appelés « *crayons* ». Immérgés dans l'eau du noyau de la centrale, les crayons seront rechargés périodiquement.

| Pays         | ktonnes | Part |
|--------------|---------|------|
| Australie    | 1684    | 28%  |
| Kazakhstan   | 815     | 13%  |
| Canada       | 588     | 10%  |
| Russie       | 481     | 8%   |
| Namibie      | 470     | 8%   |
| South Africa | 320     | 5%   |
| Niger        | 311     | 5%   |
| Brésil       | 277     | 5%   |
| Chine        | 224     | 4%   |
| Mongolie     | 145     | 2%   |
| Reste monde  | 725     | 12%  |
| Total        | 6040    | 100% |

*Figure 1 – Réserves d'Uranium 2021 récupérables à un coût inférieur à 130\$/kgU*

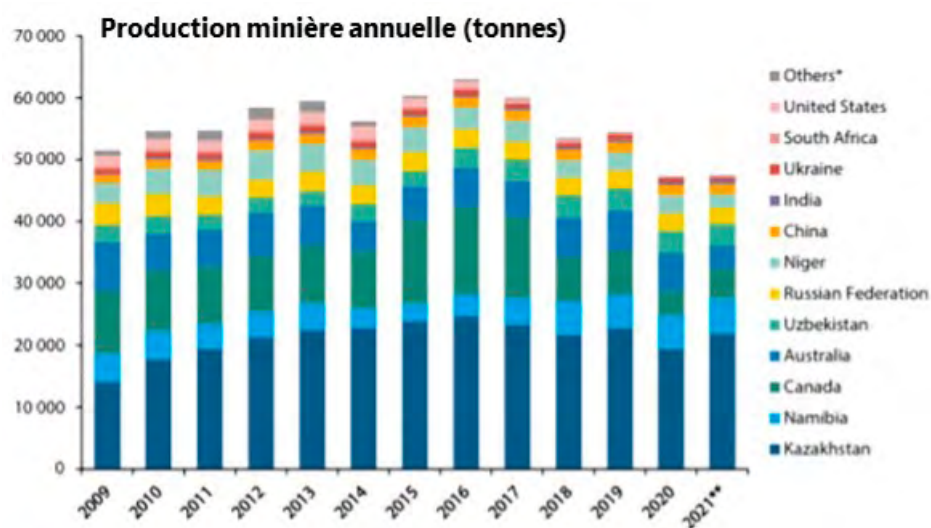
Source des données : World Nuclear Association & Nuclear Energy Agency

## Réserves mondiales

Les réserves mondiales (actualisées en 2022) sont de 6 millions de tonnes (*Figure 1*). Elles sont concentrées à 90% dans une dizaine de pays dont plus des deux tiers dans le top 5 Australie, Kazakhstan, Canada, Russie et Namibie. La liste est complétée par le Niger, l'un des fournisseurs historiques de l'Union Européenne. L'Europe recèle dans son sous-sol 75000 tonnes d'Uranium (1,25% des réserves mondiales) principalement en Espagne, en Slovaquie et en Slovénie. Ces réserves ne sont pas exploitées à ce jour.

## Producteurs et consommateurs. Le grand paradoxe

Au cours des 15 dernières années, la production mondiale d'Uranium (*Figure 2 haut*) montre deux périodes distinctes. Une période de croissance continue jusqu'à atteindre un maximum de 60000 t/an en 2016, puis une décroissance assez importante en dessous des 50 000 tonnes due notamment à la dépression des prix mais aussi à la pandémie du COVID19 qui a provoqué la fermeture temporaire de nombreuses mines dans le monde. En 2022, la production s'est légèrement redressée mais restait sous le seuil des 50000 tonnes.



| Pays               | Tonnes | Part |
|--------------------|--------|------|
| Kazakhstan         | 21227  | 43%  |
| Canada             | 7351   | 15%  |
| Namibie            | 5613   | 11%  |
| Australie          | 4553   | 9%   |
| Ouzbekistan (est.) | 3300   | 7%   |
| Russie             | 2508   | 5%   |
| Niger              | 2020   | 4%   |
| Chine (est.)       | 1700   | 3%   |
| Inde (est.)        | 600    | 1%   |
| Afrique Sud (est.) | 200    | 0%   |
| Reste monde        | 283    | 1%   |
| Total              | 49355  | 100% |

*Figure 2 – Haut – Historique de production 2009 à 2021*

*Bas - Principaux producteurs d'Uranium 2022*

*Source des données : World Nuclear Association*

5 pays (Kazakhstan, Canada, Namibie, Australie et Ouzbékistan - **Figure 2 bas**) concentrent 85% de la production mondiale dont 43% pour le seul Kazakhstan. La croissance y est impressionnante : de 3720 tonnes en 2004 à 23127 dix ans plus tard. 80% de la production mondiale d'Uranium est dans les mains d'organismes publics et gouvernementaux contre seulement 20% dans le privé.

La société nationale kazakhe Kazatomprom est le leader mondial concentrant 25% de l'extraction. Elle est suivie par les Chinois de CNNC (China National Nuclear Corporation) et CGNPC (China General Nuclear Power Corporation) totalisant à elles deux 16 % de la production. Viennent ensuite le russe Rosatom (16%), le français Orano (9%) et l'ouzbek Navoi (7%). Dans le secteur privé, seul le canadien Cameco (15%) occupe une place importante.

L'un des grands paradoxes de l'Uranium est que les grands pays producteurs (hormis la Russie) sont différents des consommateurs : Etats-Unis, Chine, France, Russie et Corée du Sud représentent les trois quarts du marché mondial (**Figure 3**). 70% de l'Uranium est extrait dans des pays qui n'en utilisent pas : ainsi le Kazakhstan, premier producteur mondial, n'a pas de centrales nucléaires. Réciproquement 90% de l'Uranium est consommé dans des pays qui n'en produisent pas.

| Pays         | Part |
|--------------|------|
| USA          | 28%  |
| Chine        | 15%  |
| France       | 13%  |
| Russie       | 10%  |
| Corée du Sud | 7%   |

*Figure 3 – Principaux consommateurs d’Uranium 2022*

Source des données : WNA & USGS

La production primaire (i.e. minière) d’Uranium ne couvre aujourd’hui que les 5/6 de la demande mondiale estimée à 60000 tU/an. Le complément (i.e. secondaire) provient principalement du recyclage du combustible usé ainsi que de la progressive dénucléarisation de l’arsenal militaire faisant suite aux accords de démantèlement entre les USA et l’URSS/Russie.

Contrôlée par les pays consommateurs, la production secondaire repose sur les 5 leviers décrits dans l’encadré de la **Figure 4**. Selon la NEA, elle représentait en 2021 de l’ordre de 10 500 tU/an. Sa taille est vouée à décliner au cours des prochaines années. La World Nuclear Association<sup>6</sup> l’estime entre 6000 et 7000 tU/an à l’horizon 2040.

---

<sup>6</sup> <https://world-nuclear.org/our-association/publications/global-trends-reports/nuclear-fuel-report>



- ◇ *Le combustible appauvri contenant un mélange de plutonium (8,5%  $^{238}\text{Pu}$  et 91,5% d' $^{238}\text{U}$  est retraité pour fabriquer un nouveau combustible appelé MOX (Mélange d'Oxydes  $\text{PuO}_2$  et  $\text{UO}_2$  appauvri). Le  $^{238}\text{Pu}$  remplace l' $^{235}\text{U}$  habituellement employé comme isotope fissile. Ce combustible s'utilise dans certains réacteurs dit à eau légère (ou eau pressurisée). Seul un petit nombre de réacteurs peuvent actuellement utiliser ce combustible et en quantité limitée. Le MOX représente environ 5% de l'offre mondiale de combustible. 23 réacteurs français (sur 25 dans le monde) peuvent utiliser le MOX*
- ◇ *Le RepU<sup>7</sup> (Reprocessing Uranium ou URT -Uranium de ReTraitement en français) consiste à réenrichir du combustible appauvri qui ne contient plus qu'1% d' $\text{U}^{235}$ . Appliqué seulement en France et en Russie, il représente environ 1% de l'offre mondiale de combustible. Cette technique au coût très élevé est assez peu utilisée*
- ◇ *Le SDU (Stock Depleted Uranium)<sup>8</sup>. Il s'agit d'un sous-produit de l'opération d'enrichissement, mais avec moins d' $\text{U}^{235}$  (entre 0,25% et 0,35%, contre 0,71% dans la nature). Cette offre représente 1.2 million de tonnes d'uranium*
- ◇ *L'underfeeding qui consiste à charger le noyau du réacteur avec moins d'Uranium*
- ◇ *Récupération et recyclage de l'Uranium fissile militaire utilisé dans les têtes nucléaires*

*Figure 4 – Principales méthodes de production secondaire*

## Géopolitique de l'Uranium : mainmise de la Chine

Des invasions des régions levantines par les pharaons à la recherche du bois aux deux dernières Guerres Mondiales dominées par le charbon et le pétrole, l'Histoire nous enseigne que le contrôle des ressources minières et énergétiques a toujours fait l'objet de convoitises et déclenché des conflits de tout type. Notre monde moderne n'y échappe pas. Face à une nouvelle logique de blocs (BRICS/US/Europe) associée à des échanges internationaux de plus

7 [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1411\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1411_web.pdf)

8 [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_13470/management-of-depleted-uranium](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_13470/management-of-depleted-uranium)

en plus conflictuels (conflits diplomatiques, commerciaux et même militaires), le contrôle des ressources uranifères attire plus que jamais la convoitise des grandes puissances mondiales.

Engagée dans une méga-décarbonation en vue d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2060, la Chine projette de construire entre 6 et 10 réacteurs nucléaires par an. D'ici une décennie, l'Empire du Milieu devrait gérer le plus grand parc nucléaire du monde devant les États-Unis et la France. Aussi, Pékin poursuit-il une politique agressive d'exploration et d'exploitation minière mais aussi d'enrichissement, ceci afin de devenir autosuffisant à terme sur l'ensemble du cycle. Le nucléaire représente aujourd'hui en Chine 4,7% de la production d'électricité. Son objectif est d'atteindre 10% d'ici 2030.

Comme pour la plupart des ressources minérales, la Chine est en train d'effectuer une véritable OPA mondiale sur les réserves d'Uranium. En contrepartie de fournitures d'Uranium elle investit massivement dans les pays producteurs et propose son assistance au développement des filières nationales.

En Namibie (troisième producteur mondial) elle a commencé à investir en 2012. Après avoir racheté en 2019 les mines de Rössing et d'Husab, elle y contrôle la majorité de la production à travers ses entreprises CNNC, CNUC and CGN-URC. En pratique 80% des exportations Namibiennes d'Uranium sont destinées à la Chine.

Les entreprises chinoises ont également obtenu des permis d'exploration en Égypte, au Zimbabwe et au Botswana. En Asie centrale, Pékin a développé des relations bilatérales avec l'Ouzbékistan et le Kazakhstan en vue d'y investir dans le futur.

Au Niger dès 2007, la CNNC a exploité le gisement d'Azelik mettant fin au monopole Français. Après le coup d'État et l'expulsion d'Orano, elle y a renforcé sa présence en obtenant d'autres concessions.

En Russie, les trois seules mines encore en activité (Priargunsky -Transbaïkalie-, Khiagda -Bouriatie- et Dalur -Oural-) sont largement subventionnées par Moscou qui souhaite à la fois garantir son approvisionnement stratégique et soutenir l'économie des trois régions. Toutefois, depuis la chute de l'Union Soviétique en 1991, la Russie a utilisé la matière fissile provenant du démantèlement d'une partie de son arsenal atomique dans le cadre du programme russo-américain « *Megatons to Megawatts* » (1993-2013). Le Kremlin mise aussi sur un nouveau méga-gisement à Elkon (République de Sakha). Compte tenu de son gigantesque potentiel (600000 tonnes de réserves avec une teneur de 0.15%<sup>9</sup>), il pourrait changer la

---

9 <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2009/cn175/URAM2009/Session%20>

donne géopolitique. Bien que son ouverture ait été retardée par manque d'investissements, on attend dès 2025 une production de 5000 tonnes/an.

Sans pour autant y avoir extrait un seul gramme d'Uranium à ce jour, la société russe Rosatom a aussi essayé de s'implanter en Australie, aux États-Unis, en Tanzanie et au Zimbabwe via des rachats d'entreprises.

L'objectif principal du Kremlin est de contrebalancer l'activisme chinois en exploitant d'autres minerais stratégiques : un véritable « *bras de fer* » entre les deux pays s'est installé au Kazakhstan, en Ouzbékistan mais aussi au Niger où la diplomatie Russe s'active pour obtenir des concessions.

Si l'invasion de l'Ukraine a relancé des projets miniers en Slovaquie, en République Tchèque, en Roumanie et en Hongrie, l'Europe (1,5% des réserves mondiales) reste quant à elle un petit poucet. L'excommunication d'Orano au Niger où la Compagnie française a annoncé la suspension de ses activités<sup>10</sup> à partir du 31/10/2024 n'est pas de bon augure. L'entreprise juge en effet impossible de continuer à travailler dans ce pays dirigé depuis quinze mois par une junte militaire très hostile à la France. Faisant de la souveraineté minière un de leurs mantras la junte a rompu avec Paris, renvoyant dans l'Hexagone les militaires français présents ainsi que l'ambassadeur. Dans le même temps, ils se sont rapprochés de nouveaux partenaires comme la Chine, la Russie et même l'Iran.

## Les marchés et les prix

Comme le gaz, l'Uranium se négocie principalement à travers des contrats long terme (plus de 85% des volumes échangés). Il s'agit de contrats signés entre le producteur et le consommateur sur une durée moyenne de 10 à 15 ans avec des prix révisés régulièrement. Toutefois, il existe aujourd'hui un marché spot (moins de 15% des volumes - principalement CMENew-York/Chicago<sup>11</sup>) où l'investisseur/spéculateur privé peut acheter/vendre des contrats futurs de faible volumes (250 livres U308). A l'échéance du contrat il n'y a pas de livraison physique mais un « cash settlement » : l'acheteur ou le vendeur reçoit/paie la différence du prix d'achat/vente du contrat par rapport au prix spot publié par l'UxC LLC<sup>12</sup>.

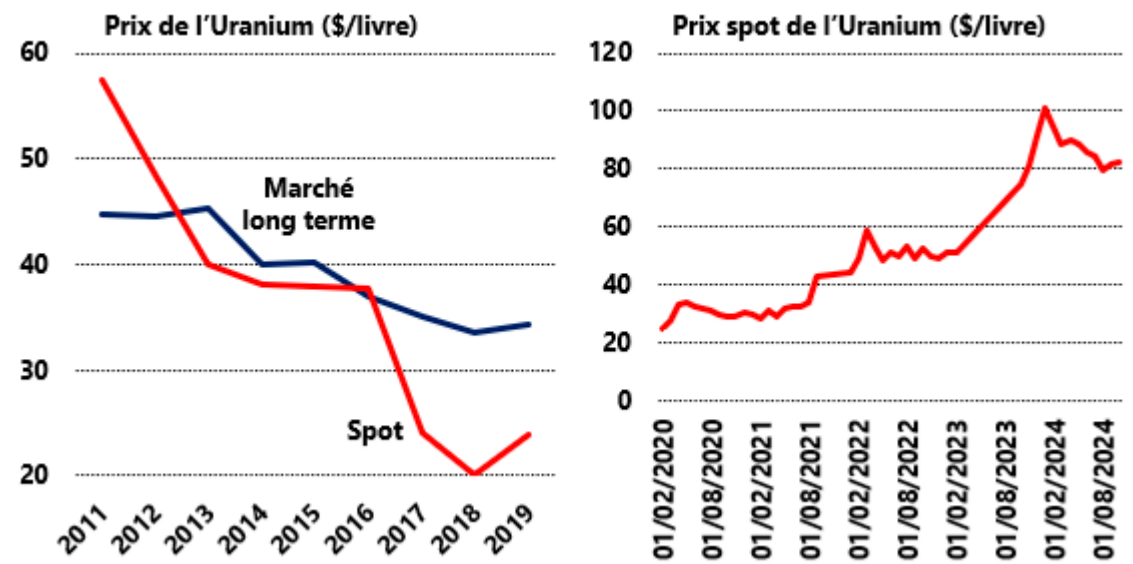
---

4/01\_79\_Boytsov\_Russia.pdf

10 [https://www.francetvinfo.fr/societe/nucleaire/le-specialiste-francais-du-nucleaire-orano-suspend-la-production-d-uranium-de-sa-filiale-au-niger-faute-de-pouvoir-continuer-a-travailler\\_6856826.html](https://www.francetvinfo.fr/societe/nucleaire/le-specialiste-francais-du-nucleaire-orano-suspend-la-production-d-uranium-de-sa-filiale-au-niger-faute-de-pouvoir-continuer-a-travailler_6856826.html)

11 <https://www.cmegroup.com/markets/products.html#sortAsc>

12 UxC LLC est la principale entreprise d'analyse et de recherche sur le marché de l'uranium localisée à Roswell, en Georgia (USA)



*Figure 5 – Gauche - Evolution des prix MLT et spots entre 2009 et 2019*

*Droite - Prix mensuel moyen sur le marché spot depuis 2020 à 2024*

*Source des données : NEA & investing.com*

Comme le montre la **Figure 5 – gauche** sur la durée, les marchés long terme lissent les prix par rapport aux valeurs spots.

Après avoir atteint des sommets en 2007 avec un record historique de 137 \$/lb, les prix spots étaient restés assez déprimés au cours des années 2010 à 2020 avec notamment un plus bas à 20 \$/lb en 2018. Depuis, les cours se sont largement ressaisis, le yellow cake cotant 50 \$/lb début 2023, puis atteignant 107 \$/lb en janvier 2024, son plus haut niveau depuis 17 ans. En cause le Kazakhstan (43% de la production mondiale) qui a été dans l'obligation de réduire sa production en raison de la pénurie d'acide sulfurique utilisé dans la méthode d'extraction par lixiviation. Cette moindre disponibilité d'acide sulfurique provient à la fois de certaines baisses de production du pétrole et du gaz (qui rappelons le sont aujourd'hui les principales sources de soufre), de problèmes logistiques ainsi qu'une forte demande du secteur agricole. Sur l'année 2024, face à une demande croissante, les prix ont un peu diminué mais restent élevés entre 80 \$ et 90 \$.

Sur le marché spot, on signale un fort intérêt à l'achat de certains fonds localisés aux USA et en Suisse et spécialisés dans les investissements stratégiques à long terme. Ces mêmes fonds ont procédé à des achats massifs sur le marché des métaux précieux, provoquant notamment une flambée des prix de l'or et surtout de l'argent.



## L'offre et la demande à l'horizon 2040

Il existe aujourd'hui dans le monde 436 réacteurs nucléaires pour une puissance de l'ordre de 390 GW. Il faut y rajouter 173 projets [dont 53 GW<sup>13</sup> en construction seront mis en production à l'horizon 2028]<sup>14</sup>. Mais, compte tenu de la décarbonation massive des pays émergents, le futur de l'atome ne s'arrêtera pas là.

Dans son dernier rapport sorti en 2023<sup>15</sup>, la NEA (Nuclear Energy Agency) considère qu'à l'horizon 2040, la puissance mondiale (scénario médian) pourrait s'accroître de 75%. Les 675 GW de puissance correspondante (**Figure 6 - gauche**) doublerait alors les besoins actuels pour atteindre une demande de l'ordre de 110 000 tU/an (**Figure 6 - droite**). Face à cette explosion de la demande, l'offre pourra-t-elle suivre ?

Après l'accident de Fukushima de mars 2011, l'ensemble de la filière nucléaire a dû faire face à une crise aux conséquences très graves : forte chute des investissements, décision de retarder certains programmes, faiblesse des prix de l'Uranium forçant de nombreuses mines à réduire leur production voire fermer pour les moins compétitives : mine de McArthur River et usine de Key Lake au Canada, réductions des productions kazakhe et nigérienne, arrêt du projet Langer Heinrich en Namibie. Cerise sur le gâteau, en 2020, la pandémie de COVID-19 a eu un impact considérable sur la production avec de nombreuses mines temporairement fermées. Fort heureusement, pour des raisons stratégiques (garantir l'approvisionnement des porte-avions et des sous-marins à propulsion nucléaire) et sur ordre du Ministère de la Défense US, certaines mines américaines non profitables n'ont pas été fermées.

La crise est heureusement derrière nous. La hausse des prix a relancé la production notamment aux USA où l'opérateur Energy Fuels a mis trois nouvelles mines en production en Arizona et en Utah (Pinyon Plain, La Sal et Pandora). En 2024, deux autres mines devraient être mises en service dans le Colorado et le Wyoming.

Le socle développé et des développements aujourd'hui décidés (**partie rouge Figure 6 - droite**) sont loin de satisfaire les besoins des deux prochaines décennies. Pour y arriver, la NEA compte sur de nombreux développements envisagés chez les producteurs historiques (Australie, Canada, Namibie et Niger) mais aussi chez des « *new comers* » comme le Botswana, le Groenland-Danemark, la Finlande, la Mauritanie, la Mongolie et la Tanzanie.

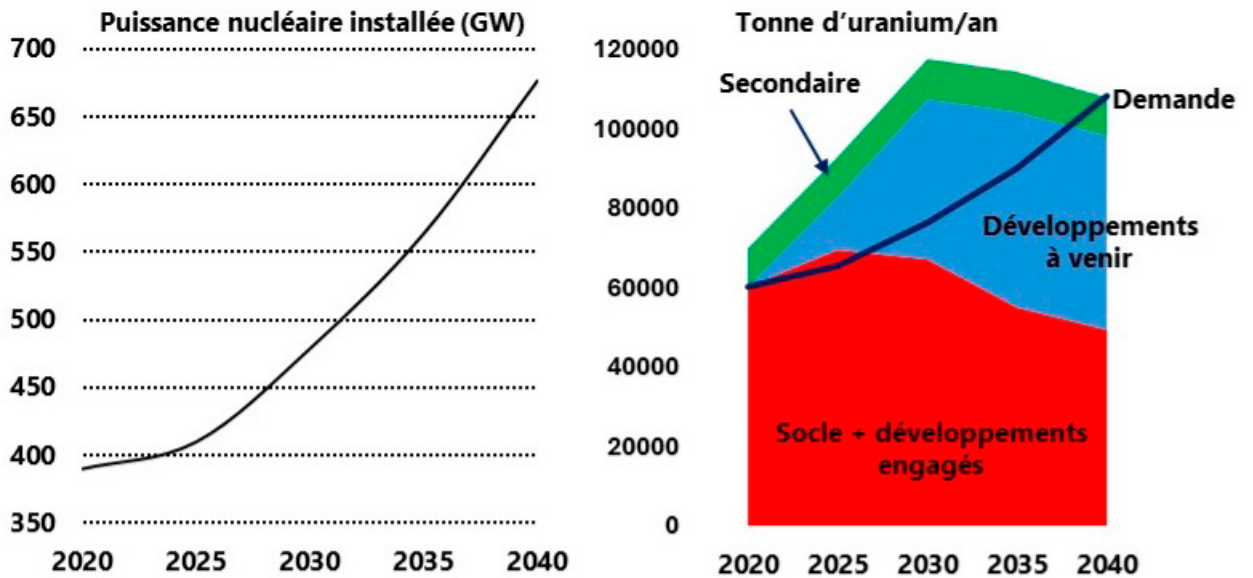
---

13 Parmi ces 53 GW 40 GW se situent dans les pays émergents contre seulement 14 au sein de l'OCDE

14 <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2022-v3-lr.pdf>

15 [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_52718/uranium-2020-resources-production-and-demand](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_52718/uranium-2020-resources-production-and-demand)

Selon la NEA, les nouvelles ressources 2040 (partie bleue scénario médian) viendraient surtout d'Australie (de 5000 t/an en 2025 à 13000 t/an en 2040), du Canada (de 12500 t/an en 2025 à 13000 t/an en 2040) et du Niger (de 1700 t/an en 2025 à 7400 t/an en 2040) tandis que la Kazakhstan, actuel leader mondial, verrait sa production se réduire de moitié (de 28000 t/an en 2025 à 14000 t/an en 2040). On assisterait donc à un certain rééquilibrage géographique en faveur des pays de l'OCDE.



*Figure 6 – Gauche – Accroissement de la puissance  
Droite – Comparaison prospective offre vs demande*

*Source de données : Nuclear Energy Agency Reference scenario*

En y rajoutant les 10000 tonnes annuelles de ressources secondaires disponibles dans les pays consommateurs, on arrive à couvrir les besoins des 675 GW anticipés à l'horizon 2040. Il est à noter que ces 675 GW devraient produire en rythme annuel (taux de charge de 80%) de l'ordre de 5000 TWh d'électricité décarbonée soit un peu moins du double de la production 2023 (2680 TWh)<sup>16</sup>. Malgré cette croissance significative, la part électronucléaire représentant aujourd'hui 9% de la production totale d'électricité n'évoluera que très peu : elle devrait représenter 12% à l'horizon 2040.

16 Source : Energy Institute

# Conclusion

Dans la configuration actuelle, le nucléaire ne pourra donc rester qu'une source d'électricité d'appoint au sein de la future transition énergétique mondiale. Pour passer à un niveau supérieur et s'affranchir des limites minières, il faut changer de technologie et passer au nucléaire de 4<sup>ème</sup> génération aussi appelés « *surgénérateurs* ».

Alors que dans les réacteurs classiques, l' $^{238}\text{U}$  est la « *gangue* » du combustible (qui est l' $^{235}\text{U}$ ) et le  $^{239}\text{Pu}$  un déchet « *heureux* » de la réaction nucléaire, dans les surgénérateurs le combustible est le  $^{239}\text{Pu}$  fabriqué directement à l'intérieur du réacteur via la capture de neutrons par l' $^{238}\text{U}$ . Le surgénérateur est un peu comme « *un moteur fabriquant l'essence qu'il consomme* ». Mais surtout, l' $^{238}\text{U}$  étant naturellement 140 fois plus abondant dans la nature que l' $^{235}\text{U}$ , le combustible nucléaire deviendrait de ce fait pratiquement inépuisable à l'échelle humaine.

Il n'existe aujourd'hui que trois surgénérateurs dans le monde : deux en Russie et un expérimental en Chine. La France fut pourtant pionnière en la matière avec le réacteur expérimental Rapsodie durant les années 1960, le prototype Phénix au début des années 1970 puis finalement surgénérateur industriel Superphénix mis en service en 1986 mais définitivement arrêté en 1997 sous la pression des Verts. Peut-être trop ambitieux, Superphénix renaquit de ses cendres en 2006 grâce au lancement du projet ASTRID<sup>17</sup>. Sans avoir vu le jour, ASTRID fût arrêté en 2019. Il n'y a plus à ce jour de projet de surgénération en France.

Un autre élément se prête à la surgénération nucléaire : il s'agit du Thorium<sup>232</sup> qui en captant un neutron se transforme spontanément en  $^{233}\text{U}$  fissile. Bien que la technologie soit attrayante, son développement industriel n'est pas attendu avant une vingtaine d'années. L'Inde qui dispose de 25% des réserves mondiales de Thorium a intégré la filière dans sa stratégie énergétique. La technologie intéresse également l'Australie et la Turquie possédant des réserves importantes. La France n'est pas en reste : le granite de Quintin en Bretagne contient d'abondantes réserves de Thorium connues de longue date. Les Français seraient-ils prêts à rouvrir des mines sur leur sol ?

---

17 Acronyme de "Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration"