

Ressources mondiales d'uranium : quelle disponibilité à long terme ?

Antoine Monnet, Sophie Gabriel, Jacques Percebois

Connaître les ressources d'uranium naturel est une question de premier ordre pour le devenir de l'énergie nucléaire, en termes de compétitivité, mais aussi de durabilité. Les réacteurs nucléaires à eau légère (REL) actuels bénéficient d'un avantage compétitif important face aux autres modes centralisés de production d'électricité : leur combustible représente une faible part de leur coût global. À l'avenir, si les ressources d'uranium se raréfient et que leur prix augmente fortement, cet avantage peut être perdu et remettre en cause la compétitivité du nucléaire par rapport aux autres modes centralisés de production d'électricité ou encore par rapport à une technologie nucléaire plus sobre en uranium naturel. L'étude des conditions de disponibilité de l'uranium au ^{xxi} siècle a fait l'objet d'un travail de recherche de 3 ans [16] qui est synthétisé dans cet article.

Pour notre analyse, le recueil, l'analyse et le tri d'un très grand nombre d'informations issues de la littérature ouverte ont permis de définir les données d'entrée ainsi que les contraintes dynamiques d'un marché long terme de l'uranium (§ 1). Un modèle d'estimation des « **ressources ultimes** » d'uranium a tout d'abord été développé. Ce modèle permet de quantifier à l'échelle régionale et mondiale les ressources d'uranium techniquement accessibles et d'estimer leurs coûts de production associés. Dans un second temps, afin de pouvoir élaborer un modèle de marché, les **contraintes dynamiques** qui influencent le marché de l'uranium à long terme ont été identifiées. Ces contraintes portent soit sur l'exploration, soit sur la production. L'analyse de l'activité annuelle d'exploration et des coûts de découvertes associés ont permis d'introduire deux relations déterminantes utilisées par la suite dans le modèle de marché développé. Par ailleurs, deux utilisations

originales du ratio R/P (ratio entre les réserves et la production) sont aussi introduites pour modéliser des contraintes liées à l'anticipation de la demande et à la sécurité d'approvisionnement. L'étude de l'adéquation offre-demande dans le temps a alors permis de construire un modèle de marché de l'uranium en considérant que la dynamique de long terme est une succession d'équilibres de court terme (annuels) (§ 2). Il s'agit d'un modèle économique déterministe à équilibre partiel car ne prenant en compte que le marché de l'uranium. Ce modèle de marché a finalement été utilisé pour effectuer des simulations prospectives en s'appuyant sur des scénarios de demande exogènes (§ 3).

1. Données nécessaires à la modélisation du marché de l'uranium

1.1 Scénarios de consommation mondiale d'uranium

La modélisation de scénarios de demande n'a pas été faite en propre pour notre analyse car trop d'hypothèses sont sous-jacentes et nous avons privilégié une approche bibliographique [14]. Deux scénarios de demande ont ainsi été choisis afin de représenter soit une forte demande mondiale nucléaire, 5 400 GWe de capacité installée en 2100 – et donc forte demande d'uranium naturel : 810 ktU/an, **scénario A3**, soit une demande modérée, 2 100 GWe en 2100 et 340 ktU/an, **scénario C2** (Figure 1). Aucun scénario de faible croissance ou de décroissance du parc nucléaire mondial n'a été retenu car leur intérêt est limité puisque la disponibilité des ressources d'uranium n'est pas une contrainte pour ces scénarios.

1.2 Estimation des ressources ultimes

On recense dans la littérature plusieurs modèles statistiques bivariés et multivariés pour estimer l'abondance et les coûts de production associés d'un métal non-ferreux comme

l'uranium. Notre méthodologie inspirée des travaux de Harris [6], [10–12] et Drew [9], permet une estimation des ressources ultimes d'uranium en s'appuyant sur une distribution log-normale de la teneur et du tonnage des gisements, sur l'utilisation d'un filtre économique et sur des fonctions de coûts tenant compte des économies d'échelle et du type d'exploitation minière envisagé. En calibrant différemment ces distributions et ces fonctions de coût, notre modèle prend en compte au mieux les données disponibles, les spécificités économiques et géologiques régionales [17].

Le découpage régional utilisé pour l'estimation des ressources ultimes introduit six sous-ensembles : les **États-Unis**, le **Canada**, l'**Afrique**, l'**Australie**, le **Kazakhstan** et le **reste du monde**. Le choix de ces régions prend en compte les critères suivants :

- La représentativité des régions : les cinq premiers sous-ensembles considérés comptent pour près de 85 % de la production mondiale et près de 80 % des ressources raisonnablement assurées à moins de 130 \$/kgU en 2013 [19].
- La disponibilité des données sur les gisements connus et sur les projets miniers récents.

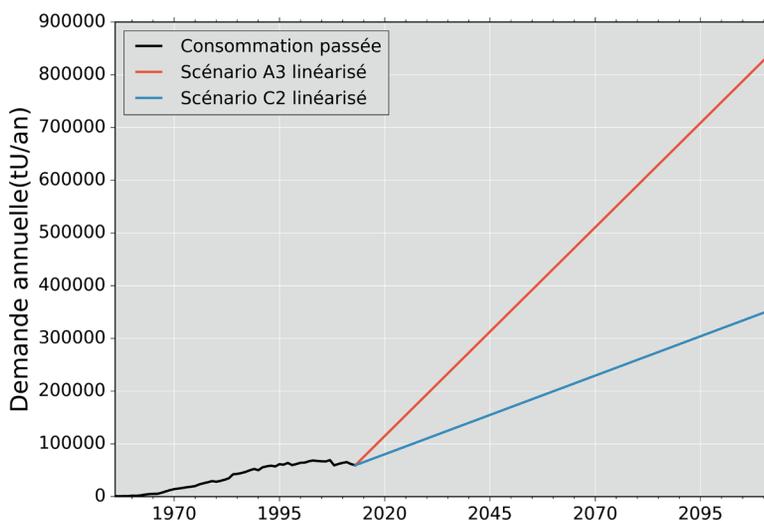


Figure 1. Scénarios de consommation mondiale d'uranium [1]

Région	Modèle MUR (MtU)			Livre Rouge 2013 (RAR+IR+PR+SR) (MtU)			Livre Rouge 2013 (RAR+IR) (MtU)		
	< 80 \$/kgU	< 130 \$/kgU	< 260 \$/kgU	< 80 \$/kgU	< 130 \$/kgU	< 260 \$/kgU	< 80 \$/kgU	< 130 \$/kgU	< 260 \$/kgU
États-Unis ^a	0,37	0,97	3,56	0,88	2,34	2,60	0,039	0,21	0,47
Canada	0,91	1,53	2,75	0,47	1,34	1,50	0,42	0,49	0,65
Afrique	4,61	10,49	31,22	0,28	1,53	1,91	0,24	1,38	1,60
Australie ^a	3,59	7,25	18,72	NA	NA	NA	1,35	1,66	1,74
Kazakhstan	3,53	5,71	11,09	0,73	1,35	1,58	0,52	0,68	0,88
Reste du monde	0,76	1,64	4,70	1,10	3,63	5,07	0,74	1,44	2,23
Total	13,8	27,6	72,0	2,62	9,77	12,23	1,96	5,90	7,64

a : données du Livre Rouge 2011 (données 2013 incomplètes)

Tableau 1. Synthèse des estimations régionales des ressources ultimes

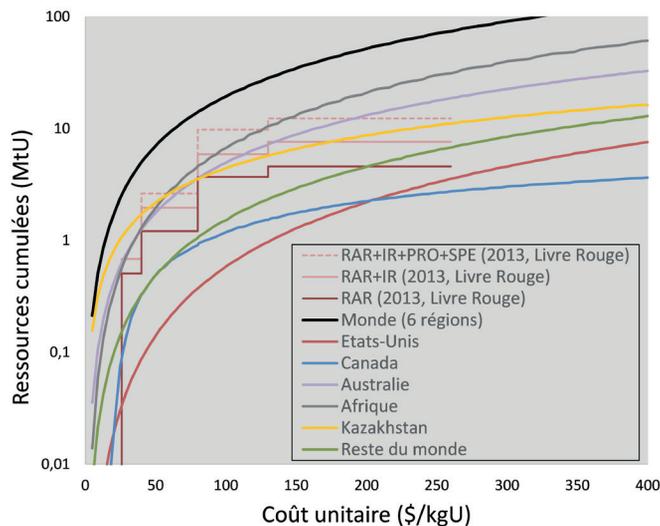


Figure 2. Synthèse des estimations régionales des ressources ultimes

- Un minimum de variabilité dans les types de gisements rencontrés et une certaine homogénéité des réglementations minières au sein des régions ce qui assure une cohérence relative lors de l'estimation des coûts des ressources ultimes.

L'application de notre modèle, nommé **MUR** pour **Modèle Uranium Régional**, a donné les estimations des ressources ultimes

synthétisées dans le Tableau 1 et sur la Figure 2. Les résultats obtenus dans chaque région sont mis en parallèle des estimations de l'AEN-AIEA publiées dans le « Livre Rouge » [19]. Cette comparaison a des limites qu'il faut garder à l'esprit : les ressources identifiées (ressources raisonnablement assurées et ressources inférées (RAR+IR)) du Livre Rouge n'incluent par définition aucune ressources non découvertes ou déjà exploitées alors qu'elles font partie

de notre estimation des ressources ultimes. De plus, l'édition 2013 du Livre Rouge agrège les données de 52 pays, ce qui ne représente que 75 % de la superficie du monde entier. Enfin, la méthodologie qui a permis d'obtenir les ressources pronostiquées et spéculatives du Livre Rouge (PR+SR) n'est pas connue et peut potentiellement varier d'un pays à l'autre.

Il est important de rappeler que le modèle développé considère uniquement les ressources de la croûte terrestre continentale et que l'uranium est considéré comme un produit primaire, c'est-à-dire qu'il supporte à lui seul l'ensemble des coûts d'investissement et de production liés à l'extraction du minerai. Ainsi, les ressources d'uranium dissous dans l'eau de mer ne sont pas prises en compte.

Comme dans toute étude statistique, la représentativité de la population étudiée (des gîtes ou des gisements dans notre cas) est déterminante pour la validité des résultats. Dans la mesure du possible, les données atypiques ou aberrantes ont été écartées, mais faute de données suffisantes à ce jour, il n'a pas été possible de quantifier l'influence du nombre de données disponibles (économiques ou géologiques). Par ailleurs, l'analyse de sensibilité réalisée montre que des incertitudes significatives pèsent sur l'estimation des ressources ultimes. Parmi les paramètres les plus sensibles, on retient notamment : le taux d'actualisation, la profondeur de la croûte terrestre prise en compte ou le prix de l'uranium représentatif des conditions économiques actuelles.

Pour la suite de l'étude, afin de prendre en compte l'ensemble de ces incertitudes, nous retenons deux estimations des ressources ultimes mondiales à moins de 260 \$/kgU : l'une à **72 MtU** (Tableau 1) et l'autre, plus faible, à **36 MtU**.

1.3 Contraintes dynamiques sur l'offre d'uranium

L'analyse de l'activité d'exploration et des coûts de découvertes associés permet d'introduire deux relations déterminantes utilisées par la suite dans le modèle de marché développé.

- Comme bon nombre de matières premières minérales, l'uranium présente une corrélation évidente entre son prix spot et les dépenses d'exploration. Les augmentations de prix ont systématiquement été suivies d'augmentations des dépenses d'exploration et inversement, les baisses de prix ont entraîné des baisses de dépenses d'exploration. La première relation considérée est donc liée **au prix de marché et aux dépenses d'exploration**.

- Intuitivement, à mesure qu'on explore un territoire, on s'attend à rencontrer une difficulté croissante pour identifier de nouvelles ressources et donc à voir le coût de découverte augmenter. La seconde relation est ainsi liée au **« coût de découverte » et aux dépenses d'exploration cumulées**.

L'analyse des données passées permet d'explicitier ces deux relations [17].

Par ailleurs, deux utilisations originales du ratio R/P (ratio entre les réserves et la production) sont aussi introduites pour modéliser des contraintes liées à l'anticipation de la demande et à la sécurité d'approvisionnement. À l'échelle mondiale, R/P est un indicateur global simple de rareté, qui peut représenter une contrainte liée à l'anticipation de la demande mondiale. Tandis qu'à l'échelle régionale, ce ratio peut s'interpréter davantage comme le résultat des contraintes techniques, budgétaires et financières d'un producteur ou la stratégie d'une région [17].

2. Modélisations du marché de l'uranium

Sur la base des contraintes d'offre présentées précédemment qui peuvent être de court terme (comme le lien de causalité entre le prix et les dépenses d'exploration) ou de plus long terme (comme l'anticipation de la demande), nous proposons d'étudier la disponibilité de l'uranium à long terme grâce à une succession d'équilibres économiques de court ou moyen terme.

Le modèle proposé est un modèle économique en équilibre partiel, c'est-à-dire restreint à un seul marché car il ne prend pas en

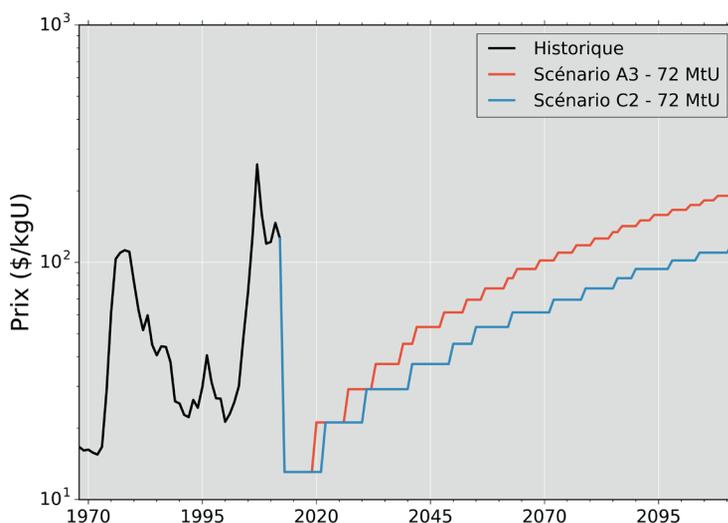


Figure 3. M1 : Évolutions du prix (A3 et C2 72 MtU)

compte des forces extérieures au marché de l'uranium telles les marchés d'autres commodités, dans d'autres secteurs de l'économie (cf. inflation, taux d'actualisation et autres facteurs macro-économiques), voire dans le contexte non économique.

Pour introduire ce modèle de façon progressive, nous présentons 3 mécanismes de marché distincts, en y intégrant progressivement ces contraintes :

- M1 : modèle de concurrence parfaite n'intégrant aucune contrainte dynamique s'appliquant à l'offre (§ 2.1) ;
- M2 : modèle intégrant des contraintes d'exploration permettant de faire émerger des équilibres économiques de court ou moyen terme (§ 2.2) ;
- M3 : modèle intégrant des contraintes dynamiques permettant d'étudier l'équilibre offre-demande à long terme à partir d'une succession d'équilibres de court et moyen terme (§ 2.3).

Le modèle M3 le plus complet, qui nous paraît le plus pertinent, fait l'objet d'une analyse de sensibilité pour mesurer l'influence de chaque paramètre. Les trois mécanismes sont ensuite comparés (§ 2.4).

2.1 M1 : Concurrence parfaite sans contrainte

Le premier mécanisme (M1) n'intègre aucune contrainte. Toutes les ressources ultimes sont supposées identifiées et entièrement disponibles dès l'instant initial (absence de contrainte sur les capacités de production). Ce mécanisme ne considère aucune rente minière et les acteurs du marché ne sont pas modélisés individuellement.

Le mécanisme M1 correspond à une concurrence parfaite sans contrainte. Le nombre de producteurs est indéterminé, mais supposé grand pour assurer les conditions de concurrence. La courbe d'offre initiale $COC(t_0)$ est mondiale (somme des courbes d'offre régionales) et toutes ces ressources sont supposées connues des producteurs. Dans ce cas de figure, les profits des producteurs tendent vers zéro et la production se fait par coût croissant. Chaque année, le prix s'établit au coût marginal de production (coût de la catégorie la plus chère de $COC(t_0)$ sollicitée pour répondre à la demande). Pour un scénario de demande donné, le prix à l'année t est obtenu en reportant simplement la demande cumulée entre t_0 et t , $\sum_{t_0}^t D(t)$, sur la courbe $COC(t_0)$. La Figure 3 présente l'évolution de prix

ainsi obtenue pour les scénarios de demande A3 et C2.

Quel que soit le scénario de demande croissante, ce modèle de marché prévoit une augmentation progressive et lente du prix de l'uranium au xx^e siècle.

Ce modèle est néanmoins peu réaliste puisque les ressources ultimes restantes sont supposées identifiées dès l'instant initial, c'est-à-dire que tout se passe comme si le budget d'exploration était illimité alors que celui-ci est réparti dans le temps et corrélé au prix au niveau mondial. Dans la pratique, le budget d'exploration est aussi limité par les fonds propres des producteurs. L'autofinancement de l'exploration est d'autant plus important que dans une situation de concurrence forte entre producteurs, le faible niveau de profits limite les profits et donc la trésorerie disponible pour explorer. Il est aussi plus difficile de recourir à des fonds privés puisque les dividendes attendus sont aussi limités que les profits. Les contraintes liées à l'activité d'exploration sont ainsi particulièrement importantes pour modéliser un marché concurrentiel. Le mécanisme M1 peut donc être amélioré en ne négligeant plus des contraintes dynamiques fortes comme le financement de l'exploration ou l'augmentation des coûts de prospection.

2.2 M2 : Concurrence parfaite avec contraintes d'exploration

Le deuxième mécanisme (M2) est identique au premier à la seule différence que l'activité d'exploration est endogène. Les ressources initiales connues sont limitées aux ressources identifiées publiées par l'AEN-AIEA dans le Livre Rouge [19]. Les ressources identifiées restent entièrement disponibles sans contrainte de capacité de production. Les contraintes de financement de l'exploration fixent les ressources découvertes chaque année, mais aucune contrainte d'anticipation de la demande n'est appliquée. La production (respectivement les découvertes) se fait toujours par coût croissant parmi les ressources connues (respectivement restant à découvrir). On évalue ainsi l'influence sur le prix des contraintes d'exploration dans le cas d'un marché concurrentiel. Les scénarios de demande A3 et C2 sont comparés sur la Figure 4.

La simulation avec le scénario C2 conduit à une augmentation progressive des prix pour atteindre vers 2100 des prix similaires à ceux du mécanisme M1 : 130 \$/kgU. Il semble donc qu'introduire la contrainte de financement de l'exploration affecte peu l'évolution du prix :

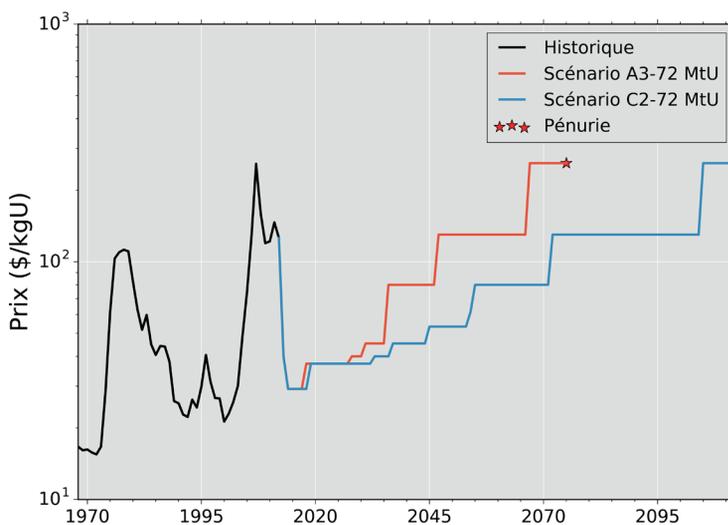


Figure 4. M2 : Évolutions du prix (A3 et C2 72 MtU)

le prix influence le montant des dépenses d'exploration, mais l'exploration n'a pas de rétroaction directe sur le prix.

En revanche, on note que la simulation du scénario A3 s'interrompt en 2075 du fait d'une pénurie : le ratio R/P s'annule. Le détail des calculs montre aussi que même s'il ne s'annule pas dans le cas du scénario C2, le ratio R/P se dégrade continuellement, passant de 130 ans en 2013 à 10 ans vers 2100, ce qui laisse craindre une pénurie proche de cette date. Les contraintes d'exploration affectent ainsi la sécurité d'approvisionnement.

Ces résultats sont peu réalistes : d'une part, il est peu probable que la situation de pénurie identifiée dans le scénario A3 se produise sans avoir été anticipée ; et d'autre part, il est peu probable que les prix restent à des niveaux si faibles sur le long terme dans le scénario C2 alors que le ratio R/P est si bas (avec des marges de sécurité d'approvisionnement si faibles, il est probable qu'une rente de rareté apparaisse sur le marché, ce que ne prend pas en compte le mécanisme M2).

Les résultats obtenus avec le mécanisme M2 montrent la nécessité de prendre en compte les contraintes d'exploration ce que ne faisait pas le mécanisme M1. En effet, ces contraintes font apparaître une situation de pénurie dans le cas d'une demande en croissance forte (scénario A3). Elles montrent aussi que les dynamiques simulées sont peu vraisemblables en l'absence d'anticipation de la demande (qu'on propose de modéliser par la suite avec un ratio R/P_{minimum}) ; par le passé le ratio R/P n'est qu'exceptionnellement passé sous la barre des 60 ans dans les années 1980. Il est donc peu vraisemblable qu'il descende à des niveaux si bas au cours du XXI^e siècle. Enfin, le mécanisme M2 est critiquable puisqu'il suppose que la concurrence sur le marché de l'uranium est parfaite, ce qui n'est pas le cas comme l'atteste la concentration actuelle du marché de l'uranium [15]. Nous proposons donc de modéliser le marché sous la forme d'un oligopole (sans collusion), en prenant en compte à la fois les contraintes d'exploration et une contrainte d'anticipation de la demande [17].

2.3 M3 : Oligopole avec contraintes dynamiques

Le mécanisme M3 suppose à présent que l'offre d'uranium n'est pas mondiale, mais régionale. En cohérence avec la modélisation des ressources ultimes, l'offre a été découpée en 6 régions pour la modélisation : États-Unis, Canada, Kazakhstan, Australie, Afrique et le reste du monde.

Pour chaque région i , la modélisation tient compte de trois courbes d'offre :

- La courbe d'offre des ressources ultimes, résultat de l'estimation faite avec le modèle MUR (cf. Tableau 1 et Figure 2).
- La courbe d'offre des ressources ultimes restantes à un instant t , qui représente les ressources découvertes et non découvertes, les ressources déjà exploitées (supposées être les moins chères) ayant été retirées.
- La courbe d'offre des ressources identifiées à un instant t . Initialement, cette courbe correspond aux ressources RAR (Ressources Raisonnablement Assurées) et IR (Ressources Inférées) publiées dans le Livre Rouge et ordonnées par coûts croissants.

Chaque région a un coût de découverte propre, alors que les contraintes de dépenses d'exploration et d'anticipation de la demande sont de niveau mondial. En particulier, les dépenses d'exploration mondiales sont déduites de leur corrélation avec le prix du marché [17] puis réparties par défaut dans chaque région au prorata de leurs profits. Chaque région « défend » sa part de marché : si la demande augmente à t , la production de chaque région augmente au prorata de sa part de marché à $t-1$. Si une région se trouve en déficit de ressource (ratio R/P régional atteignant sa valeur limite $R/P_{\text{min, loc}}$) et donc dans l'incapacité de maintenir sa part de marché, la production régionale est limitée par la contrainte locale et la demande résiduelle est répartie sur les régions restantes. Dans chaque région, la production (respectivement l'exploration) se fait par coût croissant parmi les ressources connues (respectivement au prorata des ressources ultimes restantes dont le coût est inférieur au coût de production marginal mondial). À chaque

instant, le prix est fixé au coût marginal mondial, c'est-à-dire au coût marginal le plus élevé parmi les régions qui produisent, ce qui introduit une **rente différentielle**. Si le niveau critique de sécurité d'approvisionnement ($R/P = R/P_{\min}$) est atteint au niveau mondial, une **rente de rareté** s'ajoute au coût marginal mondial pour établir le prix.

Le marché est modélisé comme un oligopole de 6 régions avec contraintes d'exploration et d'anticipation (les acteurs du marché sont modélisés de façon agrégée dans ces régions), mais aucune rente autre que la rente de rareté ou les rentes différentielles n'est intégrée au prix de marché pour représenter une éventuelle position dominante d'un des acteurs. Le terme d'oligopole est ainsi pris au sens littéral (un nombre d'acteurs réduit) sans présupposer

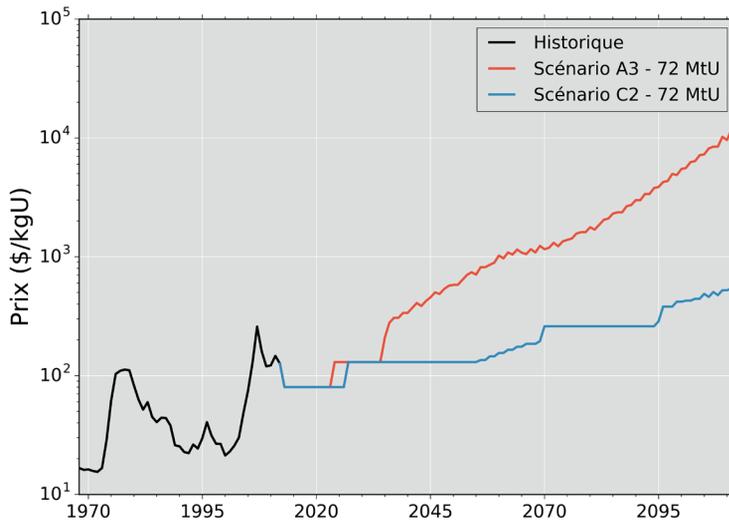


Figure 5. M3 : Évolutions du prix (A3 et C2 72 MtU)

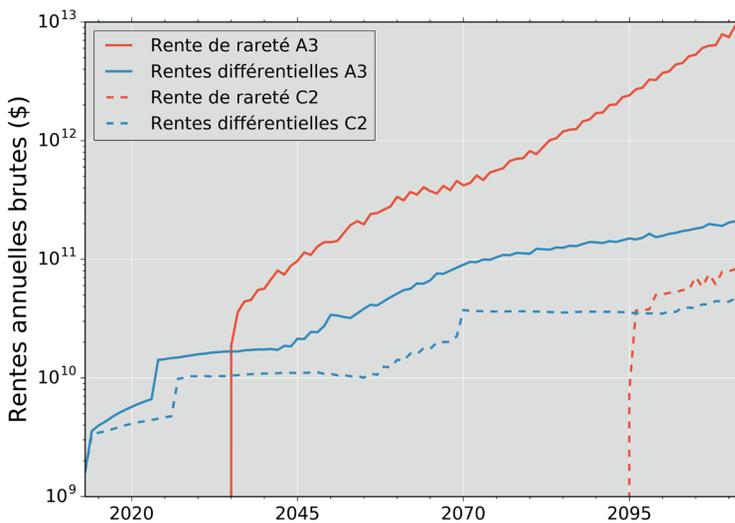


Figure 6. M3 : Évolutions des rentes minières (A3 et C2 72 MtU)

d'une éventuelle collusion entre les acteurs (on n'envisage pas de modéliser un cartel).

Le modèle proposé lève les principales limites que nous avons soulignées au paragraphe précédent :

- Les ressources ultimes (dont font partie les ressources non découvertes) sont prises en compte et l'activité d'exploration est endogène.
- Des contraintes dynamiques sont appliquées aux capacités de production.
- Les rentes minières (rente de rareté et rentes différentielles) sont introduites et calculées explicitement dans le modèle.
- Les acteurs du marché sont modélisés au niveau régional.

La Figure 5 et la Figure 6 présentent l'évolution de prix et des rentes minières pour les scénarios de demande A3 et C2.

On peut observer pour le scénario A3 deux tendances marquées dans l'évolution du prix : le prix reste assez stable à court et moyen terme (autour des niveaux de 2013), puis augmente fortement après 2035 (Figure 5). En fait ce changement de régime intervient lorsque le ratio R/P mondial atteint sa limite de 60 ans. Dans cette situation, le mécanisme M3 introduit une rente de rareté croissante pour maintenir

le ratio R/P à son niveau minimal (Figure 6). On constate en comparant les deux types de rentes que la rente de rareté apparaît et devient prépondérante à ce moment-là. Auparavant, seules les rentes différentielles existaient. Sur la durée du scénario, le taux de croissance des rentes différentielles est inférieur à celui de la rente de rareté.

Pour le scénario C2, le ratio R/P atteint sa limite plus tardivement et l'augmentation de prix est moindre.

Les paragraphes suivants présentent l'analyse de sensibilité faite afin de mieux cerner l'influence de certains paramètres et l'effet de la régionalisation des acteurs.

2.3.1 Contrainte d'anticipation de la demande

La contrainte $R/P > R/P_{\min}$ au niveau mondial traduit une certaine anticipation de la demande par le marché et un besoin de visibilité sur la disponibilité de l'uranium pour les consommateurs. Par défaut, $R/P_{\min} = 60$ ans a été retenue comme hypothèse la plus vraisemblable.

La Figure 7 montre la dynamique de prix sur le long terme obtenue avec le mécanisme M3 dans le cas du scénario A3 – 72 MtU.

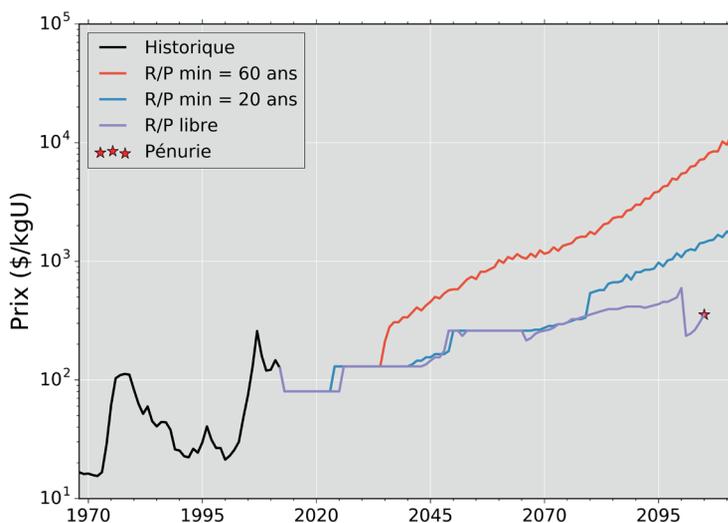


Figure 7. M3 : Influence de la contrainte d'anticipation de la demande (A3 72 MtU)

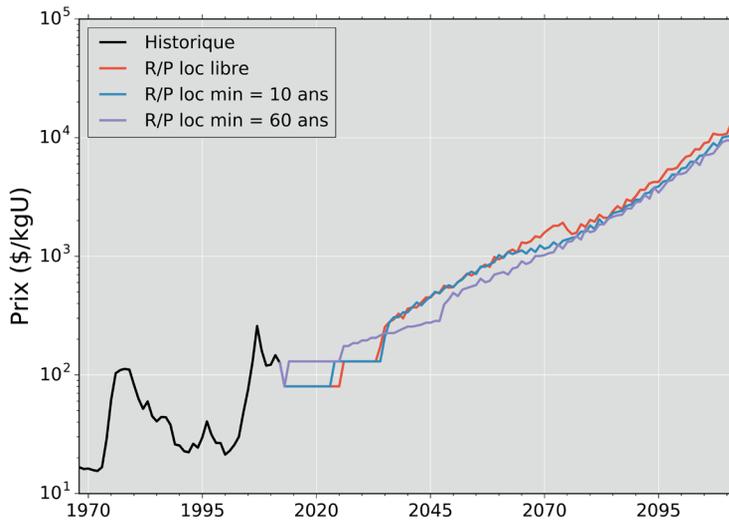


Figure 8. M3 : Influence de la contrainte de production régionale (A3 72 MtU)

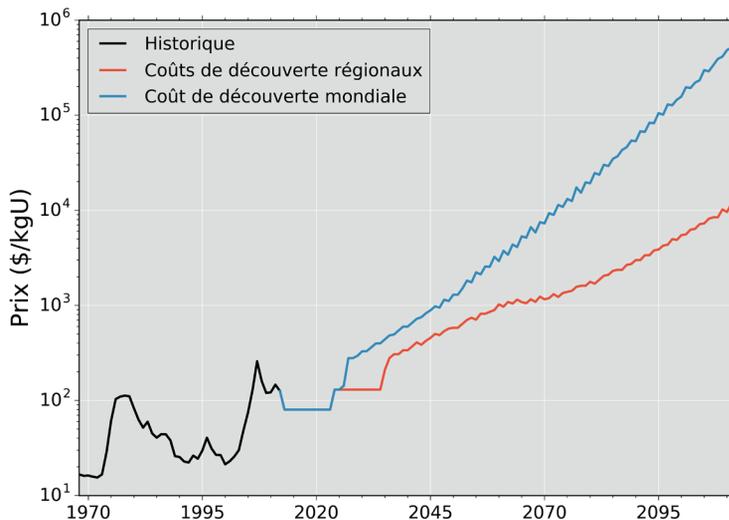


Figure 9. M3 : Influence de la régionalisation des coûts de découverte (A3 72 MtU)

On constate des évolutions de prix différentes selon le niveau d'anticipation de la demande.

- En l'absence d'anticipation (pas de contrainte R/P_{min}), la situation de pénurie, déjà constatée avec le mécanisme M2, se reproduit, mais est retardée dans le temps (2100 contre 2080 avec M2). La diminution plus lente du ratio R/P signifie que l'exploration est davantage stimulée et donc que les prix sont plus élevés avec M3 qu'avec M2 : la structure

oligopolistique du marché engendre des profits et donc des prix à court et moyen terme plus élevés qu'une structure de concurrence parfaite.

- Dans le cas du niveau de contrainte de référence ($R/P_{min} = 60$ ans), la situation de pénurie n'est jamais atteinte, mais le niveau R/P critique est atteint en 2035. On constate que le prix augmente ensuite rapidement jusqu'à la fin du XXI^e siècle.

- Enfin, la même dynamique est observée avec une contrainte d'anticipation plus faible ($R/P_{\min} = 20$ ans), mais le niveau R/P critique est atteint plus tard (vers 2075) et l'augmentation de prix jusqu'à la fin du siècle moins marquée.

2.3.2 Contrainte de production régionale

Au niveau régional, la nécessité d'apporter des garanties financières et la préférence pour le présent contraignent le ratio R/P (la signification de ce ratio au niveau régional est discutée plus en détail dans [17]). Par défaut, le mécanisme M3 impose un ratio R/P régional minimum de 10 ans.

On constate sur la Figure 8 que cette contrainte n'a pas d'influence significative à long terme. Le détail des résultats montre qu'en effet cette contrainte affecte les coûts de production régionaux et les parts de marché des régions et donc les rentes différentielles, et non la rente de rareté qui est prédominante pour fixer le prix de long terme.

2.3.3 Régionalisation des coûts de découverte

Il existe une corrélation forte, au niveau mondial ou régional, entre le coût de découverte de nouvelles ressources et le cumul des dépenses

d'exploration passées. La prise en compte de coûts de découverte régionaux (plutôt qu'un coût de découverte mondial appliqué à toutes les régions) tient compte de l'historique de l'activité d'exploration de chaque région.

On constate sur la Figure 9 que la régionalisation influence fortement le prix sur le long terme (plus élevé lorsque les coûts de découvertes sont identiques dans toutes les régions), l'écart est supérieur à un facteur 10.

2.3.4 Ventilation des dépenses d'exploration

Le mécanisme M3 prévoit par défaut que les dépenses d'exploration au niveau mondial soient réparties au prorata des profits générés par les différentes régions. Pour étudier l'importance de ce choix, nous étudions un système de ventilation des dépenses d'exploration différent : chaque année, l'ensemble des dépenses d'exploration au niveau mondial est attribué à la région dont le coût de découverte est minimal.

On constate sur la Figure 10 que le choix du système de ventilation des dépenses d'exploration a une influence non négligeable à moyen terme (2035-2060) et plus modérée à long terme :

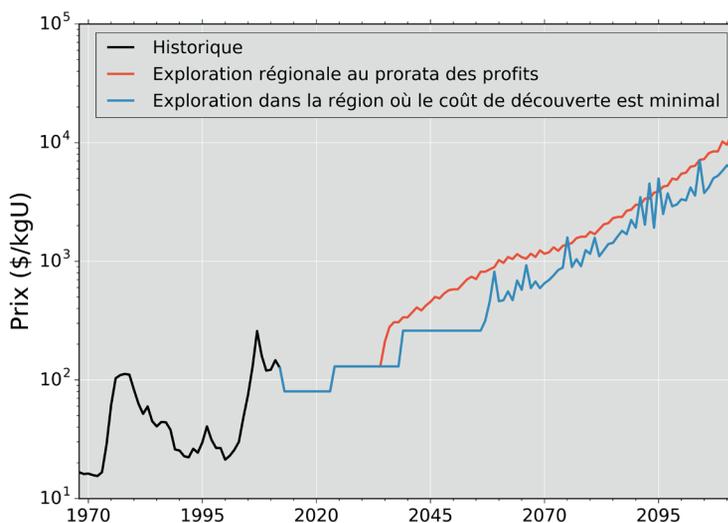


Figure 10. M3 : Influence de la ventilation des dépenses d'exploration (A3 72 MtU)

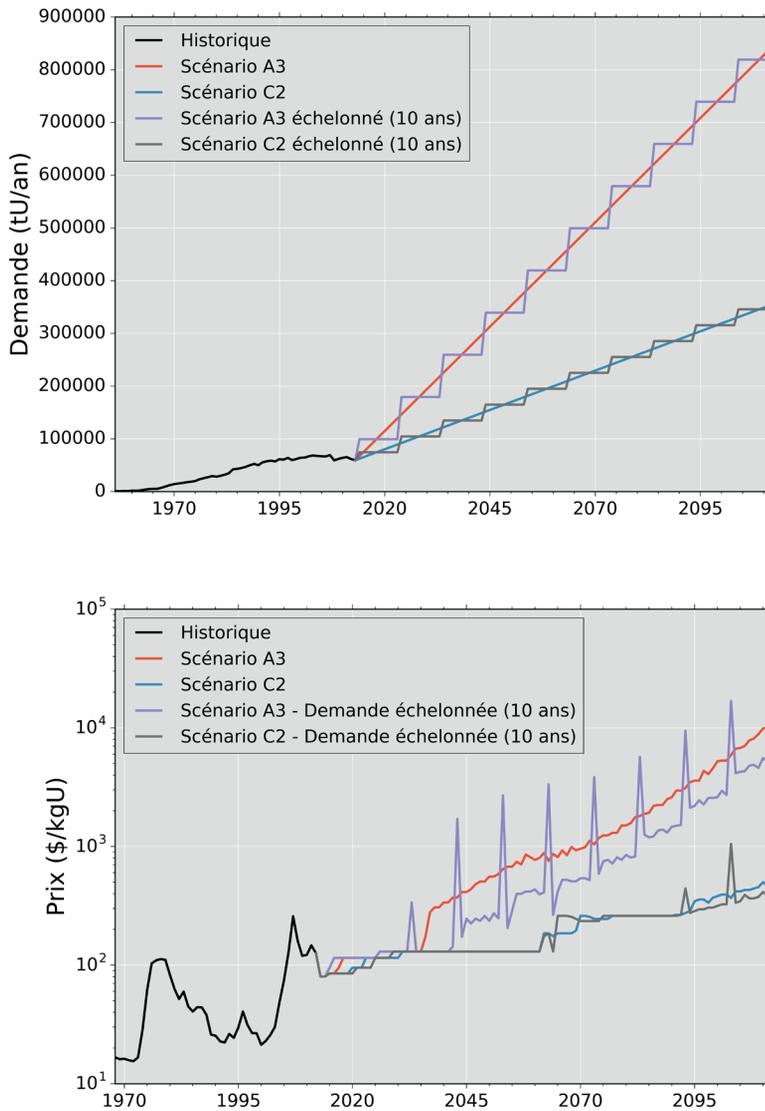


Figure 11. M3 : Influence du profil de demande (A3 et C2 72 MtU)

- Le niveau R/P_{min} est atteint 25 ans plus tard avec le système alternatif, qui maintient ainsi un prix plus bas à moyen terme.
- À long terme, l'écart de prix reste stable et modéré (moins de 50 %).

2.3.5 Demande par palier

La demande en uranium a été supposée linéaire (Figure 1) ce qui n'est pas très réaliste. En effet, les réacteurs nucléaires ont un besoin

accru d'uranium en début de vie pour leurs premiers chargements et une durée de vie limitée, ce qui implique que sur la durée considérée des scénarios, outre les nouveaux réacteurs construits pour augmenter les capacités installées il faut aussi prévoir le renouvellement de certains et qu'en conséquence la consommation d'uranium ne peut être linéaire elle aussi. Par ailleurs, par le passé, l'augmentation des capacités installées a été le fait de déploiements sur des périodes relativement courtes de

parcs au niveau national. On étudie donc ici une augmentation par palier de la demande en uranium pour se rapprocher de la réalité.

On constate sur la Figure 11 en premier lieu que la linéarisation de la demande d'uranium a peu d'influence lorsque la croissance de la demande est modérée (scénario C2). En revanche, on note des écarts de prix significatifs et une forte cyclicité lorsque la demande croît fortement (scénario A3). Néanmoins, si l'on compare plus en détail les écarts, on constate que le coût moyen pour un électricien sur toute la période (2013-2113), c'est-à-dire le prix de l'uranium pondéré par la demande, varie très peu : moins de 5 % d'écart entre le cas linéaire et le cas non linéaire. En conséquence, puisque les cycles de fluctuations sont courts (moins de 10 ans) et que le prix moyen est peu affecté, on peut considérer que les variations de demande d'uranium du scénario A3 non linéarisé pourraient être atténuées par un stockage/déstockage d'uranium à court terme, qui n'est pas pris en compte dans le modèle. Un tel stockage ne poserait a priori pas de difficultés techniques dans les pays consommateurs, surtout s'il ne concerne que l'uranium destiné aux premiers cœurs. De plus, les quantités nécessaires pour le chargement des premiers cœurs des réacteurs peuvent être facilement anticipées.

2.3.6 Autres paramètres

L'étude de sensibilité a été élargie à d'autres paramètres du modèle M3 [17]. Il a ainsi été montré que la **dynamique d'identification des nouvelles ressources** (par coûts croissants ou au prorata des ressources ultimes restantes avec un coefficient d'efficacité variable) avait peu d'influence sur l'évolution du prix à long terme (déterminée par la rente de rareté, rapidement prépondérante sur les rentes différentielles) ni sur la répartition régionale de la production (évolution des parts de marché).

De même la **dynamique de production des ressources identifiées** a été étudiée en faisant varier le taux de disponibilité des ressources identifiées mises en production selon leur coût estimé, et il a été montré

qu'elle n'influence pas les coûts de production moyens, mais seulement les coûts de production marginaux et ne change pas la compétition relative des régions.

2.3.7 Synthèse

L'analyse de sensibilité a montré que l'anticipation de la demande et le besoin de visibilité du consommateur, matérialisés par la contrainte sur le ratio R/P mondial, affectent directement l'évolution du prix en jouant sur la rente de rareté.

Certains paramètres, tels la contrainte de production régionale, les paramètres représentant la dynamique d'identification des nouvelles ressources, ou le taux de disponibilité des ressources de chaque catégorie de coût (lié à la dynamique de production des ressources identifiées), influencent les coûts de production sans affecter l'évolution du prix de l'uranium à long terme. Cette influence sur les coûts de production se traduit par une modification des rentes différentielles, mais pas de l'évolution du prix à long terme pour laquelle la rente de rareté est déterminante au premier ordre dans les scénarios étudiés.

2.4 Comparaison des trois mécanismes M1, M2, M3

Du fait de la régionalisation des acteurs, le mécanisme M3 intègre des données d'entrée et des contraintes spécifiques aux régions alors qu'elles étaient absentes ou agrégées au niveau mondial dans les autres mécanismes. Les plus importantes sont les données d'entrée sur les ressources ultimes et la contrainte sur l'évolution des coûts de découverte.

La Figure 12 montre des différences importantes dans l'évolution du prix, qu'on étudie le scénario de demande A3 (croissance forte) ou C2 (croissance modérée). Dans l'ensemble, l'écart de prix entre M2 et M3 est plus important qu'entre les mécanismes M1 et M2.

Si l'on compare les mécanismes M1 et M2, on constate que l'écart de prix reste assez stable à long terme, de l'ordre de 30 % à 50 % et légèrement plus important avec le scénario A3.

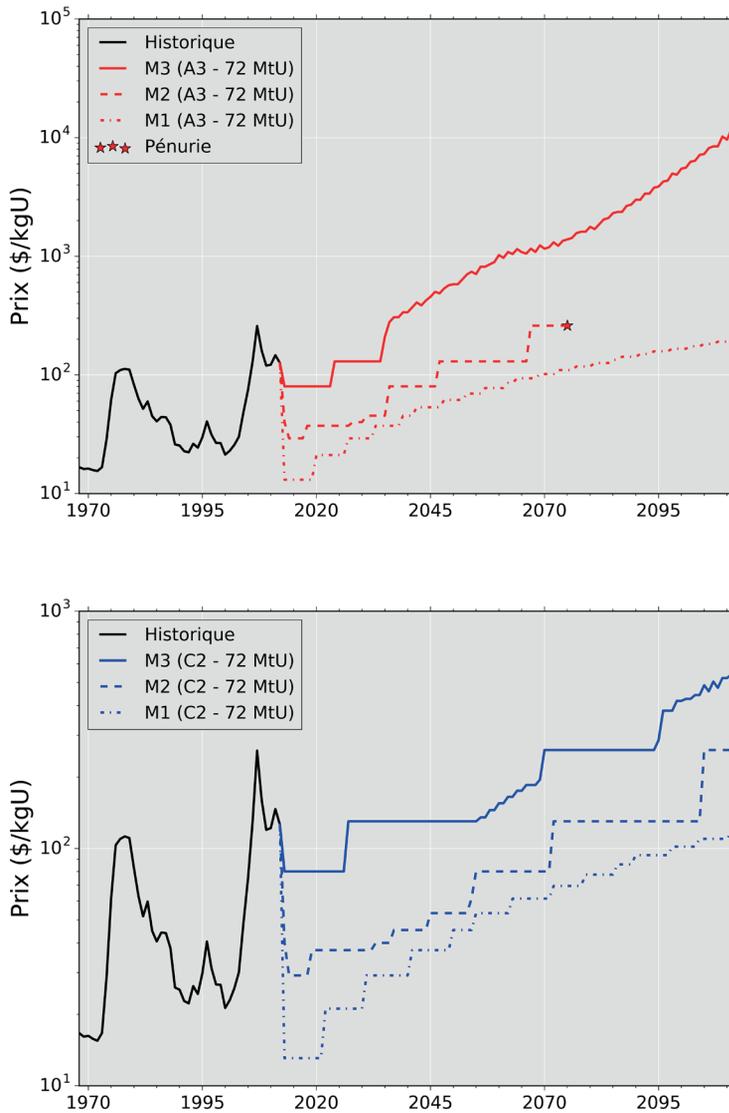


Figure 12. Comparaison des mécanismes de marché : évolution du prix (A3 et C2 72 MtU)

À court terme, on constate aussi un écart légèrement plus important. Les deux mécanismes se distinguent uniquement par l'introduction de la contrainte de financement de l'exploration (et l'augmentation des coûts de prospection dans M2 ; ils sont nuls avec M1). En négligeant cette contrainte et en supposant que l'ensemble des ressources ultimes sont identifiées et disponibles dès l'instant initial, le mécanisme M1 sous-estime les coûts de production et donc le prix.

Les mécanismes **M2** et **M3** se distinguent sur deux points :

- Le mécanisme M2 sous-estime les rentes différentielles

Le marché est supposé parfaitement concurrentiel dans le mécanisme M2 et ne regroupe pas les producteurs par région. Tous les producteurs en compétition (leur nombre est indéfini) ont accès à l'ensemble des ressources mondiales. L'épuisement des ressources se faisant par coût croissant, les écarts de coût

de production entre les producteurs sont donc minimisés. À l'inverse, le mécanisme M3 modélise individuellement les régions productrices. Les différences de coût entre les ressources identifiées des régions modélisées créent à elles seules des rentes différentielles. De plus, la dynamique de production des ressources tient compte d'une disponibilité limitée des ressources de chaque catégorie de coût (notamment pour tenir compte de la durée de vie des mines), ce qui introduit aussi des rentes différentielles au sein des régions.

- Le mécanisme M2 néglige la rente de rareté

Le mécanisme M3 est le seul à augmenter le prix de marché pour stimuler les nouvelles découvertes afin de maintenir un ratio R/P minimum lorsque la sécurité d'approvisionnement est critique.

Cette comparaison permet de conclure que les rentes différentielles et la rente de rareté ne peuvent pas être négligées pour modéliser l'évolution du prix de l'uranium à long terme. Les rentes différentielles introduisent des écarts de prix relativement stables dans la durée et

assez peu sensibles à la demande (on l'observe en comparant le mécanisme M1 qui néglige ces rentes et le mécanisme M2 qui les prend en compte même s'il les sous-estime : écart de prix de l'ordre de 30 % à 50 %). À l'inverse, la rente de rareté introduit des écarts de prix importants et croissants (qu'on observe en comparant les mécanismes M2 et M3). Cette rente est particulièrement sensible à la demande : elle apparaît plus tôt quand la demande est forte et s'accroît à mesure que la demande augmente.

3. Études prospectives de variations de l'offre

Dans cette dernière partie, quelques simulations prospectives de variations de l'offre sont faites et permettent d'étudier la robustesse du mécanisme M3. Tout d'abord, on étudie l'influence sur l'évolution de prix de l'estimation des ressources ultimes (§ 3.1), puis les cas d'un arrêt brutal de la production d'une région

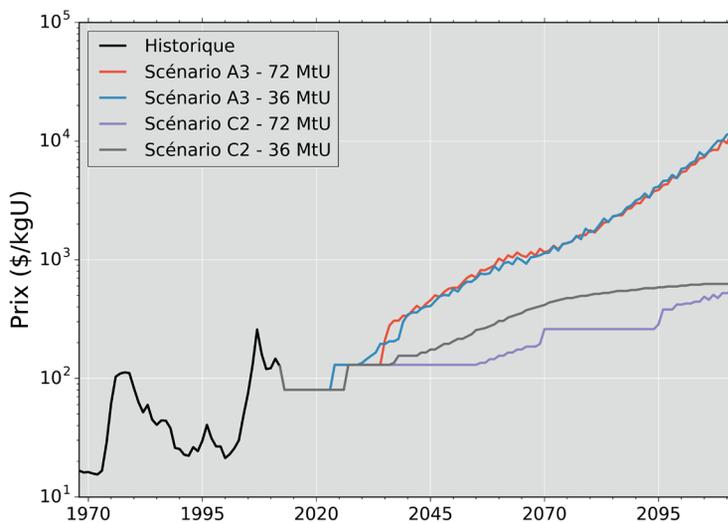


Figure 13. M3 : Influence des scénarios d'offre et de demande

A3 – 72 MtU	A3 – 36 MtU	C2 – 72 MtU	C2 – 36 MtU
2035	2040	2095	>2100

Tableau 2. M3 : Dates auxquelles est atteint R/Pmin = 60 ans

(§ 3.2) ou au contraire de son doublement (§ 3.3).

3.1 Influence des ressources ultimes

On choisit ici de retenir deux scénarios d'offre. Le premier avec une estimation des ressources ultimes de 72 MtU à moins de 260 \$/kgU et le second avec la moitié seulement, 36 MtU à moins de 260 \$/kgU (§ 2.2).

La Figure 13 représente l'évolution du prix avec ces deux scénarios d'offre, pour les deux scénarios de demande A3 et C2, et le Tableau 2 les dates auxquelles est atteinte la valeur critique de R/P_{min} .

Dans le cas étudié de scénarios de demande croissants, on peut faire les constats suivants :

- La demande d'uranium est la variable de premier ordre qui influence l'évolution du prix de l'uranium.
- L'estimation des ressources ultimes affecte davantage l'évolution du prix à moyen terme qu'à long terme (les temps caractéristiques du moyen et long terme dépendant de la croissance de la demande).
- Augmenter les ressources ultimes, à moyen terme, retarde la hausse du prix liée aux rentes différentielles, ce qui limite l'exploration et, à plus long terme, avance la date à

laquelle une rente de rareté apparaît, et donc l'augmentation importante de prix.

3.2 Influence de l'arrêt de production d'une région

Nous simulons un arrêt de la production de l'Australie en 2050 et nous analysons son influence sur l'évolution du prix. Le cas de l'Australie a été retenu car cette région occupe une place importante dans la production mondiale et des choix politiques passés ont déjà restreint ou suspendu sa production pendant plusieurs années.

Les résultats obtenus (Figure 14) montrent qu'un arrêt de la production d'un pays comme l'Australie se traduirait par un épisode de fluctuation des prix suivi d'un écart de prix résiduel par rapport au cas de référence. Cet écart se maintient à long terme et est d'autant plus important que l'arrêt de la production a lieu tôt.

3.3 Influence du doublement de production d'une région

Nous étudions à présent l'influence sur l'évolution du prix d'un doublement de la production du Kazakhstan en 2040. Le cas du Kazakhstan a été retenu car d'une part cette

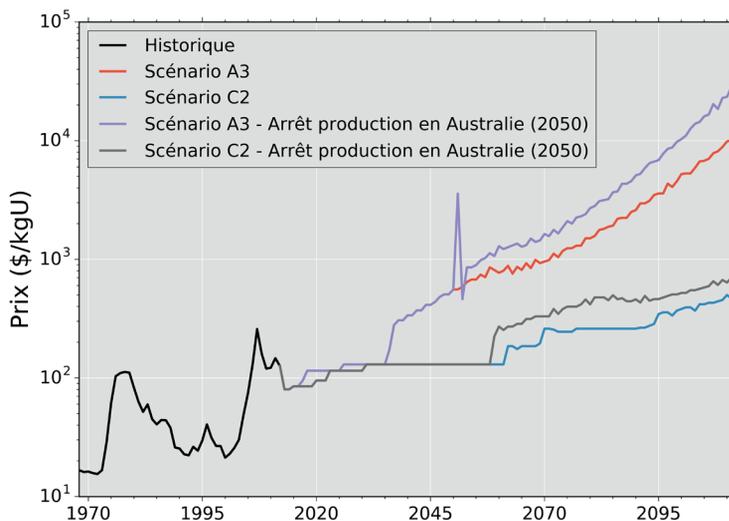


Figure 14. M3 : Influence de l'arrêt de production de l'Australie en 2050

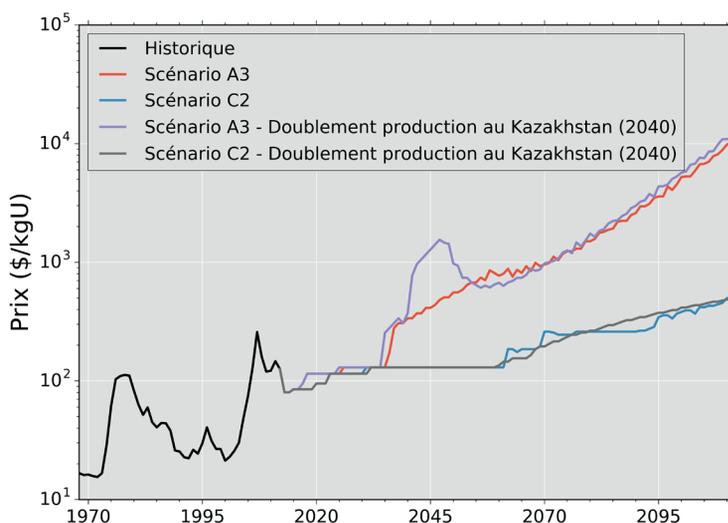


Figure 15. M3 : Influence du doublement de production du Kazakhstan en 2040

région a déjà prouvé au début du ^{xxi}^e siècle qu'elle était capable d'augmenter rapidement sa production, tout en restant très compétitive et d'autre part, la technique de production dominante (lixiviation in situ) permet techniquement de développer rapidement de nouvelles capacités de production et avec des montants d'investissement relativement faibles.

D'après les résultats (Figure 15), un doublement de la production d'un pays comme le Kazakhstan introduirait des fluctuations de prix à court et moyen terme, mais avec une incidence négligeable à long terme.

Ces simulations prospectives ont permis d'identifier des déterminants de la disponibilité de l'uranium, en testant quelques hypothèses de scénarios possibles. Les résultats montrent que le modèle développé est robuste face à des variations plus ou moins brutales de l'offre : la réponse du modèle en termes de prix converge dans tous les cas étudiés vers une tendance de long terme (identique ou décalée par rapport au cas de référence).

Cependant, le modèle développé ne permet pas de particulariser la demande d'uranium des différentes régions (la demande est mondiale). Les données d'entrée disponibles (scénarios de production électronucléaire mondiaux) ont conduit à ce choix de modélisation. C'est une amélioration intéressante qui pourrait

être apportée au modèle puisqu'elle permettrait de prendre en compte des stratégies spécifiques pour les régions « productrices et consommatrices d'uranium » ou « productrices, mais non-consommatrices » ou « consommatrices, mais non-productrices ».

Le modèle développé ne prend pas non plus en compte les deux principales formes de contrats sur lesquelles s'appuient les échanges d'uranium aujourd'hui : contrat spot et contrat long terme. Il ne produit qu'un seul indicateur de prix. Cela limite l'interprétation des résultats faisant apparaître une certaine cyclicité des prix puisqu'il semble que les électriciens tendent à limiter le recours aux contrats spot (dont l'index des prix est le plus volatil) lors des pics de prix pour se prémunir de ces fluctuations.

Enfin, les simulations prospectives analysées dans cet article partagent les limites de toute étude prospective : elles ne peuvent être exhaustives. On rappelle donc que les résultats des simulations précédentes doivent être utilisés avec précaution. En particulier, ils ne valent que pour des scénarios de production électronucléaire et de demande d'uranium croissante.

Conclusion

L'analyse faite ici des paramètres clés de la disponibilité des ressources d'uranium à long terme s'est appuyée sur une modélisation des ressources ultimes d'uranium (ressources découvertes, non découvertes et déjà extraites) et une modélisation du marché.

Une nouvelle méthodologie d'estimation des ressources ultimes et de leurs coûts de production associés a été développée à partir des données disponibles sur les gisements d'uranium connus. La modélisation est basée sur une distribution log-normale de la teneur et du tonnage des gisements, sur l'utilisation d'un filtre économique et sur des fonctions de coûts tenant compte des économies d'échelle (principalement liées au tonnage des gisements et leur capacité de production) et du type d'exploitation minière envisagé. En calibrant différemment ces distributions et ces fonctions de coût, le modèle prend en compte au mieux les données disponibles, les spécificités économiques et géologiques de chaque région.

Malgré des incertitudes significatives, les résultats obtenus ont montré que, du fait de la spécialisation de certaines régions dans une technique minière particulière et/ou de leurs spécificités géologiques et économiques, les ressources ultimes d'uranium sont inégalement réparties dans le monde. Le taux d'actualisation, la profondeur de la croûte terrestre prise en compte ou le prix de l'uranium représentatif des conditions économiques actuelles sont des paramètres particulièrement déterminants de l'estimation faite. Cependant il a également été montré que cette estimation n'influence qu'au second ordre l'évolution du prix de l'uranium à long terme.

L'analyse de la structure du marché et de ses contraintes dynamiques a permis de définir un nouveau modèle d'étude du marché. Il s'agit d'un modèle déterministe qui calcule une succession d'équilibres économiques de court terme pour étudier le long terme sur le plan prospectif. Ce modèle prend en compte le lien de causalité entre le prix et les dépenses d'exploration, l'augmentation des coûts de découverte et l'anticipation de la demande.

La régionalisation des acteurs du marché (modélisés par un oligopole sans collusion) permet d'introduire des rentes différentielles qui ont une influence limitée à court et moyen terme dans les scénarios de demande croissante étudiés ; tandis que la contrainte d'anticipation de la demande introduit une rente de rareté, permettant de maintenir les marges de sécurité d'approvisionnement, mais entraînant aussi une hausse du prix de l'uranium à long terme.

Une étude de sensibilité a révélé l'importance particulière des scénarios de demande, de la contrainte d'anticipation de la demande ou encore de la régionalisation des coûts de découverte : tous influencent significativement l'évolution du prix en jouant sur la rente de rareté.

L'intérêt du modèle de marché développé réside dans sa flexibilité et l'étendue des possibilités qu'il offre pour conduire des études prospectives. Premièrement, il permet de suivre l'évolution des rentes minières et d'un grand nombre d'indicateurs régionaux ou mondiaux (ratio R/P, coûts de production, dépenses d'exploration, etc.), ce qui facilite l'interprétation des résultats : on distingue par exemple clairement les hausses de prix dues à l'augmentation des coûts de production, des hausses de prix dues à la raréfaction des ressources identifiées. Deuxièmement, la structure du modèle est suffisamment flexible pour permettre de simuler des scénarios variés (d'offre ou de demande).

Pendant des incertitudes subsistent dans l'estimation des coûts de production et des rentes différentielles du fait que les mines ne sont pas discrétisées dans le modèle. Si ces incertitudes ont une importance limitée lorsque les scénarios étudiés correspondent à une demande d'uranium croissante à long terme (la rente de rareté devient généralement prépondérante sur la rente différentielle dans ce cas), le modèle nécessiterait d'être amélioré pour d'autres cas d'étude.

Indépendamment des simplifications nécessaires à la modélisation, il est important de rappeler certaines limites d'interprétation des résultats, concernant les questions liées à la disponibilité des ressources d'uranium et concernant les études prospectives en général.

Concernant les questions liées à la disponibilité des ressources d'uranium, les résultats sur l'évolution du prix de l'uranium peuvent nourrir une réflexion sur la compétitivité du nucléaire et la compétitivité des réacteurs à neutrons rapides par rapport aux technologies nucléaires actuelles. Néanmoins, il ne s'agit que d'éléments de réponses et en l'absence d'une analyse complémentaire sur l'évolution d'autres coûts (coût des autres modes de production d'électricité, coûts d'investissements et d'exploitation du nucléaire), il n'est pas possible de conclure sur l'évolution de la compétitivité du nucléaire.

Concernant les études prospectives en général, leur principale limite est sous doute le manque d'exhaustivité des scénarios envisagés. Il est toujours nécessaire de formuler des hypothèses qui restreignent le champ des possibles. Nous avons par exemple supposé implicitement que l'économie de marché que nous connaissons actuellement perdurerait au XXI^e siècle. Nous avons aussi supposé implicitement qu'il n'y aurait pas de rupture technologique dans les méthodes de production d'uranium. Nos résultats seraient sans doute remis en cause si, dans les années à venir, une nouvelle technologie permettait d'extraire l'uranium de l'eau de mer à un coût comparable aux coûts miniers, avec un rendement énergétique acceptable et un impact environnemental réduit : il s'agirait d'une vraie ressource *backstop* dont le coût de production pourrait constituer un plafond de prix.

RÉFÉRENCES

- [1] BASCHWITZ, A. ; LOAEC, C. ; FOURNIER, J. ; DELPECH, M. ; LEGÉE, F. : Long term prospective on the electronuclear fleet : from GEN II to GEN IV. In : *Proceedings of the Global 2009 congress - The Nuclear Fuel Cycle: Sustainable Options & Industrial Perspectives*. Paris, France, 2009
- [2] BRINCK, JOHAN W. : Calcul des ressources mondiales d'uranium. In : *Bulletin de la communauté européenne de l'énergie atomique* Bd. 6 (1967), Nr. 4, S. 109–114
- [3] BRINCK, JOHAN W. : MIMIC - The prediction of mineral resources and long-term price trends in the non-ferrous metal mining industry is no longer Utopian. In : *Eurospectra* Bd. 10 (1971), Nr. 2, S. 46–56
- [4] BRITISH PETROLEUM : *Statistical review of the world energy 2015* : British Petroleum, 2015
- [5] CAMECO : *Uranium Price*. URL <https://www.cameco.com/invest/markets/uranium-price>. - abgerufen am 2016-04-20. — Cameco Website
- [6] CHAVEZ-MARTINEZ, MARIO LUIS : *A potential supply system for uranium based upon a crustal abundance model*, 1982
- [7] CRU INTERNATIONAL : An Overview of the Uranium Mining Industry of Kazakhstan.
- [8] DE WOLDE, H. I. ; BRINCK, JOHAN W. : *The estimation of mineral resources by the computer program „IRIS“* (Nr. EUR4607e) : Commission of the European Communities, 1971
- [9] DREW, M. W. : US uranium deposits : A geostatistical model. In : *Resources Policy* Bd. 3 (1977), Nr. 1, S. 60–70
- [10] HARRIS, DEVERLE P. : *Quantitative methods for the appraisal of mineral resources* (Progress report Nr. GJBX-14-77) : University of Arizona, Department of Mining & Geological Engineering, 1977
- [11] HARRIS, DEVERLE P. : *Mineral Resources Appraisal : Mineral Endowment, Resources, and Potential Supply : Concepts, Methods and Cases* : Oxford University Press, 1984 — ISBN 978-0-19-854456-2
- [12] HARRIS, DEVERLE P. : Geostatistical Crustal Abundance Resource Models. In : CHUNG, C. F. ; FAB-BRI, A. G. ; SINDING-LARSEN, R. (Hrsg.) : *Quantitative Analysis of Mineral and Energy Resources, NATO ASI Series* : Springer Netherlands, 1988 — ISBN 978-94-010-8288-4, S. 459–488
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *World Distribution of Uranium Deposits (UDEPO)*. URL <http://infcis.iaea.org/UDEPO/UEPOMain.asp?Order=1&RPage=1&Page=1&RightP=List>. - abgerufen am 2013-11-27

[14] INTERNATIONAL INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEMS ANALYSIS ; WORLD ENERGY COUNCIL ; MCDONALD, A. ; GRÜBLER, A. (Hrsg.) : *Global Energy Perspectives* : Cambridge University Press, 1998 — ISBN 978-0-521-64569-0

[15] MONNET, ANTOINE : L'uranium dans une nouvelle ère : vers un marché très concentré ? In : *La lettre de l'I-tésé* (2014), Nr. 23, S. 7-10

[16] MONNET, ANTOINE : Disponibilité à long terme des ressources mondiales d'uranium (2016), Thèse de l'université de Montpellier

[17] MONNET, ANTOINE ; GABRIEL, SOPHIE ; PERCEBOIS, JACQUES : Long-term availability of global uranium resources. *Resources Policy* 53, 394-407 (2017)

[18] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY : *Forty Years of Uranium Resources, Production and Demand in Perspective*. Paris : OECD Nuclear Energy Agency, 2006 — ISBN 978-92-64-02806-7

[19] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY ; INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY : *Uranium 2014 : resources, production and demand, Red Book*. Paris : OECD Nuclear Energy Agency, 2014

[20] QUEEN'S UNIVERSITY : *Estimation of the potential production rate*. URL https://queensminedesign.miningexcellence.ca/index.php/Estimation_of_the_potential_production_rate. - abgerufen am 2015-05-28. — Mine Design Wiki

[21] SINGER, DONALD A. : *Short Course Introduction to Quantitative Mineral Resource Assessments* (Open-File Report Nr. 2007-1434), 2007

[22] TAYLOR, H.K. : Rates of Working Mines - A Simple Rule of Thumb. In : *Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy* (1986), Nr. 95, S. A203-204

[23] WELLMER, FRIEDRICH-WILHELM ; DALHEIMER, MANFRED ; WAGNER, MARKUS : *Economic Evaluations in Exploration*. 2nd corr. and revised ed. 2008. Aufl. Berlin ; New York : Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K, 2007 — ISBN 978-3-540-73557-1

[24] WORLD INFORMATION SERVICE ON ENERGY : *WISE Uranium Project*. URL <http://www.wise-uranium.org/index.html>. - abgerufen am 2015-02-11. — WISE Uranium.

Antoine MONNET est diplômé de l'École des Mines de Paris, spécialisé dans l'ingénierie des systèmes énergétiques et la gestion des ressources minérales. Il a complété sa formation par un doctorat d'économie sous la supervision



du Pr. Jacques Percebois à l'Université de Montpellier et Sophie Gabriel au CEA. Depuis 2016, il a rejoint LGI Consulting où il apporte son expertise technico-économique dans plusieurs projets internationaux : analyse de marché pour la cogénération nucléaire, analyse stratégique de l'approvisionnement européen en matières premières critiques, accompagnement d'acteurs publics pour l'adoption d'une stratégie digitale de plateforme.

Sophie GABRIEL est titulaire d'un doctorat en Physique des réacteurs nucléaires et s'intéresse plus particulièrement aujourd'hui à la technico-économie du nucléaire. Au sein du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives (CEA), ses études portent sur la disponibilité à long terme des ressources en uranium et les scénarios de renouvellement du parc électronucléaire français.



Sophie Gabriel est membre depuis 2009 du « groupe uranium » qui prépare l'ouvrage de référence « Uranium : Resources, Production and Demand » publié tous les deux ans conjointement par l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).

Jacques PERCEBOIS est Professeur Émérite à l'Université de Montpellier. Il est Doyen Honoraire de la Faculté d'Économie de Montpellier et a créé et dirigé le CREDEN et un



Master 2 en « Économie et Droit de l'Énergie » de 1992 à 2014. Il est actuellement directeur scientifique de la Chaire Économie du Climat à l'Université Paris Dauphine. Il enseigne également à l'École des Mines de Paris et à l'Institut Français du Pétrole. Il a publié de nombreux articles et plusieurs ouvrages, en particulier l'ouvrage écrit avec Jean-Pierre Hansen et paru fin août 2017 aux Éditions Odile Jacob : *Transitions électriques. Ce que l'Europe et les marchés n'ont pas su vous dire* (Préface de Gérard Mestrallet).