

Risques et opportunités pour le nucléaire actuel et futur en termes de ressources minérales stratégiques

Christophe POINSSOT est directeur général délégué et directeur scientifique au BRGM.

1 Introduction

Dans le contexte actuel de la COP 27 qui s'est tenue¹ fin 2022, il est important de rappeler que nous sommes tous engagés sur une transition majeure qui est de réussir à réduire nos émissions de gaz à effet de serre pour limiter l'accroissement de la température à la surface du globe.

2 Le besoin de développer des énergies bas carbone

La **Figure 1** tirée du rapport du GIEC montre que nous sommes engagés sur une courbe qui nous amène inexorablement

d'ici le milieu de ce siècle à une élévation de température de 1,5 °C. Une élévation largement plus importante que l'engagement pris durant l'accord de Paris. Le mix énergétique² à l'échelle mondiale – incidemment, celui de la France en diffère – est schématisé sur la **Figure 1** où les différentes sources d'énergie sont représentées en fonction de leur importance : plus la bulle est grosse et plus elle est importante dans le mix énergétique mondial. En ordonnée, on a porté les émissions de gaz à effet de serre : plus on est vers le haut de la figure et plus l'émission est importante ; en abscisse, est porté le « facteur

1. La COP 27 s'est déroulée du 6 au 20 novembre 2022 à Charm el-Cheikh, Égypte.

2. Le mix énergétique est la nature des sources d'énergie utilisées, ainsi que leurs proportions.

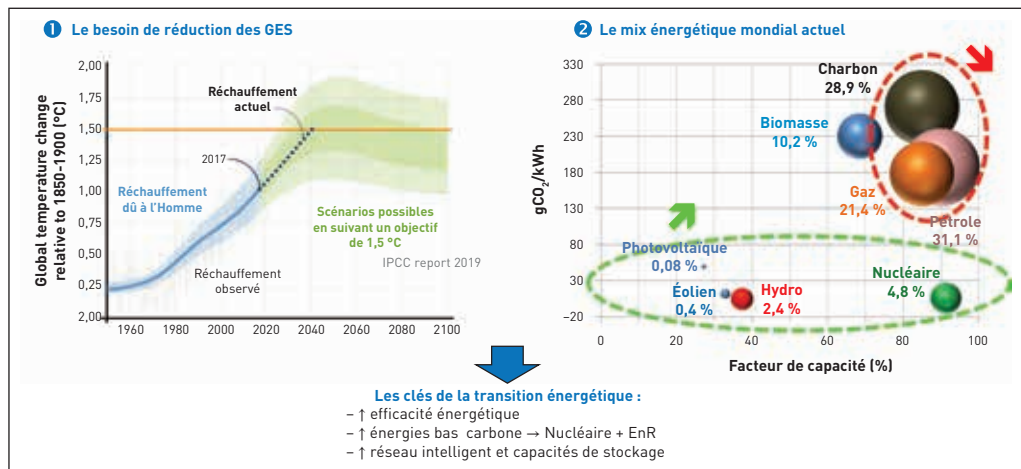


Figure 1

Limiter l'ampleur du changement climatique nécessite une révolution énergétique.

de capacité » c'est-à-dire la capacité à produire du kilowatt-heure quelles que soient les conditions extérieures³.

Aujourd'hui l'essentiel de l'énergie – plus de 80 % du mix énergétique mondial – est produit par les énergies fossiles. Elles ont certes un immense avantage qui est leur disponibilité à tout moment, quelle que soit la météo, quelle que soit l'heure du jour ou de la nuit, mais elles ont un énorme inconvénient : elles produisent énormément de gaz à effet de serre. C'est pourquoi la cible de la transition énergétique consiste à réduire les énergies fossiles et, pour ce faire, développer les énergies bas carbone. Celles-ci sont divisées en deux familles : d'une part, les

énergies renouvelables (photovoltaïque, éolien, hydro, etc.) qui représentent actuellement quelques pourcents du mix énergétique mondial et, d'autre part, le nucléaire qui se situe lui aussi à des niveaux d'émission de gaz à effet de serre extrêmement faibles mais qui peut produire quelles que soient les conditions d'environnement. La clé du succès de la transition énergétique au-delà de l'amélioration inévitable et indispensable de l'efficacité énergétique, sera donc de réussir à développer harmonieusement ces deux sources d'énergie et de les inscrire dans un réseau qui permet de les utiliser de manière harmonieuse les unes avec les autres.

3 Des énergies gourmandes en ressources minérales

La **Figure 2**, issue du rapport de l'AIE⁴ de 2021, présente la quantité de ressources minérales nécessaire pour une

3. Aussi appelé facteur de charge. Un facteur de capacité de 80 % signifie que sur une période donnée, une installation n'est capable de produire que 80 % de l'énergie prévue dans le cas idéal où elle fonctionnerait à puissance maximale durant toute la période étudiée. Pour compenser ce facteur de charge, il faut construire plus de centrales que nécessaire.

4. AIE : Agence Internationale de l'Énergie.

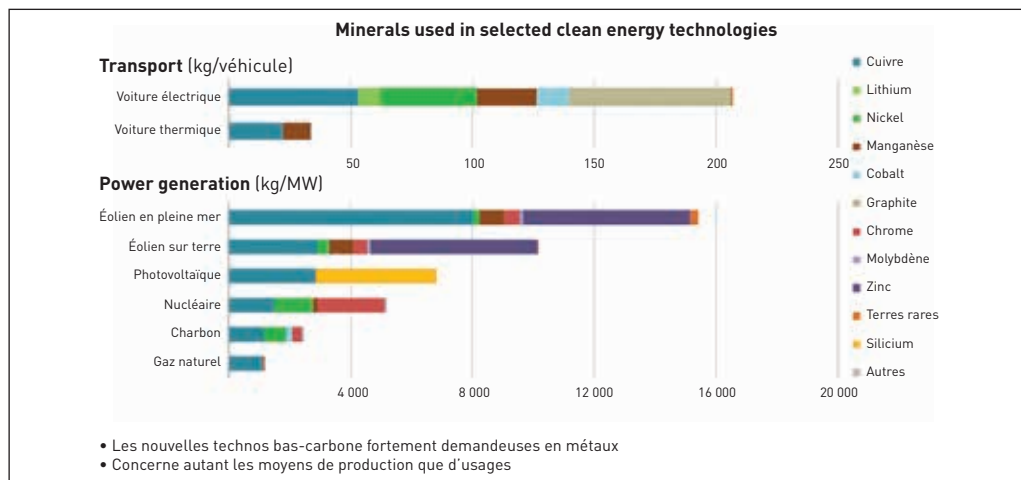


Figure 2

Besoins en ressources minérales des nouvelles sources d'énergie.

capacité d'un mégawatt⁵ installé⁶ selon le moyen de production employé. Sur le bas de la figure est porté l'essentiel du mix énergétique mondial actuel – le charbon et le gaz – sur lequel on a des teneurs, des besoins en ressources minérales assez faibles. Sur la partie haute sont portés les moyens de production de demain : l'éolien, le solaire, le nucléaire. Cette figure appelle plusieurs commentaires importants. Le premier, c'est que les besoins du nucléaire sont assez faibles. Le deuxième est l'importante différence qu'il y a entre les moyens actuels et les moyens qu'on cherche à développer : il s'agit d'un facteur 6 sur la

puissance installée. En corrigeant par le facteur de capacité présenté dans la **Figure 1**, on obtient un facteur de près de 20 par kilowatt produit : 1 kWh produit par de l'éolien offshore par exemple aura ainsi mobilisé 20 fois plus de ressources minérales qu'un kWh produit par une centrale thermique.

4 Présentation de la problématique

Cette situation explique pourquoi on s'attend à une explosion des besoins en ressources minérales indispensables pour mener la transition énergétique (**Figure 3**). Autant le sujet fait l'objet de nombreux débats sur les besoins liés aux renouvelables, autant c'est moins le cas pour le nucléaire et il paraît donc pertinent de s'interroger sur les besoins en ressources minérales de l'électronucléaire, tant les besoins en uranium pour fonctionner que ceux en métaux pour construire les installations (réacteurs, usines...).

Cette intervention abordera cette problématique selon trois

5. Rappelons les différents préfixes utilisés au cours de cette conférence : kilo : 10^3 ou mille, de symbole k ; méga : 10^6 ou un million, de symbole M ; giga : 10^9 ou un milliard, de symbole G.

6. La puissance installée ou puissance nominale est la puissance maximale que peut fournir une installation. À un instant donné, celle-ci délivre ainsi une puissance inférieure ou égale à cette puissance installée.

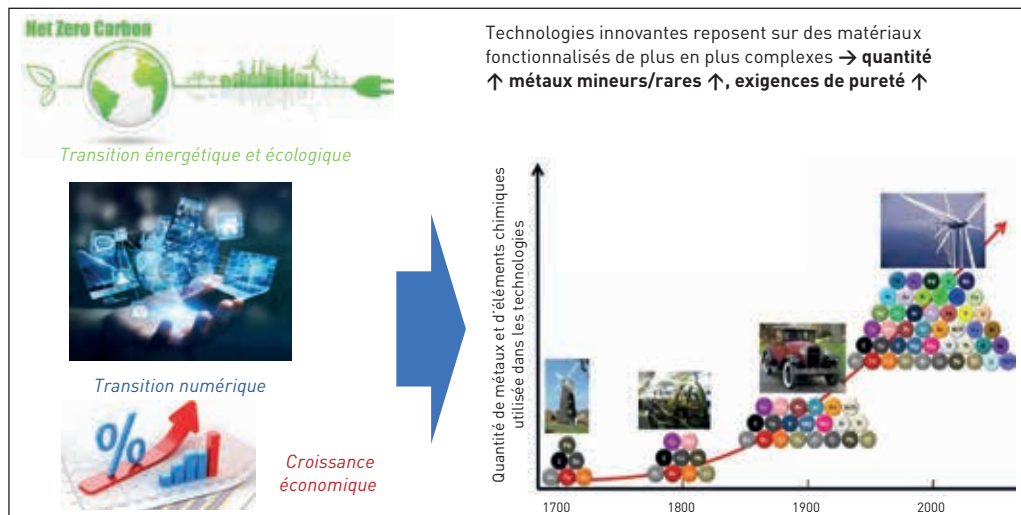


Figure 3

Une augmentation inévitable des besoins en ressources minérales.

axes. Le premier, en répondant à la question « Quels sont les besoins en métaux stratégiques pour le nucléaire ? ». Le deuxième, en éclairant sur les besoins de la filière électronucléaire en uranium qui constitue le combustible ; cela conduira à examiner les limitations éventuelles sur l'approvisionnement en combustible. Le troisième discutera d'une meilleure utilisation possible des ressources au sein de la filière nucléaire.

4.1. Les besoins en métaux stratégiques pour le nucléaire

4.1.1. Quelle est la demande attendue en ressources minérales pour la construction et le fonctionnement de centrales nucléaires ?

Commençons par les besoins en métaux stratégiques pour la construction et la mise en œuvre des centrales nucléaires. La partie gauche de la **Figure 4** montre le système primaire qui produit de

la chaleur par les réactions de fission⁷. Du circuit primaire, cette chaleur est transférée à un circuit secondaire (figurée en bleu) qui alimente une turbine qui produit l'électricité au moyen d'un alternateur⁸.

Quels sont les besoins principaux de ces installations en

7. Un réacteur nucléaire utilise un combustible tel que l'uranium 235 ou le plutonium 239. Lorsqu'il est percuté par un neutron, un tel noyau atomique réalise une fission nucléaire où il se divise en deux noyaux plus petits en libérant de la chaleur et plusieurs neutrons. Ces neutrons vont à leur tour percuter d'autres noyaux et déclencher leur fission, ce qui libère davantage de neutrons. Le nombre de neutrons, donc le nombre de réactions de fission et la chaleur libérée augmentent de façon exponentielle, il s'agit d'une réaction en chaîne. C'est la chaleur produite par ces réactions qui chauffe le circuit primaire.

8. Un troisième circuit (en vert ici) généralement alimenté par un fleuve permet de refroidir le circuit secondaire. Chacun des trois circuits est isolé des deux autres : il n'y a pas de mélange mais uniquement des transferts de chaleur de l'un à l'autre.

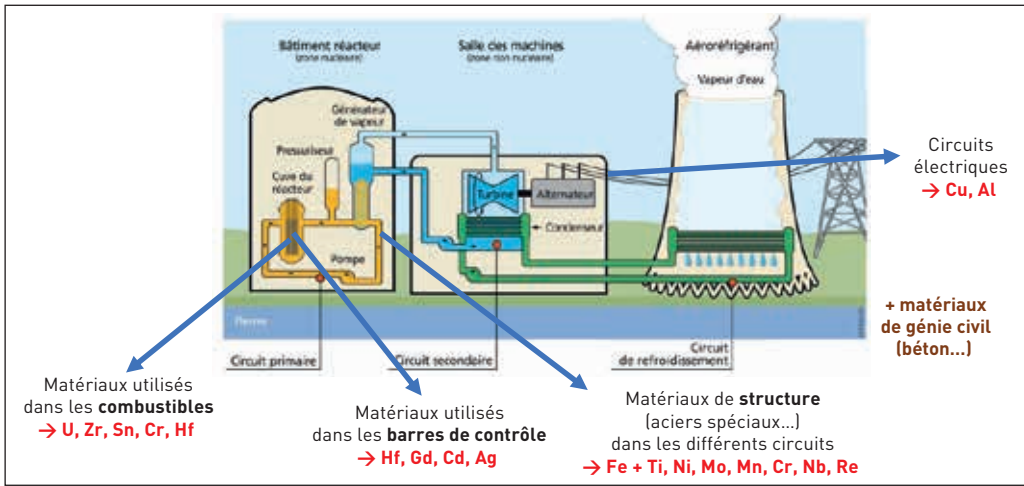


Figure 4

Schéma d'un réacteur nucléaire et principaux éléments requis.

termes de ressources minérales ? Évidemment, ce sont d'abord des matériaux de structure⁹ : dans une centrale nucléaire, ils travaillent dans des environnements très particuliers en termes d'irradiations et de températures. On utilise essentiellement des métaux ou des éléments¹⁰ métalliques dont un certain nombre sont listés ici. On trouve également bien sûr, des circuits électriques avec des conducteurs en cuivre ou

en aluminium¹¹ sur les lignes haute tension et les matériaux nécessaires pour conditionner le combustible : l'uranium et les gaines en zirconium qui vont autour avec des éléments d'alliage comme l'étain ou le chrome. On a encore affaire aux matériaux qui servent à contrôler la réaction nucléaire avec des éléments très spécifiques qui ont des capacités à piéger les neutrons¹². Malgré tout, l'énergie nucléaire requiert peu de ressources minérales par MWh produit comme le montre la **Figure 5**.

9. Un matériau de structure est un matériau choisi pour ses propriétés mécaniques telles que sa résistance ou sa densité. Les matériaux de structure constituent le gros d'un ouvrage.

10. Christophe Poinsot parle durant cette conférence d'éléments dans leur sens chimique : des atomes tels que le fer, le chrome ou l'étain qui seront assemblés sous forme d'alliages par exemple. Les éléments sont notés grâce à leur symbole chimique tels que Fe, Cr et Sn dans notre exemple. Nous invitons le lecteur à se référer à un tableau périodique pour connaître la signification des symboles utilisés dans les illustrations.

11. Ces deux éléments et les suivants sont des matériaux fonctionnels. Ils sont choisis pour leurs propriétés physiques, ici leurs capacités à conduire l'électricité ou à absorber les neutrons.

12. Cette capacité à absorber les neutrons est primordiale puisqu'elle permet d'atténuer la réaction en chaîne et de contrôler la vitesse de la réaction. Il est alors possible de choisir la puissance du réacteur mais surtout d'empêcher qu'il devienne instable. En leur absence, le nombre de fissions et la température augmentent continuellement jusqu'à l'explosion du réacteur.

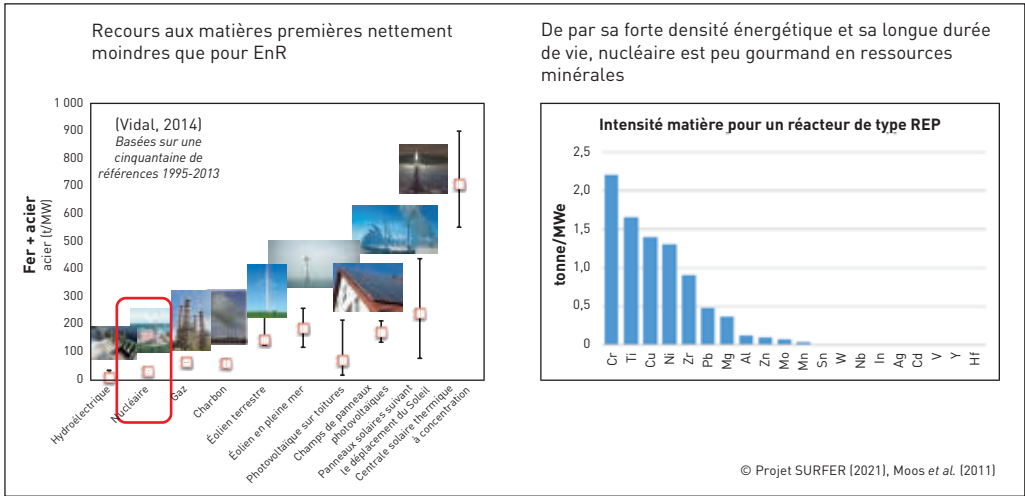


Figure 5

Quantité requise de chaque élément pour un réacteur nucléaire et comparaison avec les autres sources d'énergie des besoins en fer et acier. Estimations en tonnes par MWh installé.

La partie gauche de la **Figure 6** donne une première comparaison des besoins en éléments de structure, en l'occurrence de la quantité d'acier et de fer nécessaire par mégawatt installé selon les différentes sources d'énergie. Il ressort que le nucléaire est, sous ce rapport, sobre en besoins en ressources minérales, sensiblement au même niveau que l'hydroélectrique.

Au-delà de ces éléments majeurs de structure, d'autres éléments chimiques sont indispensables à des niveaux supérieurs à une tonne par mégawattheure produit, mais ils sont en nombre relativement restreint et représentent pour l'ensemble des mégawattheures produits par le nucléaire un volume faible par rapport aux besoins des autres moyens de production. Pour ces éléments, le

nucléaire va se positionner sur le marché de manière plus marginale : ce n'est pas lui qui donnera sa dynamique et imposera sa logique sur le marché. Il sera plutôt dans une logique de niche, et pourra passer au travers d'un certain nombre de difficultés.

En résumé, en termes de besoins en métaux, on a essentiellement affaire à des éléments de structure, à différents matériaux métalliques spéciaux et puis, évidemment, au cuivre qui, en servant à conduire l'électricité, est un invariant de l'ensemble des technologies.

Sur cette base, l'Agence Internationale de l'Énergie a estimé quels pourraient être les besoins pour les prochaines décennies : ils sont présentés sur la partie droite de la **Figure 6**. On distingue deux scénarios :

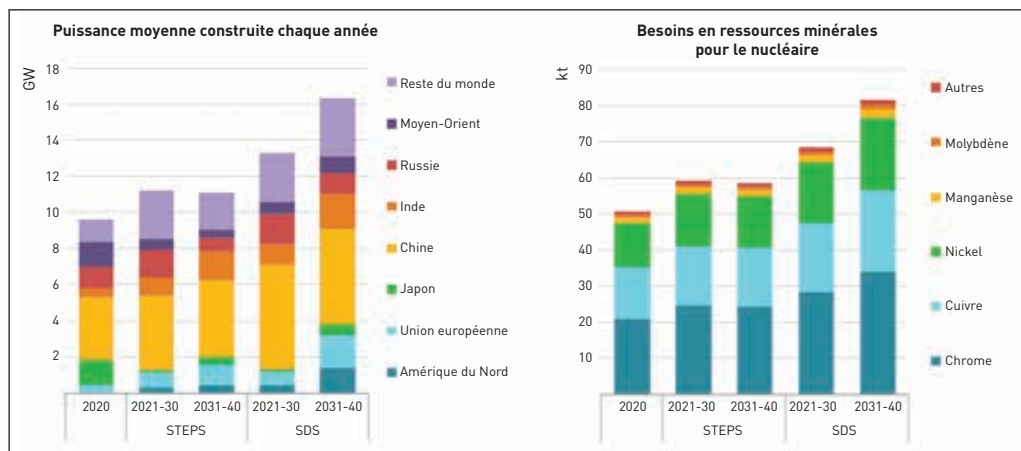


Figure 6

Évolution du parc nucléaire et des besoins associés en ressources minérales (RM).

STEPS¹³ qui correspond aux politiques actuellement décidées et SDS¹⁴ les politiques ambitieuses si l'on veut respecter le 2 °C d'augmentation de température à la fin du siècle. Les besoins sont croissants parce que le parc nucléaire est appelé à croître à l'échelle mondiale, même si ce n'est pas forcément le cas sur notre continent. Ils restent néanmoins faibles, moins de 100 000 tonnes de ressources minérales pour l'ensemble de la production électronucléaire, là où on parlait de dizaines de millions de tonnes toutes filières confondues (voir le chapitre de Patrick d'Hughes). Cela constitue un atout significatif pour le nucléaire dans le monde dans lequel on est en train d'entrer, dans lequel

les ressources minérales vont devenir un déterminant fort sur le développement des pays et sur leur souveraineté.

4.1.2. Quelles sont les menaces qui pèsent sur l'approvisionnement en ressources minérales ?

Pour apprécier l'importance de la disponibilité des ressources minérales dans la période de transition qui s'ouvre, il est important de traiter simultanément des objectifs sur l'énergie et des objectifs sur le numérique.

Les éléments chimiques impliqués sont soulignés sur le tableau de Mendeleïev (**Figure 7**). En bleu, sont indiqués l'ensemble des éléments utiles à la transition énergétique et en jaune, ceux qui sont utiles à la transition numérique. Environ les deux tiers des éléments du tableau de Mendeleïev sont concernés. Ceux qui sont essentiels pour le développement du nucléaire

13. STEPS : *Stated Policies Scenario*, Scénario des politiques décidées.

14. SDS : *Sustainable Development Scenario*, Scénario de développement durable.

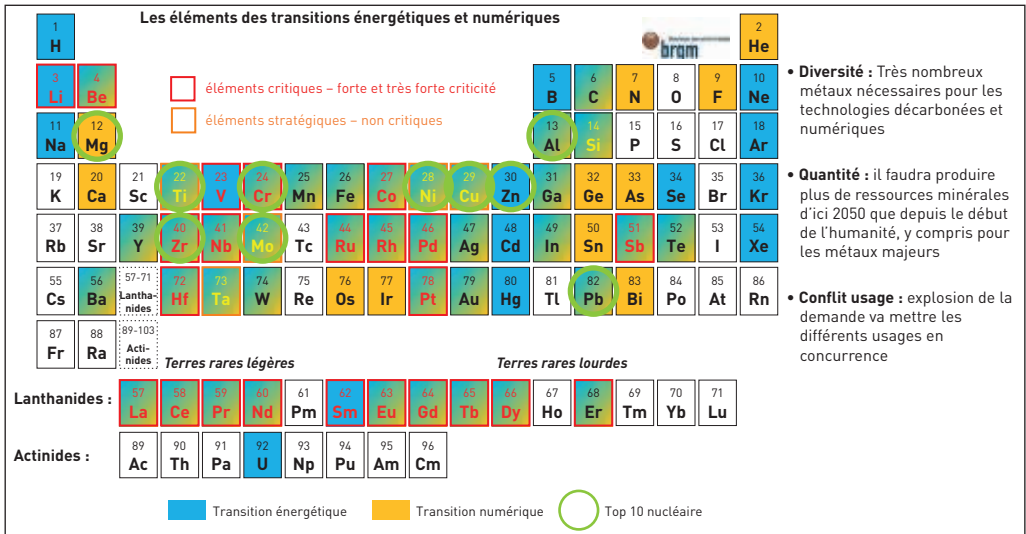


Figure 7

Éléments chimiques d'intérêt pour le nucléaire et les transitions énergétique et numériques.

apparaissent entourés en vert (le top 10).

Insistons sur le fait que malgré le contexte d'explosion de la demande, la situation se présente plutôt favorablement pour le nucléaire qui n'a besoin que de quantités relativement faibles. Néanmoins, il ne faut pas oublier le contexte de concurrence entre les moyens de production énergétique.

Quelques éléments de contexte sont toutefois permanents : un premier point est la **difficulté systémique qu'il y a à ajuster l'offre à la demande** pour les décennies qui viennent. Sur un certain nombre d'éléments majeurs, on va avoir sans doute un décrochage du marché par rapport aux besoins. La **Figure 8** illustre le cas du cuivre. Les mines qui sont aujourd'hui soit en fonctionnement, soit en projet (représentées par les surfaces présentes au bas de la figure), ne permettront pas d'ici 5 à 10 ans de répondre à l'ensemble de la demande qui va aller en s'accroissant, alors qu'il faut une quinzaine

d'années pour ouvrir de nouvelles mines. Nos trajectoires, en termes de décarbonation et de transition énergétique, ne sont pas forcément compatibles avec les ressources disponibles. Ce qui se passe pour le cuivre est exemplaire de la situation générale et impacte toute la filière énergétique : les prix sont extrêmement volatils et il est difficile pour les industriels d'investir dans ce contexte.

Un deuxième point est un message général qui concerne le nucléaire comme le reste. Aujourd'hui, quand on va chercher un certain nombre de métaux, certains n'existent pas tout seuls dans la nature à cause de la géologie et des processus physico-chimiques qui gouvernent la mise en place des gisements. Les métaux principaux que vous allez trouver naturellement sont ceux qui apparaissent dans le cercle bleu central, il y en a une douzaine (**Figure 9**). Ce sont les **éléments majeurs appelés éléments porteurs** et



Figure 8
Prévision du marché du cuivre (copper) et évolution passée de son prix.

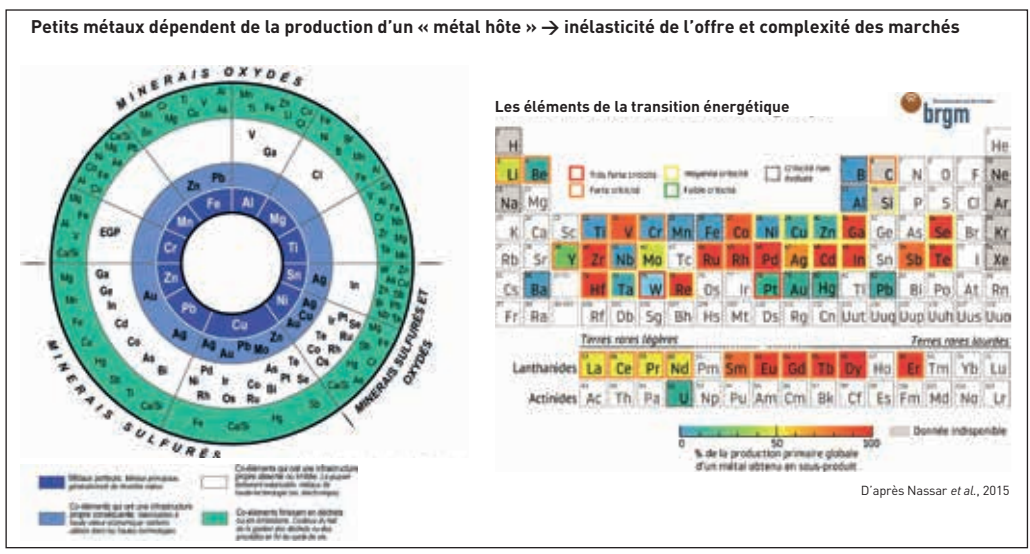


Figure 9
De nombreux éléments ne sont pas directement extraits.

ce sont les ressources principales recherchées dans un gisement. Tous les autres, vous allez les trouver en **produits secondaires**, c'est-à-dire qu'ils sont présents mais en faible quantité et ne justifient pas à eux seuls l'ouverture d'un gisement. Par contre, si vous allez ouvrir un gisement pour

la ressource principale, vous pouvez les récolter au passage. Une conséquence considérable est que, pour les éléments qui ne sont pas dans le cercle bleu, ce qui va gouverner leur disponibilité ou leur non-disponibilité n'est finalement pas le besoin que vous en avez, mais plutôt le besoin que vous avez

pour l'élément majeur qui gouverne le marché. Il s'agit là de quelque chose d'extrêmement important et impactant sur les marchés.

Quand on regarde quels sont les éléments concernés dans un tableau de Mendeleïev, ceux qui apparaissent en rouge sont les produits secondaires ; ils concernent un gros tiers du tableau de Mendeleïev, dont certains, en nombre relativement faible, sont nécessaires aux installations nucléaires comme le molybdène, le zirconium ou le cobalt. Cependant, **l'essentiel des éléments dont on aura besoin pour le nucléaire fait partie des éléments majeurs et aura peu de risques de rupture d'approvisionnement.**

4.1.3. Un approvisionnement maîtrisé en France : le hafnium

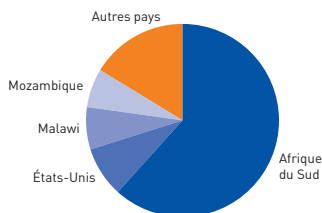
Le hafnium est un cas intéressant qui sert pour le nucléaire : il est utilisé dans la gestion des

réacteurs pour ses propriétés de poison neutronique¹⁵. On ne trouve pas d'hafnium tout seul dans la nature (**Figure 10**), mais seulement en ressource secondaire du zirconium qui sert lui-même pour le nucléaire, ce qui lie les deux marchés par un même usage. Le hafnium s'obtient en purifiant le zirconium où il est naturellement présent et cette purification est indispensable pour garantir le bon déroulement de la réaction neutronique. La France produit du zirconium pour ses usines de production de combustible nucléaire et est actuellement pour cette raison un des plus gros producteurs mondiaux d'hafnium. Signalons cette situation : le hafnium sert les besoins du nucléaire mais

15. Un tel matériau est utilisé afin de réguler la réaction en chaîne qui se produit dans le réacteur. Il est capable d'absorber des neutrons sans en réémettre, ce qui ralentit la réaction.

- Hafnium = **impurétés** dans les minéraux de Zr (zircon et baddeleyite) avec un ratio de 1/50.
- Pas de mine de Hf, la **production primaire est métallurgique**, à partir de résidus provenant de la purification du $ZrCl_4$ lors de la fabrication du Zr métal (gaine combustible nucléaire).
- Production d'hafnium métal est « **quasi-fatale** » puisqu'il est nécessaire de retirer le Hf du zirconium utilisé comme gaine pour les combustibles nucléaires.
- **Framatome (Jarrié)** : 1^{er} producteur mondial d'éponges d'hafnium métal devant US (EU, 2020)
- Mais reste **dépendant des importations de minerais de Zr** : 19 kt/an provenant à 87 % d'Afrique → **dépendance à l'évolution du marché des combustibles nucléaires**

Principaux pays fournisseurs



Source : https://lekiosque.finances.gouv.fr/site_fr/NC8/recherche.asp?t=2&iter=2&CS=zirconium

Figure 10

Le hafnium, un sous-produit du zirconium.

sert aussi dans d'autres technologies comme la microélectronique, une retombée du nucléaire intéressante souvent ignorée !

4.1.4. Comment sécuriser l'approvisionnement européen en ressources minérales ?

La discussion qui précède montre que l'Europe est dans une situation d'extrême dépendance vis-à-vis de ses importations de métaux (**Figure 11**). Cela a été dit de manière générale à propos du nucléaire, mais s'applique aux autres technologies. Cette situation résulte de ce que l'on a désinvesti notre industrie primaire et aussi notre industrie extractive pour investir dans des pays à bas coût de main-d'œuvre et à faible réglementation environnementale. Aujourd'hui, on est à quelques exceptions près absents du paysage mondial et on se repose intégralement sur les importations.

Pour corriger cette situation (**Figure 12**), il est indispensable :

– de développer une meilleure connaissance, une meilleure intelligence des chaînes de valeur minérale ;

– de développer **une industrie du recyclage**, indispensable mais qui ne répondra pas à l'intégralité de la demande ;

– de développer, par conséquent, **une industrie minière à l'échelle européenne** et française, les annonces récentes sur le lithium¹⁶ sont un premier pas mais on peut aller beaucoup plus loin.

Dernier point mais tout aussi important, il faut **maintenir notre positionnement à l'international** pour préserver les approvisionnements en ressources absentes du territoire européen, tout en garantissant les normes environnementales et sociétales les plus strictes. C'est le sens de l'engagement de la France

16. Le 17 octobre 2022, Emmanuel Macron a annoncé vouloir développer des mines de lithium en France afin d'exploiter les gisements relativement importants du pays.

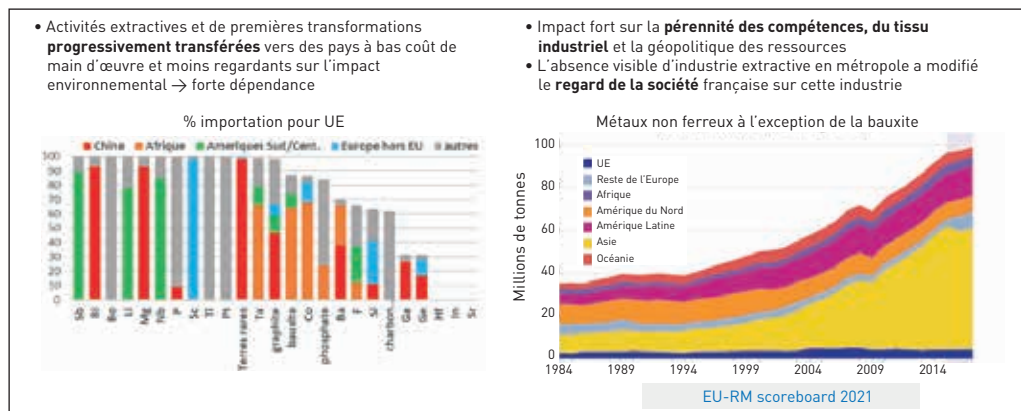


Figure 11

Origine des importations en Europe de métaux et principales régions productrices de métaux.

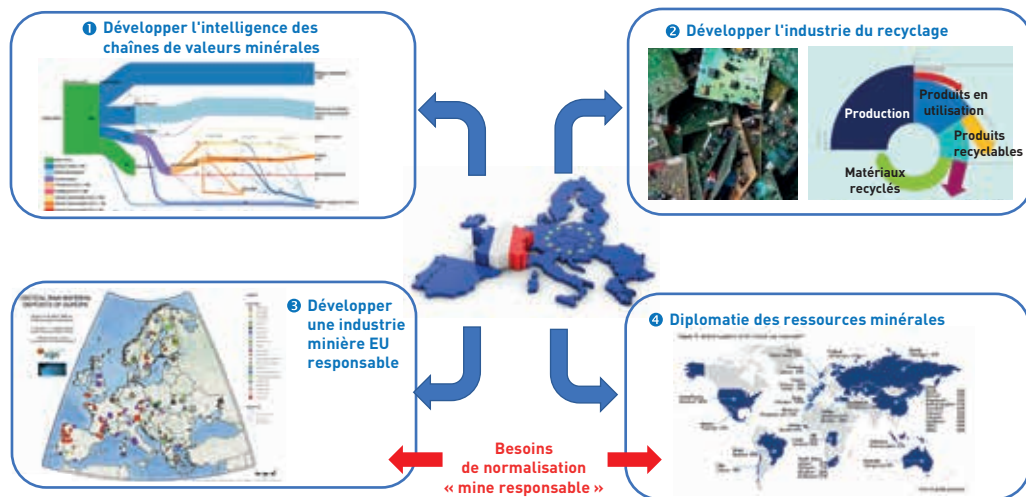


Figure 12

Stratégies possibles pour l'UE afin de garantir sa souveraineté en ressources minérales.

et des engagements que prend la France dans le développement de la normalisation de la mine responsable.

4.1.5. Conclusion sur les métaux stratégiques

Le paysage qui vient d'être présenté concernant les risques d'approvisionnement en matériaux stratégiques pour le nucléaire fait ressortir que, par rapport aux autres énergies – en particulier décarbonées –, l'énergie nucléaire est relativement désensibilisée. Ses besoins ne sont pas du tout du même ordre de grandeur que ceux des énergies renouvelables : il n'y a pas de gros risques même s'il faut rester vigilant.

4.2. L'approvisionnement en combustible

4.2.1. Cas du zirconium : peu de risques en termes d'approvisionnement

Au-delà des besoins en ressources minérales, l'électro-nucléaire a également besoin de combustibles. Il s'agit

essentiellement d'uranium dans une gaine métallique faite en alliage de zirconium.

Qu'en est-il aujourd'hui de la disponibilité de cette matière sur le marché mondial et du risque éventuel pour l'industrie nucléaire qui lui serait associé ? La **Figure 13** représente un assemblage de combustibles irradiés ; il s'agit d'une sorte de fagot de crayons de combustible dans lequel on a des gaines d'environ 1 cm de diamètre dans lesquelles on vient empiler sur 4 mètres de haut des pastilles d'uranium. Ces gaines sont faites d'un alliage de zirconium constitué principalement du zirconium et des éléments d'alliage comme l'étain, le fer, le chrome, le nickel et d'autres plus minoritaires. Le zirconium, qui reste l'essentiel de la matière dont on a besoin pour la gaine, est utilisé sous forme métallique qui ne représente pour le zirconium que 3 % du marché (1,3 million de tonnes). Dans ces 3 % de zirconium métallique, 2 % sont liés au nucléaire et 1 % à d'autres

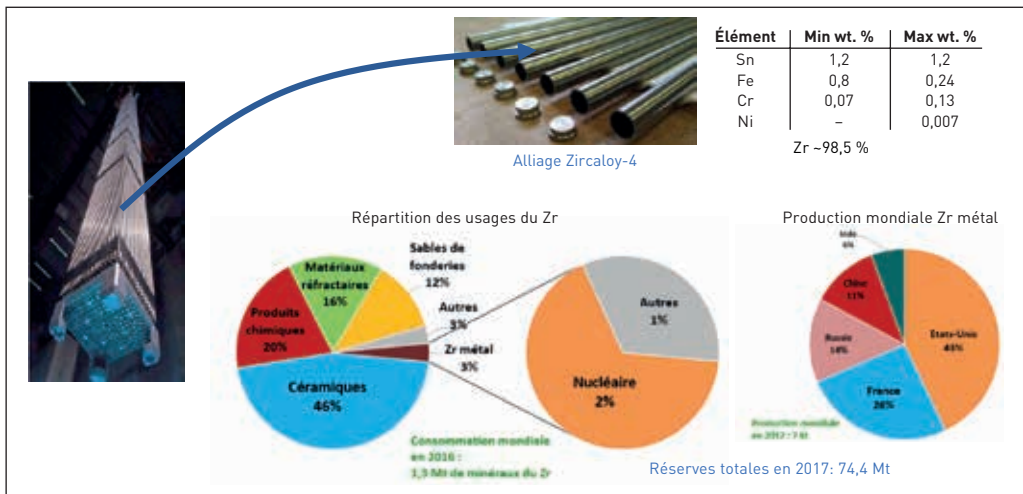


Figure 13

Marché du zirconium.

usages. Le nucléaire reste très minoritaire.

La répartition mondiale des sources de zirconium ne fait pas craindre une dépendance majeure envers un pays quelconque. Les deux grandes sources sont les États-Unis et la France, sachant que dans le graphe sont considérées la ressource minière et la localisation des industries de transformation, ce qui explique la présence de la France très active dans ce domaine via l'opérateur Framatome.

Les ressources mondiales sont estimées à 75 millions de tonnes. Comparé au faible volume dont on a besoin chaque année pour le nucléaire, il n'y a pas de problème d'approvisionnement à court terme : on a en fait plus de 50 ans d'autonomie sur ce sujet-là, ce qui nous laisse largement le temps pour anticiper et faire évoluer les technologies.

4.2.2. Étude du marché présent et futur de l'uranium

Aujourd'hui, les besoins en uranium à l'échelle mondiale

sont évalués à environ 60 000 tonnes par an pour les 400 réacteurs nucléaires dans le monde qui représentent à peu près 400 gigawatts électriques de puissance installée (Figure 14). Les demandes sont bien réparties entre l'Union européenne, l'Amérique du Nord et l'Asie qui représentent quasiment les trois quarts de la demande mondiale. Actuellement, quand on regarde du côté de la production, on est proche de 55 000 tonnes avec comme acteur principal le Kazakhstan qui représente environ 40 % du marché mondial, le Canada, l'Australie et la Namibie sont d'autres acteurs importants. La Figure 14 montre que les ressources disponibles sont réparties sur l'ensemble des continents, à l'inverse du pétrole qui est localisé dans certaines zones de façon très concentrée.

Qu'en est-il des besoins futurs ? La Figure 15 reproduit les chiffres qui proviennent du « livre rouge » écrit tous les deux ans par l'Agence pour

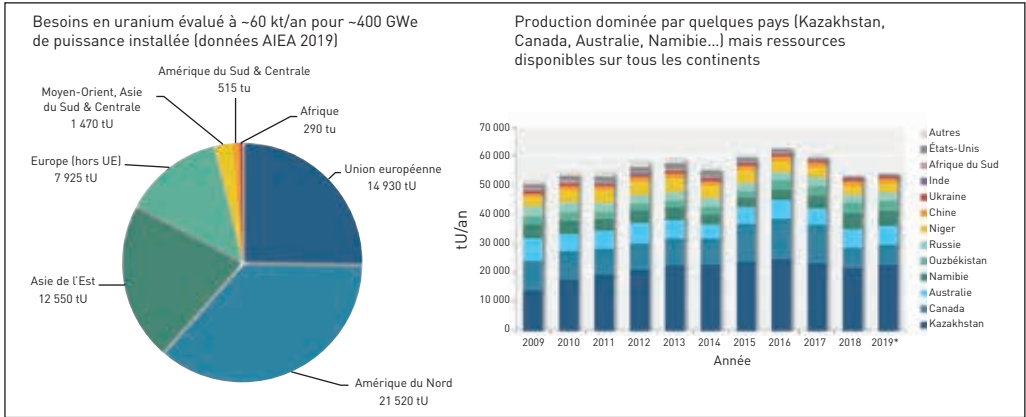


Figure 14

Marché de l'uranium.

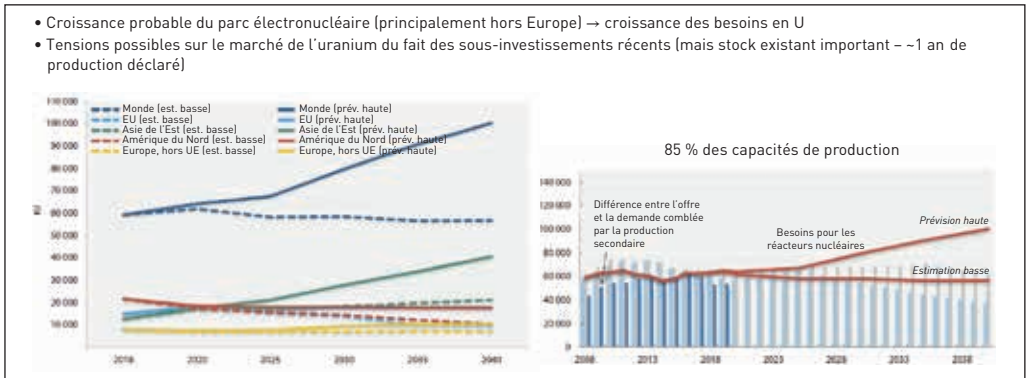


Figure 15

Prévision du marché mondial de l'uranium.

l'énergie nucléaire et l'Agence internationale de l'énergie atomique. Ils donnent les prévisions de croissance faites en 2020 sur les besoins en uranium pour les 20 ans qui viennent. Il y a deux scénarios : un scénario de valeurs hautes, optimiste sur le développement du nucléaire en traits continus, puis un scénario plus pessimiste, de valeurs basses

en traits pointillés. Dans le pire des cas, les besoins sont constants et, dans le cas le plus favorable au nucléaire, ils vont naturellement augmenter. Pour donner un ordre de grandeur, on parle d'un facteur légèrement inférieur à un facteur 2 en 20 ou 30 ans. Quand on compare ces prévisions à la situation du marché, on voit qu'à très court

terme il n'y a pas de risques.

Par contre, si l'on n'ouvre pas de nouvelles mines, on aura un écart qui se creusera sur le moyen-long terme. La **Figure 15** suppose qu'il n'y a que 85 % des mines qui sont en fonctionnement par suite des aléas de l'exploitation industrielle : cette valeur correspond à la moyenne constatée ces dernières décennies. Tout cela amène deux commentaires, le premier est qu'il faut avoir conscience que des mines sont aujourd'hui à l'arrêt parce qu'elles n'étaient pas rentables avec des cours de l'uranium très bas, et qu'elles réouvriront dès lors que les cours remonteront suite à des tensions sur le marché. Le deuxième point est que des réserves existent dans un certain nombre de pays, ce qui devrait permettre de lisser les cours.

Qu'en est-il sur le très long terme pour les ressources en uranium ?

La **Figure 16** donne la répartition des différentes ressources à l'échelle mondiale. Pour l'essentiel, on retrouve les pays mentionnés plus haut : l'Australie est clairement en tête en termes de ressources connues, suivie par le Canada, le Kazakhstan, la Namibie, le Niger et l'Afrique du Sud qui sont les principaux pays dans lesquels on a des réserves d'uranium conséquentes. Le trait continu en bas de la figure donne le besoin annuel mondial ; les réserves sont largement au-dessus, et ce ne sont que les réserves connues. Plus le cours de l'uranium va augmenter, plus on va investir pour faire de la prospection et plus on va trouver d'autres ressources. Aujourd'hui, on estime donc avoir plus de

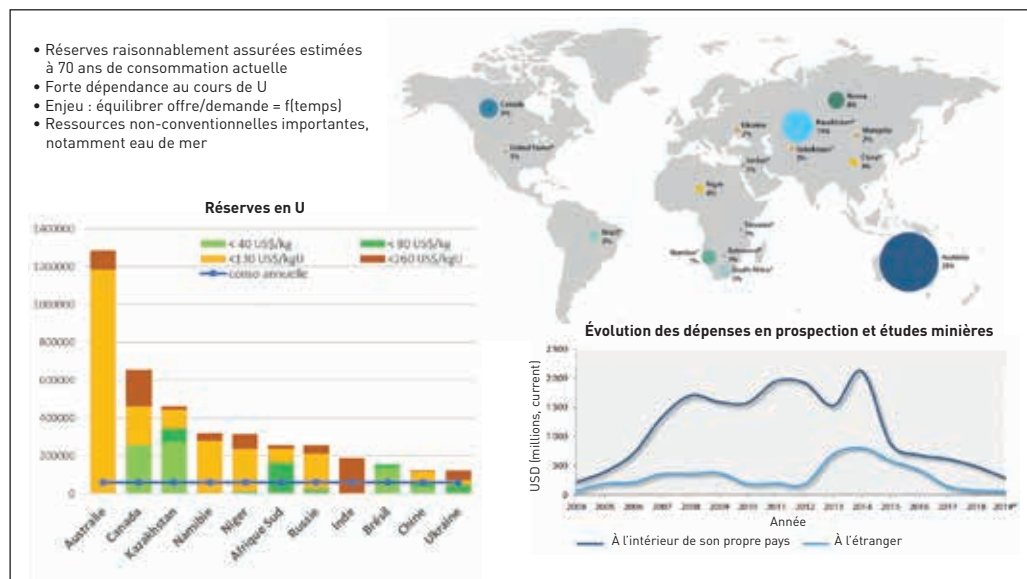


Figure 16

Réserves mondiales en uranium et importance de la prospection.

70 ans de disponibilité avec comme enjeu l'équilibre offre-demande en fonction du temps, et que cette valeur est susceptible de considérablement augmenter dès lors qu'une prospection plus active redémarrera.

4.2.3. Comment mieux utiliser nos réserves d'uranium ?

Dans le nucléaire comme ailleurs, le recyclage peut permettre d'économiser significativement la ressource naturelle, en l'occurrence l'uranium. La **Figure 17** montre les ordres de grandeur des besoins en uranium pour faire fonctionner le parc nucléaire français dans la décennie 2010 (la baisse de production électronucléaire en 2021-2022 n'est pas prise en compte). On voit qu'on a ainsi besoin de 1 200 tonnes de combustible (uranium enrichi)

année après année, ce qui requiert une quantité de minerai d'uranium naturel beaucoup plus importante du fait des pertes inévitables lors de l'enrichissement¹⁷ : de l'ordre de 9 500 tonnes de minerais d'uranium. On décharge pratiquement autant de combustible qu'on en charge, à savoir 1 200 tonnes. Dans le combustible utilisé, il reste encore environ 95 % de l'uranium qui n'a pas été transformé.

17. Le minerai d'uranium contient principalement deux isotopes qui diffèrent par leur nombre de neutrons : ^{238}U et ^{235}U . Seul ce dernier est capable de réaliser une fission nucléaire mais il n'est présent qu'à une concentration de 0,72 %. Des opérations de purification de cet isotope sont réalisées et c'est l'uranium enrichi obtenu qui est utilisé en tant que combustible dans les réacteurs. Le reste est appelé uranium appauvri et connaît d'autres applications.

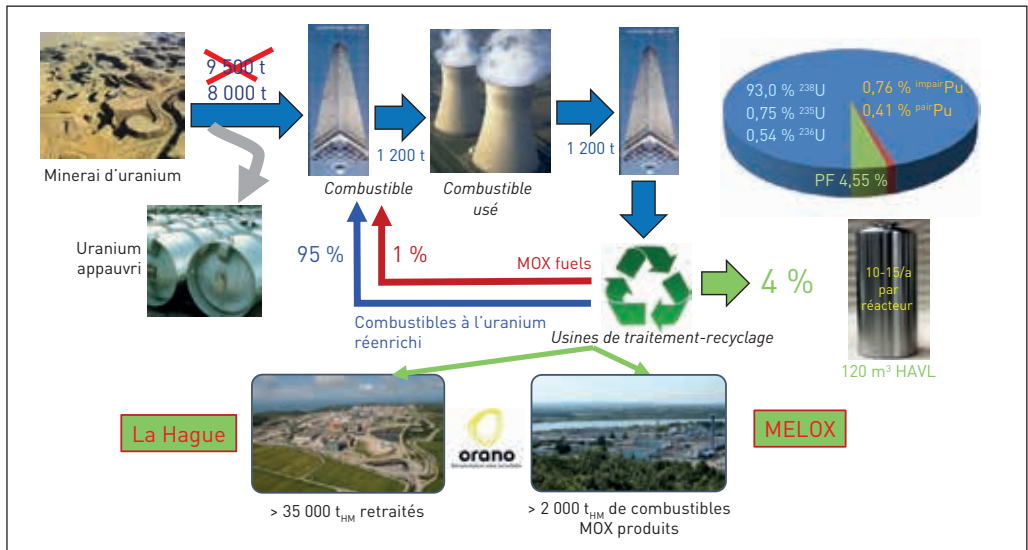


Figure 17

Cycle de l'uranium en France.

Une partie de cet uranium est utilisable : certes, l'isotope fissile a décrépu puisqu'il a été largement utilisé, mais il reste néanmoins plus concentré que dans le minerai naturel. On a également du plutonium qui contient des isotopes fissiles. La partie des déchets ultimes¹⁸ qui ralentissent la réaction neutronique reste finalement relativement faible, entre 4 et 5 %.

Tout cela milite pour mettre en place un recyclage et réutiliser ces 95 % d'uranium ainsi que le plutonium fissile présent (1 %). C'est le choix qu'a fait la France depuis longtemps avec ses usines de traitement-recyclage qui recyclent les matières fissiles (uranium et le plutonium) sous forme de combustible MOX¹⁹ pour le plutonium, et de combustible URE (pour uranium réenrichi) pour l'uranium. En mettant en place ces deux recyclages, la France économise à peu près 20 % de la ressource en uranium : en ordre de grandeur, 10 % pour chacune des deux branches rouge et bleu. Cela permet aussi d'isoler les déchets

18. Déchets ultimes ou HAVL pour Haute Activité Vie Longue : il s'agit de la part de déchets nucléaires ne pouvant pas être recyclés du fait de leur dangerosité sur une longue période. Ils sont enrobés dans des fûts en verre pour éviter les fuites et sont généralement enfouis en profondeur.

19. MOX : *Mixed Oxides*, mélange d'oxydes. Il s'agit d'un mélange contenant de l'uranium 238 et du plutonium pouvant être utilisés en tant que combustible. Le plutonium est radioactif et les neutrons émis par sa fission transforment l'uranium en davantage de plutonium, ce qui permet d'utiliser un isotope de l'uranium auparavant inutile.

radioactifs et de pouvoir les confiner dans une matrice beaucoup plus performante et efficace qu'en les laissant au sein des combustibles usés. Il s'agit là d'un savoir-faire qu'a développé la France au travers des usines de La Hague et de Melox qui fonctionnent avec succès depuis plus de 40 ans. Il s'agit d'un élément de réponse à la question : « Dans quelle mesure le recyclage est-il capable de réduire nos besoins en uranium et par conséquent d'augmenter la durée de vie et notre autonomie sur cette ressource ? »

Mais on pourrait faire encore mieux. En effet, en changeant les réacteurs actuels pour des réacteurs à neutrons rapides, c'est-à-dire utilisant des neutrons beaucoup plus énergétiques (**Figure 18**), on pourrait mettre en place un multirecyclage et gagner encore sur l'utilisation du combustible. On pourrait alors, en principe, utiliser tous les isotopes de l'uranium et du plutonium et aller beaucoup plus loin dans l'utilisation de la ressource, car on consommerait la totalité de l'uranium et du plutonium et non pas les seuls isotopes fissiles minoritaires. Les besoins en ressources naturelles seraient alors évidemment beaucoup plus faibles : pour alimenter un parc de réacteurs nucléaires comme celui que l'on a en France, 50 tonnes d'uranium appauvri par an seraient suffisantes au lieu des 8 000 tonnes d'uranium naturel dont on parlait tout à l'heure. Sachant qu'on dispose aujourd'hui en France d'environ 450 000 tonnes d'uranium appauvri résultant des opérations d'enrichissement

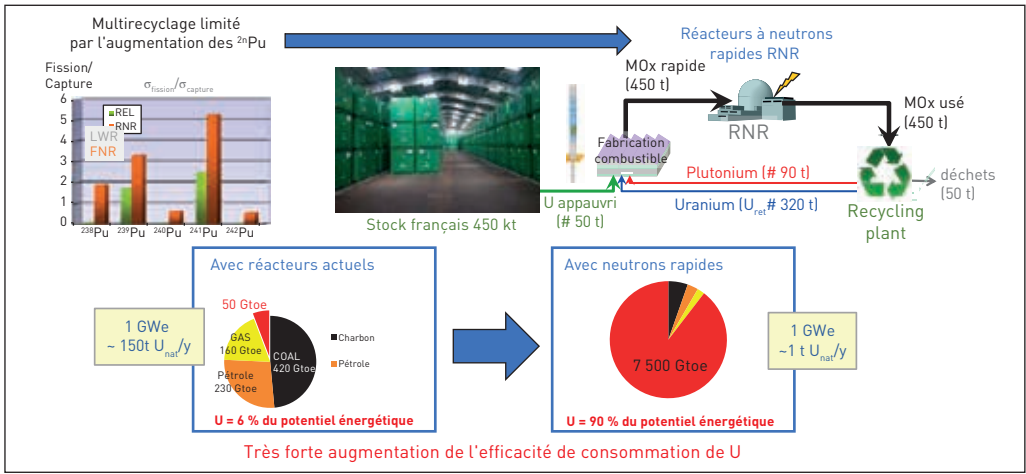


Figure 18

L'utilisation possible du plutonium en tant que combustible nucléaire.

conduites ces dernières décennies. Cette réserve est énorme et changerait considérablement le paysage si on se mettait en mesure de l'exploiter puisqu'elle permettrait de garantir une production électrique de plusieurs milliers d'années sans nécessiter aucune nouvelle extraction d'uranium du sous-sol, sans dépendre d'aucune importation.

La **Figure 18** donne une illustration de ces fonctionnements : sur la partie gauche, c'est le réacteur dit thermique (réacteur actuel) où on utilise 150 tonnes d'uranium naturel pour faire un gigawatt électrique. La quantité d'uranium sur terre

représente 50 gigatonnes équivalent pétrole, ce qui reste relativement faible par rapport aux ressources en pétrole, en gaz et en charbon. Mais si on utilise les réacteurs à neutrons rapides mentionnés précédemment, il ne faut plus qu'une tonne d'uranium pour faire un gigawatt : on obtient alors une équivalence d'environ 7 500 gigatonnes de pétrole. L'uranium devient alors la réserve énergétique principale car dans les filières de réacteurs à neutrons rapides, le potentiel énergétique de la ressource uranium est considérablement multiplié et que, d'autre part, les stocks d'uranium appauvri peuvent être utilisés.

Conclusion

Ce chapitre a voulu faire ressortir les messages suivants (**Figure 19**) :

- La transition énergétique requiert de **développer des énergies décarbonées** qui sont des énergies extrêmement gourmandes en ressources minérales, à l'exception de l'une

- Transition énergétique \Leftrightarrow énergies décarbonées \Rightarrow ressources minérales \uparrow
 - Passage d'une dépendance aux énergies fossiles à une dépendance aux ressources minérales
 - \Rightarrow nouvelles dépendances géopolitiques
- Dans ce contexte, **faible dépendance** du nucléaire aux ressources minérales est un atout indéniable alors que l'accès aux métaux stratégiques risque de devenir un frein à la transition énergétique
- Même si les ressources en U restent abondantes à l'échelle du siècle \Rightarrow incertitude sur l'adéquation offre / demande à moyen-terme
 - Augmenter les investissements dans l'amont du cycle.
 - Recyclage des combustibles permet un gain significatif en U.
 - Multirecyclage grâce à des RNR pourrait permettre à long-terme de s'affranchir de la problématique des ressources en U
- Combustibles nucléaires contiennent des **métaux stratégiques** (PF)
 - Seuls Ru et Rh présentent un intérêt malgré problématique du stockage
 - Opportunité d'utilisation dans la sphère nucléaire \Rightarrow Enjeu de traçabilité

Figure 19

Diapositive de conclusion.

d'entre elles qui est le nucléaire. De ce point de vue, le nucléaire présente un intérêt éminent pour pallier les éventuels risques de rupture sur les approvisionnements au-delà de l'intérêt évident qu'il présente du fait de sa capacité à produire en continu (sans intermittence) sur de très longues périodes (> année).

- Le deuxième point est qu'en termes de ressources de fonctionnement du nucléaire, il n'y a clairement **pas de risque à court terme de rupture d'approvisionnement**, ni sur l'uranium qui constitue le combustible, ni sur le zirconium qui permet de fabriquer les matériaux de gainage.

- À technologie de réacteurs constante, il y a néanmoins des risques d'à-coup à moyen terme et **il est indispensable de réinvestir dans l'amont du cycle** pour être en mesure de répondre aux besoins croissants. Le choix du recyclage qu'a fait la France constitue une option particulièrement pertinente pour réduire ces risques de tensions dans l'amont du cycle.

- En développant les **réacteurs à neutrons rapides** dont elle maîtrise la technologie, la France pourrait également s'affranchir totalement de tout nouveau besoin en uranium et être en capacité de produire de l'électricité

durant plusieurs millénaires en consommant les stocks d'uranium appauvri présents sur son territoire.

- **Dans les produits de fission sont présents des éléments stratégiques**, et il peut être intéressant d'en valoriser certains. Il faut toutefois une phase d'entreposage préalable pour permettre leur décroissance radioactive, principalement pour deux d'entre eux de la famille des platinoïdes utilisés pour la catalyse²⁰ : ruthénium et rhodium.

À retenir : le nucléaire est beaucoup moins consommateur que les énergies renouvelables en ressources minérales et présente de ce point de vue un intérêt économique, stratégique et environnemental certain dans le cadre de la transition énergétique.

20. Les catalyseurs sont des substances permettant par leur présence de réaliser plus facilement et rapidement un grand nombre de réactions chimiques. Ils ont généralement un coût très élevé.