

## Vers un choc d'uranium avant la fin du siècle

### Un nucléaire pour 50 ou 5000 ans ?

#### Résumé

Au regard de trois scénarios d'évolution du parc nucléaire mondial, l'état des connaissances en matière de disponibilité géologique de l'uranium confirme l'urgence absolue du nucléaire durable.

Au-delà des considérations éthiques qui auraient dû nous imposer depuis longtemps de basculer vers le nucléaire durable, la motivation première des RNR relève de la rareté de la ressource en uranium qui est le carburant unique de l'énergie nucléaire.

Il n'est pas contestable que les ressources d'accessibilité raisonnable sont en train de s'épuiser et que nous sommes en train d'attaquer les ressources géologiquement de plus en plus difficiles d'accès. On s'achemine donc inexorablement vers une pénurie d'approvisionnement en uranium dès le milieu de ce siècle même dans des scénarios de croissance modérée du parc nucléaire mondial.

La question est maintenant de savoir si l'on veut du nucléaire pour 50 ou 5 000 ans.

Si l'on est convaincu que le nucléaire est le seul recours – au côté de l'hydraulique – pour disposer d'une énergie décarbonée et pilotable, alors les pays avancés en matière de recherche et de développement technologique, se doivent de basculer dès que possible vers les réacteurs à neutrons rapides (RNR) capables d'utiliser tout l'uranium naturel.

Alors que la question de la sécurité d'approvisionnement énergétique est au cœur des débats, la France s'est gravement fourvoyée avec l'abandon de son programme de recherches Astrid (réacteur prototype industriel de puissance à neutrons rapides), vingt ans après la déroute de la filière rapide française avec l'arrêt de Superphénix.

Il faut bien comprendre, à l'opposé du discours actuel de la filière, qu'il n'y a pas de continuité entre le nucléaire à neutrons lents et le nucléaire durable. Au contraire, il y a rupture radicale, à la fois de matière première, de réacteurs et d'usines du cycle car c'est l'ensemble de l'uranium naturel qui est utilisé à l'inverse des réacteurs actuels qui n'en utilisent que 0,7%.

Plusieurs décennies seront nécessaires pour mettre au point un prototype de RNR de puissance, le déployer industriellement avec les installations du cycle associées. Faute de quoi le nucléaire de fission s'arrêtera dans moins d'un demi-siècle. L'urgence est absolue.

Claire Kerboul – <https://www.nucleairedurable.fr>

## Introduction

Les réacteurs nucléaires de fission, en France et quasiment partout dans le monde, sont conçus pour fissionner l'uranium 235, seul isotope fissile existant sur Terre mais présent à très faible teneur (0,7%) dans l'uranium naturel. Ces réacteurs fonctionnent avec des neutrons lents qui constituent l'optimum énergétique pour fissionner l'uranium 235 ; en revanche ils ne sont pas appropriés pour casser efficacement les autres noyaux lourds (uranium 238, plutonium et autres transuraniens<sup>1</sup>).

On s'attendrait donc à ce que la question de la disponibilité de la ressource en uranium soit au cœur des politiques électronucléaires. Or, en France, il n'en est rien. Négligeant l'évaluation des réserves accessibles d'uranium et la vitesse avec laquelle celles-ci sont consommées, des dirigeants de la filière soutiennent que le prix de l'uranium est suffisamment bas pour remettre à plus tard les recherches nécessaires à la mise au point d'un réacteur à neutrons rapides de puissance (RNR)<sup>2</sup>.

Pourtant, l'examen des données géologiques est sans appel : au rythme où nous consommons l'uranium, et même en supposant une croissance modeste de cette consommation, le nucléaire de fission, s'il reste maintenu dans la technologie des réacteurs à neutrons lents (REP, EPR), s'arrêtera bien avant la fin du siècle par épuisement de la matière fissile.

Découvert en 1789 par le chimiste allemand Martin Klaproth, l'uranium reste jusqu'à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle un métal sans intérêt. Tout change avec la découverte de la fission en 1938 : l'uranium devient la matière première de l'industrie nucléaire, qui fait ses premiers pas dans une compétition intense avec l'industrie pétrolière. De 1945 à 1985, on assiste à une ruée vers l'uranium qui a pu être comparée à la « ruée vers l'or » au XIX<sup>ème</sup> siècle.

Après l'éclipse nucléaire mondiale qui succède à Tchernobyl (1986), et malgré un fléchissement marqué en Europe à la suite de l'accident de Fukushima (2011), dès le début des années 2000 l'intérêt mondial pour l'énergie nucléaire est relancé.

Dans un contexte de forte expansion de la Chine et de l'Inde, d'incertitudes sur la disponibilité des ressources fossiles et d'inquiétudes sur l'obligation de limiter les émissions de gaz à effet de serre, cette relance est maintenant inexorable dans toutes les régions du monde.

---

<sup>1</sup> Noyaux plus lourds que l'uranium (neptunium, plutonium, américium, curium etc.).

<sup>2</sup> Cf. audition Assemblée nationale du 7 décembre 2022 - Souveraineté et indépendance énergétique de la France : Audition de l'administrateur général du CEA ; audition Sénat du 13 février 2024 – Table ronde « Nucléaire du futur – Enjeux et perspectives » avec les représentants du CEA, d'EDF et d'Orano.

## Estimation des ressources mondiales d'uranium sur Terre

L'uranium est présent dans les différentes roches de l'écorce terrestre à une concentration d'environ un à trois grammes par tonne de roche<sup>3</sup>. On le rencontre dans des terrains granitiques, dans des roches sédimentaires, dans des roches ignées et même dans l'eau.

Les grands pays producteurs d'uranium sont actuellement l'Australie (28 %), le Kazakhstan (13 %), le Canada (10 %), la Russie (8 %), la Namibie (8 %), l'Afrique du Sud (5 %), le Brésil (5 %) et le Niger (5 %) qui disposent de plus de 82 % de la ressource mondiale. Les autres pays sont la Chine (4 %), l'Ukraine (2 %), l'Ouzbékistan (2 %), la Mongolie (2 %), les Etats-Unis (1 %), la Tanzanie (1 %), le Botswana (1 %)<sup>4</sup>.



Figure 1 - Répartition mondiale des ressources d'uranium identifiées.

L'existence de gisements d'uranium est caractérisée par la présence d'éléments radioactifs en quantité significative. Cette radioactivité, qui impose des contraintes d'exploitation, est en revanche fort utile pour la prospection et l'évaluation des teneurs en uranium des minerais<sup>5</sup>. Il en découle une certaine robustesse des données de prospection accumulées depuis des décennies dans le monde entier.

Le *Red Book*<sup>6</sup>, ou « *Livre rouge* », constitue le document de référence internationale de toutes les données concernant l'uranium, publié conjointement depuis 1965 par l'AIEA et l'AEN-OCDE, établi d'après les rapports des gouvernements sur l'exploration et la production d'uranium dans leur pays.

<sup>3</sup> Sa teneur dans l'eau de mer est beaucoup plus faible, de l'ordre de 3 microgrammes par litre.

<sup>4</sup> *Livre Rouge – 2022: "Uranium 2022: Resources, Production and Demand"* - OECD 2023 NEA No. 7634

<sup>5</sup> La prospection radiométrique est la méthode géophysique de détection de l'uranium via la détection du radium, descendant de l'uranium, dont le rayonnement est beaucoup plus pénétrant. L'investigation est complétée par une étude géochimique de détection d'un gisement éventuel grâce au halo de perturbation chimique induit par le gisement, suivie de sondages.

<sup>6</sup> [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_28569/uranium-resources-production-and-demand-red-book](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_28569/uranium-resources-production-and-demand-red-book).

Le *Livre rouge* mentionne à diverses reprises avoir effectué des corrections, sans toutefois les expliciter, pour tenir compte d'imprécisions ou d'omissions dans les déclarations. L'incertitude sur les estimations est donc certainement assez importante ; elle est de l'ordre de 20 voire 30% en comparant notamment certains déclaratifs d'une année sur l'autre.

Généralement les données sur les ressources d'uranium sont présentées selon une typologie qui reflète le degré de connaissance géologique et de récupérabilité de l'uranium :

Les **ressources identifiées** qui regroupent des ressources raisonnablement assurées d'extraction technologiquement réalisable et des ressources inférées, nécessitant des investigations supplémentaires avant une décision d'exploitation minière.

Les **ressources non-découvertes** qui regroupent des ressources pronostiquées et des ressources spéculatives dont l'existence est présumée par le raisonnement géologique<sup>7</sup>. Par définition ces ressources nécessitent des explorations de grande ampleur avant de pouvoir confirmer leur existence, leur teneur potentielle et les tonnages éventuels.

Certains auteurs invitent à la prudence quant à la prise en compte des ressources non-découvertes dans l'élaboration d'une politique énergétique : « *Bien que l'augmentation des dépenses d'exploration ait permis de découvrir de nouvelles ressources dans le passé, de tels investissements au XXI<sup>ème</sup> siècle pourraient ne pas donner lieu à des découvertes similaires* »<sup>8</sup>.

Les **ressources non-conventionnelles** car susceptibles d'exister dans certaines roches avec de très basses teneurs en uranium (phosphates, schistes, charbons, granites). Elles sont envisagées en sous-produit d'une exploration minière principale.<sup>9</sup> Les estimations des ressources non-conventionnelles sont par nature imprécises.

Certains intègrent les océans dans les ressources non-conventionnelles en raison de leur très faible teneur en uranium d'environ 3 microgrammes par litre. Compte tenu de leur volume d'environ 1,37 milliard de km<sup>3</sup>, les océans renferment 4 milliards de tonnes d'uranium constituant un « gisement » non-conventionnel considérable. Cependant, à supposer qu'on accepte de faire l'impasse sur les questionnements éthiques, la faisabilité technique d'une telle extraction demeure spéculative.

---

<sup>7</sup> Depuis 1976, ces ressources *non-découvertes* font l'objet d'un programme international sous l'égide de l'OCDE et de l'AIEA, « *International Uranium Resources Evaluation Project* » (IUREP) afin d'évaluer le potentiel uranifère de diverses régions du monde.

<sup>8</sup> Hall, Susan, and Coleman, Margaret, 2013, *Critical analysis of world uranium resources: U.S. Scientific Investigations Report 2012-5239*

<sup>9</sup> L'uranium contenu dans ces gisements est de faible qualité (0,01 à 0,17% d'uranium) et nécessite la production d'un autre produit pour soutenir son extraction (AIEA, 2010).

## Enseignements du Livre rouge 2022

Le *Livre rouge 2022 "Uranium 2022: Resources, Production and Demand"* correspond à la période allant du 1<sup>er</sup> janvier 2019 au 1<sup>er</sup> janvier 2021 pour 54 pays. Pour la première fois depuis les éditions précédentes du *Livre Rouge*, les ressources identifiées ont diminué d'environ -2% par rapport à 2019. Ces baisses résultent principalement de l'épuisement de certaines mines ou de l'arrêt de productions devenues non rentables (Canada, Kazakhstan, Russie, Ouzbékistan), voire de la réaffectation de certaines ressources vers des types de ressources moins assurées (Chine, Turquie). Dans l'autre sens, le Niger, la Namibie, la Mongolie et d'autres petits producteurs annoncent des ressources nouvelles.

Finalement, en 2022 le Livre Rouge estime les **ressources identifiées à environ 7,9 Mt** se répartissant entre **4,7 Mt de ressources raisonnablement assurées (RAR)** et **3,2 Mt de ressources inférées (IR)**.

Les **ressources non identifiées** seraient dans une fourchette de **10 à 15 Mt** dont **70 à 75% resteraient des ressources spéculatives**.

Le *Livre Rouge 2022* estime les **ressources non-conventionnelles** dans une fourchette allant de **39 à 57 Mt**<sup>10</sup>. Des activités d'exploration ou de production ont été mises en sommeil en raison de difficultés d'ordre technique, juridique, réglementaire, ou de réorientation vers des productions (acide phosphorique) pour l'agriculture et l'alimentation. Toutefois ces tentatives témoignent de l'intérêt de nombreux pays pour l'énergie nucléaire. Elles contredisent l'affirmation assez répandue que l'exploration de l'uranium serait à l'arrêt mais aussi que, si on la relançait, des quantités importantes seraient mises au jour.

Enfin, le *Livre rouge 2022* rappelle l'importance des délais nécessaires pour mettre en production des ressources d'uranium identifiées. Selon lui « *des tensions géopolitiques persistantes [qui] menacent la poursuite de certains aspects du commerce mondial des matières nucléaires, la capacité du marché à continuer de fournir une quantité adéquate d'uranium à la chaîne mondiale d'approvisionnement en combustible nucléaire sera mise à l'épreuve* ».

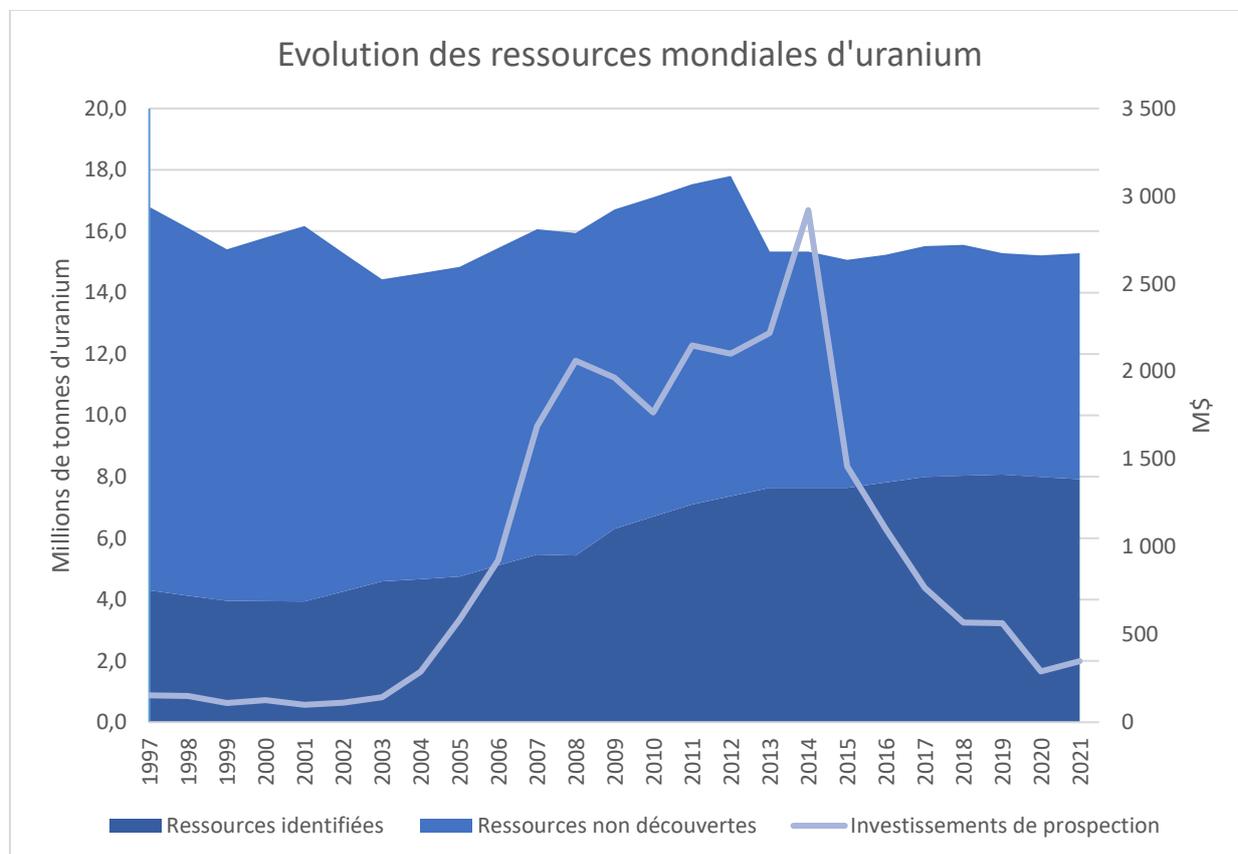
## Evolution des ressources d'uranium au cours des 25 dernières années

Il est intéressant de regarder l'évolution globale des données géologiques – ressources identifiées et ressources non-découvertes – collectées et analysées par le *Livre Rouge* de 1997 à 2021. La figure 2 ci-dessous résume, sur cette période récente de vingt-cinq ans, l'état de nos connaissances sur la disponibilité de la ressource en uranium à la surface de la Terre. Globalement, la somme des ressources

---

<sup>10</sup> Ibid. 4, p.9. En revanche, la base de données UDEPO (Uranium DEPOSIT) de l'AIEA dédiée aux gisements d'uranium dans le monde, inventorie les ressources non-conventionnelles et donne une estimation optimiste et maximale d'environ 61 Mt de ressources non-conventionnelles réparties dans 360 gisements situés dans 55 pays.

identifiées et des ressources non-découvertes reste quasiment constante autour de la valeur de 16 Mt (+/- 2 Mt). Pourtant depuis le tournant du XXI<sup>ème</sup> siècle, la plupart des pays disposant de sites miniers se sont efforcés d'augmenter leurs productions comme l'attestent des investissements massifs d'exploration et de développement de mines entre 2006 et 2015 (courbe claire).



**Figure 2 - Evolution des ressources d'uranium d'après les données du Livre Rouge de 1997 à 2022<sup>11</sup>.**

La croissance de l'exploration et de l'exploitation a principalement conduit à la transformation de ressources dont on supposait l'existence (ressources non-découvertes) en des ressources identifiées, sans identification de nouveaux gisements. Ce qui a changé est la faisabilité technologique de la récupération de l'uranium.

Dans une revue systématique des sites de production<sup>12</sup>, le recensement de 141 mines en exploitation fait état de 4,1 Mt de ressources *récupérables* auxquelles s'ajouteraient 1,45 Mt de ressources *inférées*. De fait, la capacité effective de production des mines, qui peut aller de 70% à 90% de la capacité autorisée, justifie une estimation prudente des quantités d'uranium réellement disponibles, même dans le cas de ressources identifiées.

<sup>11</sup> Cf. Différentes éditions du [Red Book](#) de l'OCDE/AEN, de 1997 à 2022

<sup>12</sup>Ibid 8.

La stabilité relative des ressources identifiées et non-découvertes au cours des 25 dernières années confirme les ordres de grandeur de la disponibilité de l'uranium à la surface de la Terre : de **6 à 8 Mt d'uranium récupérable** avec les technologies et l'énergie dont nous disposons aujourd'hui, et probablement **7 à 10 Mt d'uranium « non découvert »** dont la possibilité d'exploitation, si elle existe, est beaucoup plus incertaine, soit **un plafond total centré sur 15 à 16 Mt, affecté d'une forte incertitude**. Ces fourchettes prudentes tiennent compte du caractère déclaratif des données par les Etats et des diverses corrections introduites par le *Livre Rouge*.

### Estimation de l'évolution de la consommation au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle

Le parc nucléaire mondial est d'une puissance installée d'environ 400 GW qui consomme annuellement environ 61 000 tonnes d'uranium naturel<sup>13</sup>. Le *Livre Rouge* fournit une indication de l'ampleur de la croissance de la demande mondiale d'énergie nucléaire : « *la capacité nucléaire mondiale d'ici 2040 devrait rester au niveau actuel de 394 GW dans le cas d'une demande faible, mais passer à 677 GW dans le cas d'une demande élevée (soit une augmentation d'environ 70 % par rapport à la capacité de 2020)*.<sup>14</sup> La figure 3 ci-dessous montre l'évolution de la consommation mondiale d'uranium, entre 2020 et 2100, en fonction de trois hypothèses.

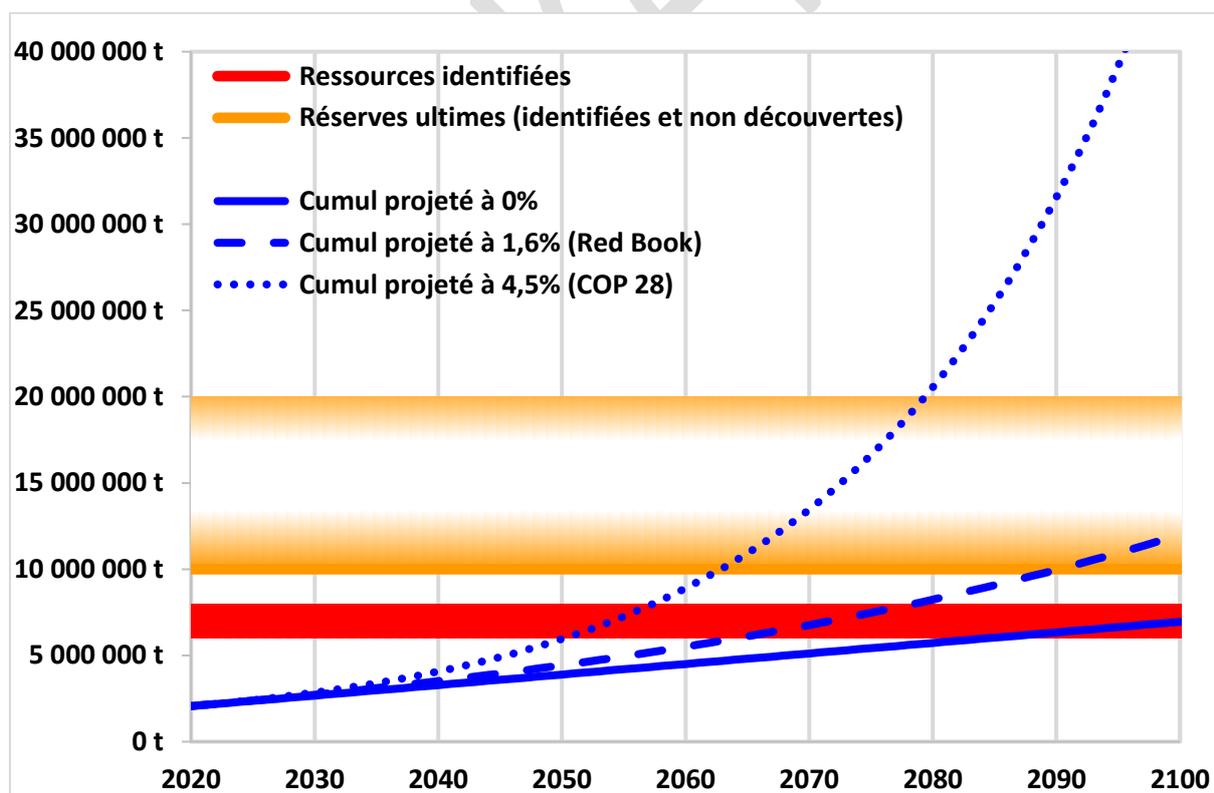


Figure 3 - évolution de la consommation d'uranium de 2020 à 2100 en fonction des trois scénarios.

<sup>13</sup> Ce parc étant constitué pour l'essentiel de réacteurs à neutrons lents ne consomme en réalité que l'isotope 235, soit 0,7% des 61000 tonnes extraites.

<sup>14</sup> Ibid. 3 page 15.

**L'hypothèse 1 d'un parc mondial sans croissance** : les réacteurs de type REP existants seraient progressivement renouvelés par des homologues de 3<sup>ème</sup> génération (par exemple EPR). Les 6 à 8 Mt d'uranium récupérables assurent un fonctionnement du parc jusqu'à la fin du siècle mais pas au-delà.

**L'hypothèse 2 d'une augmentation de 50% de la puissance du parc d'ici à 2050 correspondant à une croissance annuelle de 1,6%<sup>15</sup>** : ce scénario, considéré comme une évolution basse du nucléaire mondial, rencontre des difficultés dès le milieu du siècle. Dès 2060, on entre dans la pénurie d'approvisionnement : imaginer d'investir dans des réacteurs à neutrons lents, dont la durée de vie est d'au moins une soixantaine d'années, est illusoire.

**L'hypothèse 3 d'un triplement de la capacité nucléaire installée d'ici à 2050 correspondant à l'engagement pris lors de la COP 28 par une vingtaine de pays dont la France<sup>16</sup>** : sans préjuger de son réalisme industriel et politique, une telle croissance est d'ores et déjà quasiment impossible du point de vue de la ressource. Cette situation qui correspond à une nucléarisation volontariste de l'énergie mondiale pour assurer les besoins d'électricité pilotable devenus considérables, n'est pas tenable puisqu'il faudrait parier sur l'existence réelle des ressources non-identifiées à ce jour, dont près des trois-quarts sont spéculatifs.

Le fait est qu'il a toujours semblé difficile de considérer la pénurie physique dans les études prospectives, pourtant inéluctable si l'on en reste aux simples connaissances de la géologie. Rappelons ici l'analyse qu'en donnait Georges Capus en 2007 <sup>17</sup>« *Il serait risqué de suivre ceux qui considèrent, souvent par méconnaissance du sujet, que la distribution de l'uranium des gisements aisément récupérable [...] suit celle de l'uranium dans la croûte terrestre qui pourrait se distribuer selon un quasi-continuum des teneurs. La notion de ressources non conventionnelles<sup>18</sup>, souvent associée à des ressources à basse teneur, n'a pas été créée par hasard* ».

Or il n'est pas contestable que les ressources d'accessibilité raisonnable sont en train de s'épuiser et que nous sommes en train d'attaquer les ressources géologiquement de plus en plus difficiles d'accès. On s'achemine donc inexorablement – c'était une évidence annoncée depuis plusieurs décennies par les spécialistes miniers – vers de fortes tensions d'approvisionnement en uranium avant le tournant de ce siècle même dans des scénarios de croissance très modéré du parc nucléaire mondial. Quant aux

---

<sup>15</sup> Cf. Red Book 2022

<sup>16</sup> <https://www.lefigaro.fr/sciences/cop28-l-appel-d-une-vingtaine-de-pays-a-tripler-le-nucleaire-dans-le-monde-d-ici-2050-20231202>.

<sup>17</sup> « Que savons-nous des ressources mondiales d'uranium » par Georges Capus - CLEFS CEA - N°55 - 2007

<sup>18</sup> De surcroît les « ressources non conventionnelles » présentent un changement dans la répartition de l'uranium à l'échelle microscopique (cas des roches phosphatées) nécessitant une modification radicale des méthodes de traitement du minerai engendrant des coûts d'extraction nettement plus élevés. Cette extraction se fait via la filière « acide phosphorique » pour l'industrie des engrais et permettrait d'extraire quelques milliers de tonnes d'uranium par an.

ressources non-conventionnelles de type phosphate, elles ne peuvent apporter au mieux qu'une contribution marginale ; il en est de même pour le ré-enrichissement des stocks d'uranium appauvri au service d'une technologie basée sur l'uranium 235.

La réalité d'ici à 2050 sera probablement entre les hypothèses 2 et 3 d'évolution, 1,6 % et 4,5 %, ce qui va engendrer de sérieux problèmes pour décider d'investir dans des réacteurs à neutrons lents, de type REP, EPR ou autre) dont l'approvisionnement en combustible ne sera plus assuré bien avant la fin du siècle. Les pays qui n'auront pas pris le virage du développement des réacteurs de puissance à neutrons rapides (RNR) seront hors course.

Il existe en outre des risques géopolitiques avérés, d'ores et déjà considérables et croissants dès à présent, doublés de la question d'assurer les besoins en uranium de la défense.

C'est pourquoi, au-delà des considérations éthiques qui auraient dû nous imposer depuis longtemps de basculer vers le nucléaire durable, la motivation première des RNR ne saurait relever de considérations spéculatives sur le prix de l'uranium mais bien de la rareté de cette ressource, carburant unique de l'énergie nucléaire.

Peut-on bâtir une stratégie énergétique sur la croyance en des découvertes totalement inattendues de grands gisements qui viendraient changer cette donne ? Evidemment non.

Est-il éthiquement acceptable d'aller jusqu'à l'épuisement de l'uranium 235, laissant à nos proches descendants un monde où plus aucune réaction de fission en chaîne auto-entretenu ne serait possible ? Evidemment non.

## **Conclusion**

Dans un monde où le recours à l'énergie nucléaire devient une nécessité pour un nombre de pays de plus en plus important, les ressources identifiées d'uranium récupérable dans la croûte terrestre sont insuffisantes pour maintenir le nucléaire sur la seule fission de l'uranium 235.

Raisonnement avec les prix rend aveugle sur l'épuisement de la ressource : un choc d'uranium est une réalité géologique annoncée, qui s'imposera plus ou moins rapidement entre 2050 et la fin du siècle, quelles que soient les évolutions du prix de l'uranium. La stabilité relative des données de ressources de plus d'une cinquantaine de pays producteurs, accumulées par le *Livre rouge* au cours des 25 dernières années, en est une bonne indication.

En conséquence, la question est de savoir si l'on veut du nucléaire pour 50 ou 5 000 ans.

Si l'on est convaincu que le nucléaire est le seul recours – au côté de l'hydraulique – pour disposer d'une énergie décarbonée et pilotable, alors les pays avancés en matière de recherche et de

développement technologique, se doivent de basculer dès que possible vers les réacteurs à neutrons rapides (RNR) capables d'utiliser tout l'uranium naturel.

En abandonnant son programme de recherches Astrid, la France s'est fourvoyée gravement, vingt ans après la déroute de la filière rapide française avec l'arrêt de Superphénix. Il faut bien comprendre, à l'opposé du discours actuel de la filière, qu'il n'y a pas de continuité entre le nucléaire à neutrons lents et le nucléaire durable. Au contraire, il y a rupture radicale, à la fois de matière première, de réacteurs et d'usines du cycle car c'est l'ensemble de l'uranium naturel qui est utilisé à l'inverse des réacteurs actuels qui n'en utilisent que 0,7%.

Enfin rappelons que la mise au point et la qualification d'un tel prototype de puissance demandent au moins une quinzaine d'années dans un environnement de recherche performant. Le déploiement industriel de RNR et des installations du cycle associées nécessitera encore quelques dizaines d'années. C'est dire si l'urgence de se ressaisir est absolue.

Claire Kerbouh