

# Fiche de synthèse

## MIG Ressources minérales pour la transition énergétique

Décembre 2019

Dans le contexte actuel du changement climatique, il est urgent de limiter nos émissions de gaz à effet de serre, principalement dues à l'utilisation des combustibles fossiles. Pour cela, il est nécessaire de développer des technologies innovantes et durables en ce qui concerne la production et le stockage d'énergie. Les articles produits dans le cadre de notre MIG ont pour but d'évaluer le potentiel de développement à grande échelle de ces différentes technologies en soulevant les enjeux techniques, économiques, sociaux, géopolitiques et environnementaux liés aux ressources qu'elles nécessitent.

Les énergies renouvelables telles que l'éolien ou le solaire, l'énergie nucléaire et les batteries sont en plein essor : leur demande a très fortement augmenté ces dernières années, ce qui implique une hausse de la production de leurs constituants, et des moyens mis en place pour extraire les métaux nécessaires. La viabilité économique et technique de la mise en place à grande échelle de telles technologies dépend en effet directement des ressources disponibles.

L'industrie des ressources minérales distingue les réserves et les ressources. Les réserves constituent la part des ressources dont on a prouvé l'exploitabilité technique et économique. Outre le fait que les réserves sont donc dépendantes des techniques d'extraction disponibles à un temps donné et des prix du marché, leur qualification nécessite un investissement que les entreprises ne réaliseront que lorsqu'il leur sera nécessaire pour rassurer les investisseurs (pour lesquels il est essentiel qu'une entreprise minière dispose d'un minimum de réserves, étant donné que c'est ce qui conditionne sa durée de vie). Les ressources s'affranchissent de ces contraintes, et regroupent l'ensemble des tonnages identifiés par des travaux de prospection, voire parfois des modèles géologiques.

Nos modélisations ont pour objectif, dans chacun des cas traités, de donner un ordre de grandeur du temps qu'il nous reste avant l'épuisement des substances nécessaires aux différentes technologies ainsi que de savoir si celles-ci seront suffisantes pour assurer la transition énergétique. C'est donc l'indicateur des ressources qui est pertinent. L'indicateur « réserves » pourra quant à lui faire sens sur des questions relatives à la capacité de croissance de la production des substances sur le court et moyen terme.

Enfin, le recyclage se présente comme un incontournable, à la fois pour repousser les échéances d'épuisement, pour permettre des croissances rapides de production de certaines substances, et enfin pour diminuer les impacts environnementaux des technologies vertes.

### Métaux mineurs, métaux majeurs

En amont de la mise en place de ces technologies, il faut tout d'abord s'assurer de l'approvisionnement en différents composants et surtout évaluer si les ressources dont on dispose sur Terre sont suffisantes, d'autant que la demande en métaux est en très forte croissance actuellement. Certains d'entre eux, essentiels à l'industrie, et rares (ou du moins dont la répartition géographique est très polarisée, sujette à des monopoles), sont qualifiés de critiques, et sécuriser leur approvisionnement est un enjeu national.

Or, l'abondance et la consommation des métaux, bien que croissante, est très variable. C'est pourquoi ils peuvent être répartis en trois catégories : majeurs, mineurs et sous-produits. Même si les familles de métaux telles que les terres rares ou les platinoïdes font partie des métaux mineurs, elles présentent des effets de couplage qui justifient leur traitement spécifique. Si les métaux majeurs, tels que le cuivre, ont une production actuelle de plusieurs millions voire milliards de tonnes et sont très abondants, les métaux mineurs, tels que le lithium, ont une production moindre et leur stock risque d'être épuisé d'ici quelques décennies. On qualifie de sous-produit un métal qui est produit uniquement lors de l'extraction d'un métal (majeur), et dont l'extraction seule n'est pas viable économiquement ; c'est par exemple le cas du cobalt dans la grande

majorité des mines. Enfin les terres-rares, abondantes mais à faible concentration, ont la particularité d'être extraites simultanément et indistinctement, de sorte que leurs marchés sont très interdépendants. Ainsi, dans un contexte de croissance de la demande, l'objectif de l'article est de modéliser les productions et marchés futurs pour chacune de ces catégories, afin d'estimer si la transition énergétique est viable (et à quelle échelle).

## **Recyclage et mines urbaines**

Comme les ressources en métaux sont limitées et diminuent rapidement en raison d'une production toujours croissante, le recyclage est non seulement une solution pertinente pour ralentir l'épuisement progressif des métaux, mais aussi un bienfait pour l'environnement. De plus, le recyclage permet de faire des économies non négligeables et est une source secondaire en minerai totalement indépendante de la production minière. Ainsi, recycler permet donc de s'affranchir partiellement des intérêts des grands pays producteurs tels que la Chine ou la RDC.

Aujourd'hui, le taux de recyclage de la plupart des métaux est variable (28% pour le cuivre, moins d'1% pour le lithium), ce qui est dû à la proportion d'usages dispersifs, au taux de collecte, à l'efficacité du procédé de recyclage et à la rentabilité économique de sa mise en place systématique. De plus, la quantité de métal recyclée chaque année est calculée à partir de la quantité de métal présente dans les systèmes un certain nombre d'années auparavant correspondant à la durée de vie moyenne de ces systèmes. La croissance de la demande impose donc que la part de métal effectivement recyclée est en réalité inférieure au taux de recyclage.

D'un point de vue technique, les procédés de recyclage sont multiples : hydrométallurgie, pyrométallurgie, séparation physique ... Ces briques technologiques s'assemblent pour recouvrer un métal utilisable. Pourtant, celles-ci ne sont pas toujours suffisamment efficaces en ce qui concerne la pureté du métal final.

## **La dépendance en ressources minérales des énergies éoliennes et solaires**

L'éolien et le solaire sont deux énergies renouvelables centrales de la transition énergétique.

En ce qui concerne le solaire, différentes technologies s'affrontent et si à l'heure actuelle les cellules à couches minces utilisent moins de matière et sont donc plus légères, les cellules au silicium sont plus fréquemment utilisées étant donnée l'abondance de cet élément sur terre. Nos modélisations montrent qu'une contribution significative de panneaux CIGS ou CdTe (à couches minces) à la production d'électricité mondiale est irréalisable en termes de ressources et production mondiale des métaux utilisés, notamment le gallium, l'indium, ou le tellure qui sont tous les trois des sous-produits d'autres substances.

La technologie principalement utilisée dans les éoliennes est celle qui fait appel à des alternateurs bobinés, dont les constituants en cuivre ne posent pas de problèmes immédiats en termes de ressources et d'approvisionnement. Les autres technologies utilisent les aimants permanents, riches en terres rares et généralement privilégiés dans les éoliennes off-shore car ils demandent moins d'entretien. Or le néodyme et le dysprosium sont deux métaux critiques dont la production est très majoritairement contrôlée par la Chine.

Par ailleurs, les éoliennes sont de grandes consommatrices de ressources en acier et béton, deux matériaux dont les procédés de fabrication sont très polluants en carbone. L'intermittence inhérente à ces technologies pose également un problème logistique qui rend une production d'énergie entièrement renouvelable impossible.

## **Les batteries Li-Ion pour le stockage d'énergie**

Pour réussir la transition énergétique et pallier l'intermittence de la production des énergies renouvelables, il est nécessaire de développer des technologies de stockage. Les batteries lithium-ion constituent une technologie prometteuse en pleine croissance suite l'explosion du marché des véhicules électriques. La limitation des ressources en métaux utilisés et l'augmentation drastique de la demande depuis 2016 font que certains métaux (lithium et cobalt) sont critiques, et assurer leur approvisionnement est donc un enjeu majeur. A plus long terme, la disponibilité de ces métaux pose problème, et pourrait empêcher la poursuite de la transition énergétique.

Le recyclage reste peu développé actuellement (seules 3% des batteries Li-ion dans le monde sont recyclées). Toutefois, malgré les difficultés techniques liées à chacune des technologies de batteries, ces dernières pourront facilement être collectées dans les garages, ce qui constituera une source secondaire de métaux pour les batteries.

Enfin, le projet européen d’“Airbus de la batterie” et la course technologique au développement de nouvelles technologies de cathodes à base de fer et de phosphate, qui ne sont pas des métaux critiques, permettront peut-être de contourner les difficultés liées à la disponibilité de cobalt et/ou de lithium.

## **Potentiel du Lithium alsacien pour l’approvisionnement français**

Le lithium est un composant essentiel des batteries Li-ion. Alors que la consommation française ne cesse de croître, la France ne dispose d’aucune production propre de ce métal. Les saumures géothermales alsaciennes, riches en minéraux se présentent aujourd’hui comme une opportunité de production nationale et de sécurisation de l’approvisionnement de lithium.

Le processus permettrait d’assurer 30 à 40% de la demande industrielle française mais pour quelques années seulement. La production chute en effet rapidement d’un facteur deux voire trois. Ainsi, on peut estimer que la production de lithium à partir des saumures géothermales ne pourra représenter un tiers des besoins français qu’à la condition de mettre une dizaine de puits en fonctionnement, ce qui paraît difficilement envisageable, étant donné le rythme de mise en place de sites de géothermie profonde. Une meilleure solution pour assurer une indépendance nationale serait d’exploiter des gisements de lithium minéral, tels que celui connu à l’aval de la carrière des kaolin de Beauvoir.

Il est finalement intéressant de noter qu’au niveau international, les ressources connues permettraient d’assurer le développement de la mobilité électrique, dès lors que le lithium contenu dans les batteries serait recyclé, avec une technologie permettant la réutilisation du lithium recyclé dans les batteries.

## **Sur la disponibilité de l’uranium : quelles ressources et quelles échéances ?**

Bien que sujette à la controverse, la production d’électricité dans les centrales nucléaires à partir de la fission de l’uranium 235 émet une quantité minime de CO<sub>2</sub>, et est puissante et pilotable. La consommation mondiale en uranium s’élève à 170 000 tonnes/an et les ressources, bien qu’abondantes (15,5 Mt pour les conventionnelles ie faisant l’objet d’une production industrielle significative), seront épuisées avant 2100.

La France a fait le choix du recyclage du combustible usé en un combustible MOX ou URE, ce qui permet de repousser cette échéance, Ces combustibles secondaires ne sont malheureusement pas recyclables pour le moment. Nos modélisations montrent que l’on rallonge de 22% la durée de vie de la ressource, soit d’une dizaine d’années minimum. Cependant, le recyclage permet aussi et surtout de diminuer le volume de déchets radioactifs. Les technologies RNR, utilisant l’isotope 238 de l’uranium, bien plus abondant, pourrait permettre de combler les besoins en ressources. Enfin, une alternative au nucléaire à l’uranium serait le nucléaire au thorium qui a les avantages de fonctionner à pression atmosphérique et de produire moins de déchets. Mais, la technologie n’est pas encore au point actuellement pour qu’un tel projet soit viable à court terme.

Pour conclure, malgré la grande variété des technologies de production ou de stockage énergétique étudiées, l’épuisement des ressources pour la plupart des matériaux est inévitable à plus ou moins long terme. Développer des technologies toujours plus performantes et recycler ne sauraient être des actions suffisantes pour contrer ce problème. Seul un changement de fond de notre modèle de société, limitant la consommation des ressources non renouvelables de notre Terre finie, permettra de garantir un développement durable sur le long terme.

Parallèlement, le développement de certaines technologies peut être bloqué ou fortement contrarié par la capacité à produire certaines substances, au-delà de la question de leur disponibilité. Ainsi, les technologies à couches minces dans le cas des cellules photovoltaïques, ou encore les éoliennes à aimants permanents peuvent se développer pour des applications de niches mais ne peuvent contribuer de manière significative à la transition énergétique parce que les métaux nécessaires (gallium, indium et tellure pour le PV, dysprosium et néodyme pour les éoliennes) sont des sous-produits d’autres métaux et ne seront disponibles que dans les quantités dictées par les marchés de leurs métaux principaux.

Enfin, les technologies de la transition énergétique conduisent également à augmenter la demande (ou donc la “pression”) sur des marchés de substances majeures, allant jusqu’au fer (pour l’acier des structures) et aux matériaux pour le béton. Si les échéances d’épuisement pour ces substances sont assez lointaines pour ne pas s’imposer dans les débats actuels, l’industrie minière pourrait rencontrer des difficultés à assurer une croissance aussi rapide que souhaitée pour certains métaux, en particulier le cuivre

*Nous tenions à remercier toutes les personnes qui nous ont accompagnés dans ce projet de MIG. Merci aux encadrants du Centre de Géosciences, Franck Aggeri, Dominique Bruel, Louis Raimbault, et Isabelle Thévenin, de nous avoir aidés dans la recherche bibliographique. Merci aux intervenants qui ont bien voulu nous faire visiter leurs locaux : Christian Thomas pour Terra Nova Développement, Yvan Bonnassieux pour l'IPVF, Serge Llompart et Thierry Bouilleau pour SAFT Bordeaux et Nersac et Hubert Sauvage pour Imerys Ceramics. Enfin, un grand merci à Damien Goetz pour avoir organisé, encadré et coordonné ces trois semaines de MIG.*

# MIG Ressources et Energie :

## Métaux majeurs et métaux mineurs

COSTA Elise, ROSSI Sophie, SAUNIER Pierre-François, SINOPOLI Bérénice, TRIN Léa

### 1 Contexte

Dans le cadre de la transition énergétique, la demande en métaux, critiques et non, va fortement augmenter dans les années à venir. Par exemple, le développement du marché des voitures électriques, et donc de celui des batteries et du stockage d'énergie, nécessite une hausse considérable de la production de lithium et de cobalt. Le marché croissant des aimants permanents, qui sont notamment utilisés dans le solaire, est quant à lui très demandeur en terres rares et en argent.

Bien savoir caractériser les métaux et leurs marchés est une condition sine qua non pour comprendre et anticiper les besoins et les difficultés de demain. Les métaux peuvent être répartis en trois catégories principales : majeurs, mineurs, sous-produits. Etant donnée la demande croissante, l'enjeu est alors de modéliser les production et marché futurs pour chacune de ces catégories, afin d'estimer à quelle échelle et à quelle échéance la transition énergétique est viable.

**Différentes catégories de métaux** Selon leur abondance sur Terre, l'ampleur de leur production et leurs caractéristiques géochimiques, les métaux ont des exploitations ainsi que des marchés très différents, ce qui fait que l'on peut les classer en des catégories distinctes. Les métaux majeurs, tels que le cuivre, ont une production actuelle de plusieurs millions voire milliards de tonnes et sont très abondants, alors que les métaux mineurs, tels que le lithium, ont une production moindre et leur stock risque d'être épuisé d'ici quelques décennies. D'autre part, les sous-produits sont des métaux produits uniquement lors de l'extraction d'un métal (majeur) et dont l'extraction seule n'est pas viable économiquement ; c'est par exemple le cas du cobalt dans la grande majorité des mines. Alors même que les familles de métaux telles que les terres rares ou les platinoïdes font partie des métaux mineurs, elles présentent des effets de couplage qui rendent leurs marchés interdépendants et qui justifient donc leur traitement spécifique.

Enfin, étant donnée leur rareté, la forte polarisation de leur marché et/ou de leur distribution sur Terre, et leur place significative dans l'industrie (notamment des énergies renouvelables et des batteries) certains métaux sont qualifiés de critiques : sécuriser leur approvisionnement est un enjeu national (voir complément sur la criticité en annexe).

### 2 Les métaux majeurs : l'exemple du cuivre

La première catégorie de métaux est celle des "métaux majeurs", ou plus généralement des matériaux majeurs. Il s'agit de matériaux dont la production mondiale annuelle est très importante, en millions (voire milliards) de tonnes, et dont les centres de production et les domaines d'utilisation sont variés. Un exemple très représentatif de cette catégorie est le cuivre. Sa production mondiale annuelle s'élève à 20 millions de tonnes, avec des mines et des raffineries bien réparties dans le monde. De plus, ses usages se multiplient dans de nombreux domaines : transports, bâtiments, électronique, infrastructures... Ainsi, l'approvisionnement en cuivre, à l'échelle de la France, ne présente pas d'instabilité majeure. De même, la croissance rapide d'une filière consommatrice de cuivre ne perturberait pas de façon conséquente le marché, qui se répartit dans de nombreuses filières. On retrouve des caractéristiques tout à fait similaires pour le charbon, le fer, et même le ciment, non moins important pour les filières énergétiques.

### 3 Les métaux mineurs : l'exemple du lithium

Les métaux mineurs se présentent comme une variante des métaux majeurs dans la mesure où leurs usages sont très diversifiés. Souvent négociés de gré à gré, ces métaux sont produits en plus faibles quantités que les métaux majeurs. Leur production annuelle est en effet de l'ordre de quelques dizaines voire centaines de milliers de tonnes.

Le lithium correspond bien à cette définition. Certes côté au LME depuis cette année, ce métal ne reste que relativement peu produit et sa production est destinée à des usages diversifiés [4]. La forte augmentation de la production ces dernières années (réponse à une forte augmentation de la demande) s'explique en partie par la transition énergétique, le lithium étant un métal essentiel dans la réalisation de batteries Li-ion (voir Figure 1).

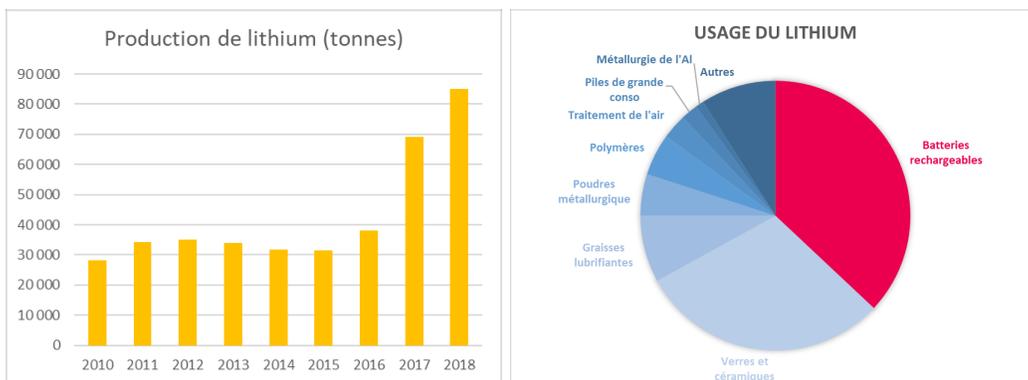


FIGURE 1 – Production mondiale et principaux usages du Lithium Li [3]

Mais la production augmentant, se pose alors la question des limites de cette augmentation. Deux types de gisements de lithium existent[5]. D'une part, il est possible d'extraire du lithium des saumures. Dans ce cas, le lithium, très soluble dans l'eau sous forme de sels et d'hydroxyde, est contenu dans des eaux où la concentration en éléments solides dissous est élevée. D'autre part, il peut être extrait de granites et de pegmatites (notamment à spodumène) en raison de ses propriétés chimiques. Or, il se trouve que c'est le lithium issu de saumures qui est le plus simple et le moins cher à produire. Rien d'étonnant ainsi que ce soit ce type de gisement qui soit majoritairement exploité. En effet, alors que plusieurs pays pourraient produire du lithium de granites, puisqu'ils possèdent une part non négligeable des réserves mondiales, seule l'Australie sort du lot en ce qui concerne les producteurs miniers de lithium.

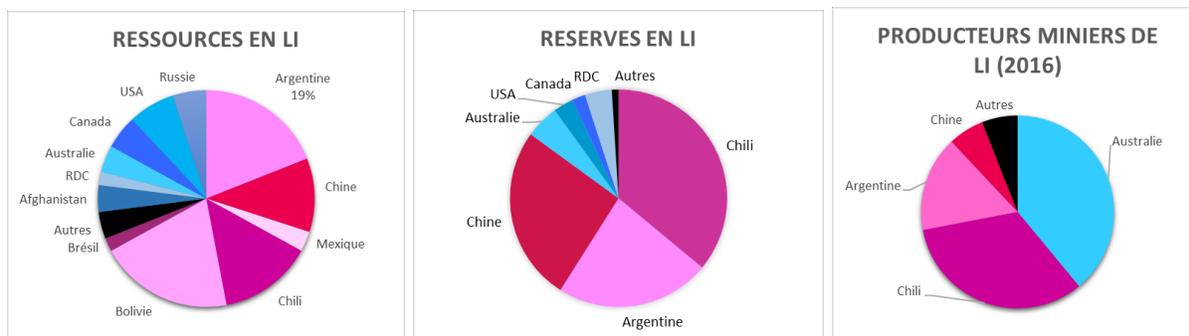


FIGURE 2 – Ressources, réserves et principaux producteurs miniers de Lithium Li (camaïeu de roses : saumures ; camaïeu de bleus : pegmatites)

Il est de plus intéressant de noter qu'une poignée de pays se partagent la production mondiale de lithium. Or, cette répartition polarisée pourrait devenir une source potentielle de tensions entre pays, notamment si la production mondiale en Li ne parvenait plus à satisfaire la demande. Cette polarisation se retrouve aussi à l'échelle des mines, puisque les 10 principales mines mondiales possèdent un tiers des réserves de lithium (cf : Tableau 1 en annexe, [9] [10]).

Cependant, en interpolant l'augmentation de la production du Lithium, on remarque que ces mines ne pourront satisfaire la demande croissante en Lithium. En effet, les prévisions d'augmentation d'ici 2026, 5 des plus grandes mines mondiales ne prévoient d'augmenter leur production que de 20 000 tonnes [10].

## 4 Les sous-produits : l'exemple du cobalt

A travers l'exemple du cobalt, nous allons étudier le terme de « sous-produit » et sa réalité économique. Le cobalt est souvent désigné comme un sous-produit du cuivre ou du nickel. Seule une mine dans le monde exploite le cobalt en tant que métal principal : la mine de Bou-Azzer au Maroc. Toutefois, sa production ne représente que 1,6% de la production mondiale de cobalt. Il existe trois types de gisements de cobalt : les gisements de cuivre stratiforme (Congo, Zambie...), de nickel-cuivre sulfuré (Canada, Russie, Australie) et de nickel latéritique (Indonésie, Nouvelle Calédonie). Nous avons étudié pour plusieurs mines différentes la proportion des revenus qu'elles tiraient de chaque métal (voir Figure 3). Ces mines représentent 80% de la production mondiale de cobalt, soit 85kt. Même si le prix du

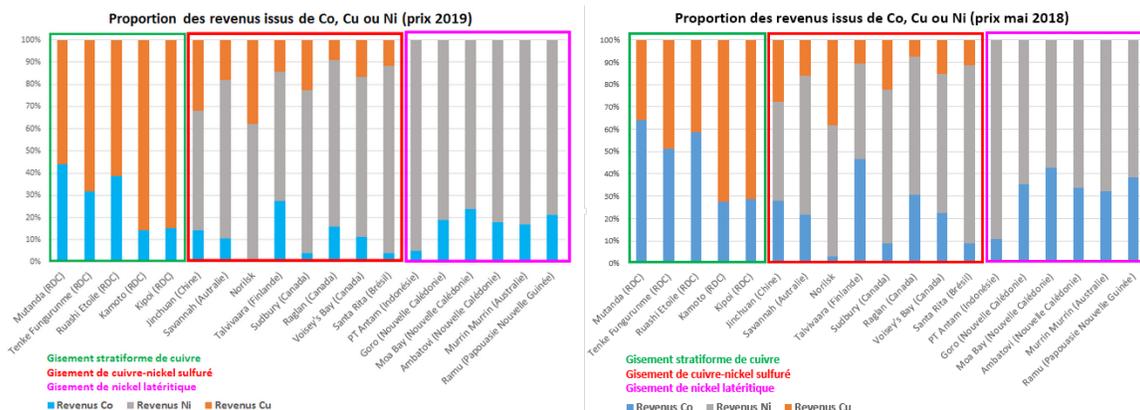
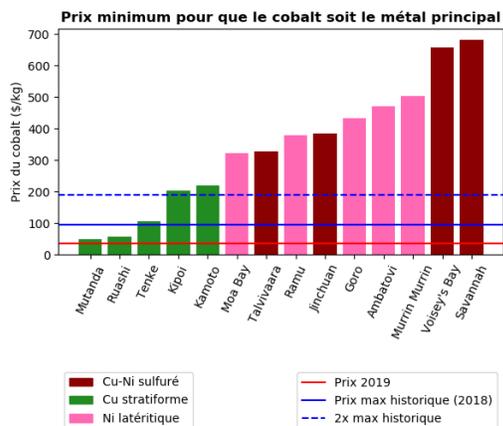


FIGURE 3 – Proportion des revenus issus du Cobalt, Cuivre et Nickel en 2018 et 20

cobalt est bien plus élevé que le prix du nickel ou du cuivre, sa contribution aux revenus des mines est minoritaire. Seules trois mines de cuivre (Mutanda, Tenke, Ruashi) au Congo tirent plus de 30% de leurs revenus du cobalt. Elles représentent 40% de la production mondiale. Il y a un an, lorsque le prix du cobalt a atteint un pic, le cobalt représentait alors plus de la moitié du revenu de ces trois mines : on pouvait alors le considérer comme le métal principal.

On peut alors se demander sous quelles conditions de prix le cobalt passerait du statut de sous-produit à celui de métal principal. On a donc calculé le prix minimum à atteindre pour que le cobalt soit le métal qui rapporte le plus dans chaque mine, en prenant les prix actuels du cuivre et du nickel.



La barre en pointillés correspond au double du prix maximum historique. Il est assez peu probable que le prix du cobalt dépasse un jour ce plafond. Ainsi, sauf pour quelques mines congolaises, il semble peu probable que le cobalt devienne un jour un métal principal. La production de cobalt ne serait donc pilotable que dans les exploitations de la RDC. Cela s'est déjà vérifié l'année dernière : en 2018, le cobalt était le métal principal de la mine de Mutanda. Mais après la chute des prix, la société Glencore a arrêté provisoirement son exploitation par manque de rentabilité. Ailleurs dans le monde, une variation de la demande en cobalt n'aura que peu d'effet sur sa production. En effet, les nouveaux projets d'exploitation de cobalt sont principalement des gisements de nickel latéritique, comme celui de Weda Bay en Indonésie. Or pour ces gisements (en rose sur le graphique), le cobalt ne sera jamais le métal principal : l'ouverture de ces nouvelles mines dépend donc principalement du marché du nickel. On peut donc bien considérer le cobalt comme un sous-produit aujourd'hui. Même si son prix augmentait, il resterait toujours un sous-produit dans les exploitations de cuivre-nickel sulfuré ou de nickel latérique.

Le cobalt est exploité dans de nombreux pays. Or, les législations sociétales et environnementales en vigueur varient énormément en fonction des pays, en particulier en ce qui concerne leur application. Prenons par exemple le cas du Congo et de l’Australie (un des premiers exportateurs de cobalt après la RDC). Dans les deux cas, la loi est censée protéger et l’environnement et les populations (voir Tableau 2 en annexe). Pourtant, Amnesty International a par de nombreuses reprises pointé du doigt la dégradation de l’environnement engendrée par l’exploitation des mines et les conditions de travail désastreuses des mineurs en RDC, en particulier lorsque ces derniers travaillent dans des mines artisanales (qui représentent tout de même 20% de la production de cobalt en RDC [2]). A l’inverse, aucune accusation de ce type ne pèse sur le secteur minier australien. Les entreprises ont aussi leur rôle à jouer pour une transition vers une gestion plus équitable des ressources minières, rôle qu’elles semblent pourtant négliger pour la plupart. Glencore, une entreprise suisse possédant des mines au Congo, en Colombie et en Zambie est ainsi régulièrement accusée de ne pas respecter les réglementations environnementales et sociétales (comme illustré dans le Tableau 3 en annexe). Si l’on poursuit la chaîne de production, on remarque que les efforts pour utiliser un cobalt propre (qui pourraient inciter les extracteurs de cobalt à améliorer leur système d’extraction) restent très limités voire inexistantes. Par exemple, Renault est le mauvais élève des grands constructeurs occidentaux de voitures électriques d’après Amnesty International [6]. Enfin, tout comme le cobalt, l’indium et le gallium sont deux sous produits dont la production est limitée par celle d’un métal plus important, ce qui a des conséquences sur la production de panneaux solaires voir (article *La dépendance en ressources minérales des énergies éoliennes et solaires*).

## 5 Les familles de métaux

Dans cette section, nous nous focalisons sur la famille des terres rares qui est constituée des 15 lanthanides, et de l’ytterium et du scandium. Pourtant, ces métaux ne sont pas si rares : par exemple, le Lutécium est 7 fois plus abondant que l’argent. Parmi les terres rares, celles dites légères (de petit numéro atomique) sont plus abondantes alors que les lourdes le sont moins.

Les utilisations des terres rares sont variées, notamment dans les aimants permanents, et leur demande pourrait donc facilement augmenter avec la transition énergétique (aimants des moteurs électriques et des générateurs). Aujourd’hui, la production annuelle d’oxydes de terres rares représente environ 170 000 tonnes (voir Figure 11 en annexe). Les deux principaux types de gisements sont ceux de terres rares lourdes et de terres rares légères. Ainsi, lorsque l’on extrait une terre rare, pour des raisons techniques, on va aussi devoir extraire les autres. On peut alors se demander si cette particularité peut avoir un impact fort sur le marché des terres rares. De fait, actuellement, l’offre et la demande de chacune des terres rares se régule plutôt bien. Mais une augmentation rapide de la demande d’une terre rare pourrait, du fait de la corrélation de leurs exploitations, induire une augmentation de la production des autres terres rares, alors que leurs demandes n’auraient pas augmenté. Ceci entraînerait systématiquement une chute rapide des prix et un effondrement des marchés, pour les terres rares qui seraient produites en excès.

Selon leur localisation géographique et la nature des roches exploitées, chaque gisement présente des proportions différentes d’oxyde de chaque terre rare (voir Figure 10 en annexe), ce qui pourrait, en théorie, permettre de moduler l’offre pour l’adapter à la demande et ne pas déstabiliser les marchés. C’est ce que cherchent à quantifier nos simulations dans le cas d’une forte croissance de la demande d’une terre rare donnée.

**Les modélisations** Dans toutes les simulations, les mines prises en compte sont celles qui ont les proportions les plus importantes en la terre rare considérée (voir [11][8] pour les données). En particulier, les projets sont choisis en fonction de leurs paramètres géochimiques, et non en fonction de leur état actuel d’avancement.

La production mondiale actuelle de terres rares sert de comparaison aux estimations sur la production future. Dans certains graphiques, les productions futures estimées en une ou plusieurs terres rares sont inférieures aux productions actuelles. Ceci peut sembler contradictoire avec le fait que l’on a augmenté drastiquement la production d’une terre rare donnée dans chaque cas de figure. Or, ce n’est qu’une conséquence des hypothèses simplificatrices de notre modèle.

Par exemple, si l’augmentation de la production concerne une terre rare lourde, alors les gisements considérés sont ceux de terres rares lourdes. Alors, ils vont difficilement produire autant de terres rares légères qu’aujourd’hui : en effet, la production mondiale servant de référence prend en compte tous les gisements (et donc aussi ceux de terres rares légères dans ce cas).

## Le Dysprosium (Dy) : une terre rare lourde

Le dysprosium est **très utilisé dans les aimants permanents : sa consommation va augmenter jusqu'à quadrupler** dans les années à venir du fait de l'essor des énergies renouvelables. Les deux simulations ci-dessous correspondent à deux scénarios différents :

- comme la mine de Longnan produit aujourd'hui la très grande majorité des terres rares lourdes, la première hypothèse est que cette mine assurera la totalité de la production de Dysprosium dans le futur (Figure 4)
- Longnan continuera à assurer la majorité de la production des terres rares lourdes (60%) mais les projets de Dubbo, Kipawa et Strange Lake seront mis en fonctionnement (Figure 5)

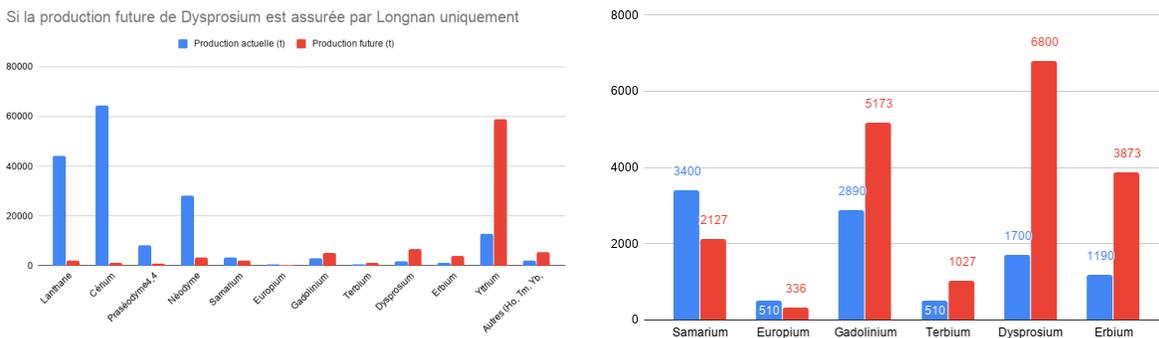


FIGURE 4 – Comparaison des productions actuelles et futures si Longnan assure toute la production dans le futur (avec zoom sur les terres rares lourdes et intermédiaires)

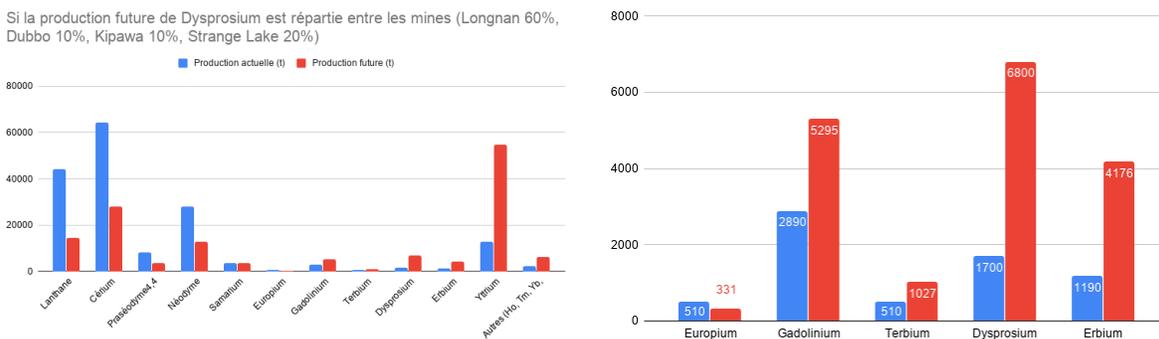


FIGURE 5 – Comparaison des productions actuelles et futures si la production de Dysprosium est répartie entre les différentes mines (avec zoom sur les terres rares lourdes et intermédiaires)

Dans le premier cas, **l'impact sur la production des terres rares légères est minime** (comme Longnan est une mine de terres rares lourdes, elle ne produit que très peu de terres rares légères). Ainsi, leur marché ne va pas, a priori, être atteint. Par contre, **la production des terres rares lourdes et intermédiaires augmente très fortement**. Dans le second, on **module davantage les productions tout en évitant un monopole chinois sur le Dysprosium**. Néanmoins, la disproportion concernant les terres rares lourdes demeure trop importante pour éviter un effondrement de leurs marchés en cas de stagnation de leurs demandes.

## Le Néodyme (Nd) : une terre rare légère

Le néodyme est une terre rare légère également utilisée dans la construction d'aimants permanents. Aujourd'hui, comme les autres terres rares légères, elle est majoritairement produite dans l'immense gisement de Bayan Obo (Chine), ainsi qu'en Australie (Mount Weld) et au Brésil (Axarà). On fait alors les simulations suivantes, en supposant que sa production va doubler :

- les mines de Bayan Obo, Axarà et Mount Weld continuent d'assurer l'intégralité de la production dans ces proportions (Figure 6)

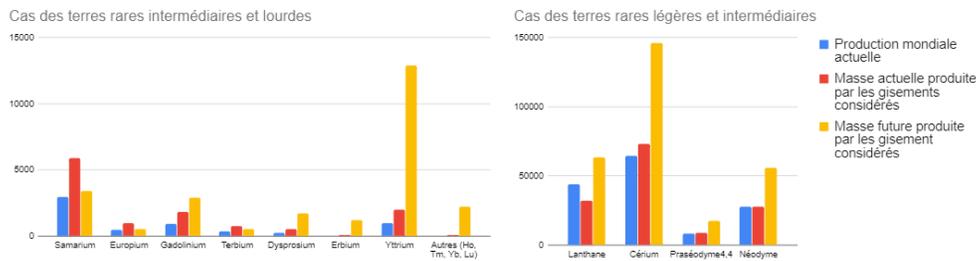


FIGURE 6 – Production de néodyme doublée, assurée par les producteurs actuels, en tonnes d'oxyde

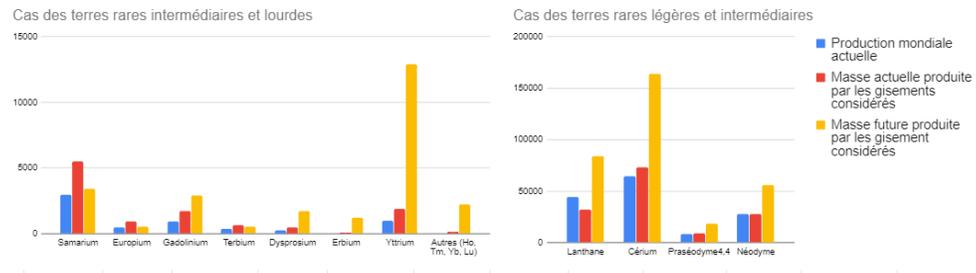


FIGURE 7 – Production de néodyme doublée, assurée par les producteurs actuels et le gisement de Mountain Pass, en tonnes d'oxyde

— le projet de Mountain Pass est mis en fonctionnement et s'ajoute donc aux mines précédentes (Figure 7)

On observe, comme dans le cas du Dysprosium, que ce sont les terres rares de la même catégorie (ici légères) qui ont le plus de risque de voir leur marché destabilisé par une augmentation de la production de Néodyme, si les utilisations de chacune de ces terres rares ne sont pas corrélées.

Si l'on pourrait espérer limiter ce risque grâce à l'ouverture de nouveaux gisements, on observe qu'en réalité, le gisement en terres rares légères le plus prometteur à une échelle de temps courte, Mountain Pass, a une concentration en néodyme plus faible que celle de Bayan Obo par exemple, et donc que son ouverture ne serait pas une solution au problème souligné ici.

En réalité, le "meilleur mix" pour limiter une augmentation involontaire de la production des autres terres rares, serait de produire le néodyme exclusivement dans la mine en présentant la plus grande concentration : Bayan Obo. Cependant, une telle option amènerait un monopole complet de la Chine sur cette terre rare, ce qui est tout sauf souhaitable.

## L'Europium (Eu) : une terre rare intermédiaire

Le cas de l'Europium est un peu différent : **en tant que terre rare "intermédiaire", il est présent dans les gisements de terres rares lourdes et de légères**. Ainsi une augmentation de sa production devrait impacter la production de l'ensemble des terres rares.

Au préalable, on estime que Bayan Obo assure 80% de la production mondiale actuelle, Longnan 10%, Axarà 5%, et Mount Weld 5%. Les deux simulations, dans le cas d'un doublement de la production, correspondent aux scénarios :

- les quatre mines continuent d'assurer l'intégralité de la production dans ces proportions <https://www.overleaf.com/6722831-clid=IwAR1S6q6bU5rMYOrXZkoAKQzagHovlucy6jJoKEbEtejZckrdNZ18dEmAv6U> (Figure 8)
- comme Bayan Obo assure 60% de la production de terres rares mondiale actuelle, on fait ensuite l'hypothèse que Bayan Obo assure la totalité de la production future d'Europium (Figure 9)

Dans le premier cas, **la production de chacune des terres rares augmente fortement** ce qui implique directement **une destabilisation de leurs marchés**, à moins que leurs demandes croissent pas drastiquement aussi. Dans le second, alors que le marché des terres rares légères est très impacté (en effet, Bayan Obo est une mine de terres rares légère), les autres marchés le sont moins fortement.

Enfin, si on ajoute le projet de Kipawa, il n'y a pas d'amélioration véritable car la proportion d'Europium dans ce gisement est inférieure à celle des gisements déjà en exploitation. Ainsi, **pour l'Europium, hors l'éventualité que les mines déjà ouvertes ne puissent subvenir à la demande future, il ne convient pas d'ouvrir un nouveau projet.**

Si la répartition de la production future d'Europium est inchangée

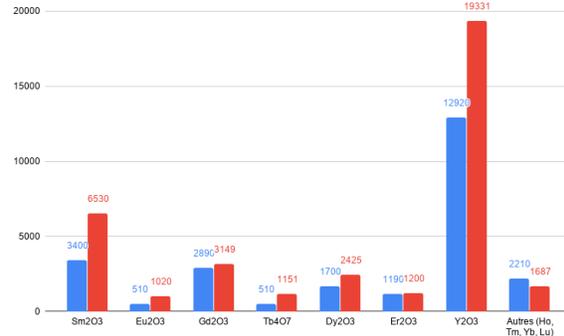
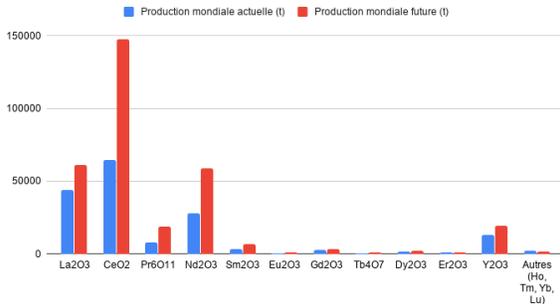


FIGURE 8 – Comparaison des productions actuelles et futures si la répartition de la production d'Europium est inchangée (avec zoom sur les terres rares lourdes)

Si la répartition de la production future d'Europium est assurée par Bayan Obo uniquement

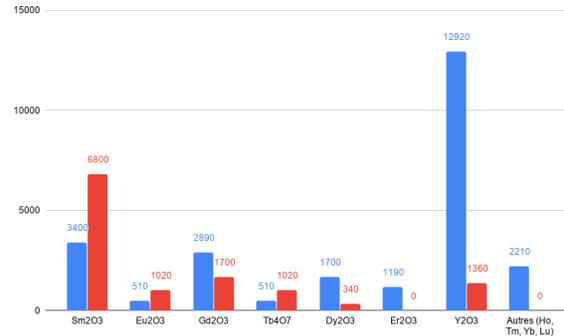
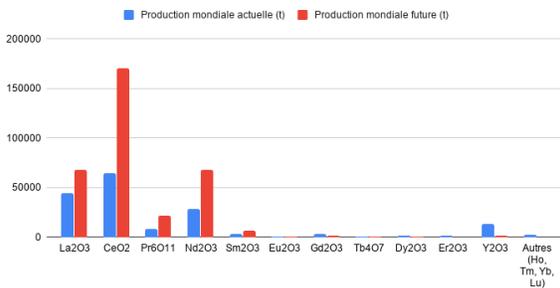


FIGURE 9 – Comparaison des productions actuelles et futures si Bayan Obo assure toute la production dans le futur (avec zoom sur les terres rares lourdes)

## Conclusions sur le marché des terres rares

**Les terres rares ne sont pas cotées en bourse** : l'établissement des prix se fait directement entre les producteurs primaires et les transformateurs ou utilisateurs. Malgré l'impossibilité d'avoir accès à des prix fiables, **les prospections faites précédemment sur la production des différentes catégories de terres rares demeurent révélatrices de l'évolution potentielle de ces marchés**, selon l'impact de l'augmentation de la production d'une terre rare sur celles des autres. Si l'on veut limiter cet impact, la meilleure solution serait d'exploiter les gisements présentant la plus grande proportion en oxyde de la terre rare concernée. Cependant, une telle stratégie augmenterait les risques liés au monopole de certains pays comme la Chine sur la production de terre rare, qui peuvent aussi déstabiliser les marchés lorsque les pays producteurs décident de limiter leurs exportations.

## 6 Conclusion

Le contexte de demande croissante, notamment due au développement des énergies renouvelables, met un point d'honneur aux enjeux liés à l'exploitation et à la sécurisation de l'approvisionnement en métaux. Qu'ils soient majeurs, mineurs ou sous-produits, les métaux cités dans cet article et bien d'autres vont voir leur production augmenter drastiquement. Si les métaux majeurs pourront facilement subvenir à la demande croissante, les métaux mineurs verront leur stock s'épuiser en quelques décennies. D'autre part, même une très forte hausse des prix des sous-produits ne rend pas ces métaux pilotables ; ainsi leur production sera toujours dépendante de celle des métaux majeurs. Quant aux familles de métaux, étant donnée l'interdépendance des marchés, une augmentation drastique de la demande en un métal donné déstabiliser les marchés de tous les autres.

Enfin, si pour la plupart la capacité minière actuelle permet de ne pas être en déficit d'offre dans les années à venir, ces interdépendances ainsi que les potentiels monopoles (chinois, congolais), peuvent contribuer à insécuriser les marchés.

## 7 Annexes

### 7.1 Criticité

La criticité d'un métal est un indicateur de l'importance économique et de la disponibilité d'un métal donné. Le COMES (COmité pour les MEtaux Stratégiques) est l'institution française chargée de mettre en œuvre les politiques de gestion des métaux stratégiques ; il calcule donc la criticité de différents métaux. Alors que la section précédente évoque l'inter-dépendance des marchés des terres rares, il est important de souligner que le COMES ne prend aucunement en compte ces considérations. Dans les grandes lignes, le COMES s'appuie sur l'indicateur IHH, indicateur dit de Herfindahl-Hirschmann, qui quantifie la polarisation d'un marché. Si un marché est réparti entre divers acteurs dont les parts de marché sont les  $p_i$ , l'IHH associé est  $\sum_{i=0}^n p_i^2$ . On peut montrer que l'IHH est d'autant plus petit que la production est répartie entre de nombreux acteurs, de manière équilibrée. A l'inverse, un IHH grand est la marque d'une production très polarisée, donc source d'un éventuel risque d'approvisionnement. Pour établir la criticité d'un métal, le COMES prend essentiellement en compte l'IHH relatif aux parts des pays dans le traitement d'un minerai, après avoir pondéré les  $p_i$  selon la stabilité des pays en question. Ensuite, la dépendance de la France en importations ainsi que quelques considérations de recyclage sont ajoutées. Ainsi calculée, la criticité en approvisionnement d'un métal dépend principalement de la polarisation de sa production, et des pays qui le produisent. Par conséquent, l'inter-dépendance des marchés n'est jamais prise en compte.

### 7.2 Compléments sur le Lithium

Mine	Réserves en Li (Mt)
Sonora Lithium Project	0,85
Thacker Pass Lithium Project	0,58
Wodgina Lithium Project	0,83
Pilgangoora Lithium-Tantalum Project	0,63
Earl Grey Lithium Project	0,66
Greenbushes Lithium Project	0,94
Whabouchi Lithium Project	0,22
Altura Mining's Pilgangoora Lithium Mine	0,17
Goulamina Lithium Project	0,23
Arccadia Lithium Project	0,16
<b>Somme</b>	<b>5,26</b>

TABLE 1 – Annexe 1 : Répartition des réserves de Lithium entre les principales mines [10]

Pays	Réglementation officielle	Respect de la réglementation	Facteurs aggravants	International
Australie	Un rapport sur l'impact environnemental d'un projet de mines doit être approuvé avant que le projet ne puisse voir le jour. Un suivi en aval de la construction de la mine est aussi réalisé.	Accusations envers Glencore de ne pas respecter l'environnement, notamment de la part de populations indigènes.	Pas de facteurs aggravants signalés.	Les investissements ayant ralenti, l'Australie cherche à attirer des investisseurs étrangers
Chine	Un rapport sur l'impact environnemental d'un projet de mines doit être approuvé avant que le projet ne puisse voir le jour.	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Non respect de la réglementation sociétale et environnementale;</li> <li>— Mines illégales.</li> </ul>	Forte exploitation des terres rares : 80% de l'extraction mondiale	Volonté du gouvernement chinois d'attirer des investissements étrangers
RDC	Un rapport sur l'impact environnemental d'un projet de mines doit être approuvé avant que le projet ne puisse voir le jour.	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Non respect de la réglementation sociétale et environnementale;</li> <li>— Mines illégales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Présence d'or et de diamants;</li> <li>— instabilité politique.</li> </ul>	Deux géants suisses (Glencore et Trafigura) implantés sur le sol congolais. Metalkol (Luxembourg) a construit une mine aux dimensions titanesques (projet ERG)

TABLE 2 – Annexe 2 [1]

Pays	Type d'installation	Violations
Australie	Mines de charbon	Pollution
Congo	Mines de cuivre et de cobalt	Pollution des alentours de ses mines d'exploitation
Colombie	Mines de charbon	Pollution du fleuve Ranchería
Zambie	Mine de cuivre	Pollution de l'air avec du dioxyde de soufre (problèmes sanitaires)

TABLE 3 – Glencore : exemples de cas de violations de droits humains et environnementaux [7]

### 7.3 Compléments sur les terres rares

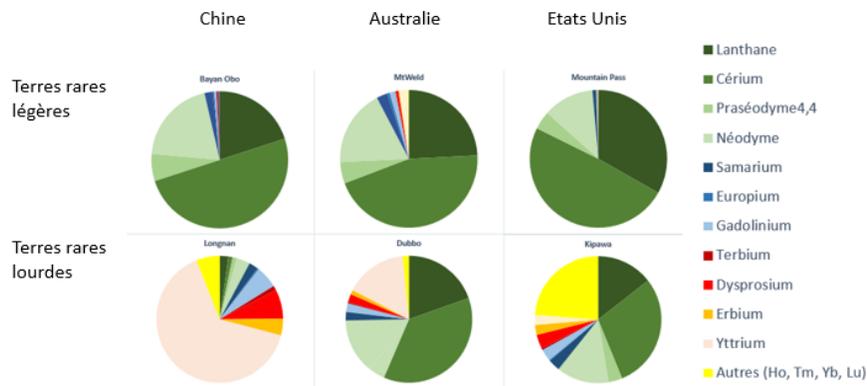


FIGURE 10 – Pourcentage d'oxydes de chaque terres rares par gisement

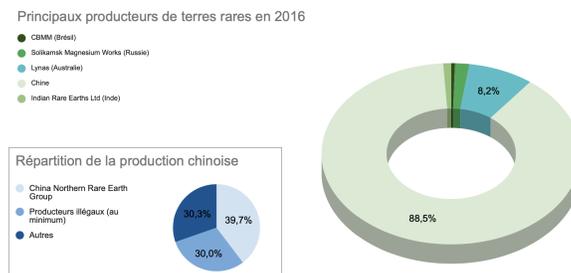


FIGURE 11 – Production mondiale de terres rares en 2016

## Références

- [1] The Law Reviews.
- [2] Le secteur minier en République Démocratique du Congo - Ministère de l'économie et des Finances. Technical report, May 2019.
- [3] BRGM. Panorama 2014 du marché des Terres Rares (BRGM), 2014.
- [4] BRGM. Ressources métropolitaines en lithium et analyse du potentiel par méthodes de prédictivité (BRGM). Technical report, December 2018.
- [5] Olivier Dubourdieu and Pierre Thomas. Le lithium (Li) : aspects géologiques, économiques et industriels. October 2019.
- [6] Amnesty international. Time to recharge.
- [7] Amnesty International. Exemples de cas de violations de droits humains et environnementaux. October 2019.

- [8] Adrian P Jones, Frances Wall, and Terry Williams. *Rare earth minerals, chemistry, origin and ore deposits*.
- [9] U.S. Geological Survey. Nickel : Mineral Commodity Summaries (USGS), February 2019.
- [10] Mining Technology. Top ten biggest lithium mines in the world, August 2019.
- [11] Yun Zhongxin, Shi Zemin, Bai Ge, Wu Chengyu, Chi Ruan, and Li Xiaoyu. *The Moniuping rare earth ore deposit, Mianning county, Schuan province*.

# Recyclage et mines urbaines

Cyprien Bouton, Léa Mailhol, Marc de Froidefond, Florent Escribe et Camille Srecki

Novembre 2019

Certains métaux ont un rôle majeur pour la transition énergétique. La limitation des ressources, associée à une production toujours croissante, nous entraîne vers une pénurie dans les années à venir. Outre les problèmes économiques engendrés, le monopole des grandes puissances comme la Chine dans le domaine de la production minière (source primaire de métal) et de la raffinerie, rendra les échanges diplomatiques plus difficiles.

Le recyclage, en tant que source secondaire, se présente comme une solution à ces problèmes. Il s’agit, grâce à une série de transformations physico-chimique, de réintroduire dans la chaîne de production un métal déjà utilisé dans un système qui arrive en fin de vie. On appelle mine urbaine l’ensemble des déchets provenant des systèmes en circulation (électroménager,...) qui contiennent des métaux que l’on pourrait récupérer et réutiliser par un procédé de recyclage. [3]

De plus en plus de procédures législatives sont à l’oeuvre pour encourager ce processus de recyclage. En France, les fabricants de batteries sont tenus de les collecter quand elles sont hors d’usage. Le recyclage permet donc à la fois de répondre au besoin croissant de métaux, de fournir un approvisionnement en ressources indépendant de la mine et de limiter l’accumulation de déchets potentiellement nocifs dans les sols ou des décharges à ciel ouvert.

L’objectif de cet article est de dresser un portrait global du recyclage, ses processus, et les différents enjeux auxquels il fait face.

## 1 Principe de fonctionnement du recyclage

### 1.1 Le recyclage dans le cycle des métaux

Pour comprendre comment se déroule le processus de recyclage d’un métal, il faut déjà connaître les différents flux, de sa production dans les mines à sa remise en circulation après recyclage. Pour chaque métal, on peut établir un bilan sur une année pour des différents flux (extraction, fabrication, mise en circulation, recyclage). Ce bilan permet d’avoir une idée globale des quantités recyclées et de celles qui sont perdues. Pour illustrer nos explications, nous avons choisi l’exemple du cuivre mais la démarche est transposable sur les autres métaux.

Sur ce cycle (Fig. 1), “*scrap stock*” correspond aux quantités de cuivre qui vont être remises en circulation. Il faut cependant distinguer deux sources d’approvisionnement secondaire (c’est-à-dire qui ne provient pas directement des mines) :

- Le “*old scrap*” qui résulte d’un procédé de recyclage du cuivre une fois que le système dans lequel il a été mis en oeuvre a atteint sa fin de vie
- Le “*new scrap*” qui provient des chutes de fabrication et qui est directement réintroduit dans le procédé de fabrication.

Le recyclage en tant que tel concerne donc uniquement le “*old scrap*”. On parlera de “*EOL (end of life) recycling*”. [6]

Il y a trois types de pertes entre le moment où les systèmes arrivent en fin de vie et le moment où le métal est prêt à être réutilisé :

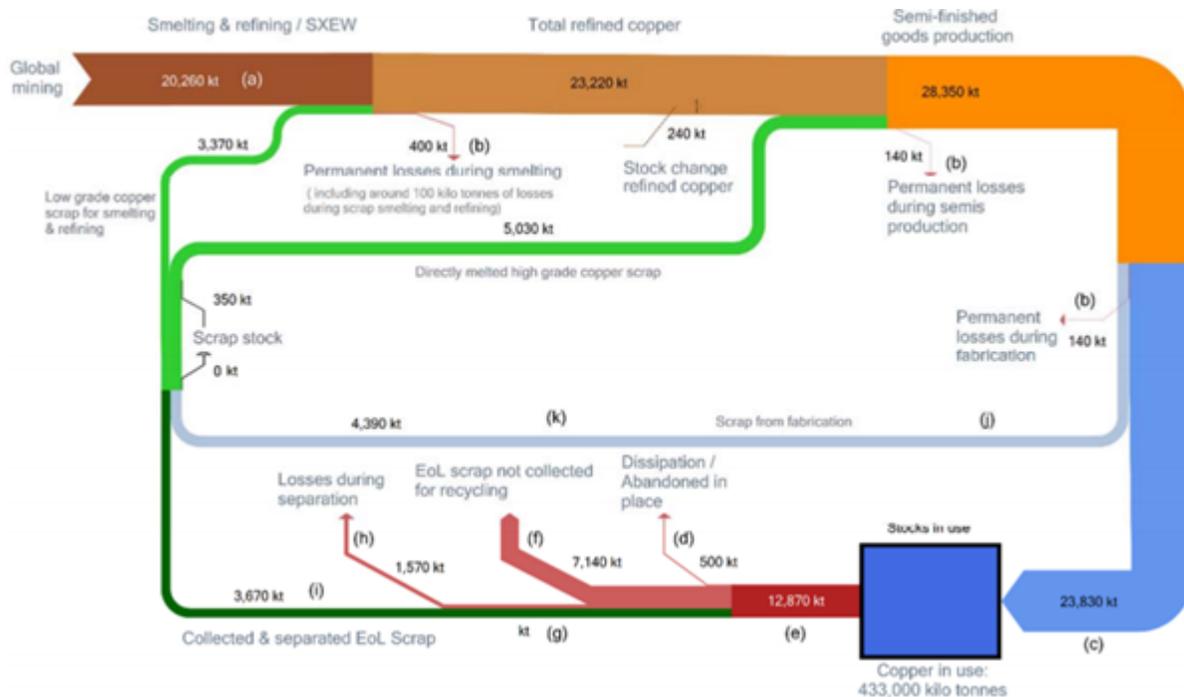


FIGURE 1 – Source : ICSG, World Copper Factbook 2016 [7]

- **Les usages dispersifs** : il s'agit d'un type d'utilisation qui ne peut être récupéré (oxyde de métaux utilisés dans les colorants, par exemple). Pour le cuivre le pourcentage d'usages dispersifs (électronique, alliage dans les cartouches, ...) est de 4%. [3]
- **Le processus de collecte** : il n'est pas obligatoire de collecter tous les produits contenant un métal pour les recycler. Certains systèmes sont jetés alors qu'ils pourraient être recyclés. L'efficacité du processus de collecte du cuivre parmi les usages non-dispersifs est de 42%. [7]
- **L'efficacité du procédé** : lors des différentes étapes de transformations physiques et chimiques il peut y avoir des pertes. Pour le cuivre une fois collecté, le pourcentage de recyclage est de 70%, mais ce chiffre tient compte aussi de la quantité de cuivre collecté et non traité.[7]

Ainsi, on obtient le taux de recyclage en fin de vie par la formule  $\tau_{collecte} \times \tau_{processus} \times (1 - \tau_{dispersifs})$ . Pour le cuivre il est de 28%. On peut aussi quantifier la part de métal provenant du recyclage dans la consommation en divisant la masse de "old scrap" par la masse de métal demandée. Pour le cuivre, on obtient 15%.

## 1.2 Méthodes de recyclage

Il existe différentes méthodes pour recycler les métaux. Les méthodes principales utilisées sont l'hydrométallurgie et la pyrométallurgie. La séparation physique permet d'effectuer une première séparation rapide avant le tri [8].

La plus courante est l'**hydrométallurgie**. Elle se décompose en trois étapes. La première étape est la mise en solution acide ou basique du métal. On procède ensuite à une purification en utilisant différentes méthodes comme la réduction ou la cémentation. On sépare ensuite les différents métaux obtenus par précipitation et électrolyse notamment.

La **pyrométallurgie** est une méthode qui consiste à séparer les différents métaux en chauffant la matière secondaire. Cette méthode est assez efficace et permet de traiter des stocks importants. Cependant elle est généralement plus polluante et donne des métaux moins purs que s'ils étaient traités par hydrométallurgie.

La **séparation physique** permet une première séparation grossière. Elle est nécessaire pour recycler des gros déchets comme les batteries qui comportent un grand nombre de métaux différents. On commence par faire une séparation granulaire : on broie les déchets puis on sépare les échantillons suivant leur taille. On peut aussi faire d'autres procédés physiques pour séparer les métaux comme la séparation par flottation, la

séparation magnétique, ou en exploitant la différences des masses volumiques des métaux avec une séparation densimétrique ou gravimétrique. On peut également utiliser les courants de foucault pour séparer les métaux. Ce procédé permet d'extraire le cuivre des batteries par exemple.

### Les bienfaits du recyclage

En plus des éléments qui rendent nécessaire le recyclage, il y a des bienfaits économiques et environnementaux non négligeables. En effet, les méthodes de recyclage nécessitent en général moins d'énergie par quantité de métal produit et demandent moins d'investissement. L'OCDE affirme que l'on arrive aujourd'hui, dans le cas des batteries, à faire des économies non négligeables grâce au recyclage.[1]

Economie réalisée par rapport à une production de batterie sans le recyclage			
	Gaz à effets de serre	Consommation de ressources naturelles	Point de vue financier
Hydrométallurgie	8%	51%	41%
Pyrométallurgie			38%

De plus, cela permet de réduire la dépendance de l'Europe vis à vis des producteurs de métaux stratégiques et de limiter les problèmes humanitaires liés à l'extraction de métaux (comme le cobalt ou la colombo-tantalite en RDC et dans les pays limitrophes).

## 1.3 Qualité des métaux recyclés

En ce qui concerne la qualité des métaux obtenus, les procédés ne sont pas sans faille. L'hydrométallurgie permet d'obtenir un métal pur à 99% dans le cas du lithium, mais cela est insuffisant pour une utilisation dans les batteries [2]. C'est pour cela que le lithium recyclé trouve son utilisation dans les céramiques essentiellement.

Pour ce qui est du Cobalt, le procédé de recyclage est de meilleure qualité. Le cobalt est suffisamment pur pour être réutilisé.

Ainsi, si le recyclage est amené à augmenter considérablement dans les prochaines années il faudra améliorer la qualité des métaux obtenus.

## 2 Modélisation et applications

### 2.1 Description du modèle

On peut définir une suite récurrente qui traduit la demande en métal et la part de ce métal qui est recyclée chaque année en fonction du taux de recyclage, du taux de croissance, des ressources en métal et de la durée de vie moyenne des systèmes.

$$\begin{cases} \text{ressources}_{n+1} &= \text{ressources}_n - \text{consommation}_n + \text{recyclage}_n \\ \text{consommation}_{n+1} &= \text{consommation}_n \times \text{tauxcroissance}_n \\ \text{recyclage}_{n+1} &= \text{tauxrecyclage}_{n+1} \times \text{consommation}_{n-\text{dureevie}} \end{cases}$$

Soit :  $\forall n > \text{dureevie}$

$$\text{partrecyclage}_{n+1} = \frac{\text{tauxrecyclage}_{n+1} \times \text{consommation}_{n-\text{dureevie}}}{\text{consommation}_n \times \text{tauxcroissance}_n}$$

Or pour un taux de croissance constant, on a :

$$\text{consommation}_n = \text{consommation}_{n-N} \times \text{tauxcroissance}^{N-1}$$

D'où :

$$\text{partrecyclage}_{n+1} = \frac{\text{tauxrecyclage}_{n+1}}{\text{tauxcroissance}^N}$$

L'implémentation de ces équations dans un algorithme permet de considérer différents scénarios d'évolution des taux de croissance et de recyclage. On suppose que la demande ne s'ajuste pas à la quantité disponible. Ainsi, on considère que si la quantité de métal demandée dépasse les ressources disponibles, le système s'arrête à cause de l'épuisement des ressources.

Les taux de recyclage et de croissance initiaux choisis dans les différents scénarios correspondent aux valeurs actuelles mais sont amenés à évoluer.

## 2.2 Applications (cobalt, cuivre et lithium)

On applique le modèle à trois métaux choisis pour le nombre d'applications (cuivre) ou leur criticité (cobalt et lithium) [4] [5]. On considère pour chaque métal quatre scénarios d'évolution de la demande et deux scénarios de recyclage : taux constant ou en augmentation.

Les quatre scénarios de croissance sont :

- 1) taux de croissance en augmentation : l'augmentation est constante. Le modèle est une droite affine dont le point de départ est le taux de croissance actuel et le coefficient directeur vaut 0.001,
- 2) taux de croissance constant : la constante choisie est le taux de croissance actuel,
- 3) taux de croissance en diminution : Le taux de croissance diminue de façon exponentielle et atteint 1 en une trentaine d'année,
- 4) décroissance : le taux de décroissance est constant et vaut 0.99.

Les deux scénarios de recyclage sont :

- 1) constant : avec le taux de recyclage actuel,
- 2) en augmentation : part du taux actuel et augmente de 5 points tous les 10 ans pour atteindre un plafond basé sur le pourcentage d'usage dispersifs pour le cobalt et le cuivre, exponentiel qui tend vers 95% pour le lithium.

Il est nécessaire de considérer que le taux de recyclage du lithium est estimé et rapporté à son taux de collecte potentiel (Fig. 4) dans la mesure où à l'heure actuelle, le lithium n'est pas recyclé pour des raisons économiques.

On constate facilement que les métaux ne sont pas tous logés à la même enseigne. Ainsi, si le cuivre a encore de beaux jours devant lui (Fig. 2) et ne sera pas épuisé avant trois siècles si la consommation se stabilise (scénario 3) ce n'est pas le cas du cobalt dont l'épuisement est estimé à 2100 (Fig. 3).

Un des effets intéressants est que le taux de recyclage a un effet mineur en comparaison de celui du taux de croissance. En effet, dans le cas d'une croissance en augmentation ou d'une décroissance, les courbes relatives aux deux hypothèses de recyclage sont quasiment confondues. En revanche, pour un taux de croissance nul, le recyclage permet d'obtenir un siècle de ressources supplémentaire pour le lithium et trois pour le cobalt.

## 3 Conclusion

Ainsi, le recyclage semble être une solution à privilégier, compte tenu de la situation actuelle en termes de besoins en ressources minières, et de ses avantages environnementaux et économiques. Une augmentation du taux de recyclage est envisageable dans les années à venir, en particulier pour le lithium dont le taux actuel est quasiment nul. Toutefois, même avec un recyclage important, si la demande en métaux continue de croître, l'épuisement des ressources sera inévitable, et le recyclage ne permettra que de retarder l'échéance de façon négligeable.

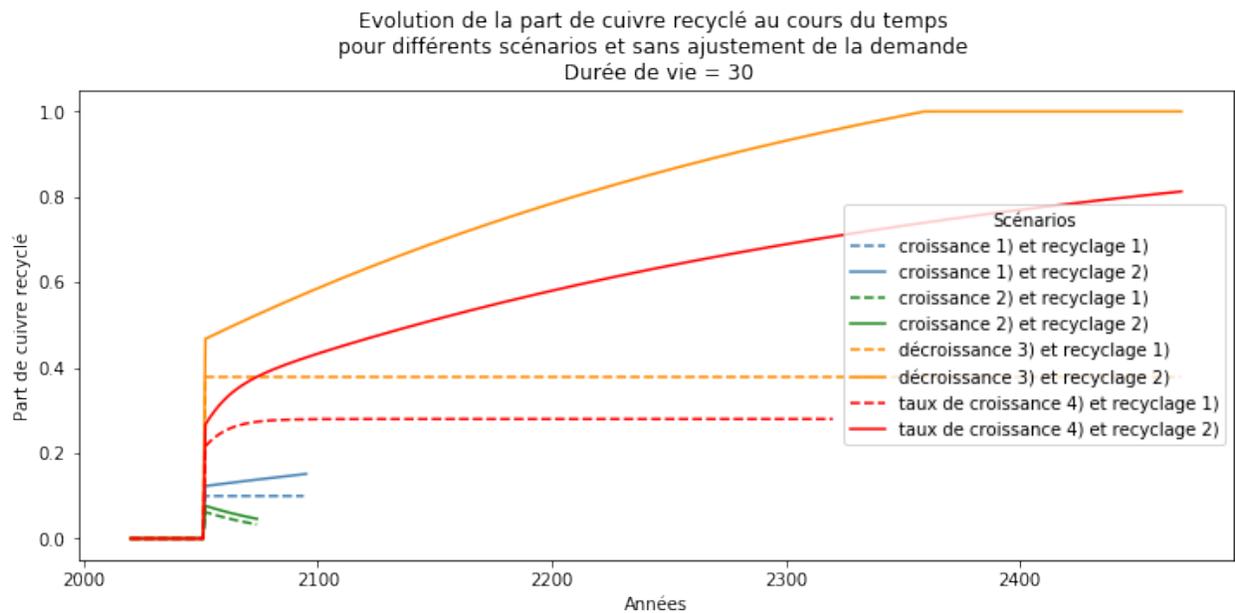


FIGURE 2 – Modélisation de l'épuisement des ressources en cuivre pour différents scénarios de croissance et de recyclage

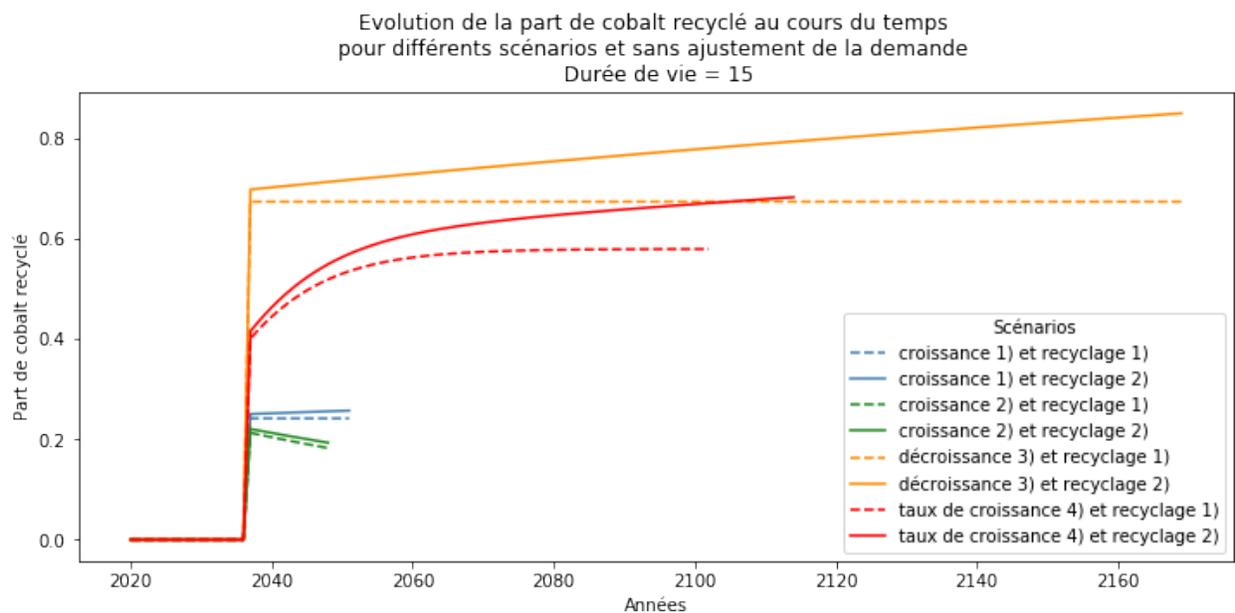


FIGURE 3 – Modélisation de l'épuisement des ressources en cobalt pour différents scénarios de croissance et de recyclage

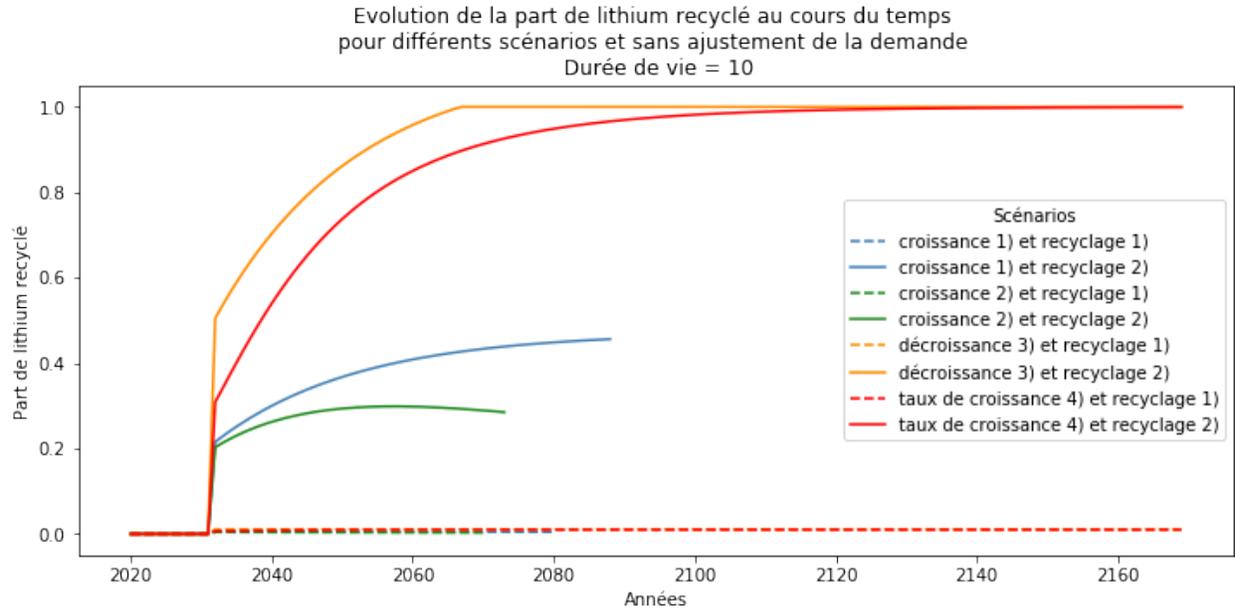


FIGURE 4 – Modélisation de l'épuisement des ressources en lithium pour différents scénarios de croissance et de recyclage

## Références

- [1] Dr. Mike Holland . Reducing the health risks of the copper, rare earth and cobalt industries :. page 98, 2019.
- [2] actuenvironnement.com. Recyclage des batteries li-ion : la pureté des métaux au coeur des choix stratégiques, 2019.
- [3] Rachel Baudry, ADEME, and Direction Economie circulaire des déchets. Place et intérêt du recyclage dans l'économie circulaire des métaux. Technical report, 2017.
- [4] BRGM. Panorama 2013 du marché du cobalt. page 156.
- [5] BRGM, J.F. Labbé, and G. Daw. Panorama 2011 du marché du lithium. Technical report, 2012.
- [6] EcoInfo. Le recyclage des métaux, 2014.
- [7] International Copper Study Group. The World Cooper Factbook, 2019.
- [8] Minéralinfo. La métallurgie : le portail des français des métaux non énergétiques, 2015-2019.

# La dépendance en ressources minérales des énergies éoliennes et solaires

Pierre-François Saunier, Bérénice Sinopoli,  
Léa Mailhol, Florent Escribe, Maxime Carenso

Novembre 2019

Les énergies solaire et éolienne sont au coeur de la transition énergétique. Ce type d'énergie va se développer dans les années à venir. La question de l'approvisionnement en ressources minérales est donc cruciale si l'on envisage un développement de ces techniques à l'échelle mondiale.

## 1 L'énergie solaire

Il existe aujourd'hui deux technologies de panneaux photovoltaïques : les cellules de première génération, à base de silicium, et les cellules dites à "couches minces". Ces dernières ne représentent que 10% du marché mondial mais présentent un avantage considérable : une réduction importante de la quantité de matière utilisée, avec pour conséquence directe l'allègement des panneaux solaires, condition nécessaire à un potentiel recouvrement des toitures urbaines. En effet, les cellules minces font en moyenne  $2 \mu m$  d'épaisseur, contre  $200 \mu m$  pour les cellules de silicium. Les dernières innovations ont même permis de fabriquer des cellules souples. Ici, nous nous intéressons particulièrement aux technologies de couches fines Cd-Te (Cadmium - Tellure), et CIGS (Cuivre - Indium - Gallium - Selenium) : nous cherchons à déterminer si la disponibilité des métaux nécessaires à leur élaboration constitue un frein au développement des technologies citées.

### 1.1 Une technologie dominante

Les technologies traditionnelles, au silicium, sont donc largement majoritaires (90% du marché). Un éventuel frein à la production de silicium est son caractère énergivore, consommateur de combustibles fossiles. Mais étant le deuxième élément le plus présent dans la croûte terrestre après l'oxygène, sa disponibilité n'est pas problématique, d'autant que la capacité mondiale de production est en 2018 bien supérieure à la production réelle (3 Mt, alignée sur la consommation). En conséquence, le silicium est très peu recyclé en fin de vie, notamment dans la filière photovoltaïque où ce procédé est très peu intéressant économiquement. [\[1\]](#)

Notons toutefois que la production de silicium métal est très polarisée : elle est dominée par la Chine à hauteur de 68 % (tandis que le deuxième producteur, le Brésil, chute à 8 %). [\[1\]](#)

Un métal dont on entend moins parler mais qui a toute son importance dans le domaine du photovoltaïque est l'argent. On le trouve en filigrane sous forme de barrettes à la surface des cellules, il sert à y faciliter la conduction de l'électricité. Bien qu'il n'en faille que très peu (environ 8 g par cellule), son coût élevé fait qu'il représente 15 à 25% du prix total d'un panneau. C'est pourquoi la recherche se concentre aujourd'hui sur des technologies de

substitution, et fait diminuer les besoins du photovoltaïque en argent, même si ce secteur représente toujours 8% de la consommation mondiale du métal précieux.

## 1.2 Les métaux limitants le développement des technologies à couche mince

Le cas des panneaux à couche mince de type CIGS ou CdTe est lui plus problématique. Le CIGS est un matériau semi-conducteur de formule  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ , [2] où  $x$  est typiquement compris entre 0.2 et 0.3. La formule ci-dessous nous a permis de calculer la masse de métal nécessaire par unité de puissance installée (kg/W).

$$m = \frac{\rho e w}{I \eta}$$

où :

$\rho$  densité de l'alliage ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$e$  épaisseur de la couche ( $\text{m}$ )

$w$  fraction massique de l'élément considéré dans l'alliage

$I$  insolation moyenne ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$\eta$  rendement du panneau

Pour la suite des calculs, nous avons pris une valeur de  $I$  correspondant à l'insolation moyenne en France (jour et nuit confondus) soit environ  $150\text{W}/\text{m}^2$ .

Pour les panneaux CIGS, le rendement des panneaux commercialisés est d'environ 18%. Les résultats de ces calculs sont consignés dans le tableau 1 ci-dessous. Les valeurs de la production mondiale et des réserves sont issues des fiches de criticité publiées par le BRGM [3].

Métal	Masse nécessaire pour une puissance installée de 1GW (t)	Production mondiale	Réserves et ressources
Cuivre	95	20,2 Mt	2720 Mt (ressources)
Indium	171	759 t	380 kt (ressources)
Gallium	104	275 t	1350 kt (ressources)
Sélénium	114	3500 t	100 kt (réserves)

TABLE 1 – Usages et réserves des métaux CIGS

Notons que pour le cuivre, la quantité calculée ici ne prend en compte que la couche absorbante. Du cuivre est nécessaire pour l'infrastructure de tous les panneaux, notamment dans les câbles électrique qui les relient au réseau. Produire 130 GW de panneaux CIGS, soit l'équivalent de la puissance installée française, représenterait par exemple 13 520 tonnes de Gallium, soit 50 ans de la production mondiale actuelle! Pour l'indium, cela représenterait 4 ans de la production mondiale. Puisque la France ne représente qu'une petite partie de la production mondiale d'électricité, il semble donc irréaliste de développer la technologie CIGS à très grande échelle.

On réalise les mêmes calculs pour la technologie Cd-Te, dont le rendement est de 17% (en moyenne sur le marché). Les résultats sont présentés dans le tableau 2 ci-dessous.

Métal	Masse nécessaire pour une puissance installée de 1GW (t)	Production mondiale	Réserves et ressources
Cadmium	323	25000	690000 (réserves)
Tellure	365	500-1200	31000 (réserves)

TABLE 2 – Usages et réserves des métaux CdTe

Le cadmium étant produit en grande quantité, il ne devrait pas poser de problème d’approvisionnement, contrairement au tellure dont la production est beaucoup plus faible. Il y a donc ici aussi un problème de disponibilité en ressources minérales. On peut toutefois se demander si la production de ces métaux ne pourrait pas augmenter en cas d’augmentation de la demande.

Les métaux rares comme le gallium ou le tellure sont principalement obtenus comme sous-produits de métaux de base, comme le zinc ou l’aluminium [fiches criticité gallium et tellure]. Bien qu’abondants (voir colonne “réserves”), leur production est subordonnée à celle de ces métaux de base. Par exemple, il n’existe pas de mine de gallium, qui est un sous-produit de l’aluminium. Si la production d’aluminium n’augmente pas, la production de gallium ne pourra pas non plus augmenter. En effet, pour une tonne de bauxite extraite, qui contient 30 à 80 g/t de gallium [3], l’aluminium rapporte 440\$ contre seulement 8.5\$ pour le gallium : il n’a donc qu’un intérêt économique limité pour le producteur. Même si les prix augmentent, la production n’augmentera pas, aux prix d’octobre 2019.

Ces deux technologies présentent donc la même limitation : une trop faible disponibilité des ressources minérales qu’elles utilisent. Les panneaux à couche mince CIGS et CdTe ne sont donc pas des solutions adaptées à un développement à grande échelle dans le cadre de la transition énergétique, mais seulement à des applications de niche.

### 1.3 Les technologies en développement sont elles exemptées de ces dépendances ?

Les recherches actuelles dans le photovoltaïque portent principalement sur des panneaux “tandem” ou multijonction, où deux technologies absorbant des longueurs d’ondes dans différents domaines spectraux sont utilisées : par exemple, on peut associer du silicium et du CIGS. Cela permet d’obtenir des rendements bien supérieurs : aujourd’hui, on atteint en laboratoire des rendements de 47%. Cependant, ces panneaux sont soumis aux mêmes limitations en ressources minérales que les panneaux CIGS : ils ne pourront pas être développés à très grande échelle.

À l’IPVF sont aussi développées des technologies Perovskite/Silicium avec comme objectif final un rendement de 36% au niveau industriel d’ici 2030. Le cristal de structure pérovskite  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  en question contient du Plomb et de l’Iode deux ressources problématiques. Cependant la recherche n’est pas encore assez avancée aujourd’hui, la durée de vie d’une cellule utilisant cette technologie n’est actuellement que de 24h en laboratoire. On ne peut donc pas estimer correctement les quantités de ressources impliquées et les limitations qu’elles imposeront aux panneaux solaire de 2030.

## 2 L’énergie éolienne

Ce mode de production d’énergie consiste à utiliser la force du vent pour faire tourner un générateur placé dans un champ magnétique. En découle la création de tensions et

de courants induits, donc d'une énergie électrique. L'éolienne est donc un transformateur d'énergie cinétique en énergie électrique.

Nous distinguons deux types de technologies concernant les alternateurs : ceux à aimants permanents, et ceux bobinés. Ces derniers représentent 90% du marché actuel. Ils sont composés majoritairement de cuivre. Les aimants permanents sont quant à eux faits de terres rares, notamment de Néodyme et de Dysprosium. Leur utilisation concerne essentiellement l'éolien offshore car les aimant permanent permettent d'éliminer la boîte de vitesse et de réduire le nombre de pièces mobiles qui pourraient casser. Ainsi, la maintenance est facilitée [4].

## 2.1 Les besoins en cuivre pour une éolienne à rotor bobiné

Les moteurs les plus utilisés sont donc ceux à double rotor bobiné. Cette technologie nécessite uniquement un bobinage de cuivre. Ce métal ne devrait pas poser de problème d'approvisionnement dans les prochaines années. En effet, les ressources ultimes en cuivre sont estimées à 5.6 Gt. On a besoin de 9,5 tonnes de cuivre pour fournir 1 MW de puissance éolienne installée, en comptant le bobinage et les câblages [5]. La consommation mondiale en énergie est de 11 000 TWh. En considérant que l'éolienne produit de l'électricité 20% du temps, il faudrait 60 Mt de cuivre pour alimenter le monde en énergie. Cela représente 1% des ressources ultimes, ou encore trois années de production du cuivre au rythme actuel.

Les ressources en cuivre ne freinent pas le développement de ce type de rotor, ce qui explique sa place dominante dans le marché des moteurs d'éolienne.

## 2.2 Vers un pénurie de terres rares pour les éoliennes à aimants permanents ?

Concernant, les aimants permanents, les conséquences d'un développement à grande échelle sont plus marquantes. Les aimants présents dans les moteurs des éoliennes sont les NdFeB (Néodyme, Fer et Bore). Pour résister aux intempéries, aux hausses de température et à la corrosion, une couche protectrice de Dysprosium, Cobalt et Vanadium est souvent déposée. Connaissant la masse de l'aimant d'une éolienne de 1 MW et la composition de l'aimant, on arrive à quantifier les besoins en terres rares de ce type d'éolienne. Les résultats de nos calculs sont répertoriés dans le tableau 3 :

Métal	Masse nécessaire pour une puissance installée de 1GW (t)	Production mondiale	Réserves et ressources
Néodyme	200,1 kg	24kt	9 à 13 Mt (réserves)
Dysprosium	25,1 kg	1,5 kt	690 kt (réserves)
Bore	8,9kg	4Mt	1,2 Gt (ressources)
Cobalt	26,2kg	109 kt	7Mt (réserves)
Vanadium	24,3 kg	79 kt	19 Mt (réserves)

TABLE 3 – Usages et réserves des terres rares

Pour donner un ordre d'idée, si toute la puissance installée française (130 GW) était assurée par des éoliennes à aimant permanent, il faudrait produire une quantité de néodyme égale à la production mondiale actuelle. De plus, les ressources et la production de Néodyme sont totalement dominées monopole de la Chine (elle détient 80% des ressources et 88% de

la production mondiale). La Mine de Molycorp aux Etats-Unis a fait faillite et les autres exploitations ne disposent pas d'assez de financements pour se développer. Il est donc peu probable de voir se développer la production mondiale de Néodyme. [1] De même, pour le dysprosium, alimenter la France nécessiterait 3 ans de production annuelle, sur un marché dominé à 97% par la Chine. [1]

Il est bon de noter que l'on parle ici de puissance installée et que les éoliennes étant un système intermittent, la puissance effective sera moins importante. Il faudrait donc encore plus de ressources pour réellement alimenter la France. Ces calculs nous montrent donc qu'il est inconcevable de développer cette technologie à l'échelle mondiale (et même française) à cause de la criticité et du manque de ressources en Néodyme et Dysprosium. Cela explique le faible pourcentage d'éoliennes à aimants permanents (10%).

### 2.3 Des infrastructures qui nécessitent énormément d'acier et de béton

Une autre donnée à prendre en considération est la quantité d'acier et de béton nécessaire pour construire une éolienne. En effet, la fabrication d'une éolienne nécessite une grande quantité de béton : on estime à 1500 tonnes la masse nécessaire pour une éolienne de 3MW. Pour les éoliennes off-shore ce chiffre est encore plus élevé, du fait des fondations sous-marines. Outre le souci environnemental qu'est l'approvisionnement en sable nécessaire au béton, sa production en soi n'est pas tant problématique : on rend compte du fait que la construction, béton et acier compris d'un parc éolien d'une puissance de 130 GW relâchez 7,3 millions de tonne équivalent CO<sub>2</sub>, ce qui correspond à seulement 3% de ce que la France a émis en 2018. [6] En effet l'énergie éolienne est une des moins émissive de gaz à effet de serre.

Cependant du fait des quantités massives de béton et d'acier nécessaires, le coût énergétique est bien plus important. En fin de vie, une éolienne a restitué environ 20 fois pour les plus récentes la quantité d'énergie nécessaire à sa construction. À titre de comparaison, dans les meilleurs gisements, le pétrole rend 100 fois l'énergie dépensée pour s'en approvisionner.

Enfin, une éolienne est composée majoritairement d'acier, dont la consommation serait accrue par le développement du parc éolien actuel. Si l'on considère qu'en moyenne une éolienne actuelle a une puissance de 2MW et fonctionne pendant 20 ans, avec un facteur de charge de 20%, on calcule que l'éolien a un coût en acier de 0,1 tonne d'acier par GWh d'éolien (puisque 70 tonnes d'acier interviennent dans sa confection). On a par un raisonnement analogue un coût en béton de 24,5 tonne de béton par GWh. Mis en regard avec les 500 TWh consommés annuellement en France, cela correspond à 50 000 tonnes d'acier et 12,2 millions de tonnes de béton, soit 4% de la production française pour l'acier et 60% pour le béton. [7]

## Conclusion

Pour l'énergie solaire comme pour l'énergie éolienne, il existe donc des technologies de base ne dépendant pas de métaux rares : les panneaux au silicium et les éoliennes à moteur double bobine. Dans le contexte de la transition énergétique, ces solutions sont à privilégier car elles pourront être développées à grande échelle. Au contraire, le développement de technologies comme les panneaux à couche mince ou les éoliennes à aimant permanent sera forcément limité par la production en métaux critiques (gallium, tellure ou terres rares).

## Références

- [1] (COMES) Comité pour les métaux stratégiques. Fiches de criticité | Minéralinfo. Technical report, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 2015.
- [2] Charles Roger. *Developpement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques*. phdthesis, Université de Grenoble, October 2013.
- [3] P. Christmann, J.-M. Angel, L. Bailly, F. Barthélémy, G. Benhamou, M. Billa, P. Gentilhomme, C. Hocquard, F. Maldan, B. Martel-Jantin, J Monthel, and Compagnie Européenne d’Intelligence Stratégique (CEIS). Panorama mondial 2010 du gallium. Rapport final. Document public 60582, BRGM, December 2011.
- [4] Timothy Brown. Cet aimant gigantesque générera de l’énergie pour la première ferme éolienne offshore des États-Unis. *GE Reports*, April 2016.
- [5] AAPLX. Autopsie d’une éolienne industrielle., April 2017.
- [6] FIB. Les chiffres clés de la FIB - Industrie du béton.
- [7] Businesscoot. Le marché de l’acier en France. Technical report, Businesscoot, 2017.

# MIG Ressources et Energie :

## Les batteries Li-Ion pour le stockage d'énergie

COSTA Elise, FOLIARD Thomas, ROSSI Sophie,  
ROUX-SALEMBIEN Maud, SRECKI Camille

novembre 2019

En Octobre 2019, le prix Nobel de chimie a récompensé trois chercheurs, John Goodenough, Stanley Whittingham et Akira Yoshino, pour leurs travaux ayant joué un rôle majeur dans les avancées techniques des batteries lithium-ion [2]. Ces dernières, en tant que technologies de stockage prometteuses, constituent une facette de la transition énergétique à venir. Les dispositifs de stockage énergétique, couplés à des énergies renouvelables mais intermittentes, sont destinés à remplacer les énergies fossiles dans la production électrique mondiale [16].

Il est donc pertinent de s'intéresser à la faisabilité d'un tel projet, notamment en matière de ressources disponibles. Depuis 2011, le COMES (comité pour les métaux stratégiques) a pour mission de mettre en place une politique de gestion de telles ressources. Aussi, on se posera les questions suivantes : quels sont les métaux nécessaires à la production de dispositifs de stockage et dispose-t-on de ressources suffisantes pour alimenter nos besoins croissants ?

Les barrages STEP (stations de transfert d'énergie par pompage) permettent de stocker de l'énergie via la méthode du pompage-turbinage. Le procédé consiste à faire remonter de l'eau d'un cours d'eau ou d'un bassin en aval vers un bassin d'accumulation (pompage) en cas d'excédent de production électrique. On restitue l'énergie accumulée sous forme d'énergie potentielle en turbinant l'eau comme dans un barrage classique. Le rendement de tels dispositifs est estimé à 70-85% [3] et, du fait de la taille importante du dispositif, les STEPs sont principalement utilisés pour équilibrer l'offre et la demande d'énergie dans le réseau électrique global.

La production d'air comprimé à l'aide d'un système pneumatique permet également de stocker de l'énergie dans un dispositif plus transportable mais le caractère non adiabatique de la compression implique une perte d'énergie de 50% si la chaleur émise n'est pas récupérée par un autre système [1].

Ainsi, le stockage électrochimique s'impose comme un dispositif de prédilection pour stocker l'énergie nécessaire à des systèmes embarqués (comme des voitures ou des téléphones) ou isolés des réseaux électriques majeurs (comme des panneaux solaires indépendants).

# 1 Stockage électrochimique

## 1.1 Différents types de batteries

Il existe un panel important de technologies de stockage électrochimique reposant sur une réaction d'oxydoréduction. Directement hérités des piles de Volta, ceux-ci ont pris leur essor à partir des années 70. Les premiers accumulateurs, fabriqués à partir de sodium "à haute température" ont été aujourd'hui détrônés par les batteries Li-Ion, principalement du fait de leur énergie massique largement supérieure, et de l'adaptabilité des différentes technologies, pouvant fournir plus de puissance ou d'énergie selon l'application, comme le montre la figure 1.

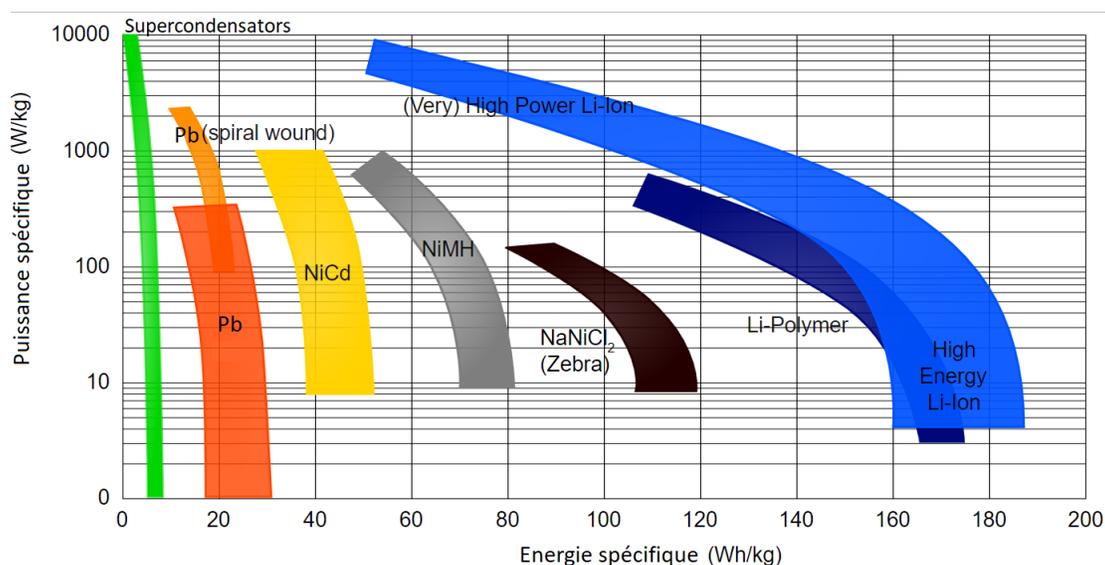


FIGURE 1 – Diagramme comparatif des technologies de batteries, source : SAFT

## 1.2 Les batteries Li-ion

### Fonctionnement

Les accumulateurs au lithium se déclinent en différentes technologies d'électrode impliquant des métaux variés. Cependant, le principe général de fonctionnement des batteries Li-Ion demeure le même. (Voir figure 2). Lors de la charge, les ions  $Li^+$  passent de la cathode en oxyde de métal à l'anode en graphite et font le trajet inverse lors de la décharge. L'espèce intervenant dans les deux demi-équations d'oxydoréduction est le lithium sous forme métallique, complexe et inclus dans une structure en feuillet.

Historiquement, les premières anodes ont été fabriquées avec du lithium métallique. Mais la formation de dendrites, filaments conducteurs, conduisait à un court-circuit entre les deux électrodes [12]. Pour résoudre ce problème, les anodes des nouvelles générations de batteries au lithium sont fabriquées à partir de graphite en feuillets. Les cathodes, quant à elles, sont constituées d'une

structure en oxyde de métal, spinale, olivine ou en couche, dans lesquelles sont inclus les ions  $Li^+$ .

Liste des principales technologies de cathode : [4]

- **LCO**  $LiCoO_2$  : 1ère cathode au cobalt, aujourd'hui peu utilisée.
- **NCA**  $LiNi_xCo_yAl_zO_2$  : Cobalt en moindre proportion et meilleure capacité massique.
- **NMC**  $LiNi_xCo_yMn_zO_2$  : Technologie prépondérante aujourd'hui, sa proportion en cobalt a été réduite au cours du temps, passant de 33% à 10% environ.
- **LFP**  $LiFePO_4$  : Technologie inventée en 1996 qui n'a réellement décollé que récemment, relativement peu chère et se passant de ressources potentiellement critiques (Co, Ni par ex.), mais dont les performances restent à améliorer.

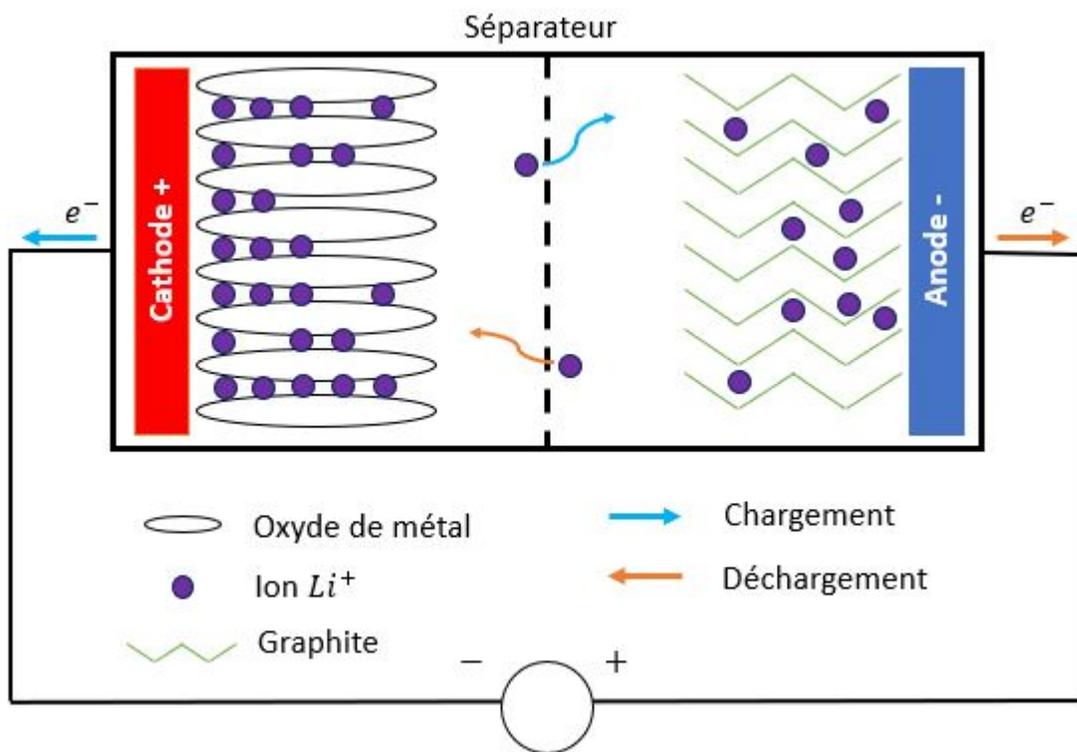


FIGURE 2 – Schéma de fonctionnement d'une batterie Li-ion

### 1.3 Critères de choix d'une technologie de stockage

Les domaines d'utilisation des batteries sont variés, et la figure 1 a montré que la plage de performances du lithium-ion est vaste. Ainsi, il est important de se concentrer sur quelques critères pour choisir la solution la plus adaptée parmi les technologies disponibles :

- **La capacité massique** : C'est la quantité d'énergie qu'une batterie peut stocker par unité de masse (définie avec l'enveloppe de protection ou seulement avec les réactifs internes selon les cas). Elle est particulièrement cruciale pour le stockage embarqué où la masse des batteries

représente un part significative de celle du système complet. C'est le plus grand avantage de la batterie lithium-ion sur les autres chimies de batterie, qui explique son utilisation prépondérante en électronique et pour les transports électriques.

- **La puissance massique** : Elle désigne la puissance maximale que peut délivrer la batterie par unité de masse. C'est un critère important pour l'automobile depuis plusieurs décennies, demandant une forte puissance pour le démarrage. C'est pourquoi la batterie au plomb est si largement utilisée dans les véhicules, elle était traditionnellement la batterie la plus intéressante de ce point de vue, pour son prix.
- **La sécurité** : Du fait de l'utilisation de substances chimiques dangereuses, la protection de l'intégrité de la batterie et de l'utilisateur est une problématique clé. C'est un point faible de la plupart des batteries lithium-ion, inflammables si on les perce et victimes d'emballement thermique si elles sont sursollicitées.
- **La durée de vie**. Elle se mesure en cycles de charge / décharge ou en années pour une fréquence d'utilisation connue.
- **Le coût**.

### Comparatif technique et domaines d'application

	Avantages	Inconvénients	Applications	Futur de la technologie
LCO	Meilleure capacité massique	Contient beaucoup de cobalt – chère	Electronique : ordinateurs, caméras, téléphones ...	Peu pertinente aujourd'hui : marché stabilisé
NMC	Compromis entre capacité massique et sécurité, coût et durée de vie, adapté selon l'application		Applications variées : véhicules électriques, industrie, secteur médical ...	Technologie prédominante, forte croissance de la demande
NCA	Bonne capacité massique	Emballement thermique, risques d'incendies	Utilisée dans véhicules Tesla et par Panasonic principalement	Potentiel dépendant du succès de ces entreprises
LFP	Peu chère, beaucoup plus sûre, bonne puissance, bonne durée de vie	Conditions de fabrication contraignantes Moins bonne capacité massique	Principalement applications de niche nécessitant puissance et longévité	Croissance modérée aujourd'hui, peut changer si le cobalt se raréfie

TABLE 1 – Tableau comparatif des principales cathodes Li-ion [5, 4, 14]

### Besoin en minéraux

Dans un contexte d'explosion du marché de la batterie, en particulier dû au développement de la voiture électrique, la composition chimique des diverses batteries peut être un critère pertinent

pour l'avenir, en particulier pour des ressources critiques comme le lithium, le nickel, et surtout le cobalt (*pour plus de détails sur la criticité de ces ressources, voir article sur les métaux*).

La figure 3 donne la composition de différentes cathodes pour 1kWh d'énergie stockable. La variabilité de teneurs pour les modèles NMC s'explique par la volonté des industriels de réduire leur dépendance en cobalt.

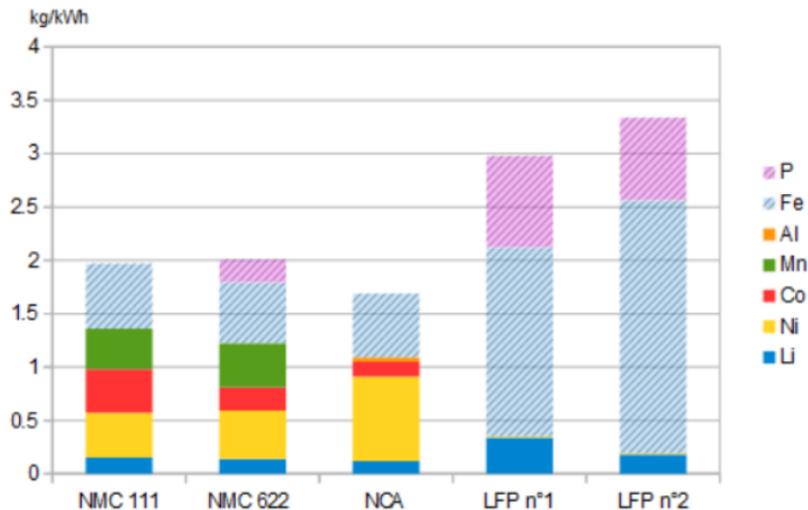


FIGURE 3 – Composition de différents modèles de cathodes par kWh de stockage. Les métaux hachurés sont les plus abondants, dont les ressources ne seront pas limitantes dans un futur proche. Les chiffres après "NMC" représentent la fraction molaire respective de Ni, Mn, Co dans la cathode. Aujourd'hui, ce ratio peut aller jusqu'à 811 [16, 13, 14]

## 2 Difficultés liées au recyclage des batteries Li-Ion

Pour construire une batterie lithium-ion, le nickel, le cobalt et le lithium sont toujours nécessaires. Le cobalt constitue 8 à 20% de la masse d'une batterie, le lithium 6% à 9% de cette masse. Les ressources minières mondiales indiquées, c'est-à-dire les ressources dont le tonnage est identifié et que nous connaissons grâce à un échantillonnage relativement précis de ces différents matériaux (voir l'article Métaux majeurs, métaux mineurs). Nous avons construit un modèle très simple afin d'estimer jusqu'à quand nous disposerons de cobalt et de lithium. En supposant la croissance de la demande en Li et en Co constante, avec les valeurs données dans le tableau 5.1 en annexe, nous aurons exploité l'intégralité des ressources indiquées de cobalt métal vers 2070, celles de lithium entre 2060 et 2110 selon l'hypothèse de croissance retenue. En fonction de la cathode utilisée on peut également avoir besoin d'aluminium ou de manganèse mais nous sommes loin de manquer de l'un comme de l'autre. Actuellement le nickel est recyclé à environ 60% et le cobalt à 68% [7]. Le recyclage du lithium est pour ainsi dire inexistant (1%) [8]. Pourtant ce métal est critique et la demande en batterie lithium-ion est amenée à augmenter. Quels sont les freins au recyclage et les pistes d'amélioration ?

Le recyclage des batteries pose un certain nombre de problèmes, dont le plus évident est l'absence de standardisation des produits [17]. En effet on trouve sur le marché autant de modèles que de fabricants, par conséquent le processus doit s'adapter à chaque batterie ce qui suppose l'intervention d'un opérateur humain. Il s'agit d'un double inconvénient : c'est plus cher et l'opérateur est susceptible de se blesser car le recyclage des batteries suppose la manipulation de produits toxiques ; de plus la mise en contact de batteries conçues avec des technologies différentes peut générer des réactions chimiques entre des composants qui n'auraient pas dû être mis en présence [11]. Enfin le recyclage simultané de batteries aux composants variés peut générer des impuretés dans les batteries recyclées, susceptibles de diminuer leurs performances [11].

Pourtant, certaines études sont encourageantes, comme le procédé hydrométallurgique permettant de recycler une cathode en une cathode identique, avec un taux de récupération d'environ 90% et des impuretés négligeables qui n'affectent pas le bon fonctionnement de la batterie [10]. Mais il faut rester critique car les calculs de coût réalisés ne prennent pas en compte le paiement des machines et du personnel, seulement celui des produits chimiques. De manière plus générale, les procédés de recyclage les plus prometteurs fondés sur l'hydrométallurgie emploient des réactifs coûteux et polluants, les déchets doivent alors subir un traitement spécifique pour satisfaire aux normes environnementales. De plus, ces procédés innovants ne parviennent à recycler que 50% du cobalt [11].

Enfin les batteries au lithium sont actuellement peu récoltées, seulement 3% sont recyclées [15] - excepté en France où le recyclage est obligatoire. On peut cependant supposer que les batteries de voitures électriques pourront facilement être collectées dans les garages. L'exemple des batteries acide-plomb, recyclées à 99% aux Etats-Unis nous montre que cet aspect peut être largement amélioré [11]. Finalement, peut-être que la disparité du parc sera moins limitante dans le cas des voitures électriques si chaque fabricant récupère ses propres modèles pour les recycler. Une législation plus stricte pourrait également aider à standardiser les batteries et les processus de recyclage. Pour faciliter ceux-ci, les fabricants doivent s'attacher à l'éco-conception de leurs produits.

## 3 Marché mondial des batteries Li-Ion

### 3.1 Production mondiale des métaux critiques des batteries Li-Ion

L'explosion du marché des batteries a engendré une très forte augmentation de la production mondiale de cobalt (109,5 kt [7] en 2016) et de lithium (39,5 kt [8] en 2016), et surtout depuis 2016. Pour ce qui concerne le **lithium**, l'Australie a triplé sa production de spodumène dans cette période, et les autres producteurs miniers majeurs sont le Chili, l'Argentine et la Chine. Le lithium est principalement commercialisé comme composé ou concentré ( $Li_2CO_3$ , hydroxyde de lithium, etc.) mais peu en tant que métal.

Le principal producteur minier de **cobalt** est la République Démocratique du Congo, fortement critiquée pour l'absence de transparence et de traçabilité de ses produits. La RDC devance de loin Cuba, la Russie, les Philippines, et l'Australie. Elle est donc en situation de force dans ce marché puisqu'un grand nombre de pays en sont totalement dépendants. La Chine est quant à elle le producteur métallurgique majeur, en s'approvisionnant principalement en cobalt congolais, et aussi le premier consommateur mondial, avec près de 80% de sa consommation dédiée aux batteries. Ainsi, les pays importateurs sont fortement dépendants de la Chine.

Etant donnée la criticité de ces métaux (surtout le cobalt), une nationalisation ou un embargo (congolais ou chinois) auraient des conséquences immédiates et dramatiques dans le reste du monde. Toutefois, les Etats sont loin d'être les seuls acteurs de ce marché : les grandes multinationales de l'industrie des matières premières tentent de faire main-mise sur les mines. Pour le cobalt, Glencore (Suisse) possède pléthore de mines (notamment en RDC) et contrôle 30% de la production minière mondiale. Par son achat en 2016 de la 2<sup>e</sup> plus grande mine de cobalt (en RDC), l'entreprise chinoise China Molybdenum Co. Ltd. en contrôle désormais 15%.

Dès lors, s'assurer de la stabilité et la sécurité de l'approvisionnement en lithium et en cobalt est devenu un enjeu stratégique pour de nombreux pays et entreprises (Etats-Unis, Asie), donnant lieu à la création d'alliances, partenariats et coentreprises. De tels projets permettent notamment de diversifier les sources d'approvisionnement et donc d'éviter les monopoles.

### 3.2 Marché des principaux composants des batteries au Li-Ion

Les demandes en lithium et cobalt subissent une forte croissance avec l'essor des batteries : actuellement, près de 40% du lithium et 50% du cobalt y sont dédiés. **Cependant, même avec une production toujours croissante, à court terme, l'offre risque de ne pas réussir à suivre le rythme de la demande** en raison des temps incompressibles de construction et mise en fonctionnement des installations d'exploitation.

**Le cobalt est coté en bourse au London Metal Exchange (LME) depuis 2010** ; les cours du LME servent de base à toutes les négociations de prix, qui est donc en proie à la spéculation boursière. Depuis 2010, le prix du cobalt fluctue autour de 30 US\$/kg et explose en 2017 pour dépasser 90 US\$/kg. En effet, avec l'explosion du marché des batteries, sa consommation a augmenté de 30% en 5 ans. Comme les ressources sont limitées et qu'une part de l'offre est réservée aux acheteurs traditionnels, une situation de panique s'est formée, ce qui s'est traduit par une hausse des prix. En 2019, le prix est redescendu et fluctue autour de 35 US\$ environ. Or, tous les prix cités sont en monnaie courante. Alors même que l'on pourrait penser que l'on est presque revenu aux prix de 2010, en monnaie constante (où l'inflation est corrigée) ces prix sont plus bas qu'en 2010.

**Le lithium, quant à lui, n'est pas coté en bourse : son prix est donc uniquement déterminé par des négociations directes entre producteurs primaires et transformateurs ou utilisateurs.** Ces prix peuvent fluctuer d'un pays à l'autre, mais la tendance générale est à la hausse. Par exemple, l'hydroxyde de Lithium passe environ de 5 US\$/kg en 2011 à 15 US\$/kg en 2018. Par contre, en Chine on passe de 21 US\$/kg début 2018 à 12 US\$/kg en fin d'année : la stratégie chinoise consistant à posséder l'intégralité de la chaîne de production (mines, métallurgie, construction de batteries) lui permet de baisser ses prix et donc de se positionner tant que possible comme leader mondial dans le stockage d'énergie et les voitures électriques.

## 4 Conclusion

Le développement des batteries Li-Ion est un enjeu majeur pour le stockage d'énergie, à la fois du point de vue technique, économique, géopolitique et environnemental. En effet, étant donnée la criticité des matières premières mises en jeu, la question de la limitation des ressources incite à

développer le recyclage ainsi qu'à rechercher des alternatives (telles que la technologie Fer Phosphate) voire des nouvelles technologies qui seraient plus durables. Toutefois, sans une prise d'action majeure au niveau international et si l'on demeure dans une logique de croissance, aucune solution viable ne risque de voir le jour, du moins à court terme.

## 5 Annexes

### 5.1 Tableau récapitulatif des consommation, production, ressources des principaux composants d'une batterie au lithium

Métal	Li	Co	Ni	Cu
Consommation mondiale actuelle (kt)	33	93	1 890	23 430
Prévision de l'évolution de la consommation (par an)	entre +6.4% et +14.4%	+7%	+ 2.5%	+2.5%
Production mondiale actuelle (kt)	36.5	109.5	2 150	20 220
Réserves connues (Mt)	8.3 (Roskill 2016); 14 (USGS 2017)	7	69	777
Equivalent en années au rythme de production actuelle (ODG)	300	75	30	40
Equivalent en années au rythme de production estimé (ODG)	50	25		25
Ressources identifiées (Mt)	62	25 (terrestres)	268	2 720
Prix moyen actuel (US\$ par kg)	$Li_2CO_3$ 13	55	9.5	6
Valeur de marché pour la production actuelle (G US\$)	2.3	6	19	144
Taux de recyclage	1%	68% fin de vie ; 32% secondaire	60% fin de vie ; 35% secondaire	50%
Masse nécessaire pour parc automobile mondial				

*Remarques :*

- Les données dans le tableau remontent au plus tot à 2015 et proviennent des fiches de criticité du BRGM [7] [8] [9] [6] et des rapports de l'USGS.
- Les différences dans les prévisions du développement de l'industrie des véhicules électriques expliquent l'écart entre les prévisions de Roskill et de l'USGS pour la consommation de Lithium.

### 5.2 Production mondiale des composants des batteries Li-Ion

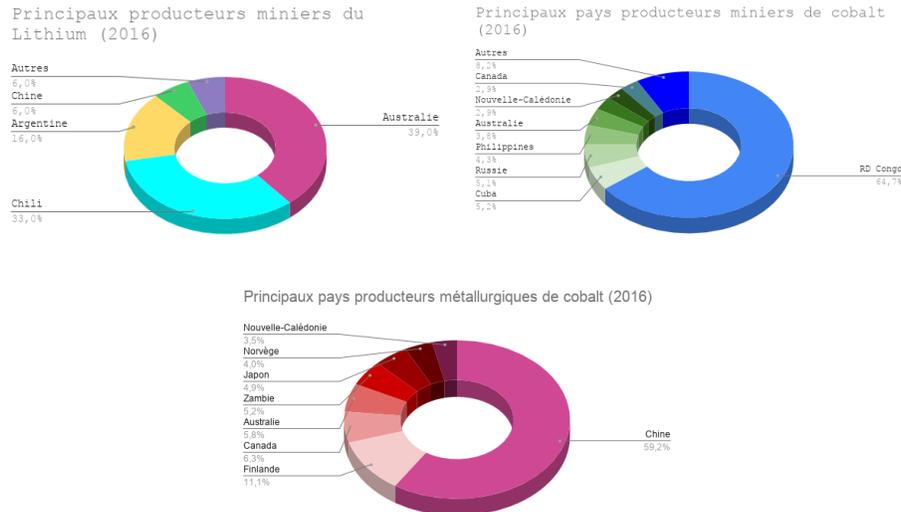


FIGURE 4 – Principaux pays producteurs miniers et/ou métallurgiques de lithium et cobalt

## Références

- [1] CAES, stockage par air comprimé, December 2013.
- [2] Le prix Nobel de chimie 2019 récompense l'invention des batteries au lithium-ion, October 2019.
- [3] Stockage hydraulique : atouts et contraintes, April 2019.
- [4] Types of Lithium-ion Batteries – Battery University, July 2019.
- [5] George E. Blomgren. The Development and Future of Lithium Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(1) :A5019–A5025, January 2017.
- [6] BRGM. Fiche de synthèse sur la criticité des métaux - Le nickel. Technical report, BRGM, December 2016.
- [7] BRGM. Fiche de synthèse sur la criticité des métaux - Le cobalt. Technical report, BRGM, December 2017.
- [8] BRGM. Fiche de synthèse sur la criticité des métaux - Le lithium. Technical report, M, December 2017.
- [9] BRGM. Fiche de synthèse sur la criticité des métaux - Le cuivre. Technical report, BRGM, January 2018.
- [10] Eric Gratz, Qina Sa, Diran Apelian, and Yan Wang. A closed loop process for recycling spent lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*, 262 :255–262, September 2014.
- [11] Bin Huang, Zhefei Pan, Xiangyu Su, and Liang An. Recycling of lithium-ion batteries : Recent advances and perspectives. *Journal of Power Sources*, 399 :274–286, September 2018.
- [12] Frédéric Le Cras and Didier Bloch. De Volta aux accumulateurs Li-ion - Développement des batteries au lithium, November 2016.

- [13] Elsa A. Olivetti, Gerbrand Ceder, Gabrielle G. Gaustad, and Xinkai Fu. Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations : Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals. *Joule*, 1(2) :229–243, October 2017.
- [14] Christophe Pillot. The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2018 – 2030, May 2019.
- [15] Basudev Swain. Recovery and recycling of lithium : A review. *Separation and Purification Technology*, 172 :388–403, January 2017.
- [16] Marcel Weil, Saskia Ziemann, and Jens Peters. The Issue of Metal Resources in Li-Ion Batteries for Electric Vehicles. In Gianfranco Pistoia and Boryann Liaw, editors, *Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles : Battery Health, Performance, Safety, and Cost*, Green Energy and Technology, pages 59–74. Springer International Publishing, Cham, 2018.
- [17] Guangjin Zhao. *Reuse and Recycling of Lithium-Ion Power Batteries*. John Wiley & Sons, Incorporated, New York, SINGAPORE, 2017.

# Potentiel du lithium alsacien pour l’approvisionnement français

Maxime Carens, Thomas Foliard, Quentin Guitet, Maud Roux-Salembien

19 décembre 2019

Avec le développement annoncé des voitures électriques, la consommation de lithium pour les batteries lithium-ion est amenée à croître. D’après un article de Denis Sergent publié dans La Croix le 9 novembre 2019, l’Alsace pourrait d’ici quelques années fournir 30 à 40% de la demande industrielle française en extrayant le lithium dissous dans les saumures géothermales qui seront déjà exploitées en premier lieu pour la production d’électricité. Nous avons cherché à calculer un ordre de grandeur du potentiel de production de la région.

## 1 Le lithium, un métal critique

Le lithium est le troisième élément du tableau périodique, essentiellement utilisé dans la confection de batteries et de céramiques. La consommation de lithium a doublé en 10 ans, passant de 21 300 tonnes en 2008 à 43 000 tonnes en 2017 [7]. D’après l’article de La Croix, la demande française en lithium métal pour l’industrie du transport est de 3 000 tonnes par an. Nous avons essayé de réévaluer ce chiffre : d’après l’article sur les batteries Li-Ion la batterie d’une voiture électrique contient au maximum 10 kg de lithium métal [4]. Or en 2019, 38000 voitures électriques ont été immatriculées en France [6]. Ainsi comme le secteur des batteries consomme aujourd’hui environ 40 % de la production de lithium [1], cela nous permet d’estimer le besoin annuel actuel à presque 2400 tonnes de lithium métal, en prenant la fourchette haute. Cependant ce chiffre ne tient pas compte du fait que la majorité des biens de consommation qui contiennent du lithium n’ont pas été produits en France.

A ce jour, la France ne produit pas de lithium, elle est donc dépendante de l’étranger pour sa consommation. L’élément est cependant considéré par le Comité des Métaux Stratégiques (Comes) comme un métal critique [3] et sa consommation est appelée à augmenter très fortement avec l’électrification du parc automobile. Par conséquent certaines entreprises s’intéressent à de nouveaux moyens de produire le lithium, tablant sur l’importance stratégique d’une production nationale.

## 2 Principe de la géothermie profonde

Pour répondre à la demande en lithium, les saumures de la géothermie profonde, riches en minéraux, attirent l’attention. En Alsace, ce sont des forages de quelques kilomètres de profondeur qui exploitent une eau souterraine entre 150 et 200°C pour la production électrique et le chauffage domestique ou industriel. L’eau est extraite d’une roche poreuse ou fracturée, ce qui facilite son écoulement jusqu’au point de pompage. Pour préserver la nappe et éviter de polluer les eaux de surface en y rejetant les saumures après exploitation, les centrales géothermiques fonctionnent par doublets : un puits extrait les saumures chaudes tandis qu’un second les réinjecte une fois leur chaleur récupérée.

Pour l’instant, ces saumures sont uniquement exploitées pour leur chaleur. L’idée des industriels alsaciens serait, sur les nouvelles installations, d’extraire le lithium dissous à hauteur d’environ 200 mg/L dans les saumures (très variable selon les sites). La société Fonroche Géothermie prévoit par exemple une production d’environ 300 tonnes de lithium métal par an sur son futur site de Vendenheim [6] (en construction, voir Tableau 1).

Contrairement aux idées reçues, la géothermie profonde n’est pas une énergie complètement renouvelable. En effet, aux débits d’utilisation usuels, on pompe la chaleur du gisement plus vite que la Terre ne lui en transmet. Il se forme alors un "front de roche refroidie" qui se propage autour du puits d’injection, atteignant progressivement le puits d’extraction. Au bout de 30 à 50 ans, la température de l’eau extraite devient généralement trop basse pour une exploitation rentable, marquant la fin d’exploitation du doublet de forages. En comparaison, on estime que la ressource thermique ainsi puisée mettrait entre 50 et 200 ans à se renouveler [5].

Site	Société	Mise en service	Concentration de $Li^+$ estimée (mg/L)	Débit d'extraction (L/s)
Rittershoffen	Electricité de Strasbourg	2016	190	70-80
Vendenheim	Fonroche	Forage en cours	162	– (estimé entre 40 et 80)
Soultz-sous-Forêts	Electricité de Strasbourg	2016 (Li prévu en 2021)	173	35

TABLE 1 – Quelques sites d'exploitation future du lithium en Alsace [10] [12] [11]

Bien que le renouvellement de la ressource géothermique ne soit pas problématique à très long terme, la géothermie profonde demande des investissements massifs (Fonroche annonce 320 millions d'euros d'investissements en Alsace d'ici 2023, pour 3 sites de production [6]) et met plusieurs années avant d'être opérationnelle. Étant donné le prix de l'énergie, le lithium alsacien ne sera toujours qu'un sous-produit de l'exploitation géothermique, peu importe le cours du métal. On ne peut donc pas imaginer une production qui s'adapte à la demande, condition pourtant nécessaire si l'on cherche une certaine indépendance française.

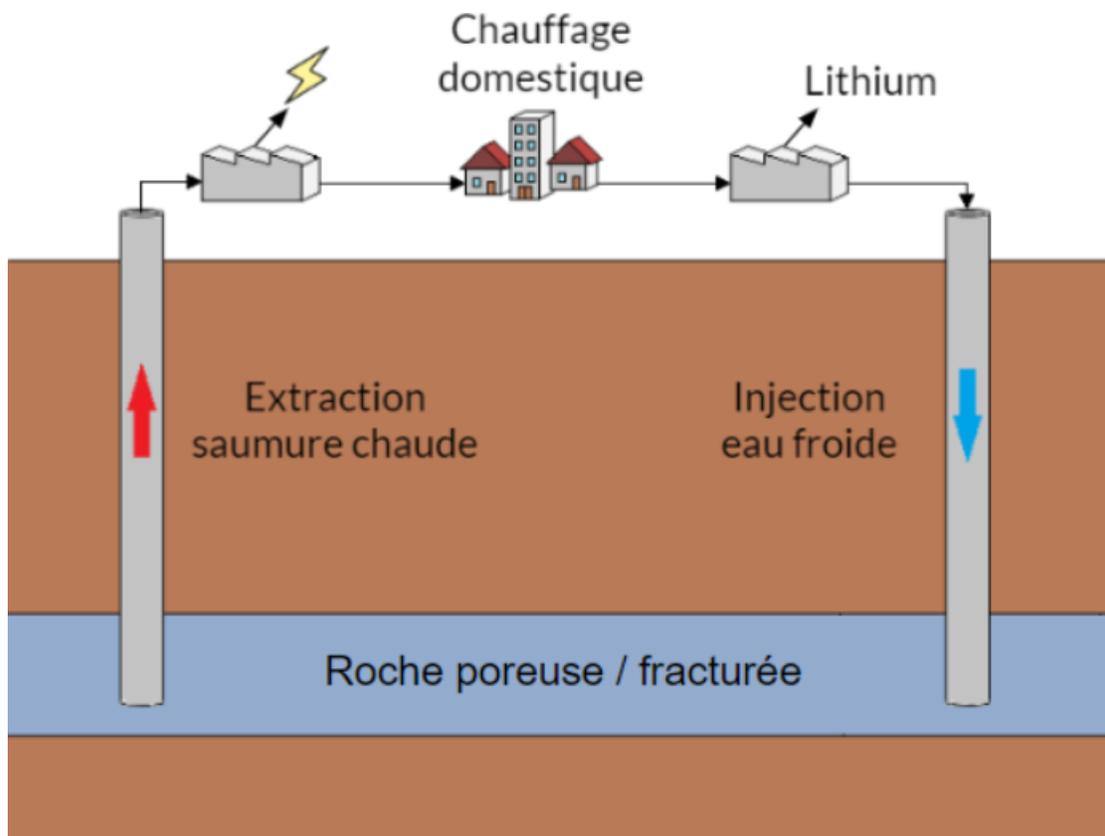


FIGURE 1 – Fonctionnement d'un doublet de géothermie profonde

### 3 Estimation du potentiel de production d'un doublet de puits

#### 3.1 Cadre du modèle

Nous avons cherché à vérifier les ordres de grandeur annoncés dans l'article de la Croix, notamment la possibilité de produire environ 300 tonnes de lithium (équivalent métal) par an pour le futur site de Vendenheim exploité par la société Fonroche Géothermie. Pour estimer le potentiel de production, on serait tenté de multiplier le débit d'extraction par la concentration mesurée pour obtenir un ordre de grandeur de la production annuelle. Pour le futur site de Vendenheim, avec un débit entre 40 et 80 L/s, on aurait une production entre 200 et 400 t/an, soit du même

ordre qu’annoncé.

En réalité, étant donné qu’on réinjecte un fluide appauvri en lithium, ce fluide migrant tout autour du puits d’injection jusqu’au puits d’extraction, il vient diluer la saumure et fait ainsi baisser la concentration de lithium au niveau du puits d’extraction... ce qui pourrait compromettre le rendement du puits. Nous avons donc modélisé ce phénomène pour estimer plus précisément la production potentielle de lithium, à l’aide des modèles développés par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières. [2]

Nous nous plaçons dans un cadre très simplifié, permettant avant tout d’estimer des ordres de grandeur :

- la roche contenant la saumure est supposée être une couche infinie d’épaisseur constante, homogène et isotrope (le liquide se déplace aussi facilement partout, dans toutes les directions) ; l’hypothèse est discutable dans la mesure où le fluide passe dans un réseau complexe de failles
- il n’y a aucun écoulement naturel de la saumure ; dans une situation favorable, un écoulement pourrait en partie renouveler la saumure et ainsi partiellement compenser la baisse de la concentration, ce qui en fait l’hypothèse la plus discutable
- le débit d’extraction est constant (le débit moyen convient si le temps caractéristique de variation du débit est faible devant le temps caractéristique de migration de la saumure, ce qui est le cas)
- la roche ne contient pas de lithium (qui pourrait venir se dissoudre dans l’eau, ce qui pourrait conduire à ré-enrichir la saumure en lithium entre le puits injecteur et le puits producteur) ; l’hypothèse semble raisonnable au vu de la faible teneur des roches

Lors de l’exploitation, il se produit une baisse de pression au niveau du puits d’extraction, accompagnée d’une augmentation de pression au puits d’injection. Ceci modifie la carte des pressions de manière à créer des lignes de champ joignant les deux puits. La saumure appauvrie, une fois injectée, suit ces lignes de champ en migrant lentement vers le puits d’extraction. Toutefois, la ligne de champ suivie, donc la taille du trajet pour aller d’un puit à l’autre, dépend de la direction de départ de l’eau appauvrie. La saumure appauvrie n’arrive donc que progressivement au puits d’extraction, venant lentement diluer la saumure d’origine.

On introduit le temps de percée  $t_0$ , correspondant au temps que les premières gouttes de saumure diluée mettent pour rejoindre le puits d’extraction. Le modèle fournit alors, en exprimant les données dans le système international :

$$t_0 = \frac{\pi\omega D^2 h}{3Q} \tag{1}$$

où  $D$  est la distance entre les puits,  $h$  la hauteur de la veine perméable dans laquelle le fluide se déplace,  $Q$  le débit d’extraction et  $\omega$  la porosité cinématique de la roche. Cette dernière étant très difficile à déterminer avec précision - d’autant que nous n’avons pas directement accès à toutes les données des exploitants - nous avons testé plusieurs scénarios. La figure 2 correspond à  $\omega = 5\%$  et aux données estimées pour le futur site de Vendenheim ( $D = 1200m$ ,  $h = 40m$ ,  $Q = 60L/s = 0.06m^3/s$ , ce qui donne  $t_0=1,5$  ans). La concentration de en lithium de départ est prise à  $162mg/L$ . [12]

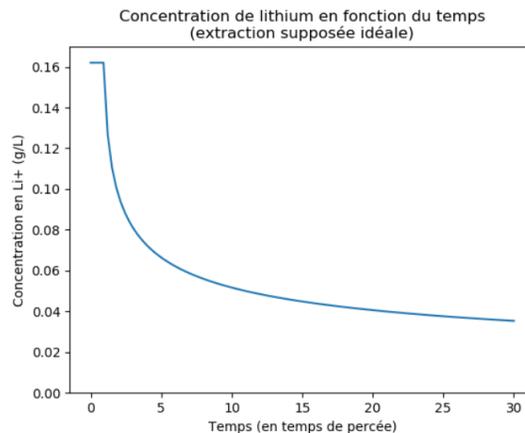


FIGURE 2 – Evolution de la concentration en ions  $Li^+$  au puits d’extraction

Avec l'hypothèse supplémentaire que la teneur en lithium de l'eau ré-injectée est constante dans le temps (ce qui est vrai si on arrive à retirer tout le lithium de la saumure et reste sinon une approximation acceptable au vu des procédés en développement), on arrive à donner une estimation de la concentration en fonction du temps (figure 2), et donc de la production de lithium. L'axe des temps est gradué en fonction du temps de percée  $t_0$ , afin de s'affranchir au maximum des données numériques.

### 3.2 La question des procédés d'extraction

Connaissant la concentration de lithium à la sortie du puits et le débit d'extraction, on peut en déduire une production annuelle. Celle-ci est bien évidemment amenée à décroître en même temps que la concentration de la saumure. La figure 3 présente la production annuelle prévue pour le site de Vendenheim, calculée dans le cas idéal où nous disposerions d'un procédé capable d'extraire la (quasi-)totalité des ions  $Li^+$ , avec les paramètres estimés ou fournis par Fonroche Géothermie. Le paramètre le plus incertain étant la porosité de la roche, nous fournissons le graphique pour plusieurs porosités, sans que cela n'affecte grandement nos conclusions.

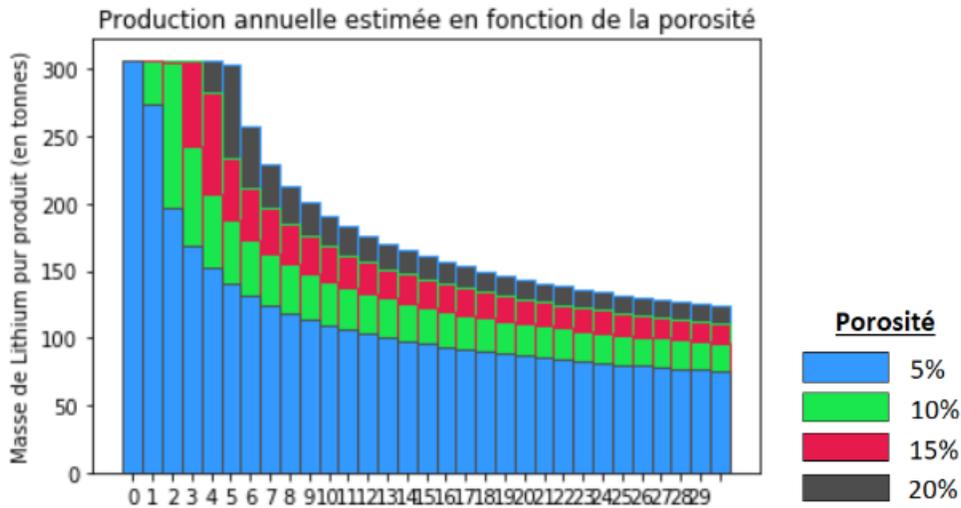


FIGURE 3 – Evaluation de la production annuelle sur un doublet de Vendenheim

En réalité, les procédés sont encore en développement. Ils n'extraient pas tout le lithium et ne sont rentables qu'à partir d'une concentration minimale. Etant donné que la concentration baisse rapidement avec le temps, il s'agirait d'avoir un procédé rentable même avec une concentration 2 à 3 fois inférieure à celle d'origine.

La société Adionics a par exemple mis au point un procédé d'extraction liquide-liquide qui permettrait d'extraire plus de 90% du lithium, et qui serait efficace à partir d'une concentration de 20 mg/L dans les saumures. Cependant il doit encore être adapté pour fonctionner aux températures élevées auxquelles l'eau sort des centrales (40°C à 70°C). D'après cette société, le procédé est déjà en phase pilote et devrait être fonctionnel dans moins de 5 ans. [8]

Le directeur du développement d'Electricité de Strasbourg affirme quant à lui que sa société pourra extraire du lithium dès 2021, avec le concours d'Eramet [1] qui utilise un autre procédé à base de solides actifs pour extraire et concentrer le lithium [11].

En faisant des hypothèses sur l'efficacité des procédés et sur les débits d'extraction, et avec les données pour différents sites prévus, on obtient des productions annuelles de l'ordre de la centaine de tonnes par site pour la première année, soit des ordres de grandeur similaires à ce qui est annoncé dans l'article du journal la Croix. Une remarque qui semble cependant passée sous silence et qui ressort dans l'ensemble des modèles est la décroissance de la production au bout de quelques années avec une division possible par deux ou trois de la production au bout de cinq à quinze ans (selon la porosité et le débit)... Toutefois, le modèle proposé négligeant l'écoulement naturel de la saumure (par gravité notamment), si les puits sont convenablement placés, leur durée de vie peut être significativement augmentée.

## 4 Pourra-t-on valoriser les importantes ressources connues en sous-sol ?

Le BRGM propose une évaluation des ressources alsaciennes de lithium contenu dans les saumures de l'ordre du million de tonnes [9], tout en précisant que ce chiffre est à prendre avec précautions : en l'absence de données précises il a été approximé en supposant constantes l'épaisseur de la couche contenant la saumure et sa teneur en lithium. Notre modèle montre qu'on pourrait extraire 200 à 400 tonnes de lithium d'un doublet de puits pendant ses 3-4 premières années d'exploitation, puis ce chiffre tomberait à 100-200 tonnes de lithium pendant une vingtaine d'années. Pour comparer l'intérêt de ce mode de production à celui plus traditionnel des mines, nous pouvons rapporter la production de lithium de dix doublets de puits à la production minière mondiale, qui s'éleva à 85 000 tonnes en 2018 d'après l'usgs. Les premières années, dix puits alsaciens produisant chacun au 300 tonnes de lithium par an rapporteraient 3% de la production minière mondiale de 2018, ce qui n'est pas négligeable - ce chiffre tomberait à 1% au bout d'une quinzaine d'année en tenant compte de la baisse de la concentration en lithium et sans considérer l'évolution de la production minière, une hypothèse très audacieuse étant donné que celle-ci a triplé en 10 ans. À titre de comparaison l'Argentine était en 2019 le quatrième producteur de lithium minier avec 7% de la production mondiale [13] [14].

## 5 Une demande de plus en plus importante

Avec l'émergence des voitures électriques la demande en batteries lithium-ion est en forte augmentation, et la part des batteries dans l'utilisation du lithium est déjà majoritaire. L'exploitation du lithium contenu dans les saumures géothermales serait-elle suffisante pour électrifier le parc automobile français ? Nous avons fait un modèle, adapté à partir de celui présenté dans l'article *Recyclage et mines urbaines*, qui prévoit d'électrifier les 39 millions de véhicules actuellement en circulation en France d'ici 2050. Nous ne prenons pas en compte une éventuelle croissance du parc automobile. En imposant un scénario de croissance indiquant le nombre de véhicules qui doivent être électrifiés chaque année, on obtient la quantité de lithium métal nécessaire par an, c'est la demande primaire, en orange sur la figure 4. On constate que l'on a besoin de 12 000 tonnes de lithium métal en 2060 - dans notre modèle le parc automobile serait déjà électrifié mais il faut remplacer les anciennes batteries, car elles ont une durée de vie de 10 ans. Avec dix doublets de puits nous produirions moins de 10% de ce dont nous aurions besoin : nous serions loin d'être indépendants. . .

Dans un second temps, on envisage que l'on recycle le lithium. On estime que notre capacité à le recycler augmente rapidement et qu'à notre maximum nous parvenons à recycler 90% du lithium (voir figure 5 en annexe). Nous gardons l'hypothèse de croissance de la demande précédente.

D'après la figure 4, nous aurions besoin au maximum de 6 000 tonnes de lithium métal, puis à terme d'environ 1200 tonnes par an. Une dizaine de doublets de puits permettrait de satisfaire cette demande. Cependant il faut prendre en compte la durée de vie d'une installation. En effet on estime la durée de vie d'un doublet de puits géothermal à 30 ans - c'est peut-être pessimiste étant donné le manque de recul que nous avons sur les installations récentes. A cette limitation il faut ajouter celle de la teneur en lithium des saumures, qui pourrait baisser jusqu'à rendre le procédé non rentable (ce seuil nous est pour l'heure inconnu). Pour prendre en compte ces limites on calcule l'ensemble du lithium métal nécessaire selon notre modèle entre 2020 et 2100. Sans recyclage il faudrait 770 000 tonnes de lithium métal contre 220 000 tonnes avec recyclage. Sachant que, d'après notre modèle, un doublet de puits produit au total entre 3 600 et 5 800 tonnes de lithium pendant ses 30 ans de durée de vie, il nous faudrait une cinquantaine de doublets de puits avec recyclage, 130 à 210 doublets de puits sans. En raison du temps nécessaire pour mettre en place un doublet de puits, il est difficilement envisageable d'en construire autant en 80 ans, d'autant plus que les doublets sont avant tout exploités pour produire de la chaleur, le lithium n'étant qu'un sous-produit. En revanche si l'on décide de se cantonner à une dizaine de doublets de puits, en assurant de 2020 à 2100 que dix doublets sont continuellement en service, nous pourrions produire 96 000 à 150 000 tonnes de lithium pendant cette période. Dans l'hypothèse où l'on recyclerait le lithium, cela signifierait que 40 à 70% du lithium utilisé pour électrifier le parc automobile et l'entretenir serait issu des saumures géothermales alsaciennes.

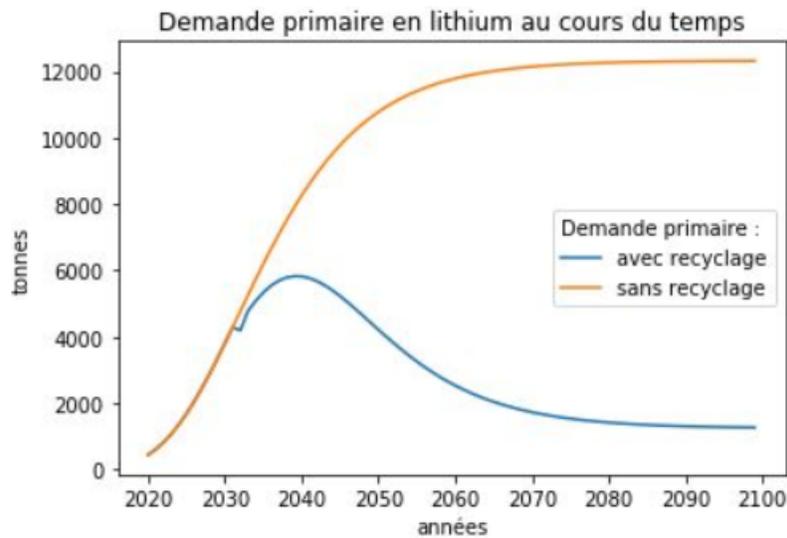


FIGURE 4 – Modélisation de la demande primaire en Lithium future en France

## Conclusion

La production de lithium à partir des saumures géothermales dans une dizaine de doublets de puits pourrait significativement nous aider à électrifier le parc automobile français, à condition de recycler le lithium. Cependant cette production serait limitée par deux facteurs, le seuil de concentration en lithium à partir duquel l'extraction n'est plus rentable et la durée de vie du puits géothermal, estimée à 30 ans environ. Si la demande en lithium croît rapidement avec l'avènement des voitures électriques, la lenteur de cette industrie ne permettra pas d'y faire face dans l'immédiat - on ne pourra qu'équiper des sites déjà fonctionnels. Finalement, si la France voulait obtenir une véritable indépendance vis-à-vis du lithium, elle pourrait exploiter des gisements découverts dans des carrières actuellement en service. Du lithium a par exemple été découvert dans la carrière de kaolin de Beauvoir, en quantités très prometteuses. En résumé, la production de lithium par les saumures géothermales a l'avantage d'être bientôt applicable à l'échelle industrielle mais n'offre pas de solution durable aux problèmes posés par la criticité de ce métal.

Annexe

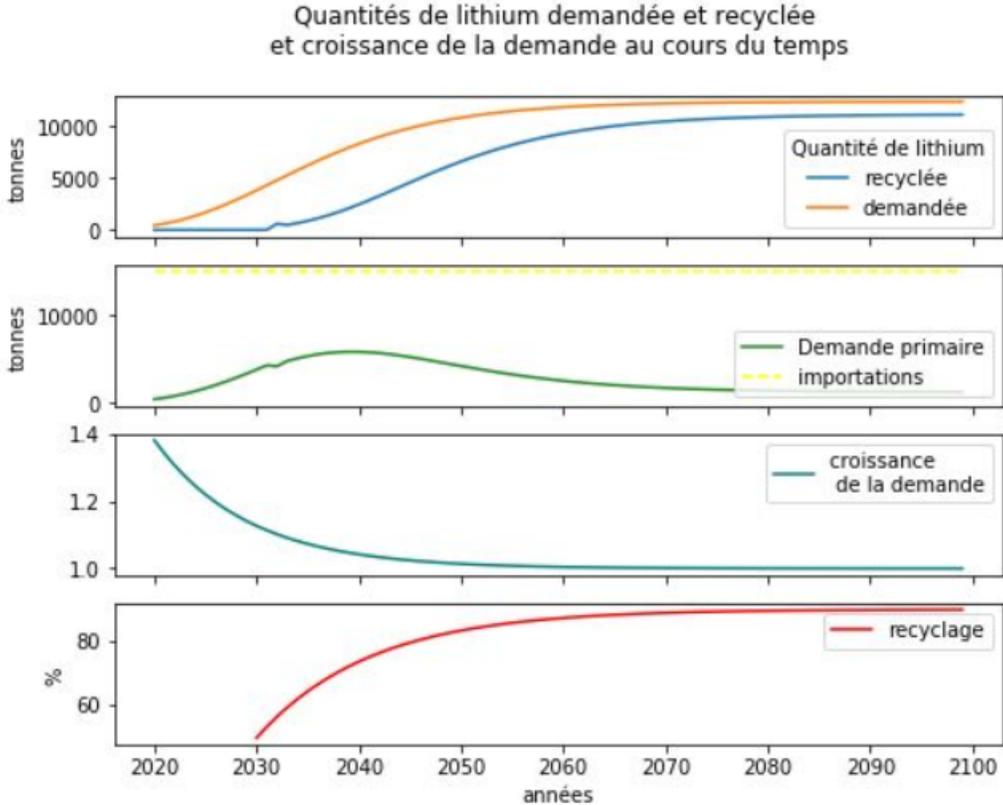


FIGURE 5 – Scénario utilisé pour l'établissement du modèle de la figure 4

## Références

- [1] Rapport d'activité 2018. Technical report, Electricité de Strasbourg, 2018.
- [2] BRGM. *Stockage longue durée en nappe phréatique de calories à basse température pour l'habitat*. 1979.
- [3] BRGM. Fiche de synthèse sur la criticité des matières premières minérales - Le lithium. Technical report, December 2017.
- [4] Myrtille DELAMARCHE. Faisons le pari du Lithium Made in Europe. February 2019.
- [5] FONROCHE. FAQ Géothermie.
- [6] FONROCHE. L'Alsace peut fournir l'industrie en lithium. Communiqué de presse, FONROCHE Géothermie, July 2019.
- [7] Eric GLOAGUEN, Jérémie MELLETON, Gaëtan LEFEBVRE, Bruno TOURLIERE, and Silvain YART. Resources métropolitaines en lithium et analyse du potentiel par méthodes de prédictivité. Technical Report BRGM/RP-68321-FR, December 2018.
- [8] Guillaume de Souza. Adionic's Temperature Swing Salt Absorption Technology (TSSA) for the valorization of dissolved compounds, October 2019.
- [9] H. Pauwels, M. Lambert, and A. Genter. Valorisation des fluides géothermaux contenant du lithium en vue d'une production industrielle. Technical report, September 1991.
- [10] Jeanne Vidal. La géothermie profonde dans le Fossé rhénan, January 2017.
- [11] Bernard Kempf. Du lithium dans le sous-sol alsacien, March 2019.
- [12] Bernard Sanjuan, Gabrielle Negrel, Morgan Le Lous, Ewan Poulmarch, Frédérick Gal, and Pierre-Clément Damy. Main geochemical characteristics of the deep geothermal brine at Vendenheim (Alsace, France) with constraints on temperature and fluid circulation. page 13, 2019.
- [13] USGS. Mineral Commodity Summaries 2009. Technical report, USGS (United States Geological Survey), 2009.
- [14] USGS. Mineral Commodity Summaries 2019. Technical report, USGS (United States Geological Survey), 2019.

# Sur la disponibilité de l'uranium : quelles ressources et quelles échéances ?

Cyprien Bouton, Marc de Froidefond, Quentin Guitet, Léa Trin

19 décembre 2019

La production d'électricité dans les centrales nucléaires est une technologie controversée, ayant toutefois de nombreux atouts dans le cadre de la transition énergétique (très faibles émissions de  $CO_2$ , puissance, pilotabilité...). Dans cet article, nous nous posons la question d'une éventuelle limitation du nucléaire par les ressources en uranium en estimant des échéances en fonction de divers scénarios.

## 1 Quels sont les besoins en Uranium ?

Aujourd'hui, la quasi totalité de l'uranium extrait du sol est exploité pour la préparation du combustible des réacteurs nucléaires : une partie est effectivement utilisée en tant que combustible, alors que l'autre est seulement stockée, nous détaillerons plus loin pourquoi. Nous allons dans cette article nous concentrer sur la seule utilisation de l'uranium dans la production d'électricité, en négligeant ses autres usages (militaire et médical notamment). La production d'électricité par la fission atomique représente environ 10% de la production mondiale d'électricité, et si selon de nombreux scénarios de l'Agence Internationale pour l'Energie Atomique (AIEA), cette proportion devrait rester stable dans les prochaines années, couplée à l'augmentation de la demande en électricité, elle devrait induire une pression de plus en plus forte sur les ressources mondiales d'uranium.

L'énergie atomique est une énergie bien plus concentrée que la majorité des énergies fossiles. En effet, à masse égale, la fission de l'uranium libère (en ordre de grandeur) 1 million de fois plus d'énergie que la combustion du pétrole. Cependant, cette grande concentration énergétique de l'uranium n'est aujourd'hui pas exploitée dans son entièreté. On estime en effet que seuls 0.5% des noyaux extraits du sol sont fissionés dans les réacteurs nucléaires actuels. Cette faible exploitation de l'uranium naturel a plusieurs explications.

La première est la composition isotopique naturelle de l'uranium, qui contient 99.3% d'uranium 238, isotope non fissile, mais toutefois fertile (pouvant donner un noyau fissile en recevant un neutron), et donc très peu exploité dans les réacteurs actuels, contre 0.7% d'uranium 235, fissile, plus facilement exploité dans les réacteurs actuels. Ainsi, dans la plupart des technologies utilisées, avant de pouvoir être exploité, l'uranium naturel doit être enrichi en uranium 235, ce qui engendre aussi des pertes (voir encadré sur le cycle du combustible).

Le second facteur limitant l'utilisation complète du combustible naturel est le taux de combustion imparfait : même une fois enrichi, le combustible naturel n'est pas exploité dans sa totalité car la réaction cesse en dessous d'une certaine teneur en uranium 235. Cependant, cette exploitation peut aussi être optimisée grâce à la réutilisation éventuelle du plutonium généré dans les réacteurs et de l'uranium restant à la fin de la réaction.

Lorsque tous ces facteurs sont pris en compte, ainsi que le rendement thermique des centrales nucléaires, on estime que 20 tonnes d'uranium naturel sont nécessaires à la production d'un TeraWatt-heure électrique, ce qui permet d'expliquer qu'aujourd'hui, environ 70 000 tonnes d'uranium naturel par an sont nécessaires pour la production d'électricité nucléaire au niveau mondial.

Le calcul ainsi réalisé en considérant les réacteurs actuellement en fonctionnement, mêlé aux différents scénarios imaginés par l'AIEA sur la production future d'électricité nucléaire permet d'avoir une estimation de la quantité d'uranium naturel qu'il sera nécessaire d'extraire dans les prochaines années (figure 1).

### 1.1 Ressources

Pour établir les échéances pour la production d'électricité nucléaire, il faut tout d'abord connaître la disponibilité de l'uranium. A partir de rapports de différents organismes, il est possible d'obtenir une estimation des ressources mondiales. Ici, on s'intéresse aux ressources, et on ne détaillera pas la part des réserves (ce qui est aujourd'hui localisé

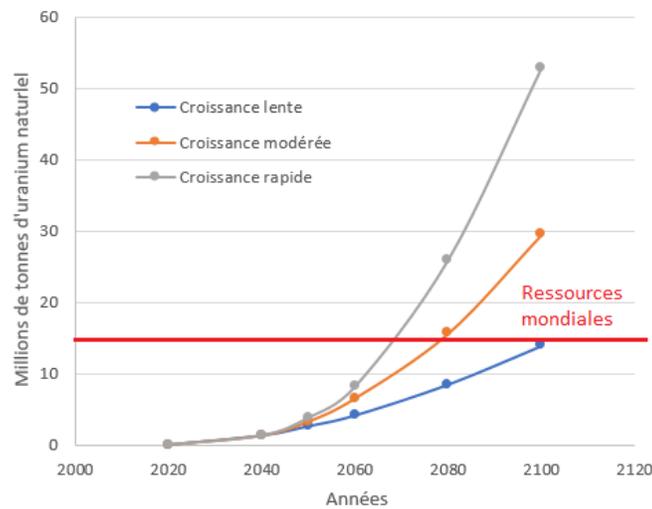


FIGURE 1 – scénarios sur l'évolution de la consommation mondiale cumulée d'Uranium en millions de tonnes, basés sur des modèles de demande en électricité dans les années à venir de l'AIEA

et technologiquement et économiquement exploitable), non représentatives de la quantité ultimement disponible pour le long terme. Tout d'abord, il est intéressant de comprendre les deux types de ressources en uranium.

### Ressources conventionnelles

Les ressources conventionnelles sont les ressources qui ont fait l'objet d'une production industrielle significative que ce soit par extraction directe, en tant que coproduit ou encore en tant que sous-produit important (selon la définition du Livre Rouge de l'OCDE).

L'uranium peut être extrait en co-produit de deux métaux principalement : du cuivre, comme dans la mine d'Olympic Dam en Australie (BHP group, 3 700 tonnes produites en 2016) ; de l'or. Il y a 4 catégories de ressources classées (par des organismes spécialisés) en fonction de leur certitude à propos de la quantité estimée et du coût de leur exploitation :

- les ressources raisonnablement assurées (RRA) qui sont contenues dans des gisements connus.
- les ressources inférées (RP) qui ont de grandes chances d'être techniquement et économiquement exploitables.
- les ressources pronostiquées à partir de données indirectes : une histoire et un environnement géologique et géochimique favorable.
- les ressources spéculatives dont on suppose la présence à partir d'indication indirecte et d'extrapolations. Leur localisation est très peu précise.

Ressources identifiées	RRA	4815,0
	RP	3173,0
	<b>TOTAL</b>	<b>7988,0</b>
Ressources non-découvertes	Pronostiquées	1698,3
	Spéculatives	5832,3
	<b>TOTAL</b>	<b>7530,6</b>
<b>TOTAL</b>		<b>15518,6</b>

FIGURE 2 – Estimation des ressources mondiales conventionnelles en uranium en 2018 à partir du rapport de l'OCDE, en milliers de tonnes d'uranium (sans restriction de prix)

On estime donc les ressources conventionnelles totales d'uranium (y compris spéculatives) à 15,5 millions de tonnes. C'est celles-ci qu'on va prendre en compte pour évaluer les échéances de disponibilité en uranium, mais il faut savoir qu'il existe un autre type de ressources exploitables, pouvant potentiellement largement repousser l'échéance.

## Ressources non-conventionnelles

Les ressources non-conventionnelles sont les ressources issues d'exploitations où l'uranium est considéré comme un sous-produit mineur, comme les phosphates ou les schistes noirs, ou bien d'autres sources plus "exotiques" encore non exploitées, telles que l'eau de mer. La plupart ne sont pas exploitées aujourd'hui (absence d'incitation économique) et il faudrait développer de nouvelles méthodes d'extraction. C'est déjà fait en partie avec l'extraction de phosphates au Maroc.

## Echéances

En s'appuyant sur les scénarii précédents et en ajoutant la barre des ressources ultimes en uranium, on détermine les échéances de la disponibilité en uranium.

On observe que si on ne change en rien les technologies des centrales ou le mix énergétique, les ressources en uranium viendront à s'épuiser avant 2100 quel que soit le scénario, mais garantit environ 50 ans de ressources sans augmentation massive et imprévue de la consommation d'électricité nucléaire. Il faut tout de même garder en tête que nos chiffres peuvent paraître pessimistes, notamment car nous n'avons pas pris en compte les ressources non-conventionnelles; le département américain pour l'énergie estime qu'il y aurait 22 millions de tonnes d'uranium récupérables rien que dans les phosphates.

Mais il y a peut-être tout de même un intérêt important à explorer de nouvelles générations de centrales, ou de nouvelles technologies pour repousser cette échéance. Dans la suite, nous développons quelques pistes à cette fin, en étudiant une technologie existante (le recyclage), et deux technologies de réacteur prometteuses, encore en développement (on parle de réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération).

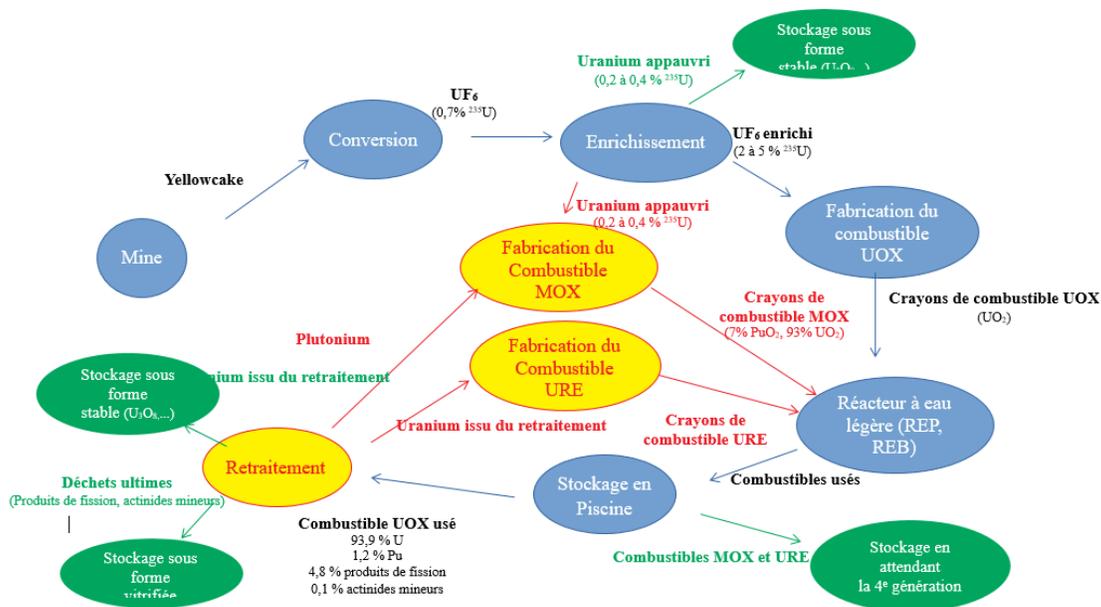


FIGURE 3 – Cycle de vie de l'uranium

## Le cycle de vie de l'Uranium

De la mine à la centrale, puis durant le traitement des déchets radioactifs, l'uranium subit de nombreux traitements. La figure 1 vise à en résumer les différentes étapes dans le cas des réacteurs dits à eau légère (à savoir les réacteurs à eau pressurisée et les réacteurs à eau bouillante – REP et REB), qui représentent environ 90% de la puissance installée. Quelques adaptations sont nécessaires dans le cas des autres types de réacteur.

### De la mine à la centrale

L'uranium naturel est constitué de 2 isotopes : 99,3 % d'uranium 238 et 0,7% d'uranium 235. Il est principalement extrait dans des mines à ciel ouvert ou souterraines, par lixiviation (injection d'eau acide ou basique dans des roches contenant de l'uranium afin de le dissoudre), ou en sous-produit d'autres matières premières. Après un traitement chimique, on obtient un yellowcake, solide jaune contenant environ 70% d' $U_3O_8$  (en masse). Un autre procédé chimique purifie le yellowcake et permet d'obtenir l'uranium sous la forme d' $UF_6$ , gazeux autour de 50C : on parle de conversion.

Pour l'instant, seuls 0,7% des molécules d' $UF_6$  contiennent un atome d'uranium 235, isotope fissile (capable de fissionner après impact d'un neutron). Or cet isotope doit être présent en quantité suffisamment importante dans le combustible pour permettre une réaction de fission en chaîne. L' $UF_6$  est donc enrichi en uranium 235 en passant dans des centrifugeuses. On génère ainsi d'un côté de l'uranium dit enrichi, contenant entre 2 et 5% d'uranium 235, et de l'autre de l'uranium appauvri, en contenant seulement 0,2 à 0,4%. L'uranium appauvri n'est aujourd'hui pas utilisé et est reconverti sous forme stable ( $U_3O_8$ ) pour être stocké.

L' $UF_6$  est enrichi est reconverti en  $UO_2$  et sert à la confection de crayons de combustible cylindriques, constitués d'une gaine d'alliage de zirconium et d'un coeur de pastilles d' $UO_2$ . On parle de combustible UOX (uranium oxyde).

### Dans la centrale

Les crayons sont disposés les uns à côté des autres de sorte à démarrer une réaction en chaîne : les neutrons issus des rares désintégrations spontanées de l'uranium 238 viennent frapper les atomes d'uranium 235 qui fissionnent, émettant à leur tour plusieurs neutrons en même temps que de la chaleur. Une réaction en chaîne commence, les neutrons excédentaires étant absorbés afin d'éviter une réaction incontrôlable. Les neutrons frappent aussi des atomes d'uranium 238, créant de nouveaux éléments tel que du plutonium, fissile mais inexistant à l'état naturel sur la planète. De nombreux éléments chimiques, dont beaucoup sont radioactifs, sont ainsi créés.

A la fin, le combustible usé est retiré de la centrale et entreposé dans des piscines durant 1 à 2 ans afin d'être refroidi, le temps que les éléments radioactifs à vie courte – et très radioactifs – se désintègrent. A la fin, le combustible usé contient 93,9% d'Uranium (dont 0,8% d' $^{235}U$ ), 1,2% de Plutonium, 4,9% de produits de fission et d'actinides mineurs.

### Traitement des déchets et recyclage

Certains pays considèrent le combustible usé comme un déchet. D'autres comme la France ont fait le pari du recyclage : l'uranium et le plutonium sont chimiquement séparés, tandis que les produits de fission et les actinides mineurs, considérés comme des déchets finaux, sont vitrifiés avant stockage définitif (réduisant ainsi de manière substantielle la quantité de déchets).

L'uranium, contenant toujours 0,8% d' $^{235}U$ , peut être ré-enrichi afin de former du combustible dit URE. Ce combustible n'est pour l'instant pas recyclable, car il contient d'autres isotopes artificiels gênant la fission.

Le plutonium, mélangé à de l'uranium appauvri, est utilisé dans la confection de combustible dit MOX, pour l'instant non recyclable non plus.

Ces deux types de combustible recyclé peuvent être intégrés dans les centrales à eau légère existantes, moyennant quelques adaptations mineures des réacteurs.

## 2 Repousser l'échéance

### 2.1 Le potentiel du recyclage

Nous avons cherché à estimer le temps pouvant être gagné sur la ressource en utilisant les combustibles recyclés MOX et URE, qui sont des technologies déjà existantes et partiellement utilisées (voir encadré sur le cycle de vie de l'uranium). Les résultats sont avant tout des ordres de grandeur.

#### Combustible MOX

Le combustible usé contient environ 1% de Plutonium. Or le MOX en contient 7%. Avec des crayons de masse sensiblement équivalente, il faut donc 7 crayons d'UOX pour faire un crayon de MOX. En « régime permanent », on économise donc  $1/(7+1)=13\%$  de combustible par rapport à une situation où l'on produirait autant d'énergie sans MOX. Actuellement, la France produit environ 10% de son électricité nucléaire à partir de MOX, ce qui confirme cet ordre d'idée.

Notons que ce taux de 13% est nettement inférieur au taux d'incorporation maximal de MOX dans les REB (50 à 60%) et dans les REP (20 à 40%), ce qui laisse envisager une incorporation plus poussée si on imagine utiliser des stocks de plutonium existants et évite d'avoir à adapter toutes les centrales pour recevoir le combustible. Remarquons également que l'uranium appauvri étant disponible en très grande quantité, celui-ci n'est pas limitant pour la confection du MOX.

#### Combustible UOX et URE

Un calcul équivalent montre que si l'on recycle l'UOX pour faire à la fois du MOX et de l'URE, on arrive à une économie autour de 18%, notée  $p$ . En supposant la consommation d'énergie nucléaire constante, on montre alors qu'on rallonge d'une proportion  $p/(1-p) = 22\%$  la durée de vie de la ressource. Cet ordre de grandeur est également valable pour une croissance régulière. En prenant une fourchette basse de 50 ans de ressources en uranium, et en supposant que le recyclage est total (en négligeant les 10% de réacteurs autres qu'à eau légère), on arrive à potentiellement une dizaine d'années de sursis.

#### Une solution à long terme

Le recyclage des combustibles usés permet donc effectivement de repousser l'échéance de manière non négligeable, et ainsi de gagner quelques années pour le développement de nouveaux types de réacteurs. L'effet reste cependant relativement faible. Le principal intérêt du recyclage est donc de diminuer le volume de déchets radioactifs produits. Remarquons toutefois que certains pays tels que les Etats-Unis ne recyclent pas leur combustible pour des raisons de non prolifération du nucléaire; le plutonium pouvant servir à la confection de bombes atomiques. L'effet réel du recyclage sera donc inférieur à la dizaine d'années annoncée.

Le calcul ne prenant pas en compte les stocks d'uranium issu du retraitement et de plutonium déjà existants et qui sont difficiles à estimer (notamment parce qu'une partie des stocks est militaire), les combustibles MOX et URE peuvent ainsi encore rajouter quelques années à l'échéance.

### 2.2 Les réacteurs à neutrons rapides ou RNR

Nous avons vu précédemment qu'avec les réacteurs actuellement utilisés, dans lesquels les neutrons servant à provoquer la fission sont ralentis à l'aide de matériaux modérateurs (comme l'eau lourde par exemple), seuls 0,5% des noyaux d'uranium naturels produits étaient utilisés lors de la fission.

Pour améliorer le taux d'utilisation du combustible naturel et donc augmenter la durée possible d'utilisation de nos ressources actuelles, de nouveaux types de réacteurs, appelés réacteurs à neutrons rapides sont utilisés. L'objectif de ces réacteurs est d'exploiter l'uranium 238 présent en très large majorité dans le combustible naturel.

L'exploitation de l'uranium 238 est permise par le fait que, dans ce type de réacteurs, la présence de neutrons rapides est exploitée pour permettre à l'uranium 238 fertile mais non fissible de se transmuter en plutonium 239 fissible, qui pourra alors alimenter la réaction.

L'introduction de ce type de réacteur pourrait donc permettre une bien meilleure valorisation du combustible naturel, qui permettrait de repousser l'échéance à laquelle nos ressources seront épuisées.

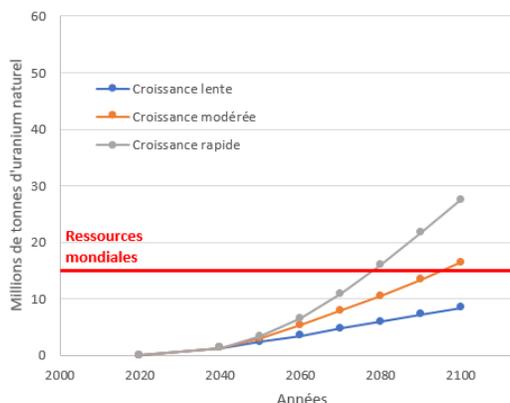


FIGURE 4 – Masse d’uranium nécessaire cumulée nécessaire pour répondre aux besoins futurs du nucléaire civil avec l’introduction progressive des RNR

Ainsi, si l’on s’appuie sur les mêmes scénarii de l’AIEA que précédemment, mais cette fois ci en simulant l’introduction progressive des RNR, on observe que ce type de réacteurs nous permettrait d’exploiter le nucléaire civil pendant de nombreuses années encore, d’autant plus que notre simulation ne prend pas en compte l’utilisation possible des larges stocks d’uranium appauvri déjà existant, et qui continueront d’être produits le temps que l’on exploitera encore nos réacteurs actuels. Ceci permettrait de repousser bien plus largement l’échéance, et explique que notre graphique semble peu optimiste face au gain potentiellement réalisé par de tels réacteurs.

### 2.3 Les réacteurs au thorium

Le thorium est un métal de la famille des actinides qui pourrait être utilisé dans les centrales nucléaires à la place de l’uranium, si les projets de recherche sur le sujet aboutissent. Le thorium n’est pas un élément fissile mais il est fertile. Il faut donc mettre un élément fissile en petite quantité dans le réactif pour amorcer la réaction comme du plutonium 239, de l’uranium 235 ou de l’uranium 233.

Le nucléaire au thorium nécessite une technologie spécifique : les réacteurs à sels fondus, qui ont l’avantage de fonctionner à pression atmosphérique, à la différence des réacteur classique à eau pressurisée qui fonctionnent à 150 bars. Cela limite donc les risques d’accidents. En outre, les réacteurs au thorium ne produisent pas de plutonium 239 nécessaire à la production des bombes, ce qui explique que les recherches sur le sujet ont pour l’instant été limité, mais a l’avantage de limiter le risque de prolifération. Il a aussi l’avantage de produire moins de déchets nucléaires à vie longue que l’uranium puisque qu’il fait partie de sa chaîne de désintégration. Le thorium pourrait aussi permettre de traiter des déchets nucléaires à longue vie comme le thorium 230 en l’utilisant comme réactif. Cependant, de nombreux défis technologiques restent à relever (retraiter les sels, gérer le fluor, diminuer la corrosion des matériaux et diminuer la quantité de lithium nécessaire pour produire les sels).

Pour ce qui est des ressources, le thorium est 4 fois plus abondant que l’uranium dans la croûte terrestre, même si on n’a pas une idée très précise des ressources étant donné le faible besoin actuel en thorium. De plus, il est estimé être 20 fois plus efficace que l’uranium lors de la combustion. Le thorium a donc une espérance 80 fois plus grande que celle de l’uranium. Cependant, le thorium est plus dispersé que l’uranium donc on ne pourrat pas extraire quatre fois plus de thorium que d’uranium. On estime qu’on pourrait satisfaire l’équivalent de la consommation électrique actuelle pendant 10 000 ans rien qu’avec le thorium.

## 3 Conclusion : une limitation en Uranium ?

Les ressources en uranium sont donc limitées et peuvent être amenées à poser problème d’ici une cinquantaine d’années si on envisage une forte croissance de la demande électrique et/ou une hausse de la proportion de nucléaire dans le mix énergétique (bien que cela soit peu vraisemblable d’après les scénarios de l’AIEA), avec possibilité de repousser légèrement l’échéance par le recyclage ou d’autres technologies non développées dans cet article.

Cela laisse a priori suffisamment de temps pour développer les réacteurs dits de 4ème génération tels que ceux présentés précédemment, qui pourraient potentiellement résoudre en grande partie les problèmes d’approvisionnement

électrique mondial pour les siècles à venir, si la population est prête à accepter cette technologie controversée et que des investissements sont faits.

## Références

- [1] Cycle du combustible nucléaire, Jean-Marie GRAS, Techniques de l'ingénieur
- [2] Cycle du combustible nucléaire : généralités et amont du cycle, Dominique GRENECHE, Techniques de l'ingénieur
- [3] Cycle du combustible nucléaire : aval du cycle et questions génériques, Dominique GRENECHE, Techniques de l'ingénieur
- [4] Réacteurs nucléaires, P.BACHER, Techniques de l'ingénieur
- [5] Elecnuc—Les centrales nucléaires dans le monde 2018.
- [6] Uranium : Ressources, consommation et évolutions du marché , GRENECHE, D., CHAUVIN, A., LAUGIER, F, Techniques de l'ingénieur
- [7] Memento sur l'énergie 2018.
- [8] Uranium 2018 Resources, Production and Demand, OCDE
- [9] Superphénix. Connaissance des Énergies website [www.connaissancedesenergies.org](http://www.connaissancedesenergies.org)