

De l'uranium jusqu'à quand ?

Lorsque les réacteurs s'arrêteront faute de combustible.

Selon l'Agence pour l'Energie Nucléaire (AEN) et l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), le total des ressources en uranium s'élèverait à 14,8 millions de tonnes². Sur cette base, l'AIEA prétend que les ressources sont suffisantes pour assurer au bas mot 270 années de consommation du parc des réacteurs nucléaires actuels³.

Mais une analyse critique des données prouve que les ressources exploitables ne dureront pas au-delà de quelques décennies.

Les réserves en uranium sont constituées par les "ressources connues" réputées économiquement exploitables : le coût d'extraction de l'uranium⁴ qu'elles contiennent est plus bas que son prix de vente. Dans cette perspective, une simple augmentation du prix de vente de l'uranium suffit donc à transformer en réserves certaines ressources dont le coût d'extraction était auparavant trop élevé. Les ressources exploitables sont ainsi passées de 3,6 à 4,7 millions de tonnes d'uranium (MtU) entre 2005 et 2006, grâce à la prise en compte d'une nouvelle catégorie de coût (entre 80 et 130 \$ par kilogramme d'uranium)⁵.

Ainsi définies en fonction de la rentabilité économique, les réserves en uranium sont virtuellement extensibles jusqu'à la limite des ressources physiquement existantes. Il "suffirait" pour cela que le prix de vente de l'uranium en vienne à compenser un coût d'extraction exorbitant, et que les "ressources non découvertes" le soient... La Figure 1 rend également compte de cette vision simpliste, qui déduit les ressources exploitables de la seule comparaison économique entre prix de vente et coût d'extraction de l'uranium. Le second volet de cet article s'attachera à montrer l'inanité de cette conception.

Découvrir de nouvelles ressources ? Une gageure...

La classification officielle des ressources en uranium donne une impression de précision et de fiabilité qui est illusoire. L'AIEA et l'AEN tiennent les ressources pour acquises, quels que soient les niveaux de probabilité et de coût qu'elles leur assignent. En fait, les "ressources non découvertes" (10 MtU) relèvent de la pure spéculation. Georges Capus, expert chez Areva, les qualifie de "catégorie un peu fourre-tout"⁶. Selon les experts indépendants de l'Energy Watch Group, la probabilité qu'elles ne soient jamais découvertes est bien plus élevée que celle de leur mise en exploitation. Ces spéculations ne peuvent fonder aucune prospective sérieuse⁷.

Le prix de vente de l'uranium a été multiplié par 14 entre janvier 2003 et juin 2007⁸. Or, il détermine l'intensité de l'exploration minière⁹. Plus l'uranium se vend cher, plus les sociétés minières ont intérêt à chercher de nouveaux gisements. Pour l'AIEA et l'AEN, il est donc hors de doute que les "ressources non découvertes" le seront un jour... C'est oublier que l'intensité de l'exploration ne présage en rien de son succès ! Les investissements consacrés à l'exploration ont connu leur pic historique au début des années 1980. L'Energy Watch Group

1. Livre Rouge de l'AEN-OCDE/AIEA, "Uranium 2005 : ressources, production et demande", 2005

2. Hormis les ressources dites "non conventionnelles", qui sont présentes à faible ou très faible concentration dans les phosphates, les schistes, le granit et l'eau de mer. Elles ne sont pas prises en compte par la classification officielle.

3. AIEA, Akira Omoto, "Global trends in nuclear power and fuel cycle and IAEA activities", 11 avril 2007, <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2007/cni61/Presentations/Presentation%20material/Omoto.pdf>; AIEA, Yuri Sokolov, "Uranium resources : plenty to sustain growth of nuclear power", 1er juin 2006, <http://www.iaea.org/NewsCenter/Statements/DDGs/2006/sokolov01062006.html>; Conseil Mondial de l'Energie, "Uranium resources", 2007, http://www.worldenergy.org/publications/survey_of_energy_resources_2007/uranium/673.asp

4. Le coût d'extraction concerne en fait non seulement l'extraction minière proprement dite, mais également les diverses étapes de concentration et de purification qui transforment le minerai en concentré d'uranium ("yellowcake") sous forme d'oxyde U₃O₈, qui contient en moyenne 75 % d'uranium pur. Certaines publications parlent de "coût de récupération".

5. Jan Willem Storm van Leeuwen, "Nuclear power, the energy balance", section D p.2, octobre 2007, <http://www.stormsmith.nl/report20071013/partD.pdf>

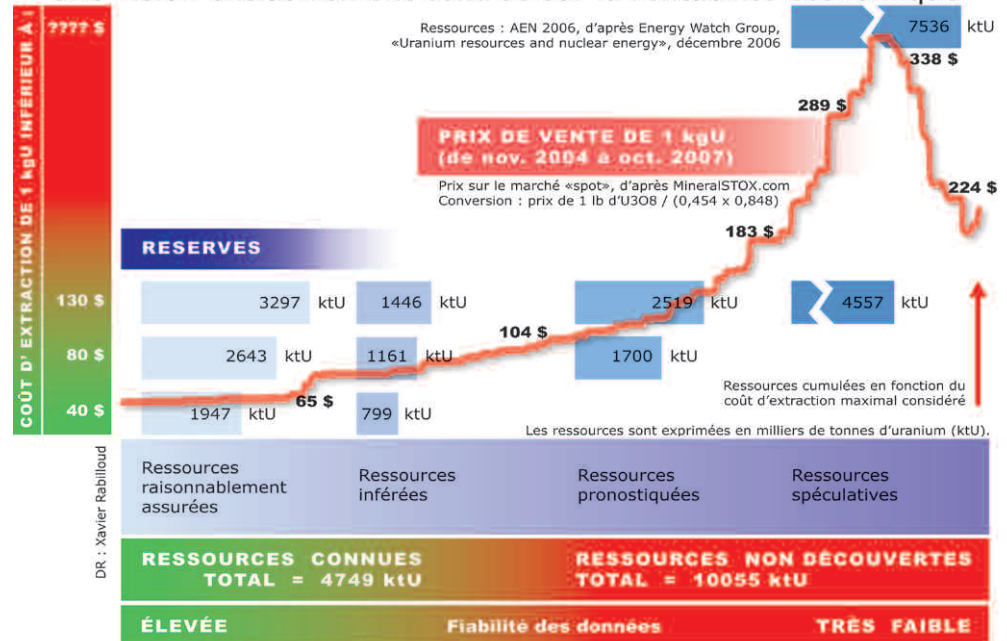
6. Georges Capus, "Que savons-nous des ressources mondiales d'uranium ?", CLEFS CEA, n°55, été 2007, <http://www.cea.fr/var/plain/storage/original/application/812673a6af277324960d426787f3eb86.pdf>

7. Energy Watch Group, "Uranium resources and nuclear energy", pp.7, 24 et 25, décembre 2006, http://www.lbst.de/publications/studies_e/2006/EWG-paper_1-06_Uranium-Resources-Nuclear-Energy_03DEC2006.pdf

8. MineralSTOX.com, <http://www.mineralstox.com/charts/default.asp?focus=262144&mode=5%2Byear>

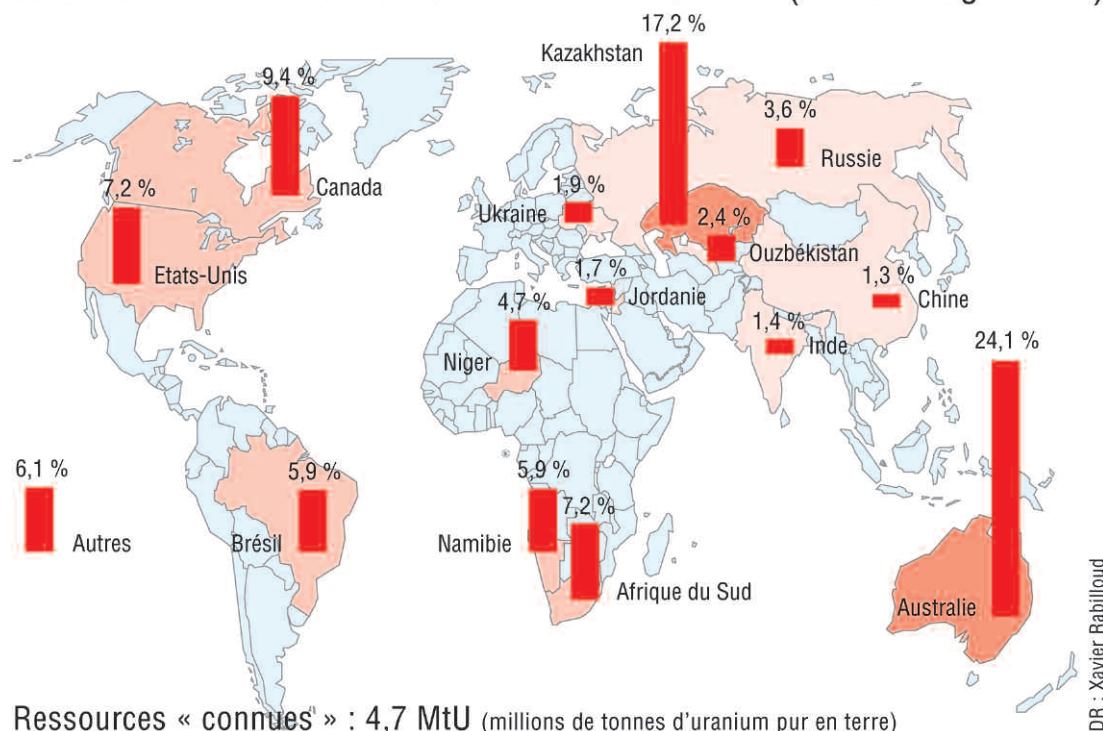
9. Robert Price, "Prospection et prix de l'uranium", AEN Infos, No 23-1, 2005, <http://www.nea.fr/html/pub/newsletter/2005/23-1-uranium-price-fr.pdf>

La classification officielle des ressources en uranium une vision exclusivement centrée sur la rentabilité économique



La classification officielle des ressources en uranium les répartit selon leur probabilité d'existence et selon leur coût d'extraction maximal prévu (Figure 1).

Répartition mondiale des ressources « connues » en uranium selon la classification officielle de l'AEN / AIEA (Livre Rouge 2006)



Ressources « connues » : 4,7 MtU (millions de tonnes d'uranium pur en terre)

constate que cette exploration accrue n'a pourtant provoqué aucune augmentation des ressources répertoriées¹⁰.

A des fins de capitalisation boursière, nombre d'entreprises engagées dans l'exploration minière font valoir des ressources, sans considération pour la viabilité technique ou économique de leur exploitation¹¹. Jan Willem Storm van Leeuwen, membre du GIEC¹² et de l'Oxford Research Group, rappelle que les ressources les plus accessibles et les plus efficacement exploitables sont déjà mises en production. Les chances sont donc faibles de découvrir de nouveaux gisements d'un intérêt comparable¹³. Il pose la question en ces termes : "Quelles sont les régions du monde si peu explorées que de nouvelles découvertes majeures y semblent probables ? Le Tibet, l'Antarctique ?". A supposer d'ailleurs que l'on trouve un "nouveau Canada" (l'Eldorado de l'uranium), le sursis ne durerait pas 10 ans au rythme actuel de consommation¹⁴.

Quand les ressources "connues" se volatilisent

Même les estimations des ressources dites "connues" sont sujettes à caution. Cameco, premier exploitant mondial de mines d'uranium, explique ainsi qu'"en ce qui concerne les ressources inférées, leur existence et la possibilité économique et légale de les exploiter sont hautement incertaines. On ne peut pas affirmer que la totalité ni même une partie quelconque des ressources inférées pourra un jour être classée dans une catégorie plus favorable"¹⁵. En clair, Cameco estime que les ressources inférées, bien que "connues", pourraient fort bien n'être jamais "raisonnablement assurées".

Deux exemples historiques en disent long sur la fiabilité des estimations des "ressources connues". En 1985, les ressources en uranium de la France étaient évaluées à 82 milliers de tonnes d'uranium (ktU). En 1991, elles ont été brutalement réévaluées de 67 à 28 ktU. Enfin, en 2001, elles sont passées de 13 à 0,19 ktU. Or, entre 1985 et 2001, l'extraction minière française a produit moins de 30 ktU¹⁶. Le calcul est vite fait : 52 ktU ont disparu comme par magie. Plus frappant encore : en 1983, les ressources prétendument "connues" des Etats-Unis ont subi une baisse drastique de 85%. Alors même que les investissements d'exploration étaient à leur sommet historique, 1000 ktU se sont brutalement volatilisées. Une telle quantité équivaut à plus de 20 ans de production minière au rythme actuel¹⁷.

De l'uranium jusqu'en 2070 au maximum

Considérons l'hypothèse favorable où l'intégralité des ressources "connues" serait effectivement exploitable. Au rythme actuel de consommation de l'uranium, ces ressources seraient épuisées en 2070¹⁸. Envisageons à présent le développement du parc électronucléaire mondial selon le "scénario de référence 2007 - 2030" de la World Nuclear Association. Ce scénario prévoit jusqu'en 2030 une croissance annuelle de 1,5 % de la puissance électronucléaire installée¹⁹. Dans ce cas, les "ressources connues" seraient épuisées dès 2060. Une très improbable "renaissance nucléaire"²⁰ nous léguerait donc au mi-temps du XXIème siècle des réacteurs inutilisables faute de combustible... si ce n'est pas avant.

Xavier Rabilloud

Salarié du Réseau "Sortir du nucléaire"
xavier.rabilloud@sortirdunucleaire.fr

10. Energy Watch Group, "Uranium resources and nuclear energy", p.26, décembre 2006

11. Wellington West Capital Markets Inc., Gregory Huffman, "Uranium strategy, how a bad year is pushing prices up", p.21, 23 novembre 2006, <http://www.kaatassetmanagement.com/UserFiles/File/pdf/Uranium%20Macro%20Update%2023-11-2006.pdf>

12. Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat de l'ONU

13. Jan Willem Storm van Leeuwen, "Nuclear power : greenhouse gases and energy security", p.13, août 2007, non publié

14. idem

15. CAMECO, "Cameco announces plans for Cigar Lake", 18 mars 2007, http://www.cameco.com/media_gateway/news_releases/2007/news_release.php?id=175

16. Energy Watch Group, "Uranium resources and nuclear energy", p.32 (annexe 5), décembre 2006

17. idem, pp.34-35 (annexe 6), décembre 2006

18. idem, pp.8 et 13, décembre 2006

19. World Nuclear News, "More nuclear and more uranium more likely", 6 septembre 2007, http://www.world-nuclear-news.org/explorationNuclearFuel/Market_Report_020907.shtml

20. Mycle Schneider, auteur pour les Verts au Parlement européen du rapport "L'Etat des lieux 2007 de l'industrie nucléaire dans le monde", estime ainsi que "divers scénarii qui prévoient une expansion grandiose du nucléaire dans le monde sont dénués de tout fondement industriel et sous-estiment le nombre d'installations vieillissantes qui vont atteindre leur fin de vie.", http://www.greens-efa.org/cms/presse-releases/dok/206/206846.energie_nucleaire@fr.htm

De l'uranium jusqu'à quand ?

Lorsque nous tomberons dans le gouffre énergétique.

La classification officielle des ressources en uranium¹ repose sur une analogie avec les autres minerais métalliques². Mais cette analogie est erronée. En effet, elle néglige l'usage spécifique de l'uranium : il est une source d'énergie, et rien d'autre.

De ce constat, une expertise récente tire des conclusions cruciales, qui devraient inciter à la réflexion jusqu'aux plus chauds partisans du nucléaire.

Dans leur grande majorité, les métaux (fer ou cuivre, par exemple) sont nécessaires à la fabrication d'équipements industriels ou de biens de consommation courante. Ils n'y sont pas utilisés comme sources d'énergie, mais comme matériaux spécifiques. Les sources d'énergie mobilisées pour extraire ces métaux du sol ne pourraient donc en aucune façon les remplacer en tant que matières premières. Par conséquent, la quantité d'énergie consacrée à leur extraction du sol n'a aucune influence sur l'intérêt de leur utilisation³, qui dépend de leurs propriétés physiques et chimiques non énergétiques.

l'expertise approfondie de ces questions menée par Jan Willem Storm van Leeuwen⁵, membre du GIEC⁶ et de l'Oxford Research Group.

De l'extraction du minerai d'uranium jusqu'à l'entreposage des déchets radioactifs, la filière nucléaire consomme de l'énergie. Cette consommation constitue son coût énergétique. Pour connaître l'énergie réellement produite par la filière nucléaire, il faut soustraire ce coût énergétique à l'énergie brute produite par les réacteurs nucléaires. C'est alors seulement que l'on connaît l'apport réel en énergie produit par la filière nucléaire. On appelle cet apport l'énergie nette. La Figure 1 montre l'articulation entre ces trois quantités d'énergie. Un gisement d'uranium n'est énergétiquement rentable que lorsque son exploitation permet d'obtenir une énergie nette positive. Dans le cas contraire, ne rien faire "crée" plus d'énergie qu'extraire l'uranium. Le gisement qui le contient n'est alors rien d'autre qu'un amas de roches inutiles, plus ou moins radioactives.

1. Voir "De l'uranium jusqu'à quand ? Lorsque les réacteurs s'arrêteront faute de combustible."

2. World Nuclear Association, "Supply of uranium", mars 2007, <http://www.world-nuclear.org/info/inf75.html>

3. Elle pourrait cependant avoir une influence sur l'intérêt des produits dans lesquels les métaux sont utilisés comme matières premières. Mais il s'agirait alors d'un débat sociétal, philosophique, sur la finalité des diverses productions industrielles – ce qui n'est pas l'objet du présent article.

4. Seuls quelques usages civils marginaux et les usages militaires de l'uranium sont non substituables.

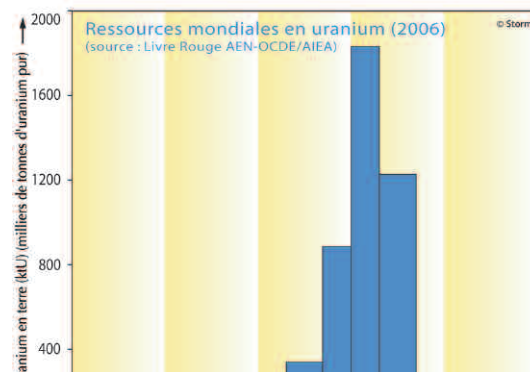
5. Les études de Jan Willem Storm van Leeuwen sont consultables en anglais sur son site Internet <http://www.stormsmith.nl>. Les schémas qui illustrent ce volet de l'article "De l'uranium jusqu'à quand ?" en sont issus. JW Storm van Leeuwen les a très aimablement adaptés et simplifiés pour les besoins de cet article. Les schémas ont été traduits en français par Xavier Rabilloud.

6. Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat de l'ONU

7. Jan Willem Storm van Leeuwen & Philip Smith, "Nuclear power, the energy balance", section D p.34, octobre 2007, <http://www.stormsmith.nl/report2007013/partD.pdf>

8. Jean-Michel Marino et Georges Capus, "Les mines d'uranium à très haute teneur : défis et atouts", Revue des Ingénieurs, juin 2002, http://mines-energie.org/Dossiers/Nucl2002_12.pdf

9. Voir "De l'uranium jusqu'à quand ? Lorsque les réacteurs s'arrêteront faute de combustible."



Toutes les ressources présentes dans le sol sont donc potentiellement intéressantes, même celles dont l'extraction exigerait une quantité considérable d'énergie – indépendamment du coût de cette énergie. Imaginons par exemple que le coût de l'énergie rende un jour l'extraction du cuivre non rentable. Il serait néanmoins justifié de subventionner l'exploitation de ce métal tant que ses usages industriels (circuits électriques, etc.) seraient considérés comme socialement nécessaires.

Le coût d'extraction des métaux a bien sûr un impact sur leur prix, donc sur la rentabilité économique de leur exploitation. Un prix de vente plus élevé permet de consentir un coût d'extraction accru, sans que la rentabilité économique n'en soit réduite. Par conséquent, les ressources économiquement exploitables (les réserves) de la plupart des métaux peuvent réellement augmenter grâce à une simple hausse de leur prix de vente.

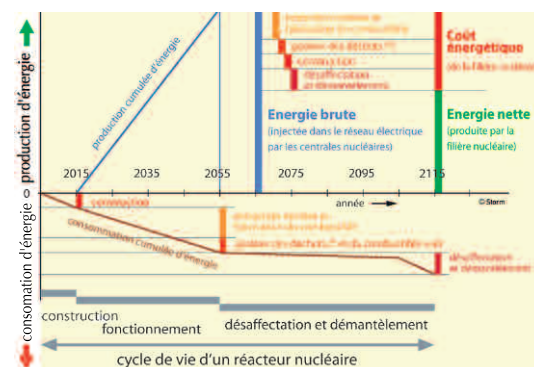
Gisements d'uranium... ou ressources en énergie ?

A l'inverse de la plupart des métaux, l'uranium est très majoritairement utilisé pour produire de l'électricité. On peut donc lui substituer d'autres sources d'énergie (énergies renouvelables, combustibles fossiles) pour parvenir au même résultat⁴. Par conséquent, les gisements d'uranium ne sont également des ressources en énergie que si leur exploitation permet de produire plus d'énergie qu'elle n'en consomme. Leur rentabilité énergétique en dépend. L'analyse présentée ici s'appuie sur

La teneur en uranium : un facteur déterminant

La rentabilité énergétique d'un gisement d'uranium dépend avant tout de sa teneur en uranium. Cette teneur exprime en fait la proportion d'oxyde d'uranium U₃O₈ présent dans le minerai. Un kilogramme d'U₃O₈ (1 kg-Ux) contient 0,848 kilogramme d'uranium élémentaire proprement dit (0,848 kgU), soit 85 %.

La teneur en uranium d'un minerai est très variable. Elle peut atteindre 20 % dans les gisements les plus favorables, situés au Canada. Néanmoins, les gisements à très haute teneur sont une exception⁸. C'est d'ailleurs une caractéristique commune à tous les minerais métalliques, pour des raisons physico-chimiques. De ce fait, si l'on finissait par découvrir réellement certaines des "ressources non découvertes" paradoxalement répertoriées dans la classification officielle, il y aurait de fortes chances qu'elles présentent une faible teneur en uranium. La probabilité de nouvelles découvertes reste néanmoins très limitée⁹. Deux tiers environ des "ressources



connues" en uranium se présentent à une teneur inférieure à 0,1 %¹⁰, comme le montre la Figure 2. Une tonne de minerai contient 100 kg d'oxyde d'uranium U₃O₈ (kg-Ux)¹¹ lorsque sa teneur est de 10 %. Elle ne contient plus que 1 kg-Ux si sa teneur n'est que de 0,1 %. Autrement dit : la masse de minerai contenant 1 kg-Ux est directement inverse de la teneur en uranium du minerai. Pour une teneur de 10 %, cette masse de minerai n'est que de 10 kg. Mais elle passe à 1000 kg pour une teneur de 0,1 %. De par cette relation, purement mathématique donc incontournable, la masse de minerai contenant 1 kg-Ux augmente de façon exponentielle à mesure que sa teneur en uranium diminue.

En outre, les lois de la thermodynamique rendent impossible de séparer complètement l'uranium du minerai qui le contient. A partir d'une masse de minerai contenant 1 kg-Ux, on obtiendra donc par séparation nécessairement moins de 1 kg-Ux. Cette séparation s'effectue par une série d'opérations mécaniques et chimiques. Leur degré d'efficacité - leur rendement - détermine la masse d'uranium réellement séparée à partir d'une masse de minerai contenant 1 kg-Ux. Or, pour des raisons avant tout physico-chimiques, le rendement de séparation diminue de façon exponentielle lorsque la teneur en uranium du minerai baisse.

Ainsi, lorsque la teneur en uranium s'amenuise :

◆ La masse de minerai contenant 1 kg-Ux augmente, donc l'énergie requise pour l'extraction minière augmente selon la même proportion - de façon exponentielle.

◆ La proportion d'uranium réellement séparée du minerai baisse également de façon exponentielle, et cette séparation, bien que moins efficace, requiert en outre une énergie accrue.

Ces deux conséquences, dont les effets se cumulent, sont essentiellement indépendantes d'éventuelles avancées technologiques. Celles-ci ne pourraient donc les contrarier que très marginalement.

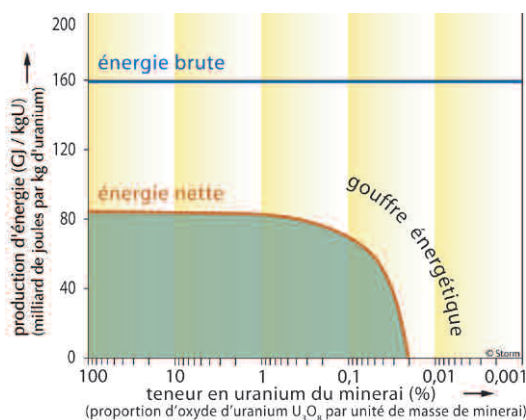
En résumé : lorsque la teneur en uranium du minerai diminue, la quantité d'énergie requise pour obtenir un kilogramme d'uranium augmente de façon exponentielle.

Le gouffre énergétique

Lorsque la teneur du minerai diminue, l'énergie consommée pour extraire 1 kg-Ux augmente. Evidemment, le coût énergétique de la filière nucléaire prise dans son intégralité augmente donc d'autant. Or, la quantité d'énergie que ce même kilogramme d'oxyde d'uranium permet de produire est constante¹². Par conséquent, l'énergie nette que 1 kg-Ux permet d'obtenir diminue lorsque la teneur du minerai baisse.

La Figure 3 représente cette variation de l'énergie nette de la filière nucléaire en fonction de la teneur du minerai exploité. Elle montre qu'à partir d'une teneur inférieure à 1 %, l'énergie nette chute de plus en plus rapidement dans un gouffre énergétique. A une teneur comprise entre 0,02 % et 0,01 %, l'énergie nette devient nulle. Nous atteignons alors le fond du gouffre... et l'uranium n'y a plus la moindre rentabilité énergétique : son exploitation par la filière nucléaire consommerait au moins autant d'énergie qu'elle en produirait !

En outre, la perte en énergie nette devient considérable bien avant le fond du gouffre énergétique. L'énergie nette dégagée par la filière nucléaire



diminue de 17 % environ à une teneur de 0,05 %, et de 45 % environ à une teneur de 0,03 %. Ainsi, une partie considérable des ressources en uranium "connues" présente une rentabilité énergétique médiocre, voire mauvaise¹³.

L'existence et les caractéristiques du gouffre énergétique sont principalement la conséquence directe de lois physiques et chimiques. Il est donc essentiellement indépendant des performances des technologies utilisées à chaque étape de la filière nucléaire. Même une multiplication par deux du rendement des opérations d'extraction minière et de séparation chimique aurait un impact négligeable.

Tout ce bel uranium qui ne servira à rien

La World Nuclear Association affirme que "l'uranium n'est pas rare au sens géologique du terme"¹⁴. C'est exact : il en existe en moyenne 2,8 g par tonne de roches dans la croûte terrestre continentale, et 3 mg par tonne d'eau de mer¹⁵. De ce constat, les pronucléaires les plus échevelés ont tiré l'une de leurs marottes : les ressources "non conventionnelles" en uranium. A savoir : les phosphates, les schistes, le granit et l'eau de mer. Ces ressources pourront assurer, nous disent certains, jusqu'à mille ans de consommation avec les réacteurs à fission de technologie actuelle¹⁶.

Pas de chance : l'immense majorité de ces ressources est solidement ancrée au fond du gouffre énergétique. Au mieux, certains gisements de phosphates et de schistes peuvent en escalader la paroi jusqu'à une teneur maximale comprise entre 0,02 et 0,03 %, où la perte d'énergie nette est d'au moins 45 %. Leur exploitation par la filière nucléaire consommerait donc au moins la moitié de l'énergie ainsi produite. Quant au granit, n'y pensons même pas : sa teneur moyenne en uranium est de 0,00028 %. Georges Capus, expert chez Areva, reconnaît d'ailleurs que "de nombreuses difficultés ne permettent pas [de] prédire un potentiel significatif" aux ressources non conventionnelles hors phosphates¹⁷.

Et l'eau de mer ? Elle n'implique pourtant aucune extraction minière. Certes, mais... sa teneur en uranium est de 0,000003 % ! Pour alimenter un seul réacteur EPR, il faudrait traiter chaque année environ 250 milliards de m³ d'eau de mer - plus que le volume de la Mer Rouge¹⁸. Michael Dittmar, physicien au CERN (Laboratoire européen pour la physique des particules), conclut avec humour : "Bonne chance !". Et deux experts d'Areva s'interrogent : "Alors faut-il continuer les recherches sur la récupération de l'uranium dans l'eau de mer ? Nous laissons au lecteur le soin de se forger une opinion"¹⁹. Gageons que l'opinion du lecteur est faite.

Xavier Rabilloud

Salarié du Réseau "Sortir du nucléaire"
xavier.rabilloud@sortirdunucleaire.fr

10. Energy Watch Group, "Uranium resources and nuclear energy", p.9, décembre 2006, http://www.lbst.de/publications/studies_e/2006/EWG-paper_1-06_Uranium-Resources-Nuclear-Energy_03DEC2006.pdf; Jan Willem Storm van Leeuwen, "Energy from uranium", p.15, juillet 2006, <http://www.stormsmith.nl/publications/Energy%20from%20Uranium%20-%20July%202006.pdf>

11. Soit 85 kg d'uranium élémentaire (kgU).

12. Pour un type de réacteur donné. Une amélioration technique des réacteurs pourrait augmenter cette quantité d'énergie produite. Mais cette augmentation serait d'un ordre de grandeur négligeable en comparaison de l'augmentation de la consommation d'énergie par l'extraction de l'uranium lorsque la teneur du minerai diminue. Elle n'aurait donc pas d'influence significative sur les phénomènes exposés ici.

13. Il faut noter néanmoins que certains minerais sont exploités pour en extraire simultanément (en coproduction) de l'uranium et d'autres minéraux : or, cuivre... Dans un tel cas, la rentabilité énergétique de la ressource en uranium est significativement meilleure. Au maximum, 10 % de la production mondiale d'uranium sont ainsi issus d'une extraction en coproduction. En outre, cette fraction de la production ne provient pas en totalité de minerais à faible teneur en uranium.

14. World Nuclear Association, "Can uranium supplies sustain the global nuclear renaissance ?", septembre 2005, http://www.world-nuclear.org/reference/position_statements/uranium.html

15. World Nuclear Association, "Supply of uranium", mars 2007, <http://www.world-nuclear.org/info/inf75.html>

16. American Energy Independence, James Hopf, "World uranium reserves", novembre 2004, <http://www.americane-energyindependence.com/uranium.html>

17. Georges Capus, "Que savons-nous des ressources mondiales d'uranium ?", CLEFS CEA, n°55, été 2007, <http://www.cea.fr/var/plain/storage/original/application/812673a6af277324960d426787f3eb86.pdf>

18. Michael Dittmar, diaporama "The nuclear energy option, facts and fantasies", 18 septembre 2007, <http://i1hp-lx2.ethz.ch/energy21/nucleaoption.pdf>; Ecole des Mines de Paris, Centre de géosciences, http://www.cig.ensmp.fr/hydro/MISC/g_eog/tboceans.htm

19. Bertrand Barré et Georges Capus, "L'uranium de l'eau de mer : véritable ressource énergétique ou mythe ?", Revue des Ingénieurs, janvier-février 2003, http://www.mines-energie.org/Dossiers/Nucl2003_16.pdf