
RESSOURCES EN URANIUM ET ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Document de référence préparé par

Energy Watch Group
(Groupe d'Étude sur l'Énergie)

Décembre 2006

EWG-Série n °1/2006

Traduction de Jean-Claude Caty avec David Connaughton

https://www.energywatchgroup.org/wp-content/uploads/EWG_Report_Uranium_3-12-2006ms1.pdf

À propos

Voici le premier d'une série de documents publié par le Groupe d'Étude sur l'Énergie destinés à fournir une image réaliste de l'approvisionnement énergétique futur et de la demande.

Le Groupe d'Étude sur l'Énergie est composé de scientifiques indépendants et d'experts qui enquêtent sur des concepts durables de l'approvisionnement énergétique mondial. Le groupe est initiée par le parlementaire allemand Hans-Josef Fell.

Les membres sont :

- Le Dr Harry Lehmann, du Conseil mondial pour les énergies renouvelables
- Stefan Peter, Institut des solutions durables et innovations [ORGA INTROUVABLE](#)
- Jörg Schindler, directeur général de Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH
- Dr Werner Zittel, Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH

Le groupe consultatif :

- Dr. Jürgen Schmid, Institut des techniques de l'énergie solaire [ORGA INTROUVABLE](#)
- Ecofys
- World Watch Institute
- Eurosolar
- Conseil mondial pour les énergies renouvelables
- Suisse de l'énergie de la Fondation

La responsabilité de ce rapport :

- Dr Werner Zittel, Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH
- Jörg Schindler, Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH

Ottobrunn / Achen, 3 Décembre 2006

Ce rapport fut soutenu par Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH

Sommaire

Uranium et Énergie nucléaire.....	7
Approvisionnement en uranium.....	7
Les centrales nucléaires.....	15
Histoire des centrales nucléaires.....	16
ANNEXES.....	23
<i>Annexe 1: Diverses définitions des réserves d'uranium.....</i>	23
<i>Annexe 2: Développement historique des ressources en uranium.....</i>	25
<i>Annexe 3 : Évaluation des ressources en uranium par pays.....</i>	26
<i>Annexe 4: Extraction d'uranium et demande d'énergie pour l'extraction minière.....</i>	29
<i>Annexe 5 : L'extraction d'uranium en France.....</i>	31
<i>Annexe 6 : L'extraction d'uranium aux USA.....</i>	32
<i>Annexe 7: Projets d'extraction d'uranium (prévus ou en construction).....</i>	35
<i>Annexe 8: Le développement de Cigar Lake au Canada.....</i>	36
<i>Annexe 9 : Évaluation pays par pays des profils de production future sur la base de la restriction des ressources (d'après NEA 2006).....</i>	37
<i>Annexe 10 : Centrales nucléaires en construction.....</i>	40
<i>Annexe 11 : Calendrier des nouveaux réacteurs EPR en Finlande et en France.....</i>	42

Note des traducteurs

Le document original fut rédigé en 2006. Les termes du rapport tels « actuellement », « aujourd'hui », se réfèrent donc à l'année 2006.

Résumé

Toute prévision du développement de l'énergie nucléaire dans les 25 prochaines années doit se concentrer sur deux aspects, **l'approvisionnement en uranium** et l'ajout des capacités des **nouveaux réacteurs**. Dans ce contexte temporel, ni les surgénérateurs, ni les réacteurs au thorium ne joueront un rôle important compte tenu des délais de développement et de leur pénétration du marché.

L'analyse des données relatives aux ressources en uranium conduit à estimer que les réserves déjà découvertes ne suffisent pas à garantir l'approvisionnement en uranium pendant plus de trente ans.

Onze pays ont déjà épuisé leurs réserves d'uranium. Au total, 2,3 Mt (Millions de tonnes) d'uranium environ ont déjà été produites. Actuellement, seul le Canada est supposé avoir des gisements d'uranium avec une teneur en minerai supérieure à 1%. La plupart des réserves des autres pays ont une teneur en minerai inférieure à 0,1% et deux tiers des réserves ont une teneur en minerai inférieure à 0,06%. Ceci est important car les besoins énergétique de l'exploitation uranifère sont au mieux indirectement proportionnels à la concentration du minerai. Avec des concentrations inférieures à 0,01 - 0,02% l'énergie nécessaire au traitement de l'uranium – sur l'ensemble du cycle du combustible – augmente sensiblement.

Les réserves prouvées (c'est à dire raisonnablement assurée à un coût d'extraction inférieur à 40 \$/kgU) et les stocks seront épuisés dans les 30 prochaines années considérant l'actuelle demande annuelle. De même, les ressources possibles – regroupant toutes les ressources estimées découvertes avec un coût d'extraction jusqu'à 130 \$/kg – seront épuisées avant 70 ans.

Actuellement, seuls 42 kt/an de la demande en uranium de 67 kt/an, sont fournis par de nouvelles productions, le reste de l'ordre de 25 kt/an provient de stocks accumulés avant 1980. Étant donné l'épuisement de ces stocks dans les 10 prochaines années, la capacité de production d'uranium doit augmenter d'au moins 50% pour répondre à la demande future.

De récents problèmes et les retards avec d'importants nouveaux projets miniers (comme Cigar Lake au Canada) sont à l'origine de doute quant à l'achèvement à temps de ces extensions en supposant qu'elles puissent être réalisées ??

Si, seules 42 kt/an des réserves prouvées de moins de 40 \$/kt peuvent être converties en volumes de production, nous pouvons alors prévoir des problèmes d'approvisionnement avant même 2020. Si toutes les ressources estimées connues et d'un coût d'extraction jusqu'à 130 \$/kgU peuvent être convertis en volumes de production, une pénurie peut au mieux être retardé jusqu'à 2050 environ.

Cette évaluation est résumée dans la figure suivante. Les profils possibles de production d'uranium en ligne avec les réserves et ressources déclarées sont présentées avec la demande annuelle de carburant des réacteurs. Les données sur les réserves et les ressources sont tirées du Livre Rouge de l'Agence de l'Énergie Nucléaire (NEA 2006). Les demandes prévisionnelles jusqu'en 2030 sont basées sur les derniers scénarios 2006 de l'Agence Internationale de l'Énergie, un « scénario de référence » représentant le développement le plus probable , et un « scénario politique alternatif » basé sur des politiques visant à accroître la part de l'énergie nucléaire dans le but de réduire les émissions de dioxyde de carbone.

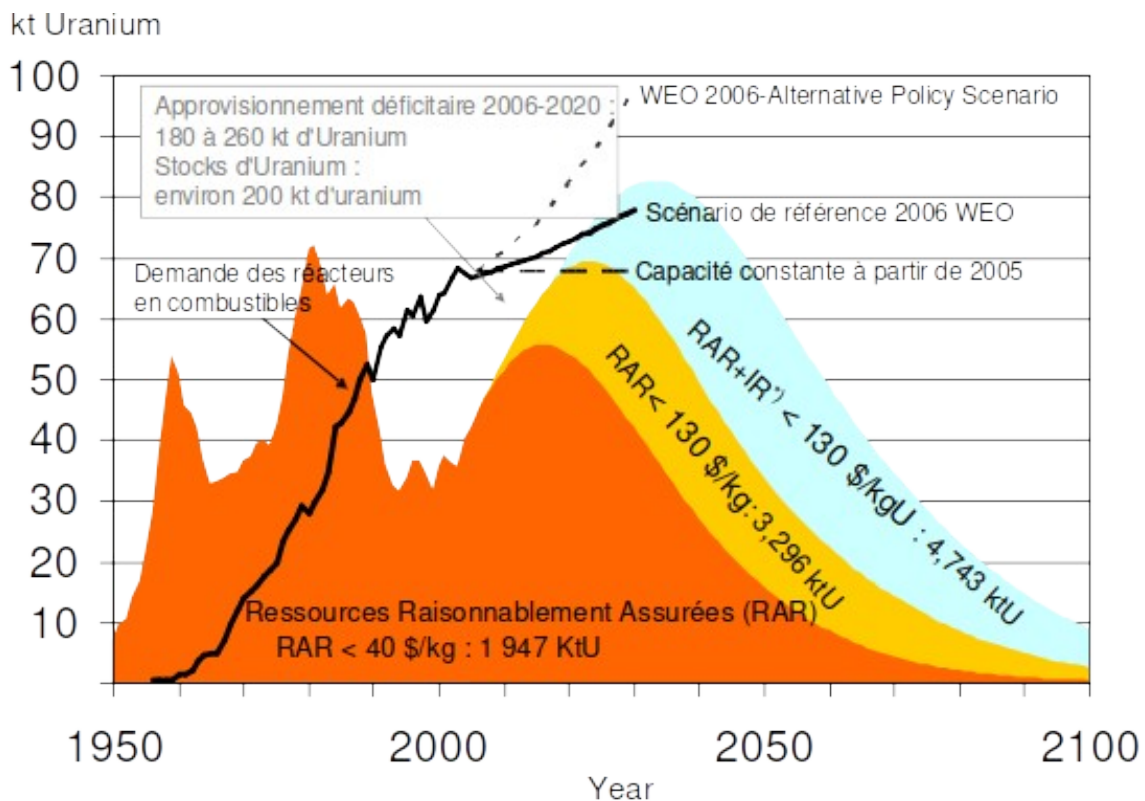


Figure 1: Demande d'uranium selon les scénarios de l'AIE et approvisionnements possibles à partir des ressources connues

Production d'uranium passée et prévisionnelle. Les prévisions sont basées sur les Ressources Raisonnablement Assurées (RAR) en dessous de 40 \$/kgU (zone orange), en dessous de 130 \$/kgU (zone jaune) et celles incluant les ressources déduites (zone bleue). La ligne noire indique la demande en combustibles des réacteurs actuellement en service et les derniers scénarios du « World Energy Outlook » (WEO 2006) de l'Agence Internationale de l'Énergie.

Dans l'hypothèse où les estimations de l'Agence pour l'Énergie Nucléaire incluent les ressources non découvertes, les réserves possibles seraient doublées voire au mieux quadruplées. Cependant, la probabilité de les convertir en véritable production est moindre que la probabilité de ne jamais les produire. Étant donné le caractère hasardeux de ces ressources, elles ne peuvent être une base sérieuse pour planifier les 20 à 30 prochaines années.

Les centrales nucléaires ont un long cycle de vie. Une planification de plusieurs années est suivie par un phase de construction de 5 ans minimum, après quoi le réacteur peut fonctionner quelques décennies. Conformément aux observations empiriques, un temps de fonctionnement moyen de 40 ans semble une hypothèse raisonnable. Environ 45% de tous les réacteurs du monde entier ont plus de 25 ans, 90% sont maintenant en activité depuis plus de 15 ans. En atteignant la fin de leur durée de vie en 2030, ces réacteurs devront être remplacés par de nouveaux avant que la capacité nette puisse être augmentée.

Actuellement, seuls 3 ou 4 nouveaux réacteurs par an sont terminés. Cette tendance se poursuivra au moins jusqu'en 2011, aucun réacteur supplémentaire n'étant en construction. Cependant, pour

simplement maintenir la capacité des réacteurs actuels (NdT : 2006), il faudra construire 15 à 20 nouveaux réacteurs par an. Aujourd'hui nous pouvons prévoir avec une grande certitude, qu'au moins d'ici 2011 la capacité totale ne peut pas augmenter en raison des longs délais de mise en œuvre.

Cette estimation conduit à la conclusion qu'à court terme, jusqu'en 2015 environ, ces importants délais de construction et de déclasserement des réacteurs vieillissants retarderont une rapide extension, et après 2020 environ, de graves pénuries d'approvisionnement en uranium deviendront probables qui, elles-même, limiteront l'extension de l'énergie nucléaire.

Finalement, il convient de noter que, selon le rapport WEO 2006, l'énergie nucléaire est considéré comme la mesure la moins efficace dans la lutte contre le réchauffement climatique : dans le « scénario politique alternatif », la réduction prévue des émissions de GES (Gaz à effets de Serre) – d'environ 6 milliards de tonnes de dioxyde de carbone – est principalement due à une meilleure efficacité énergétique (contribuant à 65 % de la réduction), 13% au changement de combustibles, 12% à l'utilisation accrue des énergies renouvelables et seulement 10% sont attribués à une utilisation accrue de l'énergie nucléaire. Cela contraste fortement avec l'augmentation massive de capacité nucléaire prévue par l'AIE et les déclarations politiques faites lors de la présentation du rapport.

URANIUM ET ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Ce chapitre est divisé en deux sous-chapitres: le premier analyse les bases de l'approvisionnement en uranium et le second analyse les statistiques de construction et d'exploitation des centrales nucléaires. Les deux sous-chapitres concluent avec une prévision sur les probables évolutions futures.

Approvisionnement en uranium

La définition des « ressources en uranium » diffère des classifications des réserves de combustibles fossiles selon différents points de vue. Cette question est examinée à l'annexe 1. La classification en différentes catégories (en allant des « Ressources Raisonnablement Assurées » et les « Ressources Présumées » (IR) jusqu'aux ressources, pronostiquées et spéculatives non découvertes) et en classes de coût (coût d'extraction attendu inférieur à 40 \$/kgU, en dessous de 80 \$/kgU et en dessous de 130 \$/kgU) donne l'impression d'une grande qualité des données et d'une grande fiabilité, ce qui n'est pas le cas à l'heure actuelle. En général, seules les « Ressources Raisonnablement Assurées » (RAR) à un coût d'extraction inférieur à 40 \$/kgU ou à 80 \$/kgU sont comparables aux « réserves prouvées » de pétrole brut. Les autres ressources découvertes (RAR dont le coût est compris entre 80 et 130 \$/kgU ainsi que les ressources présumées (IR) ont le statut de ressources probables et possibles, tandis que les ressources non découvertes sont hautement spéculatives, ce qui interdit de les prendre en compte dans les projections sérieuses des probables développements futurs.

Au niveau mondial depuis 1945, environ 2,3 millions de tonnes d'uranium ont déjà été produites. Les ressources déjà découvertes dont la disponibilité est raisonnablement sûre, se situent entre 1,9 et 3,3 millions de tonnes, selon la classe de coût. Les ressources additionnelles estimées (avec des données prévisionnelles de moindre qualité) se situent entre 0,8 et 1,4 millions de tonnes. Un tableau récapitulatif est fourni ci-dessous. À l'annexe 3, vous trouverez l'évaluation détaillée pays par pays et à l'annexe 2, l'évaluation historique. Les évaluations historiques montrent que les ressources découvertes ont été révisées à la hausse dans les premières années, puis substantiellement révisées à la baisse d'environ 30% après 1980, nuisant à la crédibilité de ces données. Nous reviendrons sur cette question plus tard.

L'Agence pour l'Énergie Nucléaire évalue également les ressources non découvertes dans chaque pays et pour chaque classe de coût. Cependant, étant donné leur caractère hautement spéculatifs – elles ne pourront probablement être jamais converties en quantités produites, seules les données agrégées sont résumées dans le tableau suivant, ainsi que l'évaluation des ressources découvertes. Il convient de garder à l'esprit que la qualité des données du tableau suivant se dégrade de haut en bas, les ressources spéculatives ayant une probabilité beaucoup plus grande de ne jamais être découvertes que d'être converties en ressources futures.



Catégorie de ressource		Gamme de coût	Ressources [kt]		Fiabilité des données
				cumulative	
Ressources Raisonnablement Assurées (RAR)		< 40 \$/kgU	1 947	1 947	Haute  Basse
		40 à 80 \$/kgU	696	2 643	
		80 à 130 \$/kgU	654	3 297	
Ressources Présumées (IR) - anciennement EAR I		< 40 \$/kgU	799	4 096	
		40 à 80 \$/kgU	362	4 458	
		80 à 130 \$/kgU	285	4 743	
Ressources non découvertes	Pronostiquées	< 80 \$/kgU	1 700	6 443	
		80 à 130 \$/kgU	819	7 262	
	Spéculatives	< 130 \$/kgU	4 557	11 819	
		Inconnues	2 979	14 798	

Tableau 1: Ressources en uranium (Source: NEA 2006)

Les Ressources Raisonnablement Assurées (RAR), les Ressources Présumées (IR) et l'uranium déjà produit sont présentés sur le graphique ci-dessous. Environ 2,3 millions de tonnes d'uranium ont déjà été produites. Ces quantités déjà produites sont présentées négativement à gauche. Les Ressources Raisonnablement Assurées en dessous de 40 kgU/\$ sont dans la plage de l'uranium déjà produit. Compte tenu de la demande actuelle d'uranium pour les réacteurs, qui est d'environ 67 kt/an, ces réserves dureraient environ 30 ans, et passeraient à 50 ans si l'on incluait les classes allant jusqu'à 130 \$/kgU. Les ressources présumées jusqu'à 130 \$/kg permettraient de prolonger le ratio statique R/P jusqu'à 70 ans environ.

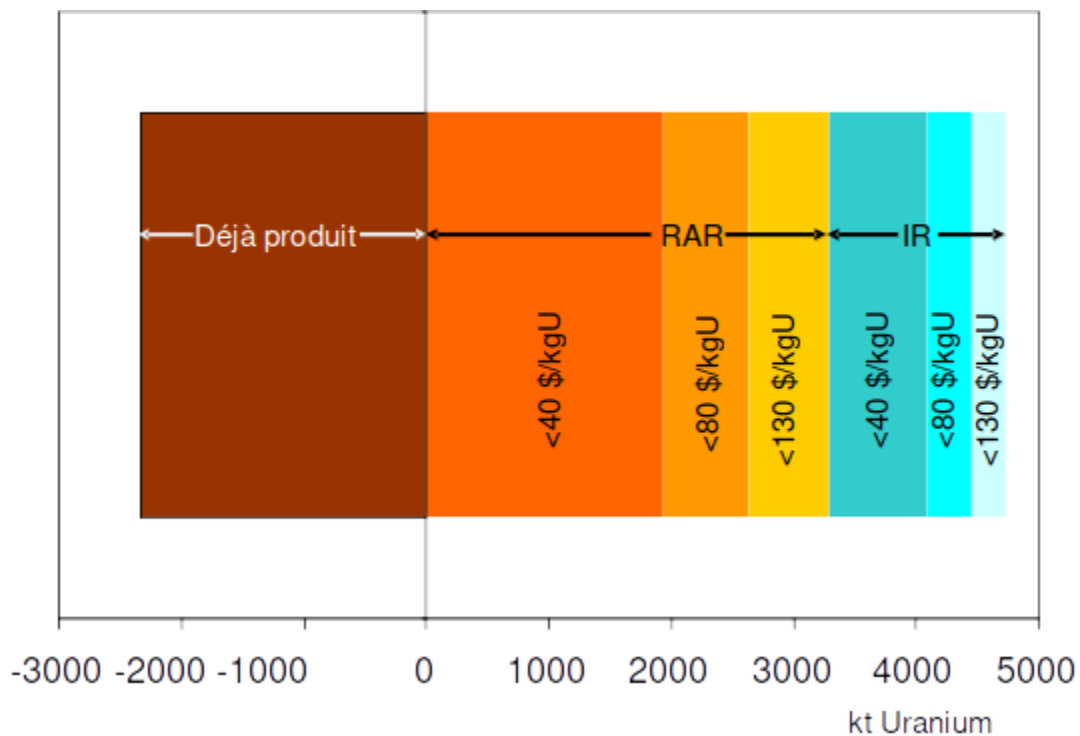
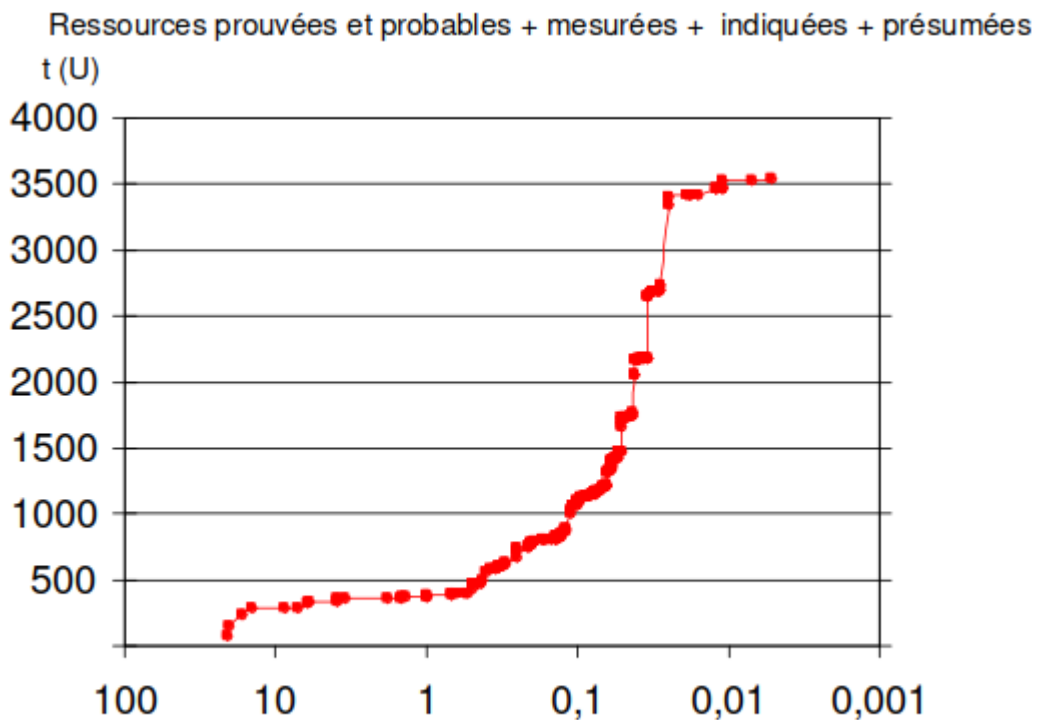


Figure 2: Ressources Raisonnablement Assurées (RAR),
Ressources Présumées (IR) et uranium déjà produit

Parmi les autres critères, la teneur du minerai joue un rôle important pour déterminer si l'uranium peut être ou non facilement extrait. La demande d'énergie pour l'extraction de l'uranium augmente régulièrement avec des concentrations inférieures du minerai. En dessous de 0,01-0,02% de teneur en uranium, l'énergie nécessaire pour l'extraction et le traitement du minerai est si élevée que l'énergie nécessaire à l'approvisionnement en combustible d'un réacteur, pour le faire fonctionner et pour éliminer les déchets, est proche de l'énergie que l'on peut obtenir par la combustion de l'uranium dans le réacteur ($EROI \approx 1/1$). Par conséquent, l'extraction de minerai, dont la teneur en uranium est inférieure à 0,01%, n'a de sens que dans des circonstances particulières. Cette question est examinée plus en détail à l'annexe 4.

Aujourd'hui, seul le Canada possède des quantités raisonnables de minerai avec une teneur en uranium supérieure à 1%. Les réserves canadiennes s'élèvent à environ 400 kt d'uranium, dont les concentrations les plus élevées peuvent atteindre 20 %.

Environ 90% des ressources mondiales ont une teneur en uranium en dessous de 1%, plus des deux tiers sont en dessous de 0,1%. La figure suivante représente les données d'environ 300 mines d'uranium répertoriées dans la base de données en ligne « WISE ». Elle comprend des ressources mesurées, indiquées et présumées (sensiblement équivalentes aux données RAR + IR de la figure précédente – la différence peut être due à des données manquantes sur la Russie et la Chine et à des définitions différentes).



Source: Service mondial d'information sur les projets énergétique d'uranium Teneur en oxyde d'uranium (U_3O_8)
Analyse: LBST 2006

Figure 3: Ressources mondiales cumulées d'uranium (sans la Chine, l'Inde et la Russie) en fonction de la teneur du minerai.

La figure suivante montre les ressources en uranium et l'uranium déjà produit par pays. Les pays sont classés par volume d'uranium déjà produit. La barre brune à gauche montre l'uranium déjà produit alors que les différentes couleurs de la barre de droite montrent les différentes qualités et les classes de coût des ressources. Comme précédemment, seules les Ressources Raisonnablement Assurées et les Ressources Présumées figurent sur ce schéma, les ressources non découvertes étant considérées trop spéculatives.

Il s'avère que 11 pays ont déjà épuisé leurs ressources en uranium, ayant extrait leurs ressources à un rythme élevé au cours des dernières décennies. Ce sont l'Allemagne, la République Tchèque, la France, le Congo, le Gabon, la Bulgarie, le Tadjikistan, la Hongrie, la Roumanie, l'Espagne, le Portugal et l'Argentine. Il est fort probable que les ressources restantes sont en Australie, au Canada et au Kazakhstan qui totalisent ensemble environ 2/3 des ressources en dessous de 40 \$/kgU le coût d'extraction. Mais soulignons encore une fois que seul le Canada contient des quantités raisonnables de minerai avec une teneur en uranium supérieure à 1%. L'Australie possède les ressources les plus importantes, mais 90% ont une teneur très faible en uranium de moins de 0,06%. En outre, le minerai d'uranium du Kazakhstan a une concentration bien inférieure à 0,1%.

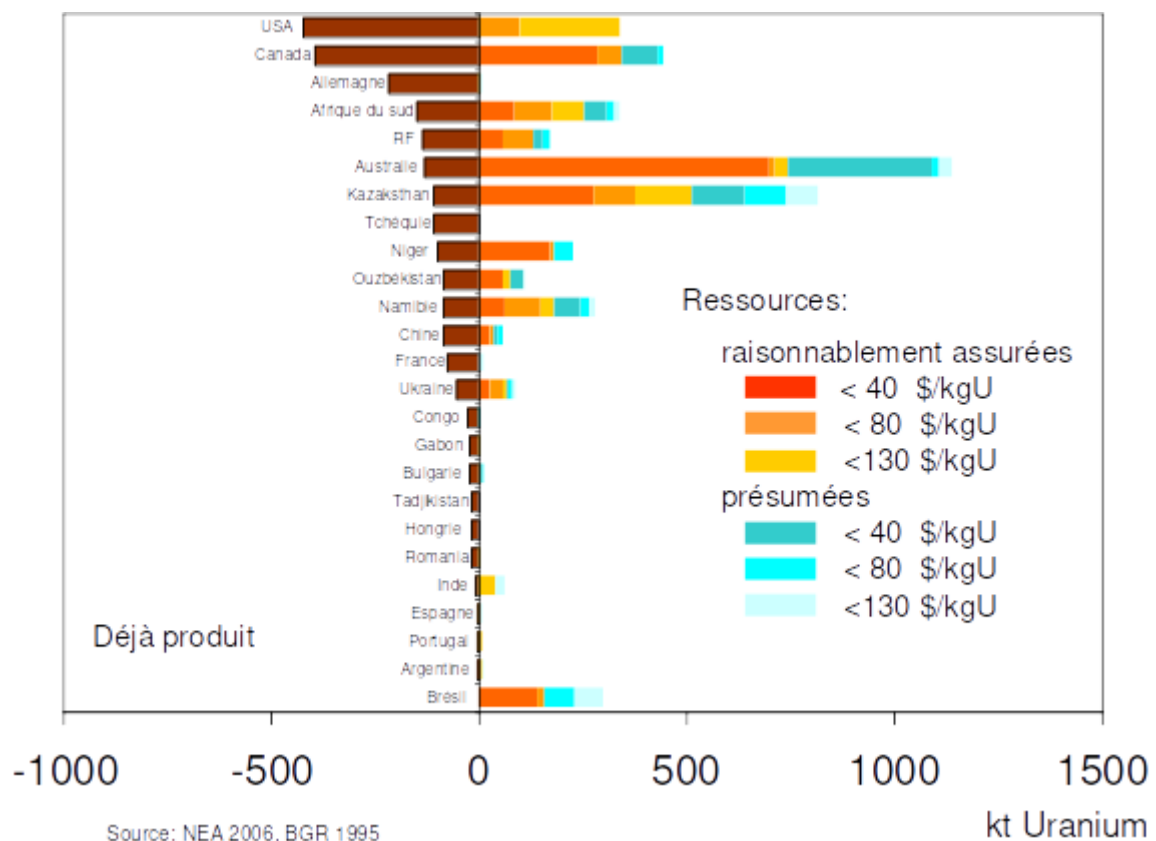


Figure 4: Production cumulative d'uranium, Ressources Raisonnablement Assurées et Ressources Présumées des pays les plus importants.

Les profils de production et les réserves déclarées de différents pays montrent d'importantes révisions à la baisse des réserves aux États-Unis et en France après que leur production maximale ait été dépassé. Les analyses détaillées sont présentées en annexe 5 pour la France et en annexe 6 pour les États-Unis. Ces révisions à la baisse soulèvent quelques doutes sur la qualité des données relatives aux Ressources Raisonnablement Assurées.

Un résumé de la production historique d'uranium de tous les pays est illustré sur la figure suivante. Les pays ayant déjà épuisé leurs réserves d'uranium sont en bas. Les données sont tirées du NEA 2006, et pour certains pays d'Europe orientale et les pays de l'ex-union soviétique (FSU) du BGR allemand (BGR 1995, avec des données supplémentaires pour les années suivantes). Cette figure intègre également la demande d'uranium pour les réacteurs nucléaires (ligne noire). Avant les années 1980, la production d'uranium a été fortement stimulée par les utilisations militaires et également par le taux de croissance attendu de production d'électricité nucléaire, finalement non concrétisé. En conséquence, la production d'uranium excéda largement la demande des réacteurs nucléaires.

L'éclatement de l'Union Soviétique et la fin de la guerre froide ont conduit à la conversion des matières nucléaires en combustibles civils et fut au moins partiellement responsable de la forte diminution de production de la fin des années 1980 et suivantes.

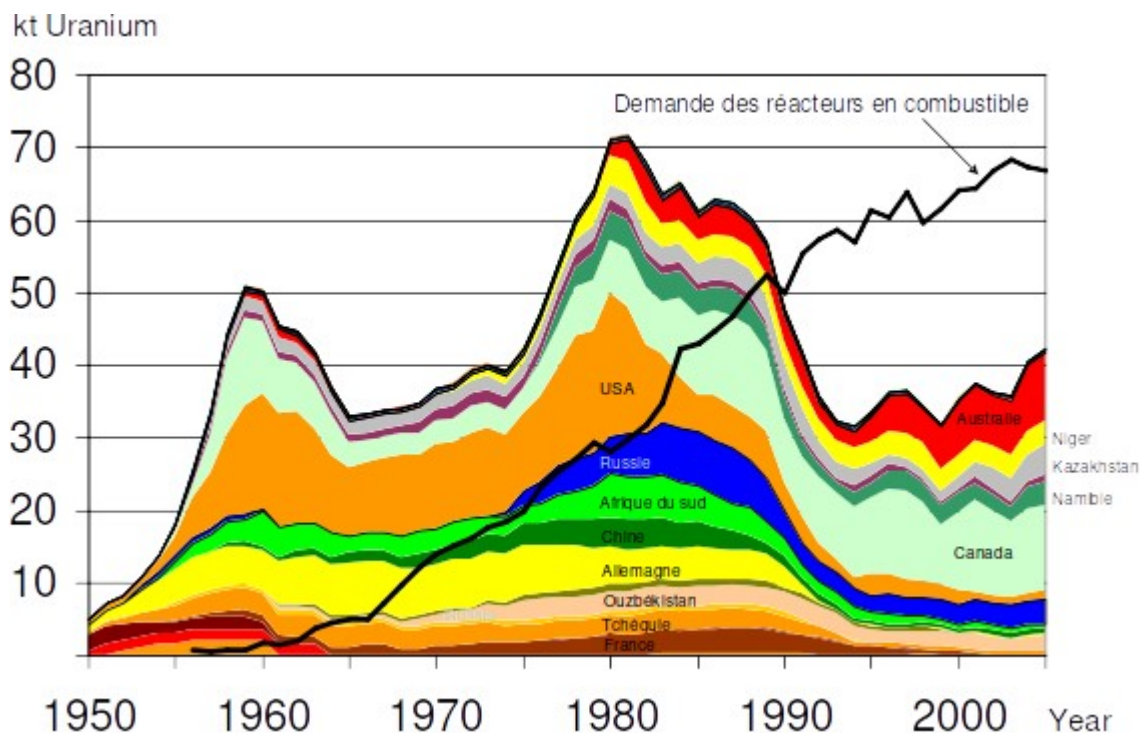


Figure 5: Production et demande d'uranium

À l'heure actuelle, la demande dépasse la production de plus de 25 kt/an. Cette lacune a été comblée avec de l'uranium provenant des stocks. Toutefois, la quantité totale de ces stocks est très incertaine, dans la mesure où elles consistent partiellement en stocks sur les sites des réacteurs, en stocks dans les mines, en stocks provenant du démantèlement des armes nucléaires et du retraitement des déchets nucléaires. En 2002, il a été estimé qu'environ 390 à 450 kt d'uranium pourraient provenir de ces sources (BGR 2002). Ce montant devrait, dans l'intervalle être réduit à environ 210 kt d'uranium voire moins d'ici la fin 2005.

La figure suivante résume la situation des ressources en uranium conjointement à une prévision jusqu'à 2030. Compte tenu à une pratique habituelle dans les rapports, les ressources non découvertes et spéculatives sont incluses (au bas de la figure) bien qu'il soit fortement probable que ces ressources spéculatives ne soient jamais converties en production réelle. Les ressources présumées, d'un coût attendu d'extraction jusqu'à 130 \$/kgU sont présentés au dessus des ressources spéculatives. Les Ressources Raisonnablement Assurées déclarées, d'un coût compris entre 40 et 130 \$/kgU, ainsi que celles en dessous de 40 \$/kgU sont présentés au dessus. Cette dernière catégorie est considérée par le BGR allemand comme équivalente aux réserves prouvées. La partie supérieure représente la production cumulée d'uranium depuis 1945 : 2,3 millions de tonnes. Cette catégorie est divisée en matériau utilisé à des fins militaires (estimation : 490 kt), en uranium utilisé dans les réacteurs (1,65 millions de tonnes) et en stocks additionnés (estimation : 210 kt en 2005).

Si l'actuelle capacité des réacteurs demeure constante, la demande annuelle restera de l'ordre de 67 kt/an. Si la production annuelle s'élève à 45 kt et si 22 kt sont prélevés sur les stocks, alors, ces stocks seront épuisés d'ici 2015 (les modifications possibles liées à l'enrichissement d'uranium et à

la fabrication de MOX sont marginales). La consommation continue de 67 kt/an dépassera les réserves en dessous de 40 \$/kgU aux alentours de 2030, 2035. En incluant les Ressources Raisonnablement Assurées en dessous de 130 \$/kgU, les ressources seraient épuisées vers 2050. L'ajout même des ressources présumées inférieures à 130 \$/kg, conduirait à l'épuisement des ressources vers 2070.

Les réacteurs en construction et ceux bientôt déclassés (selon l'AIE), montrent que la capacité nucléaire ne peut être augmentée au plus tôt avant 2011. A partir de ce moment-là, si la capacité installée devait augmenter de 5% par an, les réserves d'uranium en dessous de 40 \$/kgU seraient épuisées avant 2030.

Cependant, en gardant à l'esprit les nombreuses omissions entachant les réserves annoncées dans les rapports – comme indiqué ci-dessus – il est très probable que l'évaluation des Ressources Raisonnablement Assurées déclarées et celles présumées est optimiste. Si tel est le cas, les sévères contraintes budgétaires induites éviteront l'expansion des capacités nucléaires, sans compter les problèmes de remplacement des réacteurs vieillissants.

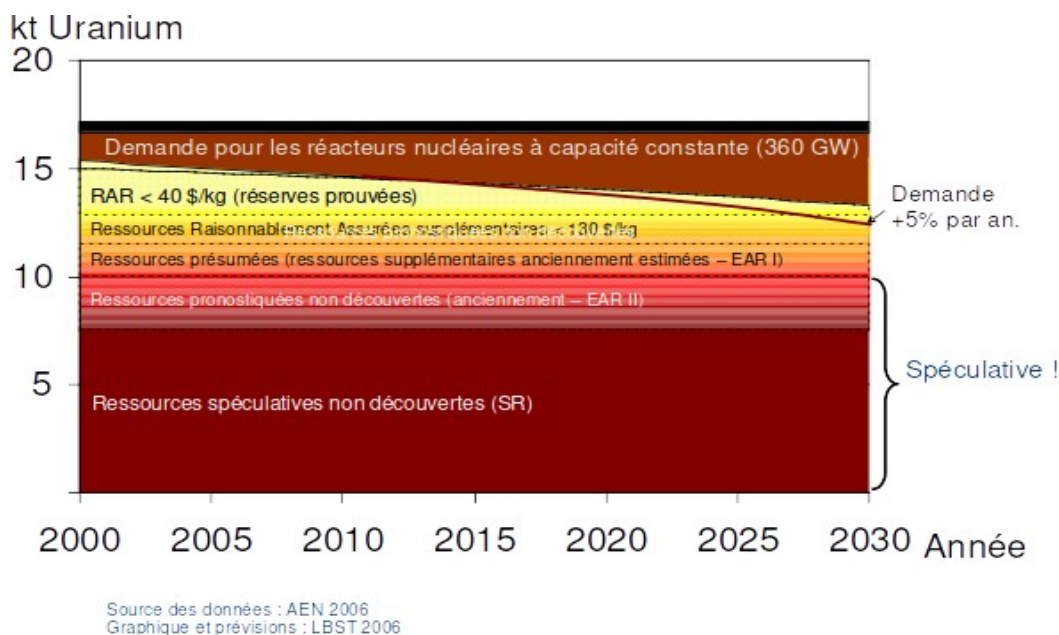


Figure 6: Ressources en uranium et consommation 2000 - 2030

Afin d'assurer le fonctionnement continu des centrales existantes, les capacités de production d'uranium doivent être considérablement augmentées au cours des prochaines années, bien avant que les stocks soient épuisés. La hausse des prix et les stocks en voie de disparition ont conduit à une nouvelle vague de développements miniers. Les divers projets actuels en sont au stade de planification et de construction, ce qui pourrait satisfaire la demande prévue s'ils sont prêts à temps.

L'annexe 7 liste les mines prévues pour être opérationnelles aux années indiquées selon l'Agence pour l'Énergie Nucléaire (AEN 2006). Au total, environ 20 kt/an de capacité de production supplémentaire sont attendus d'ici 2010. Cela permettrait d'accroître la capacité actuelle d'environ 50 kt/an à 70 kt/an, suffisamment pour répondre à la demande actuelle une fois les stocks épuisés.

Toutefois, il est très probable que les nouveaux projets miniers connaissent des dépassements de coûts et des retards qui font douter que les capacités de production puissent être étendues à temps. Ces problèmes peuvent par exemple être observés sur le projet de Cigar Lake, censé produire environ 8 kt/an d'oxyde d'uranium U_3O_8 (Équivalent à 6,8 KtU) dès 2007. Cette mine sera le deuxième plus grand gisement du monde en teneur d'uranium contenant environ 100 kt des réserves prouvées et probables. Sa capacité de production devrait augmenter l'actuelle production mondiale d'uranium d'environ 17%. Par conséquent, son développement est un élément clé dans l'expansion de l'offre mondiale d'uranium. En octobre, une grave inondation est survenue submergeant la totalité de la mine quasi-complétée. À l'heure actuelle, il est très difficile de savoir si le projet peut être développé davantage (l'annexe 8 détaille cette question).

La figure suivante résume la situation de l'offre actuelle. Les profils de production sont obtenues par extrapolation de la production de chaque pays en fonction de ses ressources disponibles. La grande incertitude sur les données est traduite dans les différents choix d'uranium encore disponible. La partie sombre est basée sur les réserves prouvées (Ressources Raisonnablement Assurées dont le coût d'extraction est en dessous de 40 \$/kgU), la partie claire du dessus représente le profil possible de production si les Ressources Raisonnablement Assurées jusqu'à 130 \$/kgU peuvent être extraites. Ces catégories sont plus ou moins équivalentes à ce que l'on nomme les réserves probables. La partie bleue claire du dessus correspond aux ressources comprenant l'ensemble « Ressources Raisonnablement Assurées » et « Ressources Présumées ». Elles sont sensiblement équivalentes aux « Réserves Possibles ». Vous trouverez l'évaluation détaillée pays par pays dans l'annexe 9.

La ligne noire représente la demande des réacteurs nucléaires en uranium, soit 67 kt en 2005. Les prévisions montrent la demande en uranium jusqu'à 2030 selon les prévisions de l'Agence Internationale de l'Énergie en 2006 dans son scénario de référence (WEO 2006). Compte tenu de la l'incertitude des données sur les ressources, nous pouvons conclure qu'entre 2015 et 2030, un écart sur l'offre en uranium se posera lorsque les stocks s'épuiseront et que la production ne pourra augmenter comme elle devrait pour satisfaire la demande croissante. Plus tard, après quelques années d'approvisionnement suffisant, la production diminuera à nouveau en raison de la déplétion des ressources. Par conséquent, il est très peu probable qu'au delà de 2040 même la capacité nucléaire actuelle puisse encore être maintenue de manière adéquate. Si toutes les Ressources Raisonnablement Assurées et les Ressources Présumées ne peuvent être converties en production, ou si les stocks se révèlent plus faible que l'estimation de 210 kt d'uranium, alors cet écart interviendra même plus tôt.

Ce n'est que lorsque les surgénérateurs seront exploités en grand nombre avec un taux de surgénération adéquat que ce problème pourra être résolu pour quelques décennies. Mais il n'y a aucune indication en ce sens dans les 25 prochaines années.

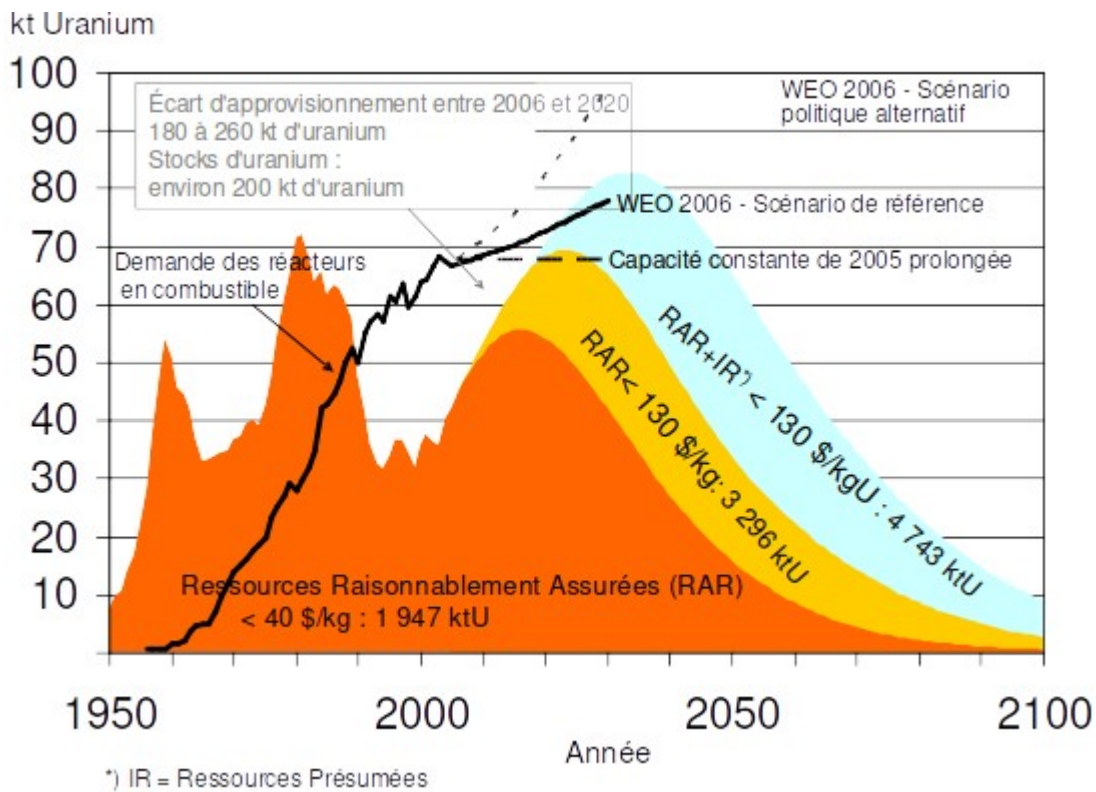


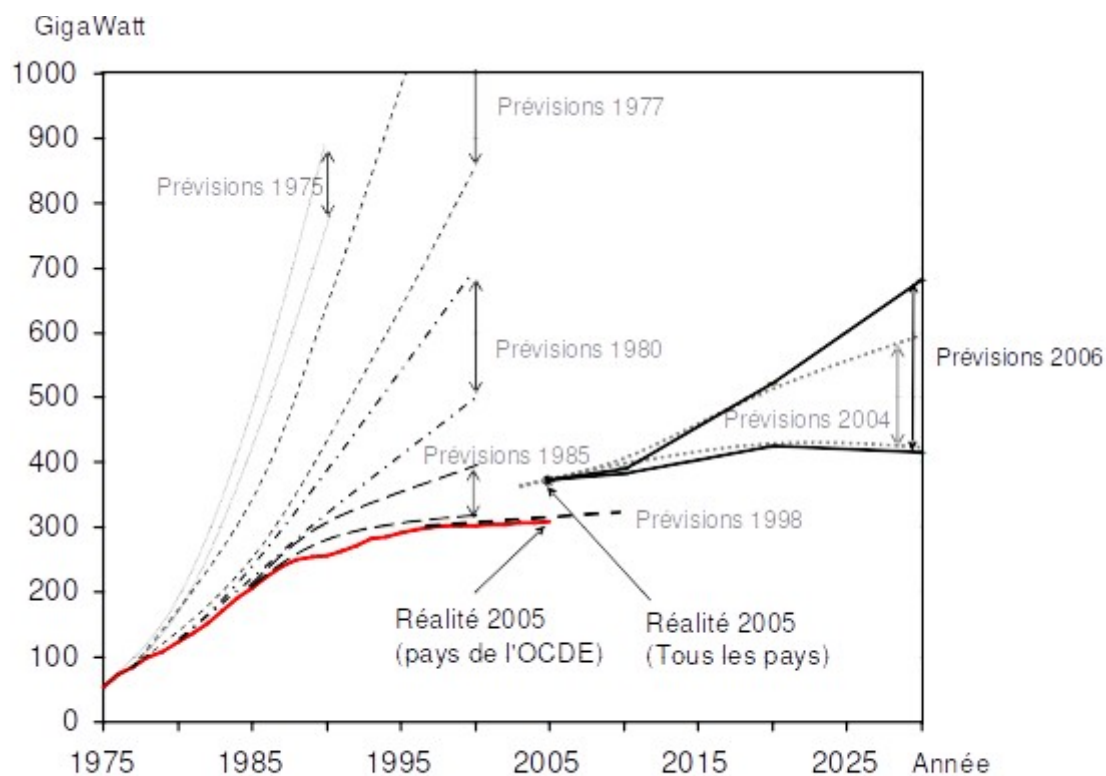
Figure 7: Histoire et prévision de la production d'uranium en fonction des ressources déclarées. La plus petite zone représente 1 900 kt d'uranium correspondant aux réserves prouvées tandis que l'incertitude sur les données augmente vers la plus grande zone correspondant aux réserves possibles, soit 4 700 kt d'uranium.

Les centrales nucléaires

Histoire des centrales nucléaires

Tous les deux ans, l'Agence pour l'Énergie Nucléaire (NEA) en collaboration avec l'Agence Internationale de L'Énergie Atomique (AIEA) publie des données détaillées sur les réacteurs existants, les réacteurs en construction, les réacteurs fermés ainsi que les prévisions pour les 20 à 30 prochaines années. Une des premières prévisions en 1975 prédit que la capacité nucléaire des pays membres de l'OCDE augmenterait entre 772 et 890 GW en 1990. Sur la base de ces prévisions, les capacités de production d'uranium ont été étendues. Mais en réalité, la capacité installée a atteint 260 GW, une valeur bien inférieure à l'intervalle cible de l'AIEA. Les prévisions de 1977 furent moins ambitieuses, prévoyant un intervalle entre 860 et 999 GW en 2000. Plus nous nous rapprochions de l'an 2000, plus les prévisions pour 2000 sont devenues modestes prévoyant une capacité comprise entre 318 et 395 GW. Finalement, un total de 303 GW ont été installées en 2000. Chaque prévision passée de l'AIEA s'est avérée trop optimiste. Même les prévisions les plus récentes définissent, pour le monde entier, une croissance de la capacité installée entre 414 et 679 GW d'ici 2030. La prévision la plus haute doublerait presque la capacité actuellement installée.

Même l'Agence internationale de l'énergie tomba loin de ces prévisions très optimistes du passé en supposant une capacité de 376 GW installée en 2030, des capacités intermédiaires de 385 GW en



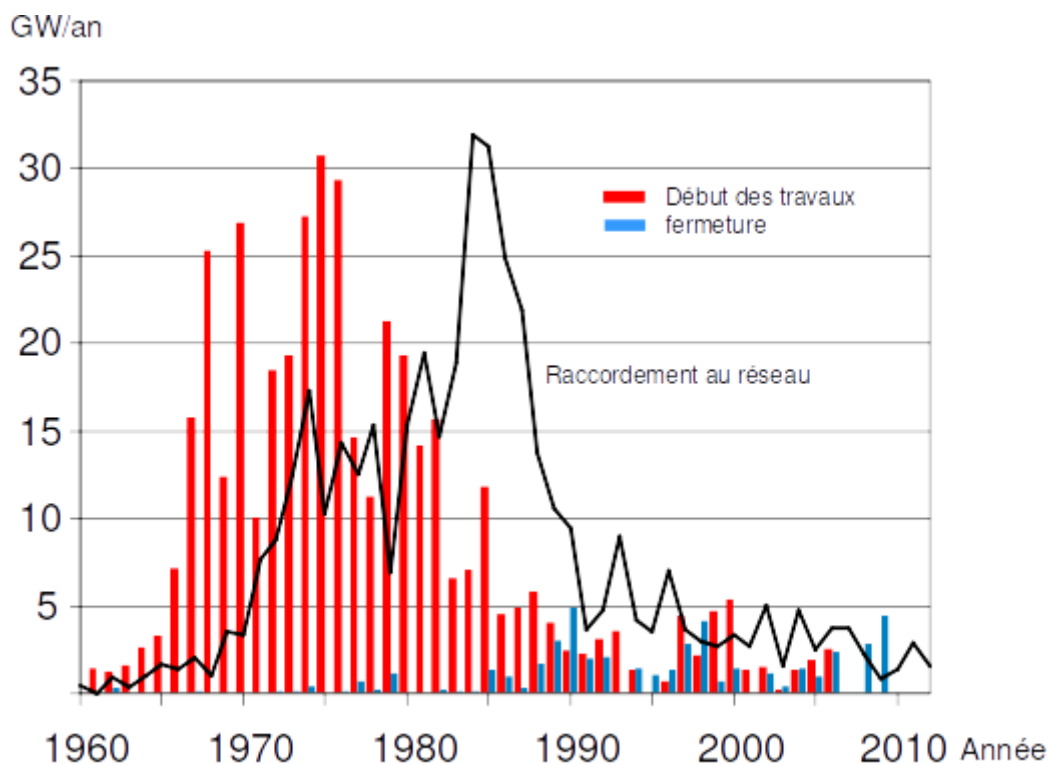
Source des données: AIEA; Graphiques : LBST

Figure 8: Historiques des prévisions

2010 et 382 GW en 2020 (WEO 2004). Toutefois, le dernier rapport de l'AIE (WEO 2006) stipule que la capacité nucléaire devrait être augmentée afin d'éviter des pénuries d'énergie et **soi-disant**

réduire les émissions de gaz à effet de serre. Le scénario de référence prévoit une croissance de 0,5% par an entre 2004 et 2030 et un scénario alternatif sur une croissance annuelle de 1,4%. Mais selon notre analyse, ces prévisions de l'AIE sont beaucoup trop optimistes car, à court terme jusqu'en 2015, les délais d'exécution nécessaires sont trop longs, ne permettant pas une augmentation de capacité d'environ 15%. En outre, les réacteurs existants sont vieillissants et près de 60-80% de ces réacteurs existants seront mis hors service dans les 25 prochaines années.

La figure suivante montre les capacités nettes des constructions en cours de nouveaux réacteurs (barres rouges) et les raccordements au réseau des nouveaux réacteurs (ligne noire) entre 1955 et 2006. En règle générale, la plupart des réacteurs ont été construits entre 1965 et 1975, période au cours de laquelle, en moyenne, une vingtaine de nouveaux réacteurs ont été construits chaque année. Le pic de connexions au réseau fut en 1985, indiquant un temps moyen de construction d'environ 10 ans.



Source: Agence Internationale de l'Énergie

Octobre 2006

À l'heure actuelle, 28 réacteurs au total, sont en construction dans le monde (voir tableau de l'annexe 10). Toutefois, 11 de ces réacteurs, presque tous situés dans des pays de l'ancien bloc de l'Est, sont déjà en construction depuis plus de 20 ans. La construction de réacteurs dans ces pays a été arrêtée au début de la transition économique. Il est donc très probable que ces réacteurs ne soit jamais achevés - de toute façon, sans date prévue disponible. Si la construction de ces réacteurs devait se poursuivre maintenant cela équivaldrait à une construction totalement nouvelle. Par conséquent, la ligne noire de la figure ne comprend que les raccordements futurs au réseau pouvant être attendus d'ici à 2011 si tout se déroule selon les programmations. Cela représente un total de 13,7 GW d'ici 2011 (ou 6,7 GW d'ici fin 2009). Si l'achèvement de certains de ces réacteurs est

retardé, cette estimation sera plus faible.

Les barres bleues de la figure montrent les réacteurs déjà fermés ainsi que la fermeture probable de réacteurs entre 2006 et 2009 comme prévu par l'AIE (voir tableau en Annexe 10). Cela représente une capacité totale des réacteurs arrêtés de 9,3 GW d'ici la fin de 2009. En équilibrant les ajouts et les fermetures annuels de réacteurs, on obtient la capacité nette connectée au réseau pour la période de 1950 à 2009, comme le montre la figure suivante. La ligne bleue fine indique les ajouts cumulés bruts de capacité et la ligne bleue épaisse la capacité nette cumulée. La capacité nette sera probablement à son maximum en 2008 et déclinera ensuite les années suivantes.

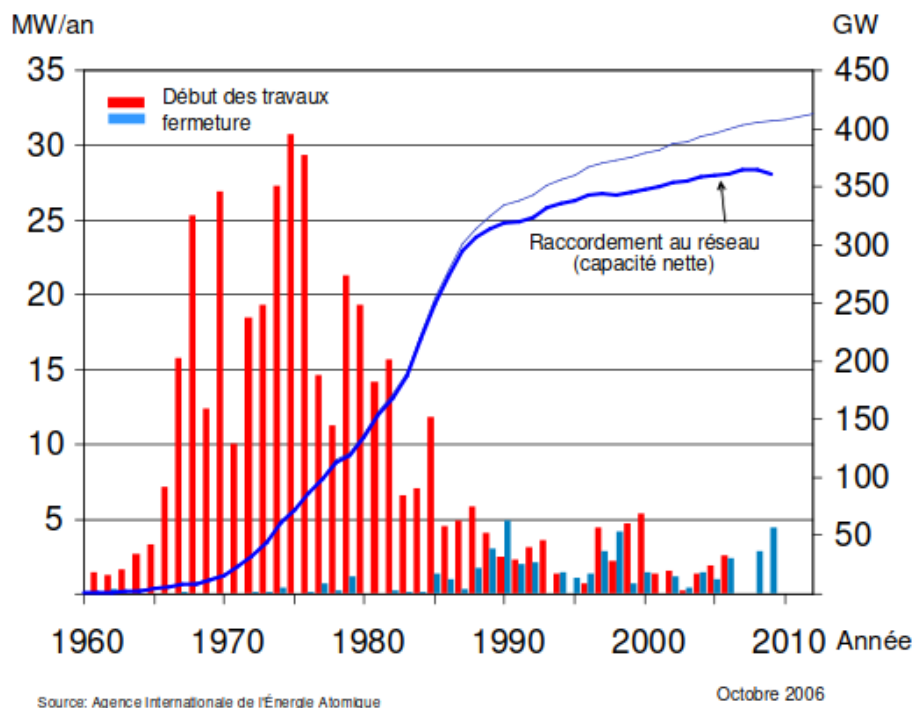


Figure 9: Capacité cumulative installée jusqu'en 2011

Sur la base de cette analyse, on peut s'attendre à une capacité maximale de 367 GW d'ici à 2011, probablement moins si plus de réacteurs sont fermés en raison de leur vieillissement. Une capacité nette de 391 GW d'ici 2015, comme prévu par l'AIE dans le WEO 2006 (La production d'uranium en France "scénario de référence") est tout simplement impossible. Cela nécessiterait la connexion au réseau d'environ 24 réacteurs supplémentaires d'ici 2010, mais la construction n'a même pas commencé. Encore plus irréaliste est le "scénario de politique alternative" dans le WEO 2006, prévoyant une capacité de réacteur nucléaire de 412 GW d'ici 2015. Cela demanderait de débiter la construction de 45 nouveaux réacteurs au plus tard dans les 5 prochaines années !

Prévisions des capacités nucléaires d'ici à 2030

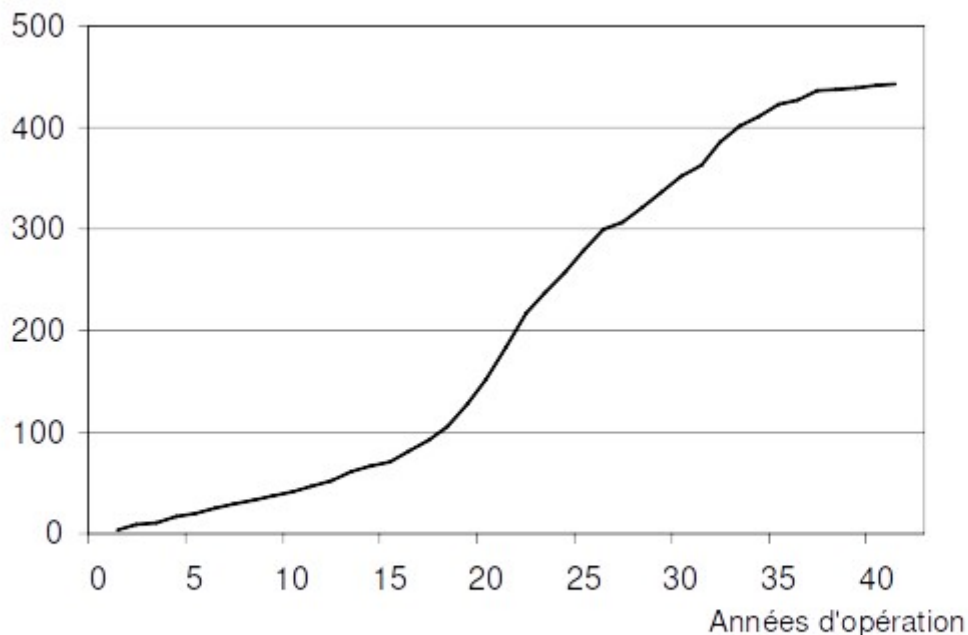
Au cours des 50 dernières années, 214 réacteurs d'une capacité nette de 148 GW ont été construits en Europe. Le temps moyen de construction était de sept ans. Environ 30% - 63 réacteurs - ont déjà été fermés après une période de fonctionnement moyenne de 24 ans. Le dernier réacteur en cours de construction est le réacteur EPR en Finlande, un autre est planifié en France. Les calendriers prévus

de ces réacteurs sont résumés dans l'annexe 11 car ils donnent une idée des délais nécessaires. Tout retard de construction rend plus difficile une augmentation de capacité et de compenser par le déclassement de réacteurs vieillissants. Après un an de construction, le nouveau réacteur finlandais a près d'un an retard sur le calendrier.

Pour un scénario mondial de capacité des futurs réacteurs nucléaires, il est supposé que la moyenne de construction de nouveaux réacteurs sera de 5 ans après le début de la construction.

Environ 85% des réacteurs en exploitation du monde entier ont maintenant plus de 15 ans d'activité. La structure d'âge de ces réacteurs est présentée dans la figure suivante. Environ 90 réacteurs sont en exploitation depuis au moins 1975 avec une capacité nette de 62 GW. Ces réacteurs sont supposés être déclassés dans les 10 prochaines années d'ici à 2015.

Nombre cumulé de réacteurs



Source: Agence Internationale de l'Énergie Atomique

Octobre 2006

Figure 10: Âge des réacteurs nucléaires

Pendant les 15 dernières années le taux moyen de construction était de trois à quatre réacteurs par an. Si cette tendance continue, seulement la moitié de la capacité déclassée (retirée du service) sera substituée par de nouveaux réacteurs et la capacité installée baissera d'à peu près 30 GW. Ce scénario est représenté dans la figure suivante par la ligne bleue. Les barres rouges indiquent le début de la construction des réacteurs déjà existants avec une extrapolation de la tendance actuelle - c'est-à-dire, le démarrage de la construction de trois réacteurs par an. En prolongeant cette tendance jusqu'en 2030, alors, l'actuelle capacité installée baissera de 367 GW à 140 GW.

Simplement maintenir la capacité actuelle exigerait des investissements beaucoup plus ambitieux dans l'énergie nucléaire que ceux observés aujourd'hui. L'Association nucléaire mondiale met

fréquemment à jour sa revue des réacteurs en fonctionnement, en construction, en commande ou planifiés et proposés. Fin septembre 2006, environ 28 réacteurs étaient en construction (incluant les 11 réacteurs “ruines” actuellement en construction depuis plus de 20 ans), 62 sont en commande ou planifiés avec une capacité nette de 68 GW et 160 réacteurs avec une capacité nette de 119 GW sont “proposés”.

En supposant :

- que les réacteurs en construction (exceptés les 11 chantiers permanents déjà évoqués) seront connectés au réseau avant 2011,
- que tous les réacteurs commandés ou planifiés seront connectés au réseau dans les 10 prochaines années (avant 2016),
- et que tous les réacteurs “proposés” seront construits dans les 15 prochaines années (avant 2021),

alors, la nouvelle capacité totale atteindra 190 GW. D’ici 2021 environ 164 des réacteurs actuels d’une capacité totale de 130 GW auront plus de 40 ans. De plus, l’arrêt de 13 GW est prévu en Allemagne. En conséquence, si ces planifications se réalisent, la capacité nette pourrait augmenter avant 2021 d’au mieux 50 GW à 420 GW soit de 13 %, en dépit de probables problèmes d’approvisionnements en uranium comme indiqué précédemment.

Si tous les réacteurs proposés ne sont achevés que dans les 20 prochaines années (au lieu de 15 ans), alors la capacité totale continuera à baisser. En conséquence, le maintien de l’actuelle capacité jusqu’en 2030 semble un but ambitieux même en considérant une reprise de projets nucléaires. La prochaine figure montre l’effort nécessaire pour respecter les exigences de divers scénarios.

Un temps de construction moyen de 5 ans est assumé. Les barres rouges indiquent la tendance actuelle pour un début de construction annuel de trois nouveaux réacteurs de 3 GW en moyenne. La ligne rouge donne la tendance de la capacité connectée au réseau. Les nouveaux réacteurs sont connectés au réseau 5 ans après leur construction. Au bout de 40 ans de service, les vieux réacteurs sont déclassés. En conséquence, la capacité nette baissera d’environ 70 % jusqu’à 2030 si les tendances actuelles persistent. Les réacteurs allemands sont déclassés après 32 ans de service. La ligne rouge pointillée montre les résultats pour un temps de service étendu à 40 ans.

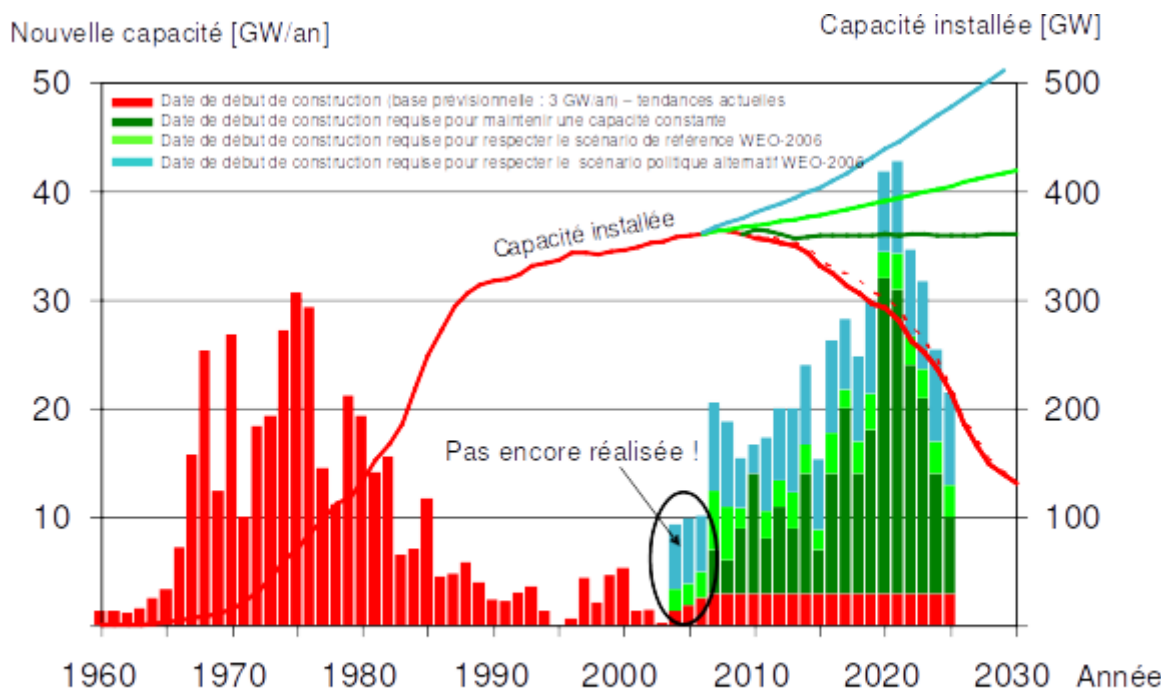
Les barres vert foncé indiquent les démarrages de construction annuels nécessaires pour maintenir la capacité présente à environ 367 GW, laquelle est représentée par la ligne vert foncé. Un faible déclin à la fin de cette décennie est inévitable dans la mesure où trop peu de réacteurs sont actuellement en construction

Les barres vert clair indiquent les démarrages de construction annuels nécessaires pour respecter la projection de l’Agence Internationale de l’Énergie dans son “scénario de référence” dans la perspective 2006 de l’énergie mondiale. La ligne vert clair montre la capacité totale correspondante.

Les barres bleues indiquent les démarrages de construction annuels nécessaires pour respecter la projection de l’Agence Internationale de l’Énergie dans son “scénario alternatif de politique” dans 2006 WEO. La ligne bleue fournit la capacité totale correspondante.

Ces dernières années, trop peu de réacteurs ont commencé leur construction pour respecter le scénario IEA jusqu'à 2012. Afin de respecter ces scénarios au-delà de 2012, il faut chaque année construire 5 à 10 fois plus de réacteurs qu'actuellement. Il faut pour cela une main-d'œuvre qualifiée à l'heure actuelle indisponible. De plus, à la fois les délais importants et les investissements énormes de plus d'un milliard d'Euro par GW comportant un fort risque financier rendent difficile de croire que ces investissements seront confiés aux marchés libéralisés. Au Royaume-Uni, par exemple, personne n'a investi dans de nouvelles centrales nucléaires ces 18 dernières années au moins, bien qu'il n'y ait aucune interdiction et que la demande en électricité existât bel et bien.

Pour résumer les résultats de ce chapitre, à court terme jusqu'à 2012, la capacité nucléaire mondiale sera plutôt en déclin qu'en augmentation en raison du vieillissement des réacteurs et d'un faible renouvellement. À long terme au-delà de 2030, le manque d'uranium limitera l'expansion des centrales nucléaires. Cependant, même pour satisfaire la demande jusqu'en 2030 les capacités actuelles de production d'uranium doivent être augmentées d'au moins 30 %. En raison des retards des nouveaux projets et des problèmes graves de la nouvelle mine « Cigar Lake » – la plus grande mine en cours de développement, les restrictions probables d'approvisionnement en uranium limiteront la capacité nucléaire disponible avant 2030.



Source: Agence Internationale de l'Énergie Atomique

Octobre 2006

Figure 11: projection des capacités nucléaires

Lors de la présentation du rapport WEO 2006, l'AIE a déclaré que l'extension des centrales nucléaires serait un instrument efficace pour lutter contre le changement climatique. Ceci est en contraste frappant avec les résultats du rapport car, selon le rapport, l'énergie nucléaire est considérée comme la mesure la moins efficace dans la lutte contre le réchauffement à effet de

serre : dans le « scénario de politique alternative », la réduction prévue des émissions de GES d'environ 6 milliards de tonnes de le dioxyde de carbone est principalement dû à l'amélioration de l'efficacité énergétique (contribuant à 65% de la réduction), 13% sont dus au changement de combustible, 12% sont dus à une utilisation accrue des énergies renouvelables et seulement 10% sont attribués à une utilisation accrue de l'énergie nucléaire.

ANNEXES

Annexe 1: Diverses définitions des réserves d'uranium

Les classifications des réserves d'uranium diffèrent des définitions des réserves de pétrole et de gaz. De plus, les institutions nationales ou internationales utilisent un schéma légèrement différent pour lister les réserves d'uranium. Mais même au sein d'une même institution, ces définitions changent de temps à autre. Les classifications les plus courantes sont résumées dans la figure suivante.

Le référentiel mis en place par l'Agence pour l'Énergie Nucléaire et l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique est fréquemment utilisé. Selon cette classification, les ressources sont divisées en « ressources connues » et « ressources non découvertes ». Les « ressources non découvertes » sont divisées en ressources « pronostiquées » et « spéculatives ». Avant la dernière mise à jour des ressources, l'expression « ressources supplémentaires estimées de catégorie 2 », ou en abrégé RSE II, était couramment utilisée pour décrire les ressources pronostiquées.

Les “ressources connues” sont divisées en 2 groupes: “Ressources raisonnablement assurées” (RAR) et “Ressources présumées” (anciennement dénommées “Ressources supplémentaires estimées, catégorie 1”). Les catégories sont divisées en plusieurs catégories de coûts en fonction des coûts d'extraction estimés. La définition de ces catégories a changé de temps à autre aussi. Les catégories “moins de 40 \$/kgU”, “moins de 80 \$/kgU” et “inférieurs à 130 \$/kg U” sont les plus utilisés.

La qualité des données diminue passant de “ressources raisonnablement assurées” à “ressources spéculatives” et d'estimations de coûts d'extraction faibles à élevées. Très souvent, les ressources de type “RAR < 80 \$/kgU” sont considérées comme équivalentes aux “réserves prouvées”, par exemple par l'Agence fédérale allemande pour les géosciences et les minéraux (BGR) jusqu'en 2002. Au Canada, cette catégorie est appelée “réserves mesurées”. La catégorie de RAR entre 80 et 130 \$/kgU est définie comme “réserves probables” en Allemagne, mais comme “réserves indiquées” au Canada. L'ensemble des “ressources supplémentaires estimées de catégorie 1” ou “réserves présumées” (RI) est défini en Allemagne comme une “réserve possible”. Par rapport à la classification des réserves de pétrole et de gaz, une “réserve possible” est quelque chose qui pourrait être transformé en “réserve prouvée” avec une probabilité de 5 à 10 %. Récemment, la BGR allemande a modifié son système de classification et a réduit la fourchette des “réserves prouvées” à “RAR < 40 \$/kgU”. prouvées” à “RAR < 40 \$/kgU”. Alors que les “ressources découvertes” sont regroupées en “RAR entre 40 et 80 \$/kgU” et “IR inférieur à 80 \$/kgU” d'une part - ce qui pourrait correspondre à des aux “réserves probables”, et “RAR entre 80 et 130 \$/kgU” et “IR entre 80 et 130 \$/kgU” d'autre part - ce qui peut correspondre à des “réserves possibles”, les “ressources non découvertes” sont toujours traitées de la même manière.

Cette longue discussion sur les définitions montre que celles-ci ne sont que des indications sur les réserves prouvées. Le niveau élevé de désagrégation des données en quatre groupes, chacun d'entre eux étant subdivisé en différentes classes de coûts, donne l'impression d'un niveau élevé de qualité

des données qui, en réalité, n'est pas justifié. Chaque classe peut inclure des montants spéculatifs qui ne seront peut-être jamais transformés en volumes produits. Ceci est démontré ci-dessous à l'aide de quelques exemples.

		Ressources connues				Ressources non découvertes					
NEA / IAEA 2004		Raisonnement assurées (RAR)		Estimation complémentaire (EAR I)		Estimation complémentaire (EAR II)		Spéculative			
NEA / IAEA 2006		Raisonnement assurées (RAR)		Ressources présumées		Prognosticated		Spéculative			
		RAR < 40 \$/kgU	RAR < 80 \$/kgU	RAR < 130 \$/kgU	EAR I < 40 \$/kgU	EAR I < 80 \$/kgU	EAR I < 130 \$/kgU	<80 \$/kgU	<130 \$/kgU	<130 \$/kgU	?
		← Réserves →									
Canada		Mesurée	Indicate d	Inferred		Prognosticated		Spéculative			
Allemagne 1995		prouvée	probabl e	possible		Prognosticated		Spéculative			
		← Réserves →									
		Réserves	Ressources								
			Découvertes				Non découvertes				
Allemagne 2005		RAR <40 \$/kgU	RAR 40 - 80 \$/kgU EAR I < 80 \$/kgU	RAR 40 – 130 \$/kgU EAR I 40 - 130 \$/kgU			Prognosticated		Speculative		

Tableau 1 : Différents systèmes de classification des réserves et des ressources d'uranium couramment utilisés

Annexe 2: Développement historique des ressources en uranium

L'évolution historique des estimations de ressources est illustrée dans la figure suivante. Les ressources dites "non découvertes" ne sont pas incluses. ressources non découvertes" ne sont pas incluses. Cependant, les différentes classes de coûts sont listées individuellement. Pour la période allant de 1977 à 1995, aucune séparation de la classe de coût "inférieur à 40 \$/kgU" n'était disponible, ce qui explique l'absence de ces données. La courbe rouge à l'arrière-plan de la figure indique les dépenses d'exploration de l'industrie minière qui présentent un pic marqué vers 1980. Il semble que le niveau des dépenses n'ait pas influencé le succès de l'exploration puisqu'aucune croissance des ressources ne peut être attribuée à cette période. Vice versa, les "ressources additionnelles estimées" ont diminué au début des années 1980 de presque 1 million de tonnes d'uranium, soit environ 30 % des ressources totales. Comme nous le verrons plus loin, cette baisse est presque entièrement due à la révision à la baisse des ressources aux États-Unis.

Dépenses annuelles d'exploration et d'évaluation des ressources en uranium

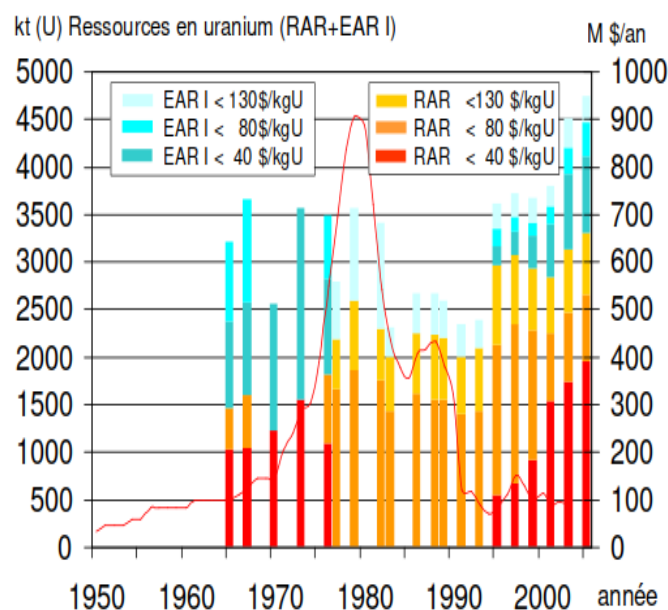


Figure A-2 : Développement historique des ressources en uranium des catégories RAR et EAR I entre 1965 et 2005, et les dépenses annuelles estimées pour l'exploration. Les ressources sont réparties en différentes classes de coûts, comme indiqué dans la figure.

Annexe 3 : Évaluation des ressources en uranium par pays

Le tableau suivant présente l'évaluation détaillée des ressources "raisonnablement assurées" et "présumées" pour chaque pays à la fin de l'année 2004, telles qu'elles figurent dans le dernier rapport (NEA). Un point d'interrogation indique qu'aucun commentaire n'a été formulé par l'organisme rapporteur concernant la classe de coût correspondante.

Les deux premières colonnes indiquent le dernier taux de production annuel disponible et les données de production cumulées estimées. Les colonnes suivantes indiquent les ressources "raisonnablement assurées" et "présumées", chaque catégorie étant décomposée en classes de coût "<40 \$/kgU", "<80 \$/kgU" et "130 \$/kgU". Il convient de noter que les valeurs données pour les classes de coût élevées comprennent les valeurs des classes de coût inférieures.

Pays	Production 2005	Production cumulée fin 2005	Ressources raisonnablement assurées fin 2004			Ressources présumées (EAR I) fin 2004		
			< 40 \$/kgU	< 80 \$/kgU	< 130 \$/kgU	< 40 \$/kgU	< 80 \$/kgU	< 130 \$/kgU
Afrique du Sud	0,674	158	88,5	177,1	255,6	54,6	71,6	85
Algérie	0	0	?	19,5	19,5	0	0	0
Allemagne	0,077	220	0	0	3	0	0	4
Argentine	0	2,6	4,8	4,9	7,1	2,9	2,9	8,6
Australie	9,51	132	701	714	747	343	360	396
Brésil	0	1,9	139,9	157,7	157,7	0	73,6	121
Bulgarie	0	16,7	1,67	5,9	5,9	1,7	6,3	6,3
Canada	11,6	394	287,2	345,2	345,2	84,6	98,6	98,6
CAR	0	0	?	6	12	0	0	0
Chili	0	0	?	?	0,6	?	?	0,9
Chine	0,75	80	25,8	38	38	5,9	21,7	21,7
Congo	0	25,6	?	1,4	1,4	?	1,3	1,3
Danemark	0	0	0	0	20,3	0	0	12
Espagne	0	6,1	0	2,5	4,9	0	0	6,4
Finlande	0	0	0	0	1,1	0	0	0
France	0,007	76	0	0	0	0	0	11,7
Gabon	0	25,6	0	0	4,8	0	0	1
Grèce	0	0	1	1	1	?	6	6
Hongrie	0	20	0	0	0	0	0	0
Inde	0,23	9	?	?	42,6	?	?	22,3
Indonésie	0	0	0	0,3	4,6	0	0	1,2
Iran	?	?	0	0	0,4	0	0	1,1
Italie	0	0	?	4,8	4,8	0	0	1,3

Pays	Production 2005	Production cumulée fin 2005	Ressources raisonnablement assurées fin 2004			Ressources présumées (EAR I) fin 2004		
			< 40 \$/kgU	< 80 \$/kgU	< 130 \$/kgU	< 40 \$/kgU	< 80 \$/kgU	< 130 \$/kgU
Japon	0	0	0	0	6,6	0	0	0
Jordanie	0	0	30,4	30,4	30,4	48,6	48,6	48,6
Kazakhstan	4,36	111	278,8	378,3	513,9	129,3	228,4	302,2
Malawi	0	0	?	8,8	8,8	0	0	0
Mexique	0	0	0	0	1,3	0	0	0,5
Mongolie	0	0,7	8	46,2	46,2	8,3	15,8	15,8
Namibie	3,147	85	62,2	151,3	182,6	61,2	86,3	99,8
Niger	3,093	98	172,9	180,5	180,5	0	45	45
Ouzbékistan	2,3	87	59,7	59,7	76,9	31	31	38,6
Pakistan	0,045	1	0	0	0	0	0	0
Pérou	0	0	0	1,2	1,2	?	1,3	1,3
Pologne	0	1	0	0	0	0	0	0
Portugal	0	3,2	0	6	7	0	1,2	1,2
Roumanie	0,09	18	0	0	3,2	0	0	3,6
Fed. de Russie.	3,431	136	57,5	131,8	131,8	21,6	40,7	40,7
Slovénie	0	0	0	1,2	1,2	0	2,8	5,5
Somalie	0	0	0	0	5	0	0	2,6
Tadjikistan	0	20	0	0	0	0	0	0
Tchéquie	0,4	110	0	0,5	0,5	0	0,1	0,1
Suède	0	0	0	0	4	0	0	6
Turquie	0	0	0	7,4	7,4	0	0	0

Pays	Production 2005	Production cumulée fin 2005	Ressources raisonnablement assurées fin 2004			Ressources présumées (EAR I) fin 2004		
			< 40 \$/kgU	< 80 \$/kgU	< 130 \$/kgU	< 40 \$/kgU	< 80 \$/kgU	< 130 \$/kgU
Ukraine	1,039	56	28	58,5	66,7	6,5	17,3	23,1
USA	1,219	423	?	102	342	0	0	0
Vietnam	0	0	?	?	1	?	0,8	5,4
Zaïre	0	23	0	0	0	0	0	0
Zimbabwe	0	0	?	1,4	1,4	0	0	0
Monde	41,952	2 347	1 947	2 643	3 297	799	1 161	1 446

Tableau A-1 : Production cumulée d'uranium à la fin de 2005, "ressources raisonnablement assurées" et "ressources présumées" d'uranium à la fin de 2004 [kt Uranium]. (NEA 2006) (BGR 1995, 1998, 2001, 2006)

Annexe 4: Extraction d'uranium et demande d'énergie pour l'extraction minière

Environ 10 % de l'uranium est extrait comme sous-produit de l'exploitation de l'or, du cuivre ou d'autres minéraux (par exemple en Afrique du Sud). Mais la plupart des réservoirs ne contiennent que de l'uranium. Dans ces mines, l'effort d'extraction augmente considérablement à mesure que la teneur en minerai diminue. Cela est dû à deux raisons :

1. Le débit de matières (et donc la demande d'énergie) est indirectement proportionnel à la teneur en minerai : pour extraire 1 kg d'uranium d'une matière contenant 1 % de minerai, il faut le traitement de 100 kg. Pour extraire la même quantité à partir d'un minerai à 0,01 %, il faut en traiter 10 000 kg.
2. La séparation du minerai d'uranium des déchets ne peut se faire qu'au prix de certaines pertes. Ces pertes sont négligeables si la teneur du minerai est élevée, mais si la teneur du minerai est faible, les pertes d'extraction fixent une limite inférieure à la qualité du minerai accessible.

Ces relations sont examinées en détail dans une publication de Storm van Leeuwen et Smith, 2005. Selon cette étude, la demande d'énergie pour l'extraction de l'uranium augmente selon la formule suivante :

$$\text{Demande en énergie} = E_0 / (\text{rendement} * G)$$

avec :

- 'E₀' la demande d'énergie à une teneur en minerai de 1%,
- 'rendement' la quantité d'uranium extraite,

- 'G' la teneur en minerai en pourcentage.

L'évaluation détaillée donne les résultats suivants pour l'augmentation de la demande d'énergie par rapport à la demande d'énergie pour une teneur en minerai de 1 %.

Teneur en minerai (G) [% U₃O₈]	Demande en énergie (théorique)	Rendement (theorique)	Rendement (empirique)
1%	E_0	0,98	0,98
0,10%	11 fois E_0	0,91	~0,9
0,05%	23 fois E_0	0,86	~0,85
0,03%	41 fois E_0	0,81	~0,75-0,8
0,015%	90 fois E_0	0,74	~0,5
0,010%	143 fois E_0	0,7	?? (probablement 0)

Le calcul complet – comprenant les besoins énergétiques couvrant l'ensemble du parcours du combustible avec les étapes “extraction du minerai”, traitement du yellowcake” et “transport jusqu'à la centrale électrique” – montre qu'en dessous d'une teneur en minerai de 0,02-0,01 %, le bilan énergétique net devient négatif. La limite supérieure s'applique aux minerais durs et la limite inférieure aux minerais tendres. Ces considérations permettent de conclure que la teneur du minerai fixe la limite inférieure des minerais d'uranium qui peuvent être considérés comme ressources possibles (cette limite ne s'applique pas aux sous-produits miniers). Il est très probable que la plupart des ressources pronostiquées et spéculatives non découvertes se rapportent à des teneurs en minerai inférieures à 0,02 %. Si c'est le cas, ces ressources ne seraient pas disponibles en tant que ressources énergétiques en raison de leur bilan énergétique minier négatif.

Une analyse plus récente du bilan énergétique du cycle de vie réalisée par l'Université de Sydney ne remet pas en cause l'approche de Storm/Smith mais en critique certains détails (ISA 2006). En conséquence, Il est irrecevable d'imaginer que la demande d'énergie augmente considérablement avec la baisse de la teneur en minerai, mais la limite finale à laquelle la teneur en minerai rend le bilan énergétique net négatif peut être différente. Leurs calculs sont basés sur une teneur en minerai de 0,015 % qui est la moyenne actuelle pour l'Australie. Sur la base de cette teneur en minerai et des technologies de pointe actuelles pour les réacteurs et les installations de traitement de l'uranium, l'intensité énergétique globale de l'énergie nucléaire peut être évaluée varier dans une fourchette de 0,16 à 0,4kWh th /kWh el. Cela représente 16-40 % lorsque l'électricité est considérée comme une énergie primaire, ou 6 à 16 % lorsque l'électricité est convertie en énergie primaire avec un rendement de 40%.

Annexe 5 : L'extraction d'uranium en France

L'extraction de l'uranium a commencé très tôt en France dans le cadre d'applications militaires et de production d'électricité. Le taux de production a progressivement augmenté jusqu'à la fin des années 1980 et a fortement diminué par la suite. La production a cessé en 2002. Entre 1956 et 2002, environ 76 kt d'uranium ont été extraites.

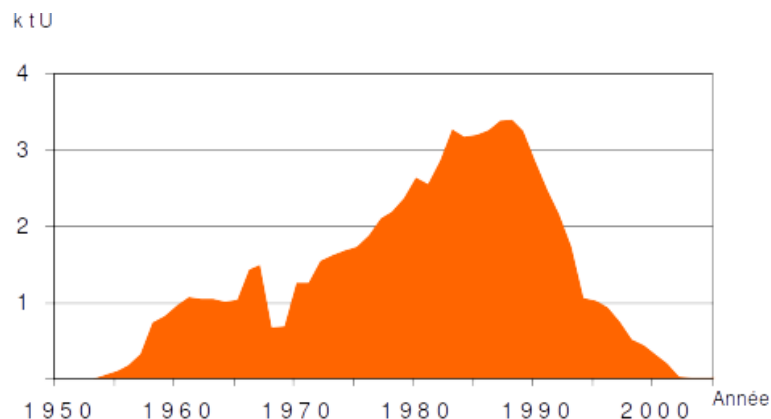


Figure A-3 : La production d'uranium en France

Selon les dernières statistiques de l'AEN, les “ressources présumées entre 80 et 130 \$/kgU” s'élèvent encore à environ 11 kt. Cela est conforme aux estimations des ressources jusqu'en 1970, à savoir des “ressources raisonnablement estimées et présumées” d'environ 70 kt, alors qu'environ 10 kt ont déjà été consommées (voir la figure suivante). La barre rouge indique les “ressources raisonnablement assurées inférieures à 80 \$/kgU” et la barre bleue évalue les “ressources supplémentaires ou présumées inférieures à 80 \$/kgU” qui, au cours de ces premières années, coïncidaient avec les “ressources jusqu'à 130 \$/kgU”. Au cours des années suivantes, les ressources déclarées sont restées aussi élevées ou ont été augmentées jusqu'à 82 kt à la fin de 1985 (et même jusqu'à 112 kt si l'on inclut les “ressources allant jusqu'à 130 \$/kgU”). A cette époque, 50 kt avaient déjà été produites.

Au cours des années suivantes, les ressources “raisonnablement assurées” et “estimées” ont été successivement revues à la baisse, avec une chute brutale de 67 kt à 28 kt en 1991 et une deuxième forte baisse de 13 kt à 0,19 kt en 2001. À l'heure actuelle, les ressources “raisonnablement assurées” et “présumées” inférieures à 80 \$/kgU sont nulles. Il est intéressant de noter que les estimations des ressources ont augmenté tant que la production était en hausse, mais qu'elles ont été suivies d'une forte baisse dès que la production a atteint son maximum et a commencé à décliner.

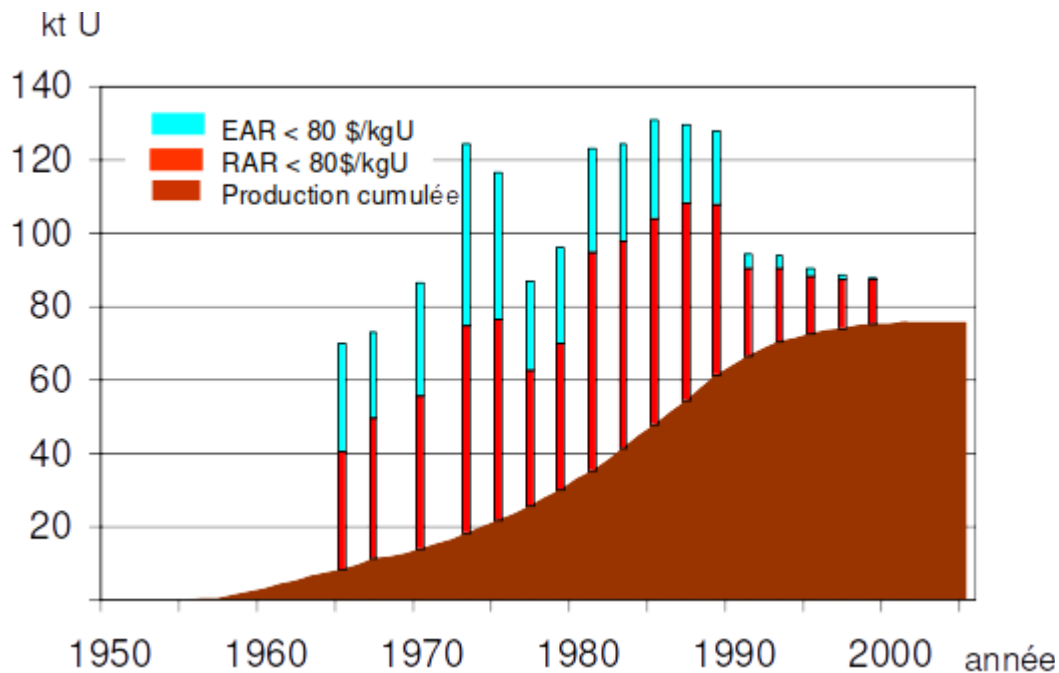


Figure A-4 : Production cumulée d'uranium et qualité des ressources en France

Annexe 6 : L'extraction d'uranium aux USA

L'histoire de la production d'uranium aux États-Unis fournit un exemple frappant de “ressources raisonnablement estimées et assurées” faussement déclarées.

La production commerciale d'uranium aux États-Unis a débuté en 1947 et a connu une croissance rapide pour atteindre 15 kt/an en 1960. La production maximale, proche de 20 kt, a été atteinte en 1980 et a été suivie d'une forte baisse. À l'heure actuelle, la production s'élève à environ 1,2 kt, soit près de 18 fois moins que le pic de production (voir la figure suivante). À la fin de 2005, environ 420 kt avaient déjà été produit. Le rapport actuel de l'AEN fait toujours état de “réserves raisonnablement assurées inférieures à 80 \$/kgU” de 102 kt et de 240 kt supplémentaires “entre 80 et 130 \$/kgU”. Les “ressources présumées” sont nulles, mais les “ressources pronostiquées non découvertes inférieures à 80 \$/kgU” s'élèvent à 839 kt et les “ressources inférieures à 130 \$/kgU” à 1 273 kt, auxquelles s'ajoutent les “ressources spéculatives non découvertes” de 1 340 kt.

(quelle que soit la différence entre “ressources pronostiquées non découvertes” et “ressources spéculatives non découvertes”).

USA – Production d'uranium

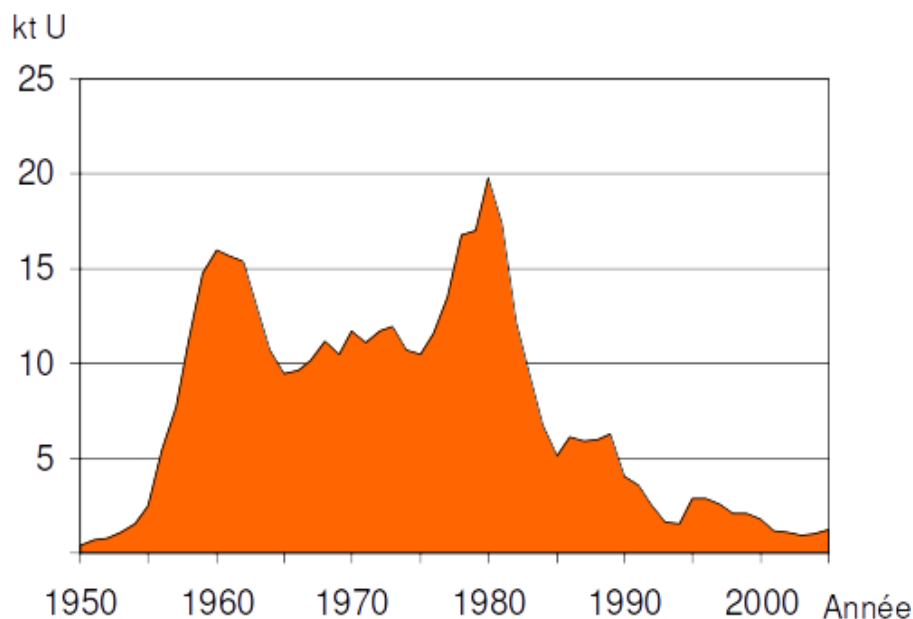


Figure A-5 : La production d'uranium aux USA

L'analyse des rapports sur les ressources historiques révèle des modèles similaires à ceux montrés auparavant pour la France (voir la figure suivante).

En 1977, les “ressources raisonnablement assurées et estimées supplémentaires inférieures à 80 \$/kgU” s'élevaient à 1 361 kt, alors que 200 kt avaient déjà été produites à l'époque. En étendant la classe de coût d'extraction à 130 \$/kgU, les ressources déclarées s'élevaient à 1 800 kt. En 1983, les “ressources raisonnablement assurées et présumées” ont été rétrogradées de 85 %, soit une baisse de près de 1 000 kt. Cela s'est produit à un moment où les dépenses d'exploration atteignaient leur niveau le plus élevé. Cette baisse de 1 000 kt des ressources en uranium des États-Unis est à l'origine du déclin des “ressources raisonnablement assurées et présumées” au niveau mondial à cette époque (voir le texte et la figure ci-dessus). À l'heure actuelle, les “ressources raisonnablement assurées inférieures à 80 \$/kgU” s'élèvent encore à 100 kt, alors que dans le même temps, la production a fortement diminué.

Bien que les raisons de la baisse de la production aux États-Unis puissent être multiples, cette forte corrélation entre la baisse de la production et la dégradation des ressources est pour le moins intéressante.

USA – Production cumulée d'uranium aux États-Unis et estimation des ressources

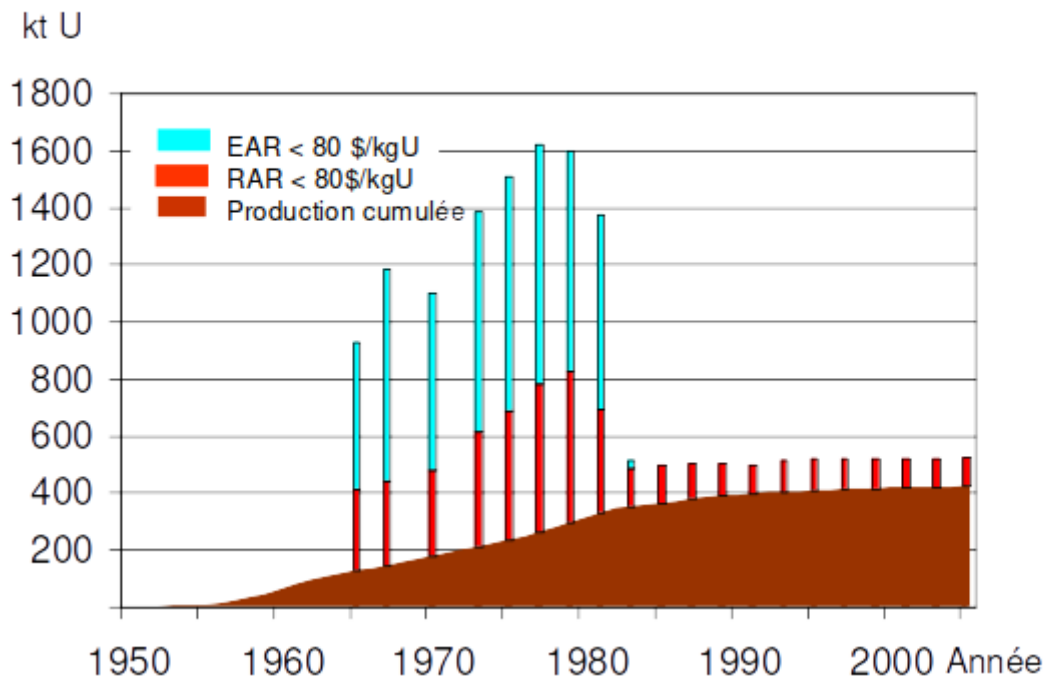


Figure A-6 : Production cumulée d'uranium aux États-Unis et estimation des ressources

Il est donc possible que la production ait diminué en raison d'un manque de ressources. Au-delà de ce constat, une baisse des “ressources raisonnablement assurées” est difficilement compréhensible - c'est dire qu'en fait les ressources annoncées précédemment n'étaient finalement pas “raisonnablement assurées”. Une ressource connue découverte a été convertie en une ressource inconnue non découverte : ceci implique que la pratique de signalement des ressources connues est très discutable et peu fiable. Une baisse de 1 000 kt est une quantité pertinente qui réduit le rapport R/P statique (à 50 kt production) de 20 ans.

Annexe 7: Projets d'extraction d'uranium (prévus ou en construction)

Le tableau suivant est basé sur un rapport du NEA (NEA 2006)

Année	Pays	Mine	Capacité projetée
2005	Iran	Bandar Abbas	0,021 kt/an
	Russie	Khiagda	1 kt/an
	Total		1,021 kt/an
2006	Inde	Banduhuran	0,15 kt/an
		Lambapur	0,13 kt/AN
	Namibie	Langer Heinrich	1 kt/an
	Niger	Ebba	2 kt/an
	Kazakhstan	JV KATCO – Tortkuduk	1 kt/an
	Total		4,28 kt/an
2007	Brésil	Itataia	0,68 kt/an
	Canada	Cigar Lake	6,9 kt/an
	Iran	Ardakan	0,05 kt/an
	Kazakhstan	JV Kendala – Central Mynkuduk	2 kt/an
	Total		9,63 kt/an
2008	Kazakhstan	LLP Stepnogorskiy Mining – Semizbai	0,4 kt/an
		LLP Kyzylkum – Kharasan-1	1 kt/an
		Southern Inkai	1 kt/an
		Irkol	0,75 kt/an
		JV Karatau – Budenovskoye 2	??
	Total		3,15 kt/an
2010	Canada	Midwest	2,3 kt/an
??	Australie	Honeymoon	0,34 kt/an

Tableau 2 : Projet de mines d'uranium

Annexe 8: Le développement de Cigar Lake au Canada

Le gisement de Cigar Lake a été découvert en 1981. Le développement de la mine d'essai a commencé en 1987 et s'est achevé en 2000. Une déclaration d'impact sur l'environnement a été déposée auprès des autorités réglementaires compétentes en 1995. Après une évaluation environnementale approfondie, les gouvernements fédéral et provincial ont accepté, en avril 1998, les recommandations d'une commission d'examen conjoint et ont autorisé le projet à passer à l'étape de l'autorisation réglementaire. En 2003, une nouvelle évaluation environnementale préalable a été exigée par la réglementation avant que les licences de construction et d'exploitation puissent être délivrées. En février 2004, le rapport de l'étude d'évaluation environnementale a été déposé et en juillet 2004, a été accepté par l'autorité de réglementation (CCSN), ce qui a permis au projet de passer à l'étape de l'autorisation de construction (citations de CAMECO 2004).

L'autorisation de commencer la construction de Cigar Lake a été donnée en décembre 2004. À ce moment-là, la construction devait commencer au début de 2005 et la production devait démarrer après 27 mois de construction, au début de 2007. Selon les plans, une période de montée en puissance de trois ans devait suivre avant que la mine n'atteigne sa pleine production.

La mine de Cigar Lake consiste en un gisement de minerai situé à environ 450 m sous la surface, entre le socle rocheux et le grès saturé d'eau qui le recouvre. Cette situation rend l'extraction difficile et nécessite le gel du sol pour permettre une exploitation sûre. En avril 2006, une première infiltration d'eau s'est produite. Les réparations de cet accident devraient retarder les travaux de six mois et augmenter les coûts de 10 à 20 %. Le 23 octobre 2006, Cameco a signalé une deuxième infiltration d'eau à Cigar Lake à la suite d'un éboulement dans une future zone de production qui était auparavant sèche. Ce deuxième afflux d'eau plus important entraînera un retard substantiel d'au moins un an. Un plan d'assainissement est toujours en cours d'élaboration et il existe actuellement un certain nombre d'inconnues, telles que les modifications (le cas échéant) du plan de développement et/ou d'exploitation minière, les calendriers de production et les dépenses d'investissement supplémentaires. Selon le dernier rapport trimestriel, le propriétaire de la mine, Cameco, sera mieux à même d'évaluer si les réserves de Cigar Lake doivent être reclassées de prouvées à probables après clarification de ces incertitudes.

Cet exemple montre que le processus de mise en production de nouvelles mines nécessite de longs délais et n'est en aucun cas simple. Les retards dus à des problèmes techniques et à des dépassements de coûts sont fréquents.

Source : Rapports de l'entreprise et communiqués de presse de Cameco (www.cameco.com)

Annexe 9 : Évaluation pays par pays des profils de production future sur la base de la restriction des ressources (d'après NEA 2006)

Si toutes les « Ressources Raisonnablement Assurées < 40 \$/kg U » sont productibles, cela correspond aux « Réserves Prouvées ».

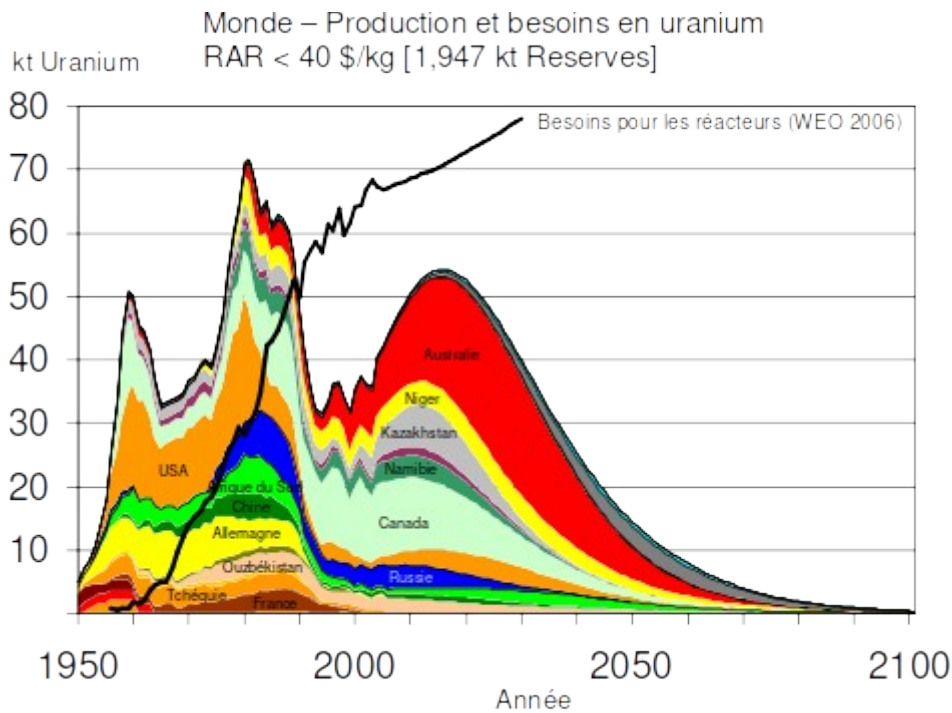


Figure A-7 : Profil de la production future d'uranium

Figure A-8: Profil de production future

Si toutes les « Ressources Raisonnablement Assurées < 130 \$/kg U » sont productibles, cela correspond approximativement aux « Réserves Probables ».

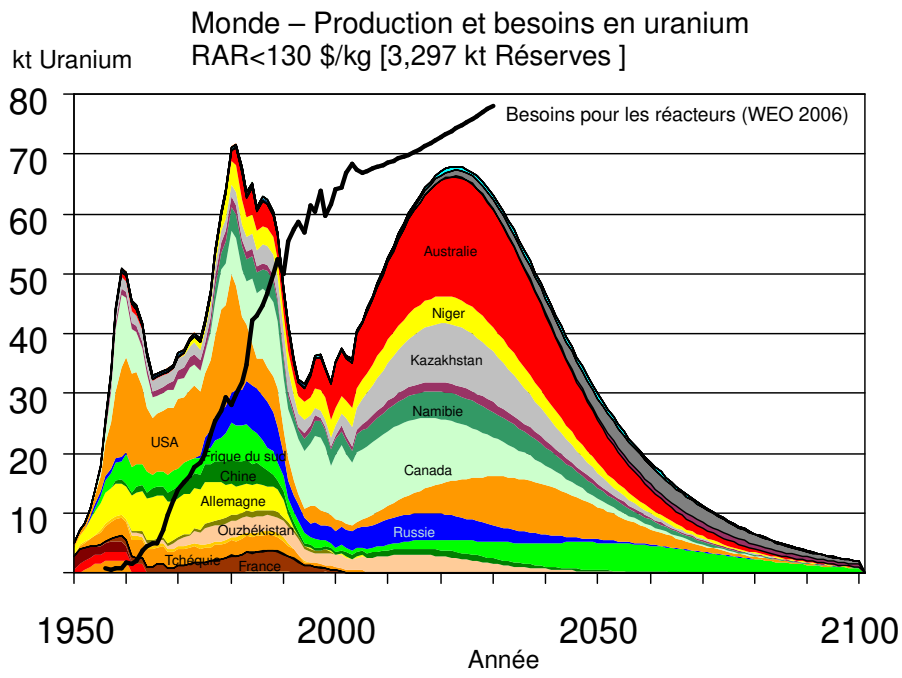


Figure A-8 : Profil de production future

Si toutes les “ressources raisonnablement assurées” et les “ressources présumées < 130 \$/kg U” sont exploitables, cela correspond à peu près aux “réserves possibles”.

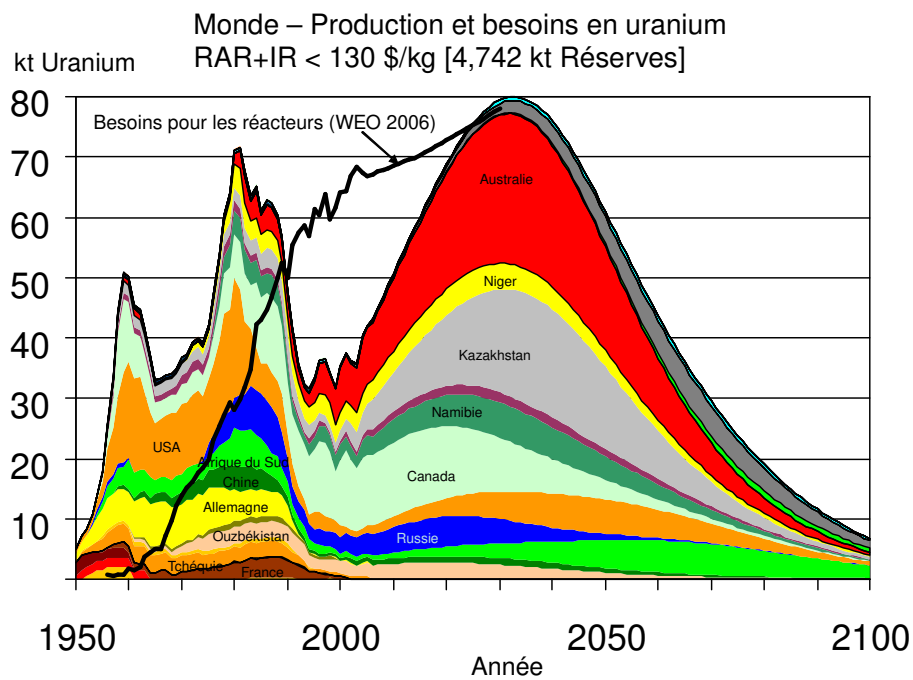


Figure A-9 : Profil de production future

Annexe 10 : Centrales nucléaires en construction

Pays	Nom	Capacité nette	Début de construction	Début espéré des opérations
Argentine	Atucha-2	692	1981	?
Bulgarie	Belene-1	953	1987	?
	Belene-2	953	1987	?
Chine	Lingao 3	1000	2005	2010
	Lingao 4	1000	2006	2010
	Qinshan 2-3	610	2006	2010
	Tianwan-2	1000	2000	2006
Finlande	Olkiluoto-3 (EPR)	1600	2005	2009
Inde	Kaiga-3	202	2002	2007
	Kaiga-4	202	2002	2007
	Kudankulam-1	917	2002	2007
	Rajasthan-5	202	2002	2007
	Rajasthan-6	202	2003	2008
	Kudankulam-2	917	2002	2008
	PFBR	470	2004	2010
Iran	Bushehr-1	915	1975	2006
Japon	Tomari-3	866	2004	2009
Corée	Shin-Kori-1	960	2006	2010
Pakistan	Chasnupp 2	300	2005	2011
Roumanie	Cernavoda-2	655	1983	2007
Russie	Volodonsk-2	950	1983	?
	Kursk-5	950	1985	?
	Kalinin-4	950	1986	?
	Balakovo-5	950	1987	?
Taiwan	Lungmen-1	1350	1999	2010
	Lungmen-2	1350	1999	2010
Ukraine	Khmelnitski-3	950	1986	?
	Khmelnitski-4	950	1987	?
Monde	Tous reacteurs	16893		?
	Seuls ceux programmés	13703		d'ici 2011

Tableau A-3 : Centrales nucléaires en construction (État d'avancement Octobre 2006, Source : PRIS)

Pays	Nom	Capacité nette	Début programmé	Fermeture probable
Bulgarie	Kozloduy 3	408	1973	2006
	Kozloduy 4	408	1973	2006
France	Phenix	233	1974	2009
Allemagne	Biblis A	1,167	1974	2008
	Neckarwestheim	785	1976	2008
	Biblis B	1,240	1976	2009
	Brunsbüttel	771	1976	2009
Lithuania	Ignalina 2	1,185	1987	2009
Slovaquie	Bohunice 1	408	1978	2006
	Bohunice 2	408	1980	2008
Royaume-Uni	Dungeness A1	225	1960	2006
	Dungeness A2	225	1960	2006
	Sizewell A1	210	1961	2006
	Sizewell A2	210	1961	2006
	Oldbury A1	230	1962	2008
	Oldbury A2	230	1962	2008
	Wylfa 1	490	1963	2009
	Wylfa 2	490	1963	2009
Monde		9,323		2009

Tableau A-4 : Anticipated worldwide reactor closures before 2010 (Source IEA, according to US-EIA 2006)

Annexe 11 : Calendrier des nouveaux réacteurs EPR en Finlande et en France

Les exemples suivants illustrent les longs délais entre les premières applications et la mise en service du réacteur :

Exemple de la Finlande : (Source : L'énergie nucléaire en Finlande, document d'information de l'UIC n° 76, septembre 2005 (www.uic.au/nip76.htm) et Areva (www.areva-np.com))

- Novembre 2000 : Demande de permis de la compagnie d'électricité finlandaise TVO.
- Mai 2002 : Le parlement finlandais approuve par 107 voix contre 92 la construction d'une cinquième centrale nucléaire, dont la mise en service est prévue vers 2009.
- Janvier 2003 : Approbation par le gouvernement.
- Mars 2003 : Trois fournisseurs soumettent des offres pour quatre projets.
- Octobre 2003 : Le choix du site de la nouvelle unité s'est porté sur l'usine existante d'Olkiluoto. Le même mois, TVO indique que le projet de réacteur à eau pressurisée de Framatome ANP, d'une puissance de 1 600 MW, a été retenu.
- Décembre 2003 : TVO signe des contrats avec Areva et Siemens pour la construction d'une unité EPR de 1.600 MWe à partir du 1er janvier 2004. En janvier 2004, le permis de construire a été demandé et accordé en janvier 2005. La construction a commencé à la mi-2005 et l'exploitation commerciale du réacteur était prévue pour 2009.
- En avril 2006, il a été signalé que la construction du réacteur avait déjà pris 9 mois de retard. L'exploitation commerciale du réacteur est désormais prévue pour 2010 (Source : AFX Paris, Finanznachrichten, 24.4.2006, voir <http://www.finanznachrichten.de/nachrichten-2006-04/artikel-6320902.asp>).
- 2009 : Début d'exploitation prévu.

Exemple de la France:

- Le 21 octobre 2004, le choix du site de l'EPR s'est porté sur Flamanville.
- 2005 – 2006: ProcÉdures administratives .
- 2007 : Démarrage prévu de la construction.
- 2012: Démarrage programmé de l'opération.

Le délai entre la première demande de permis de la compagnie d'électricité et la mise en service prévue de la nouvelle centrale sera d'au moins 9 à 10 ans en Finlande.

Le réacteur français est prévu au moins depuis 2004. Il faudra donc attendre au moins 8 ans avant que l'exploitation puisse commencer.

DOCUMENTATION

AFX 2006

La construction du réacteur d'Areva en Finlande a pris 9 mois de retard, AFX news, 24 avril 2006, www.finanznachrichten.de

AREVA 2006 L'EPR finlandais Olkuoto 3, premier réacteur de troisième génération en cours de construction dans le monde

BGR 1995

Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 1995, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1995

BGR 1998

Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 1998, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1998

BGR 2002

Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2002, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2003

BGR 2006

Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2005, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover (www.bgr.de)

Breuer 2006 Th. Breuer, Reichweite der Uranvorräte der Welt, Greenpeace, Hamburg 2006

Cameco: Les communiqués de presse suivants servent de base à la description de Cigar Lake :

21 décembre 2004 : Cameco poursuit la construction de la mine de Cigar Lake

6 avril 2006 : Cameco annonce un retard dans la construction de la mine de Cigar Lake

Mai 2006 : Opérations d'uranium

27 octobre : Cameco annonce un revers à Cigar Lake

31 octobre 2006 : Cameco déclare des revenus d'exploitation pour le troisième trimestre

EFN 2004

Le premier EPR français sera construit à Flamanville (Normandie), Lettre d'information de l'AEPN l'AEPN, 21 octobre 2004

EIA 2006

Quand les réacteurs commerciaux s'arrêtent-ils définitivement ? Le bilan récent, (www.eia.doe.gov, état au 5 octobre 2006)

EIA 2006

Uranium overview 1949 – 2005, at www.eia.doe.gov (status of October 2006)

Friends of the Earth 2006

France and Finland must release all info about safety of planned nuclear reactor – leaked confidential report reveals vulnerability of EPR reactor, Press release of 18 May 2006, see at www.foeeurope.org

Greenpeace 2006

Reichweite der Uran-Vorräte der Welt, Autor Peter Diehl, Greenpeace, Hamburg, May 2006

AIEA

nuclear power reactors in the world, reference data series No. 2, International Atomic Energy Agency, Vienna, May 2006.

AIEA

Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030, reference data series No. 1, International Atomic Energy Agency, Vienna, July 2006

ISA 2006

Life-Cycle Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Energy in Australia, The University of Sidney, 3rd November 2006

NEA/IAEA 2005

Uranium 2005: Resources, Production and Demand, Nuclear Energy Agency, IAEA , OECD, Paris 2005

NEA/IAEA 2006

Forty Years of Uranium Resources, Production and Demand in Perspective, Nuclear Energy Agency, IAEA , OECD, Paris 2006

Nuclear Energy in Finland, UIC briefing paper#76, September 2005 (www.uic.au/nip76.htm) and Areva (www.areva-np.com)

PRIS

database of nuclear power plants, see at www.iaea.org

Storm van Leeuwen, Smith, 2005 J. Willem Storm van Leeuwen, Ph. Smith, Nuclear

Power - the energy balance, 2005 (www.stormsmith.nl)

UIC 2006

World wide review of the status of nuclear power and uranium industry, see at
www.uic.com.au (status of October 2006)

Wise 2006

P. Diehl, World Information Service on Energy Uranium Projects,
Decommissioning data of uranium mines (status 16 june 2003), see at
www.wise-uranium.org

Wise 2006

P. Diehl, World Information Service on Energy Uranium Projects, Uranium
mining ownership (status 6 October 2006), see at www.wise-uranium.org

Remerciements

Les auteurs remercient Peter Diehl pour sa lecture critique du manuscrit et ses commentaires utiles.