

L'épuisement des ressources

Qui veut aller loin ménage sa monture (Racine)

1 L'économie circulaire pour éviter l'épuisement des ressources

Du fait de la surconsommation humaine, l'épuisement des ressources concerne :

- ⇒ les minerais et matières premières minérales, ressources non renouvelables ;
- ⇒ les gisements de combustibles fossiles, formés au cours de l'histoire géologique de la terre ;
- ⇒ la disponibilité de certaines ressources renouvelable, comme l'eau potable ;
- ⇒ les ressources végétales (déforestation, prélèvement végétal) ;
- ⇒ mais aussi la biodiversité due à l'extinction d'espèces.

Nous traiterons ci-après l'épuisement des minerais.

Certains, comme Jean Marc Jancovici comparent notre planète à une boîte de Pétri ou la vie se développe jusqu'à disparition des ressources et est condamnée à disparaître.

Les ressources que nous utilisons existent en quantité finie sur la planète et leur renouvellement est extrêmement lent à l'échelle de la civilisation humaine. L'épuisement des ressources terrestres est donc inéluctable, sauf à savoir les recycler. D'où le concept d'économie circulaire, pour les réutiliser.

La durée de disponibilité d'un élément ou délai d'épuisement dépend de nombreux facteurs :

- ⇒ l'**abondance** de l'élément sur terre ;
- ⇒ la **richesse** et de la nature chimique des minerais, pour une extraction industriellement rentable ;
- ⇒ les **réserves** qui se révèlent toujours supérieures aux prévisions ;
- ⇒ l'**accessibilité au minerai** (sa profondeur, sur terre ou sous mer...) induisant son coût ;
- ⇒ la **consommation mondiale** actuelle, donnée généralement disponible avec précision ;
- ⇒ l'**évolution de cette consommation**, en durée et en amplitude,
- ⇒ le **taux de recyclage** de cet élément qui réduit le besoin d'extraction.

2 L'abondance des éléments

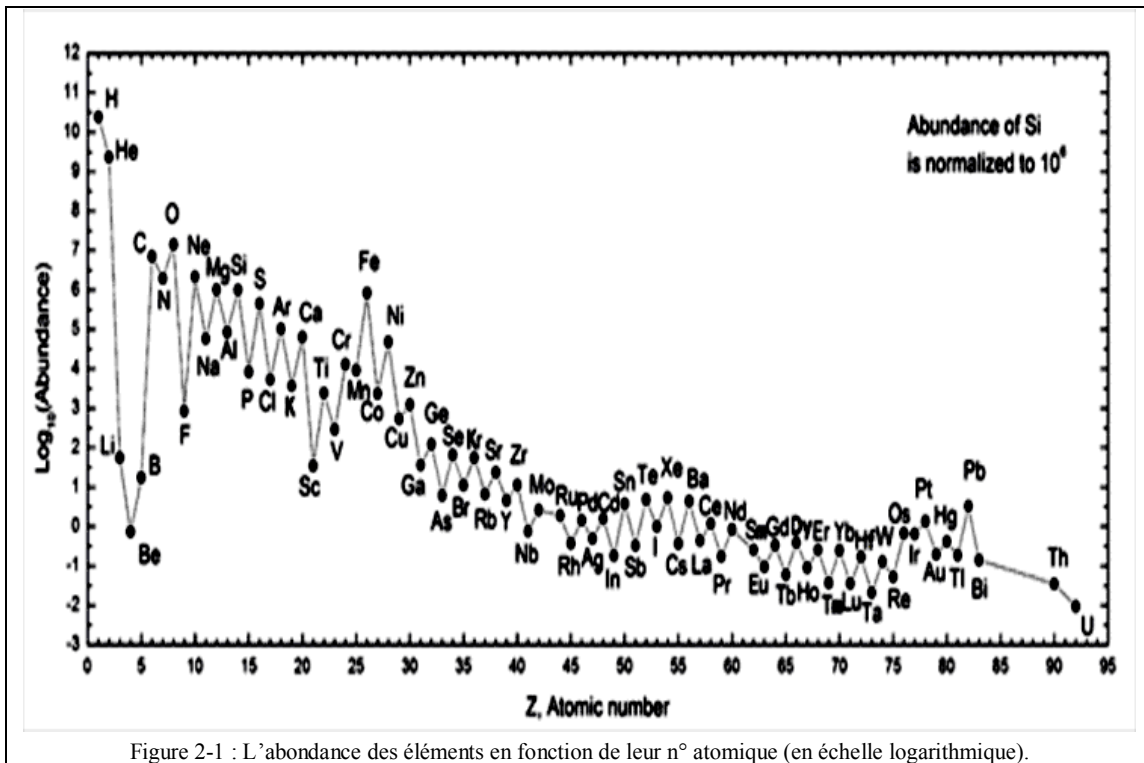
Les éléments que nous utilisons, dont la couche externe de la planète est constituée, sont parmi les 115 éléments répertoriés dans le tableau de Mendeleïev de la Figure 8-1, dit classification périodique des éléments. Dans les années 1980 on n'utilisait qu'une dizaine d'éléments de la table de Mendeleïev, contre une cinquantaine aujourd'hui.

Rappelons que chaque élément est constitué d'atomes, eux-mêmes constitués d'un noyau composé d'un certain nombre de protons chargés d'électricité positive, d'un nombre identique ou légèrement supérieur de neutrons non chargés et d'un nombre d'électrons périphériques, bien plus légers, porteur d'une charge identique à celle du proton et organisés en couches. Le nombre de protons est appelé numéro atomique de l'élément. Les éléments les plus lourds sont moins communs, c'est-à-dire moins présents sur terre. Au-delà du numéro atomique 104 les éléments ne se trouvent pas à l'état naturel. Chaque élément a des propriétés chimiques propres qui le rendent mieux approprié pour des usages précis. Ces propriétés chimiques de l'élément dépendent beaucoup du nombre d'électrons de la couche périphérique. La ressemblance de propriétés chimiques des éléments est mise en évidence dans le tableau périodique des éléments par le classement dans une même colonne. Les propriétés sont proches, aussi pour les éléments des lignes horizontales supplémentaires (lanthanides et actinides).

De nombreux éléments courants sur terre sont en quantité suffisamment importante dans la croûte terrestre pour être considérés comme quasi inépuisables, à l'échelle de l'existence de l'homme sur terre, **même s'ils ne sont pas renouvelables**. La Figure 2-1 représente l'abondance des éléments dans la croûte terrestre en fonction de leur n° atomique. Cependant, elle ne préjuge ni de la concentration, ni de la facilité d'accès aux mines.

Certains éléments particuliers (grisés sur la Figure 6-1) sont couramment inutilisables, car artificiels, radioactifs, instables ou toxiques. Quelques éléments ou isotopes radioactifs ($^{235}\text{Uranium}$, $^{239}\text{Plutonium}$, Radium, Actinium) sont utilisés seulement pour cette propriété. Tous les actinides transuraniens (au-delà de l'uranium) sont artificiels comme le neptunium et le plutonium qui n'existent qu'à l'état de traces non exploitables industriellement. Certains, cependant font l'objet d'une production comme l'Américium.

Par ailleurs, nous utilisons davantage et depuis le plus longtemps, les éléments les plus légers, en haut de colonne du tableau périodique, car ils sont les plus courants. C'est par exemple le cas par exemple de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'azote, du carbone, du sodium, du silicium, du calcium quasiment inépuisables. Ces éléments sont représentés sur fond blanc, dans le tableau de la Figure 7-1. Depuis l'antiquité nous utilisons quelques métaux assez courants, comme le cuivre, le fer et plus récemment l'aluminium. Cependant, la demande en minerais métalliques a été multipliée par 27 depuis le début du 20^{ème} siècle. Le risque d'épuisement s'est donc accru inexorablement.



Il en résulte le délai approximatif au bout duquel il sera épuisé : $[\text{Réserve}] / [\text{Consommation}]$.

Ce calcul de la disponibilité est plus complexe qu'il n'y paraît, car sur de nombreuses données nos connaissances sont incomplètes et pour les autres évolutives.

Des incertitudes majeures portent sur :

- ⇒ les **réserves** économiquement exploitables,
- ⇒ sur l'évolution hypothétique de la **consommation** et
- ⇒ sur l'amélioration du **taux de recyclage**.

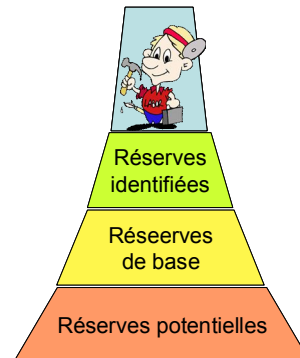
Ceci explique que les prévisions de disponibilité les plus diverses aient été publiées. On constate d'ailleurs que les estimations les plus anciennes donnent les dates d'épuisement les plus proches et parfois même dépassées. Aussi, il nous est paru utile de rappeler pour les éléments essentiels les données qui conduisent à l'analyse de la durée d'épuisement.

3 Les réserves minières

Tout d'abord, rappelons qu'on ne dispose que d'une connaissance limitée de la présence du minerai accessible. Naturellement l'exploitation des minerais les plus riches et les plus accessibles a commencé en premier.

On distingue ainsi :

- ⇒ les réserves exploitées,
- ⇒ les réserves identifiées, extractible, légalement et techniquement, au prix actuel ;
- ⇒ les réserves de base, non encore exploitable économiquement, selon la technique et le prix actuel ;
- ⇒ les ressources potentielles, identifiées mais non explorées, dont les quantités ont été estimées.



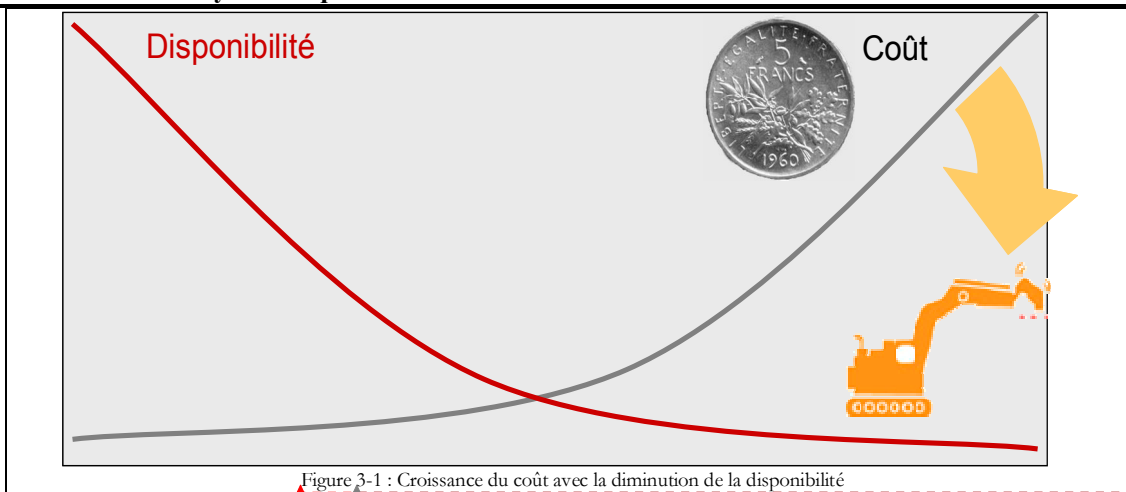
Pour certains métaux précieux (comme le platine), les compagnies ne diffusent que leurs réserves prouvées.

Néanmoins, le coût d'extraction s'accroît progressivement avec la raréfaction et les compagnies minières ne s'occupent que des gisements considérés comme rentables actuellement, suffisamment riches, pas trop profond etc. Généralement, la recherche de nouvelles mines ne devient rentable que lorsque la date d'épuisement des mines existantes se rapproche. Des mines anciennes, avec des concentrations faibles ont été abandonnées au profit de mines plus riches ou situées dans des pays utilisant de la main d'œuvre meilleur marché. L'accroissement du prix de vente génère des fonds pour financer la recherche de nouvelles mines qui reculent la date d'épuisement.

Or, les méthodes de forage minier ont vu leur efficacité multipliée par près de 100 en un siècle, compensant l'accroissement progressif des difficultés d'extraction de nouvelles réserves moins riches et moins accessibles, au fur et à mesure que les anciennes s'épuisent. Le sous-sol n'a guère été exploité dans les zones d'accès complexe, guère au Groenland, sous la banquise, dans l'antarctique (qui a été neutralisé), sous la forêt vierge, sous les mers, qui couvrent plus de trois quarts de la planète, etc. Il existe ainsi de nouveaux gisements, de moins en moins accessibles.

On peut aussi déplorer dans certains états peu développés l'absence de respect de réglementations environnementales et sanitaires.

Les réserves sont systématiquement sous-estimées



Mis en forme : Français
(France)

Code de champ modifié

4 La facilité de raffinage

Ce sera donc aussi le cas des valeurs que nous donnons.

Les métaux ont des propriétés chimiques différentes, mais assez proches. Beaucoup sont extraits de minerais qui sont à base des minerais de fer, combinaison d'un métal avec d'autres éléments pour donner des sulfures, hydroxydes, carbonates, etc. Un taux faible de métal courant (Fer, aluminium, cuivre, plomb) a souvent été remplacé par des atomes d'autres métaux plus rares. Ceux-ci sont à séparer lors de traitements métallurgiques généralement complexes. Leur faible concentration dans les minerais induit des coûts de purification élevés.

Ainsi, le plomb est souvent associé à de nombreux autres éléments (Zn, Fe, Cu, Cd, As, Ag, Au, ...). En moyenne l'extraction d'une tonne de plomb fournit 2 tonnes de zinc et 3 kg d'argent. Les mines de plomb fournissent ainsi 36 % de la production mondiale d'argent.

Les similitudes chimiques des métaux expliquent que les minerais métalliques qui sont des composés chimiques contiennent généralement plusieurs métaux qu'il est assez complexe de séparer pour obtenir par exemple un métal pur. Cependant, les éléments plus lourds, en bas de colonne du tableau, ont un nombre de protons supérieur et ont des propriétés physiques différentes, notamment leur liquéfaction et passage à l'état solide à une température supérieure.

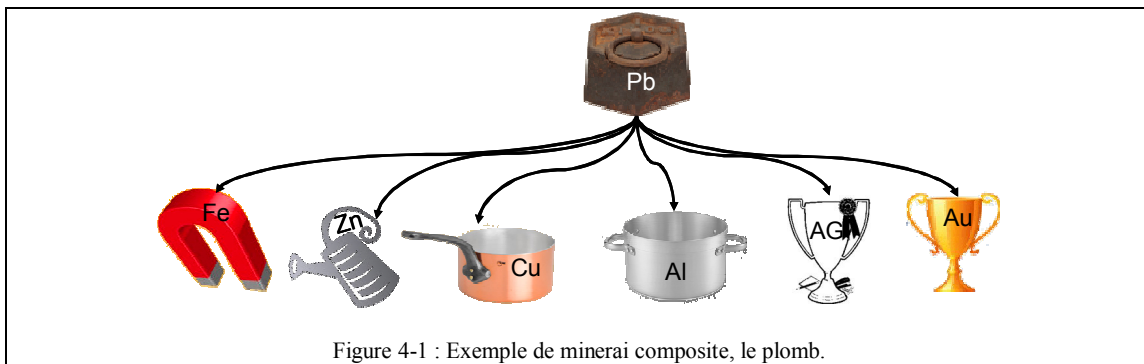
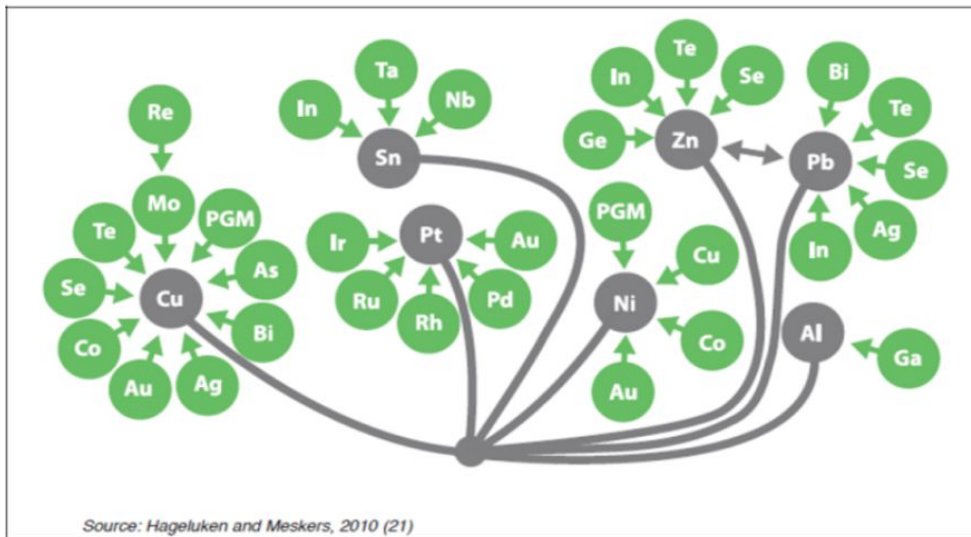


Figure 4-1 : Exemple de minerai composite, le plomb.

Les principaux sous-produits provenant du cuivre, de l'étain, du zinc, du plomb, du nickel, de l'aluminium et du platine*

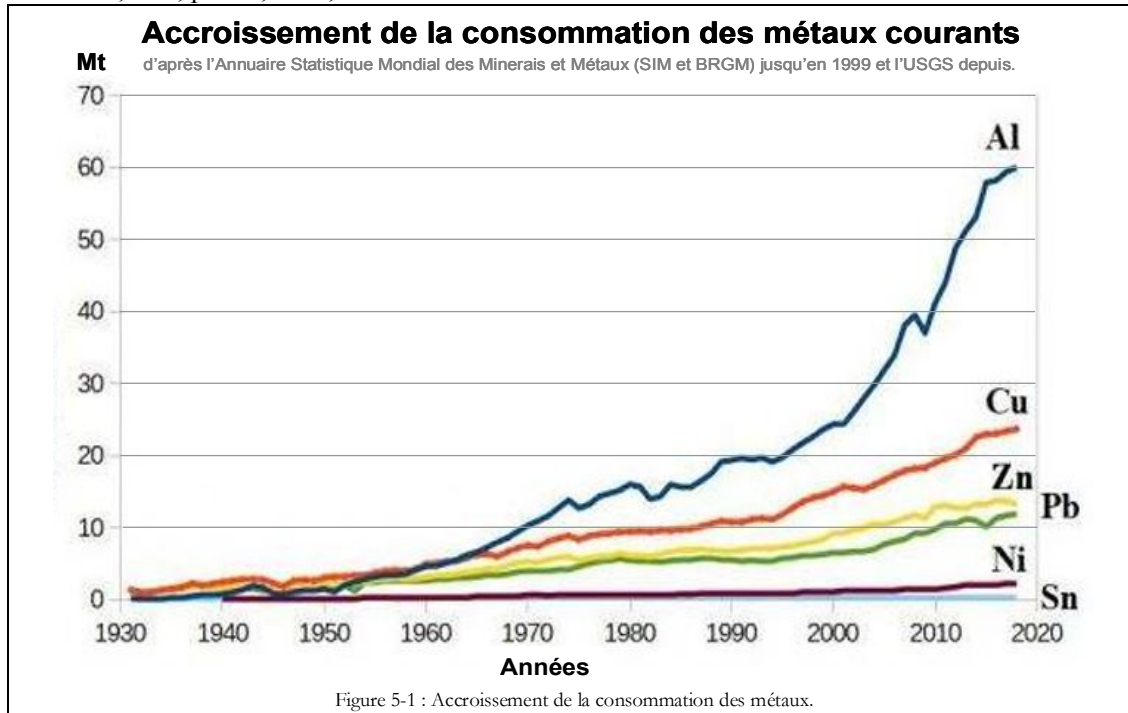


Source: Hagelucken and Meskers, 2010 (21)

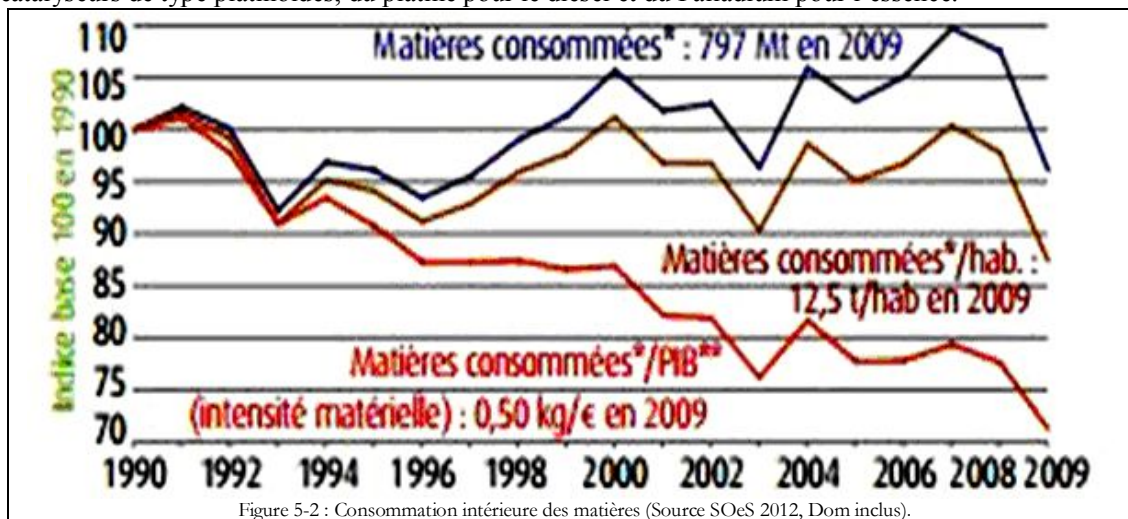
Figure 4-2 : composition des minerais

5 La consommation croissante des métaux

La Figure 5-1 montre l'accroissement de la consommation de métaux les plus courants : cuivre, aluminium, zinc, plomb, étain, nickel.



L'accroissement de la consommation peut découler de découvertes de propriétés techniques, qui induisent de nouveaux usages des éléments, comme cela a été le cas pour les lanthanides (ou terre rares) dotés de propriétés magnétiques exceptionnelles. Autre exemple, les pots catalytiques utilisent des catalyseurs de type platinoïdes, du platine pour le diesel et du Palladium pour l'essence.



Lorsque les usages se développent ou évoluent rapidement, il est difficile de déterminer quel sera la durée et l'ampleur de l'accroissement. Faut-il considérer que l'accroissement va se poursuivre en s'amplifiant, que la croissance se fera selon une pente constante, se tasser ou diminuer à cause du coût croissant de la ressource ou d'un changement d'usage ? La vérité se situe entre 2 extrêmes très distants, pour certains éléments en croissance forte. Lorsque le coût des métaux extraits commence à trop s'accroître, l'évolution technologique permet de diminuer la quantité de métal utilisé, à service équivalent et aussi de remplacer les matériaux coûteux. C'est par exemple la réalisation de bateaux en plastique, plutôt qu'en métal, la réalisation de nombreux objets ou pièces détachées à base de carbone ou de plastique, comme les ailes de voitures.

La Figure 5-2 représente l'accroissement de l'intensité matière, c'est-à-dire la diminution de la consommation des matières premières comparée au PIB. Elle montre une amélioration de l'ordre de 15% par décennie de l'intensité matière à population et PIB constants. Mais le PIB par habitant et la population continuent à croître. Une plus grande réduction de la consommation serait souhaitable.

6 Le recyclage et l'économie circulaire des métaux

Le taux de recyclage des métaux est calculable comme la différence entre la quantité mondiale extraite et la quantité mondiale consommée.

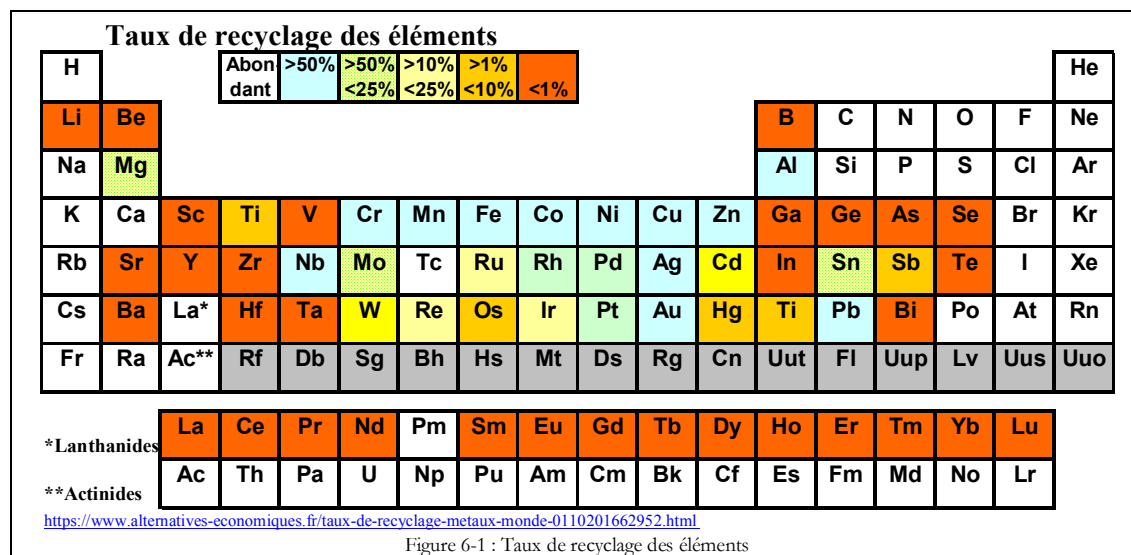
Il est généralement meilleur en Europe, dans des états suffisamment développés et organisés et que dans le reste du monde, notamment dans les pays peu développés ou les Etats Unis peu sensibilisés à l'épuisement des ressources. Les objets industriels comme les pièces détachées, dont les batteries de voitures, sont plutôt bien recyclées, alors que les petits objets du quotidien, comme les cannettes ou les batteries de téléphones portables sont mal collectés ou retraités.

Cependant, si le coût de l'élément tend à croître, cela rentabilise mieux la collecte des objets contenant des éléments chers, donc il est probable que le taux de recyclage aura tendance à s'améliorer avec le renchérissement des matières premières et avec l'accroissement du niveau de vie.

Néanmoins, à défaut d'informations fiables sur le sujet, nous avons pris en compte un taux de recyclage mondial approximatif et constant, donc sans doute trop faible sur la durée. La Figure 6-1 représente le taux de recyclage actuel des éléments selon « Alternatives économiques ».

De plus le taux de recyclage est d'autant plus élevé que les matières sont chères (donc rares). Il s'améliore un peu alors que le risque d'épuisement apparaît, tout en étant d'autant plus important.

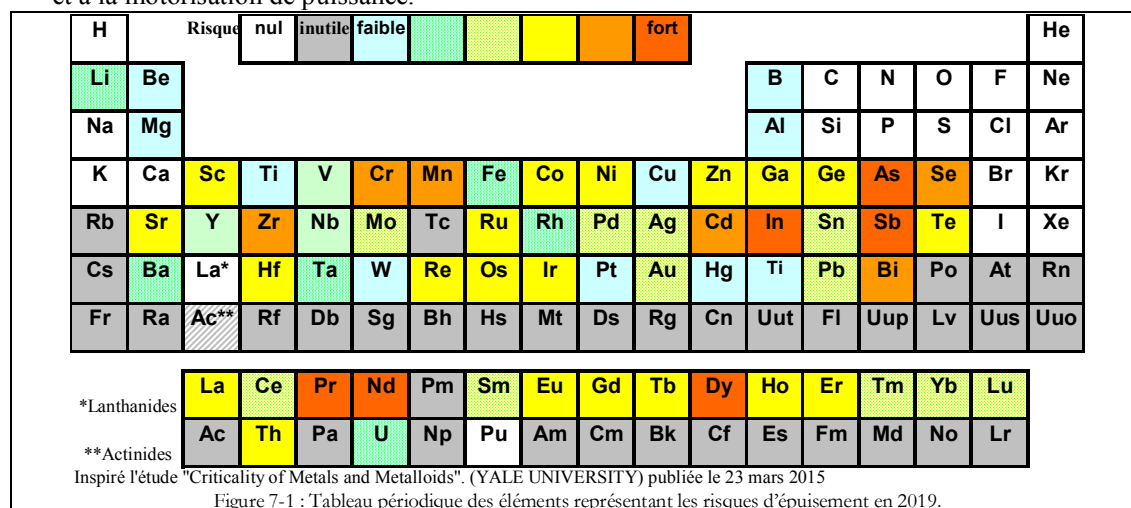
Cependant, améliorer ces taux ne se décrète pas, mais exige une organisation très complexe de collecte, de tri, de retraitement. Elle n'est mise en place que lorsqu'elle est parfaitement justifiée économiquement, c'est-à-dire lorsqu'il est déjà trop tard. On note que le taux moyen de recyclage est en moyenne insuffisant. « L'économie circulaire » qui suppose que beaucoup de matières sont recyclables dispose d'une marge de progrès gigantesque. Les progrès sont encore bien plus importants sur les éléments que sur les produits courants, comme le verre et les papiers et cartons, dont le recyclage économise, certes, de l'énergie (plus ou moins inépuisable au demeurant).



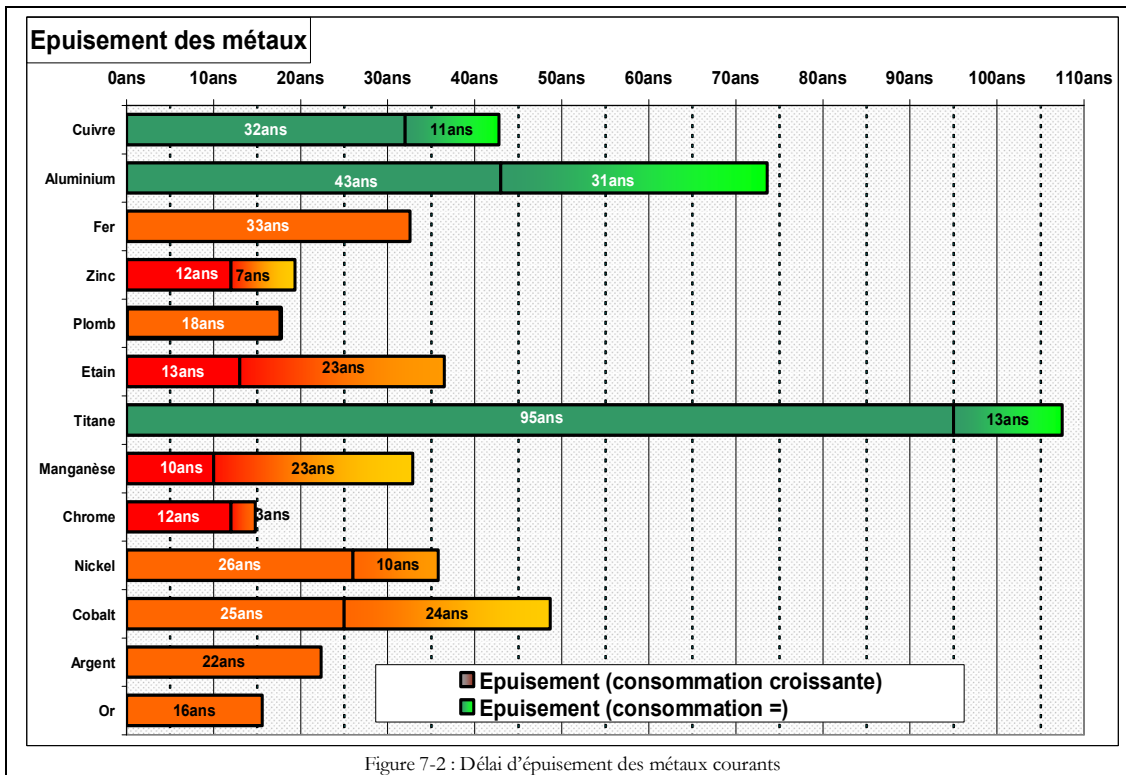
7 Le risque d'épuisement des métaux

Les études des risques d'épuisement concluent qu'un risque de pénurie existe pour :

- ⇒ les combustibles : charbon, pétrole et gaz ;
- ⇒ divers métaux, d'ailleurs complexes à extraire : cobalt, nickel, tungstène, étain, cuivre, zinc... ;
- ⇒ 3 lanthanides (terres rares) le dysprosium, le néodyme et le praséodyme), utiles à l'électronique et à la motorisation de puissance.



Pour chaque métal, selon les données du BRGM, nous avons calculé la disponibilité, à consommation constante et aussi avec un taux d'accroissement constant, bien que l'accroissement finisse par se tasser. Une valeur plausible est entre les 2 résultats. Quoique certainement sous-estimés, les délais de disponibilité des métaux sont atrocement courts, comme montré par la Figure 7-2.



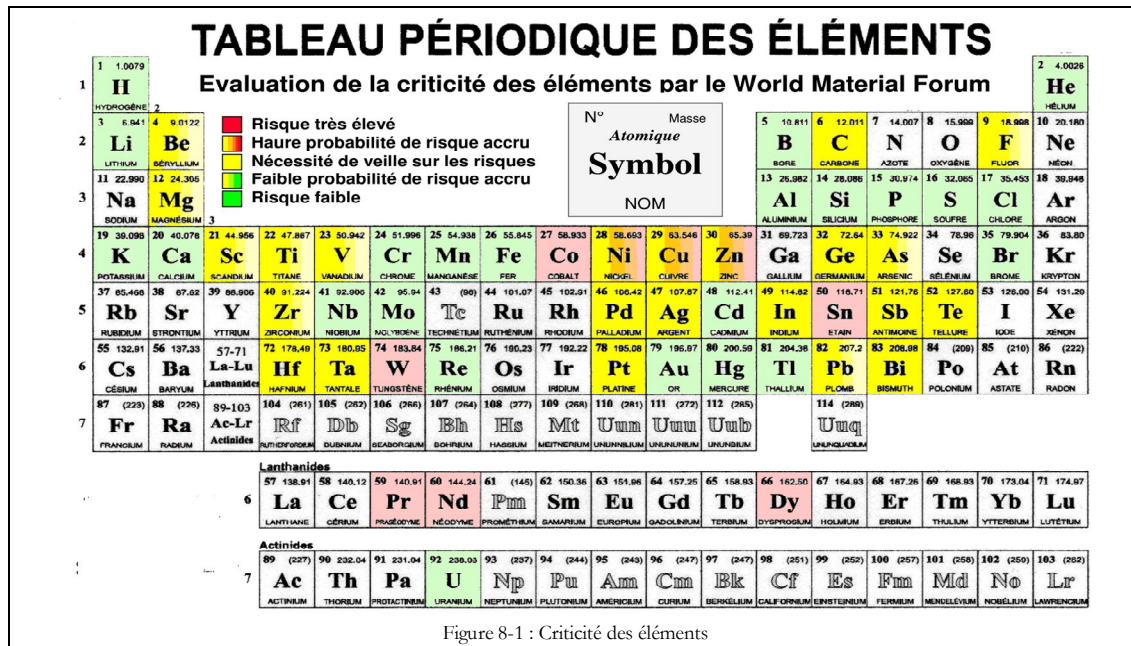
Mais rappelons que la découverte de nouvelles mines, l'amélioration du recyclage, la découverte de technologie de consommation alternatives prolongeront certainement les dates d'épuisement annoncées.

Les durées de disponibilité d'éléments vitaux s'avèrent extrêmement courtes et alertent fortement sur la nécessité d'améliorer le recyclage des matières premières.

8 La criticité des métaux

Chacun des 103 éléments peut être caractérisé par sa criticité qui dépend de :

- ⇒ son abondance, quantité présente et accessible dans les sédiments proches de la couche terrestre ;
- ⇒ son coût, qui dépend de la qualité des minerais, de leur facilité d'extraction et de purification ;
- ⇒ son utilité, compte tenu des ses propriétés d'usage la consommation mondiale ;
- ⇒ son accessibilité compte tenu de la répartition des minerais sur la planète et ses risques géopolitiques.



La Figure 8-1 donne le résultat d'une étude de criticité des éléments publiée en 2018 par McKinsey, du CRU et du BRGM, avec le Comité ministériel pour les métaux stratégiques (COMES) lors du « *World Materials Forum* ».

Les causes de criticité sont complexes et variées, pour certaines structurelles et pour d'autres conjoncturelles.

Des risques géopolitiques existent dans le cas de monopole géographique d'un état si le nombre d'acteurs de la chaîne d'approvisionnement est faible. C'est le cas, par exemple, pour le **Cobalt**, que la République du Congo produit en majorité. C'est le cas aussi du lithium, qui n'est pas rare sur la planète, mais qui est purifié essentiellement en Chine. La Chine a instauré des quotas, pour préserver ses propres industries de traitement, rendant ainsi ses approvisionnements critiques et faisant s'envoler les cours.

La disponibilité peut aussi dépendre du délai pour ouvrir de nouvelles usines d'enrichissement. C'est le cas, par exemple pour l'étain.

La criticité peut aussi être due à la volatilité des prix.

Nous nous proposons d'analyser ces causes, surtout celles qui sont structurelles, comme le niveau de réserves, plutôt que celles qui sont conjoncturelles. La Figure 8-1 donne la criticité des éléments pour la France (établie par le BRGM, *Bureau de Recherches Géologiques et Minières*).

La Figure 8-2 présente cette criticité sur 2 axes :

- ⇒ en abscisse, l'importance économique du métal,
- ⇒ en ordonnée, sa criticité, elle-même fonction de ses risques d'épuisement, des difficultés géopolitiques d'approvisionnement et des problèmes de purification.

Cependant, il existe diverses variantes de ce tableau, selon les auteurs et l'appréciation de la criticité dont l'évaluation est sujette à un certain arbitraire et fluctuante selon la géopolitique.

Une quarantaine de métaux mineurs sont « critiques, comme le tantale, le néodyme, le tungstène à la fois indispensables à l'économie et dont l'accès est parfois complexe à garantir.

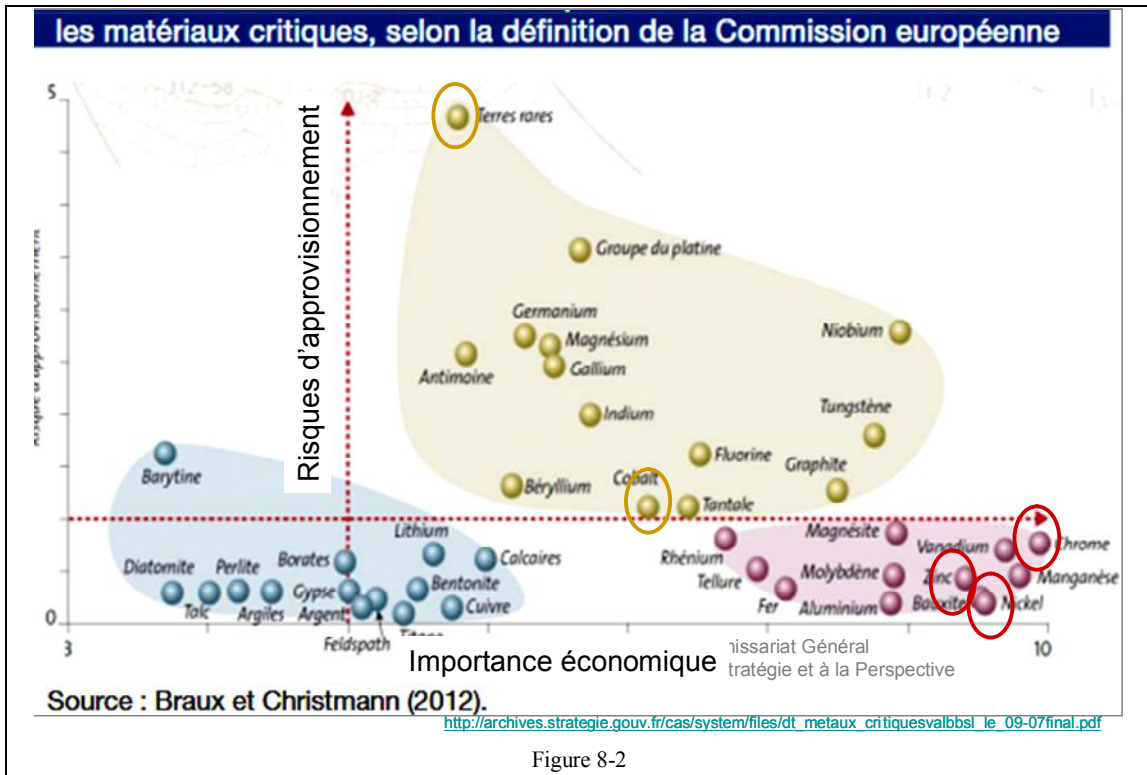


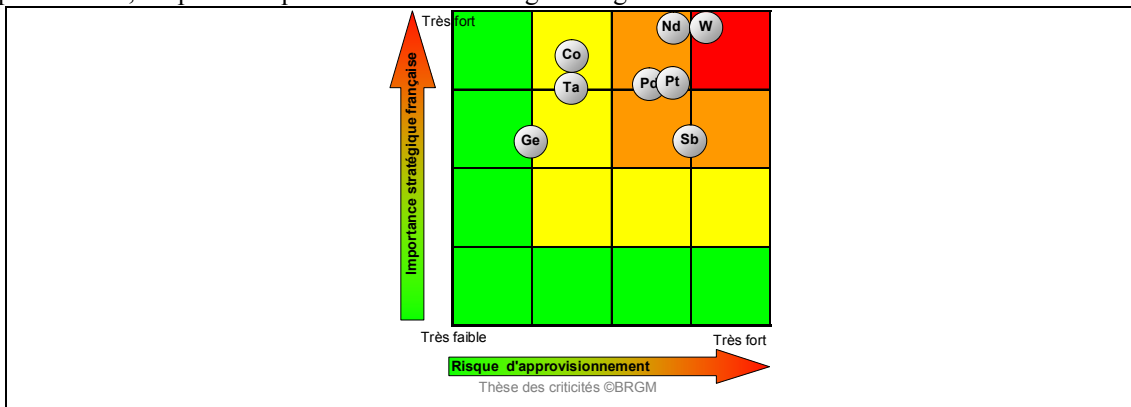
Figure 8-2

La criticité est différente selon les ressources du pays.

Pour la France, par exemple, le BRGM a dressé un tableau des éléments critiques stratégiques :

- ⇒ Le tungstène (W), indispensable pour sa dureté et sa résistance aux hautes températures (turbine) ;
- ⇒ Le néodyme, pour ses propriétés magnétiques, utiles à la miniaturisation des moteurs et génératrices ;
- ⇒ Le platine et le palladium, utilisés comme catalyseur (pots d'échappement, piles à combustible...) ;
- ⇒ Le cobalt utilisé pour les anodes des batteries au lithium,
- ⇒ Le tantale utilisé pour miniaturiser les condensateurs électroniques,
- ⇒ Le germanium utilisé dans les composants électroniques.

Il serait fastidieux de détailler le cas de la soixantaine d'éléments épuisables. Mais, nous analyserons les plus connus, les plus critiques et ceux dont l'usage est significatifs et en croissance.



(La suite est plus détaillée que la présentation en réunion)

9 Les risques d'épuisement les plus notables des métaux

9.1 Le risque d'épuisement de l'étain

Bien que peu médiatisées, ni d'une haute technicité, selon le MIT, les usages de l'étain sont indispensables pour développer les nouvelles technologies (robotique, énergies renouvelables, électronique, les voitures électriques...). Les usages de l'étain sont donnés par la Figure 9-1.

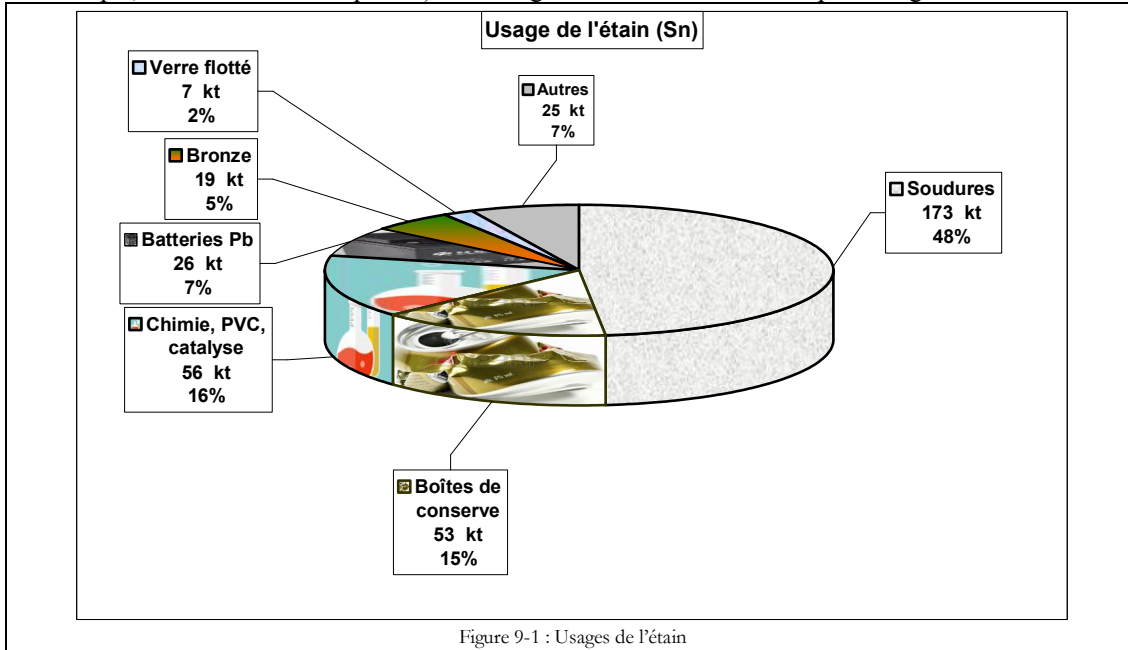


Figure 9-1 : Usages de l'étain

Dans le monde, 300 kt d'étain sont extraites par an. La récupération de l'étain avoisine 30%.

Constituant seulement 0,006 % de l'écorce terrestre, l'étain (souvent mêlé à d'autres métaux comme le plomb) s'est concentré en filons. Erodés, certains donnent des gisements alluvionnaires plus faciles à exploiter. Il y a plus de 7 Mt de réserves d'étain sur Terre et 11 Mt de ressources probables. Mais les réserves alluvionnaires sont les plus mal répertoriées. L'extraction est faite pour les deux tiers en Chine et en Indonésie.

A consommation et récupération stable et sans exploitation de nouvelles mines, l'épuisement de l'étain aurait lieu dans 20 ans seulement, dans une trentaine d'années en puisant dans les ressources probables.

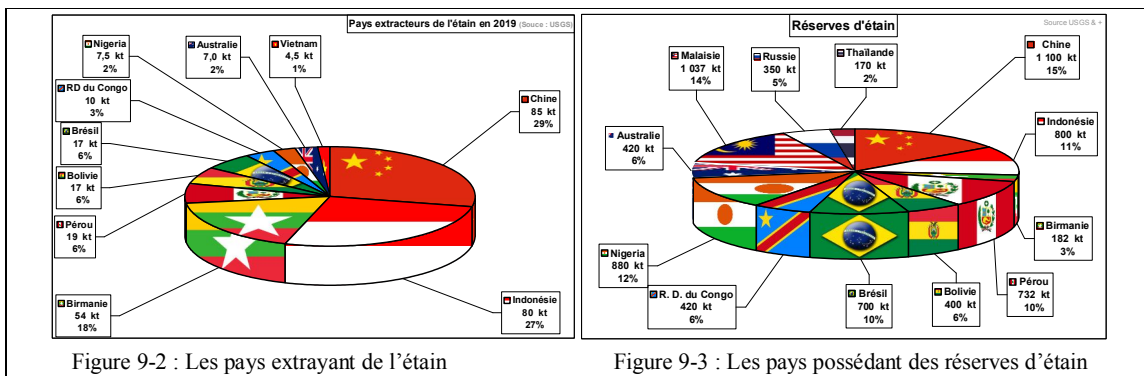


Figure 9-2 : Les pays extrayant de l'étain

Figure 9-3 : Les pays possédant des réserves d'étain

9.2 Le risque d'épuisement du zinc

Les principales utilisations du zinc sont données par la Figure 9-4. Le zinc est beaucoup utilisé pour protéger les pièces en fer de la rouille. La galvanisation en consomme la moitié et les alliages un tiers. Le zinc est aussi utilisé dans l'électronique et notamment l'informatique pour fabriquer des mémoires MRAM (Magnetic Random Access Memory). Mélangé à environ 10% au cuivre, il est aussi un composant essentiel du laiton.

Il a été extrait 13.500 t de zinc dans le monde en 2019, dont le tiers en Chine. Les réserves actuelles sont estimées à environ 260 Mt, notamment en Australie, en Chine et au Pérou. Cela laisse prévoir un épuisement théorique sur une **vingtaine d'années** seulement. De plus, l'utilisation du zinc poursuit sa croissance d'environ 30% par décennie. Certes, la disparition du zinc est annoncée depuis une cinquantaine d'années, mais de nouvelles réserves sont régulièrement mises exploitation. Hors découverte de nouveaux gisements, si la progression de la consommation se poursuit au même rythme, la durée de disponibilité du zinc se réduirait à une douzaine d'année.

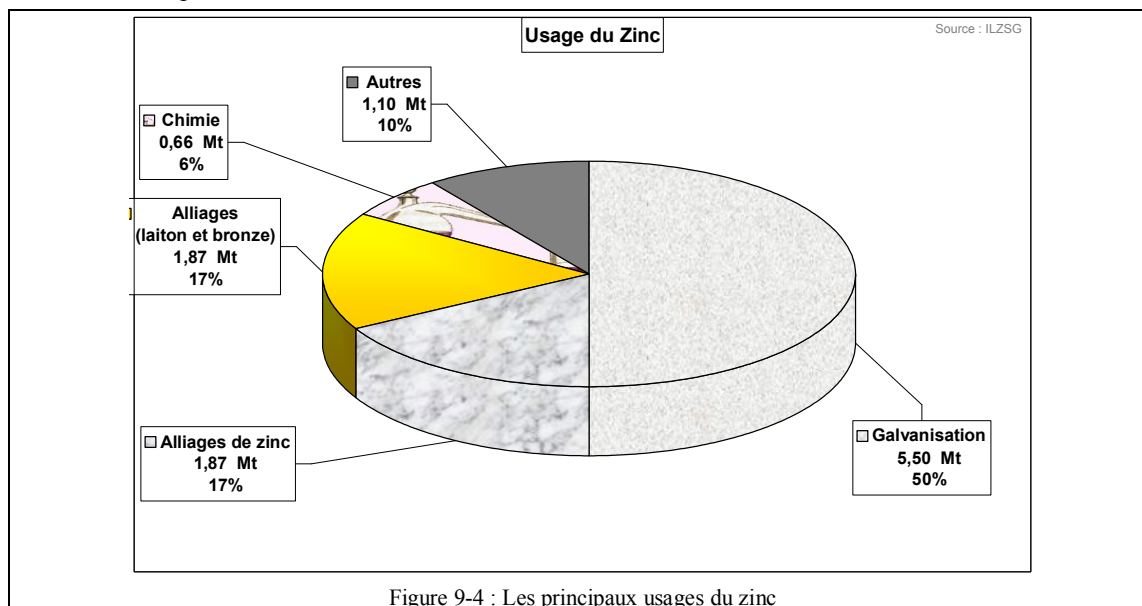


Figure 9-4 : Les principaux usages du zinc

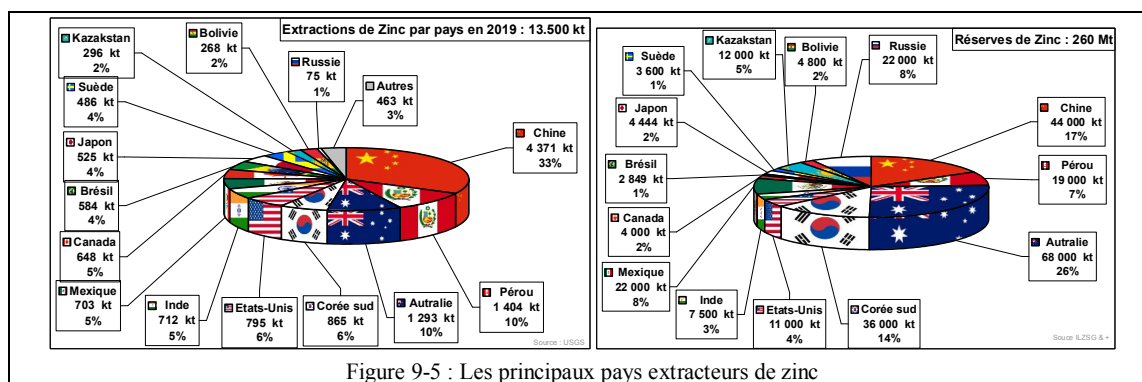
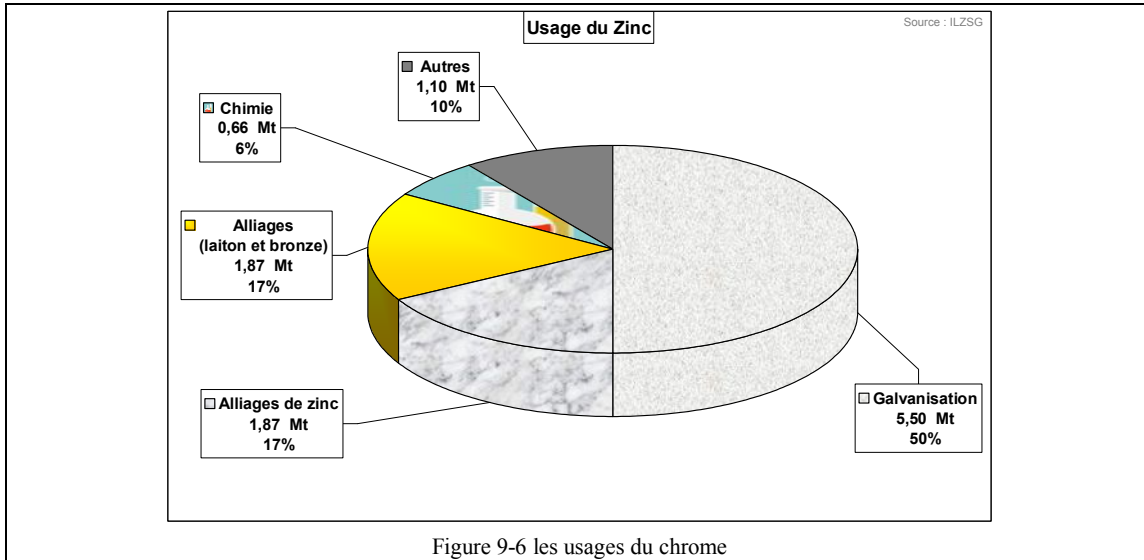


Figure 9-5 : Les principaux pays extracteurs de zinc

La disponibilité prévisible du zinc, d'une douzaine d'années, est extrêmement réduite, même s'il est probable que de nouvelles mines mises en exploitation allongeront ce délai. Le zinc est le métal courant dont la disparition annoncée semble la plus proche et problématique.

9.3 Les risques d'épuisement du chrome

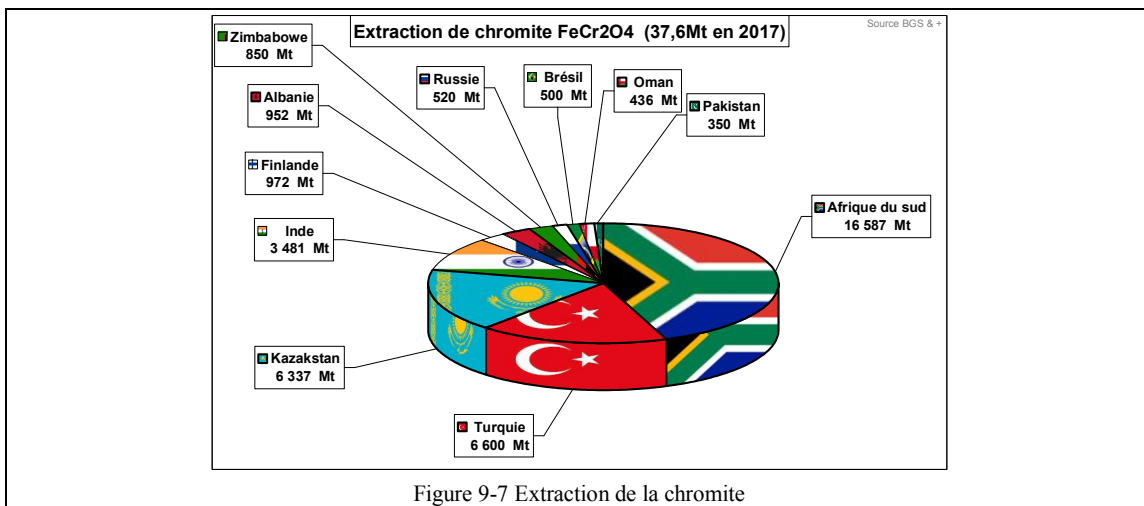
Le chrome, métal d'addition, rend résistants les alliages, et pas seulement les aciers spéciaux ou inoxydables.



Les alliages de fer sont :

- ⇒ soit faiblement alliés (moins de 3%, pour faciliter le trempage),
- ⇒ soit fortement alliés (plus de 20%),
- ⇒ soit moyennement alliés (de l'ordre de 18% de chrome, avec ou non du nickel (4%, 8%, 10%) ou
- ⇒ avec 12% de chrome, 18% de nickel et 2% de molybdène pour l'acier inoxydable marine.

Le chrome est présent à 400 ppm dans la croûte terrestre. La production minière mondiale de chrome est tirée de la chromite $FeCr_2O_4$, avec le fer partiellement remplacé par du manganèse et le chrome par de l'aluminium ou du fer). Elle est utilisée pour la fabrication de ferrochrome. Il a été extrait 37.600 t de Chromite en 2017, contenant 45% de chrome, donc environ 17 000 kt de chrome par an.



Les réserves mondiales de chromite sont estimées de 556 Mt. Cela donne des réserves de chrome de moins d'une douzaine d'années et à peine 10 ans, si la consommation poursuit sa croissance.

9.4 L'épuisement du nickel

Les métaux dits « de transition » servent d'abord à réaliser des métaux spéciaux et aussi, en faible proportion actuellement (6%), les cathodes de batteries au lithium.

Ce sont :
 ⇒ le nickel ;
 ⇒ le cobalt,
 ⇒ le manganèse, pour les batteries NMC (nickel, manganèse et cobalt) ;
 ⇒ l'aluminium pour les batteries NCA (nickel, cobalt et aluminium) ;
 ⇒ le titane.

L'usage des batteries au lithium, pour les transports individuels devrait se développer énormément. Pour le transport, elles remplaceront progressivement les autres types de batteries. Les divers métaux composant la cathode sont actuellement : le manganèse ou l'aluminium, le nickel et le cobalt.

Le nickel est le 5^{ème} élément le plus abondant sur terre, mais le 24^{ème} dans la croûte terrestre.

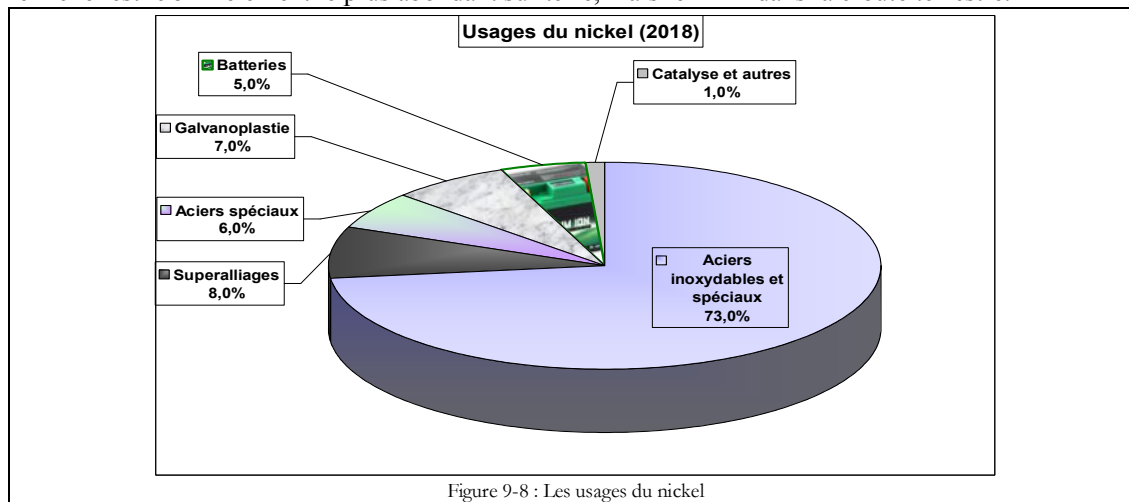


Figure 9-8 : Les usages du nickel

Le nickel est un métal qui est devenu indispensable en association avec le cobalt et le chrome, pour réaliser des superalliages pour des composants très résistants (trains d'atterrissage, ailes et turbines d'avions), ou pour ses propriétés mécaniques stables à haute température (turbines à gaz, industrie pétrolière et nucléaire). En association avec le fer, le nickel est utilisé lorsqu'il s'agit de résister à de très basses températures (transport de gaz naturel liquéfié) ou pour des applications en électronique.

De nombreuses pièces de monnaie utilisent du nickel.

Le nickel est aussi indispensable comme catalyseur dans diverses réactions chimiques.

La Figure 9-9 montre que la production de nickel s'est accrue lors des dernières années. Le besoin de nickel s'est développé en partie pour le développement des cathodes des batteries au lithium, besoin qui n'est cependant que de 5% de ses utilisations en 2018. Cependant, comme nous l'avons vu, la fabrication des batteries est dans une phase de balbutiement et d'évolution technologique rapide et d'accroissement en volume. Comme ce débouché est en croissance forte, le risque d'épuisement du nickel est inquiétant.

Il est cependant probable que l'usage du nickel diminue pour faire place à des métaux moins coûteux, si les nanotechnologies permettent soit d'en diminuer les volumes soit d'en éviter l'usage.

Le taux de recyclage est environ de moitié. Le reste des besoins est extrait.

Les pays où la production de nickel peut se faire au prix du marché sont en nombre limité (Figure 9-8).

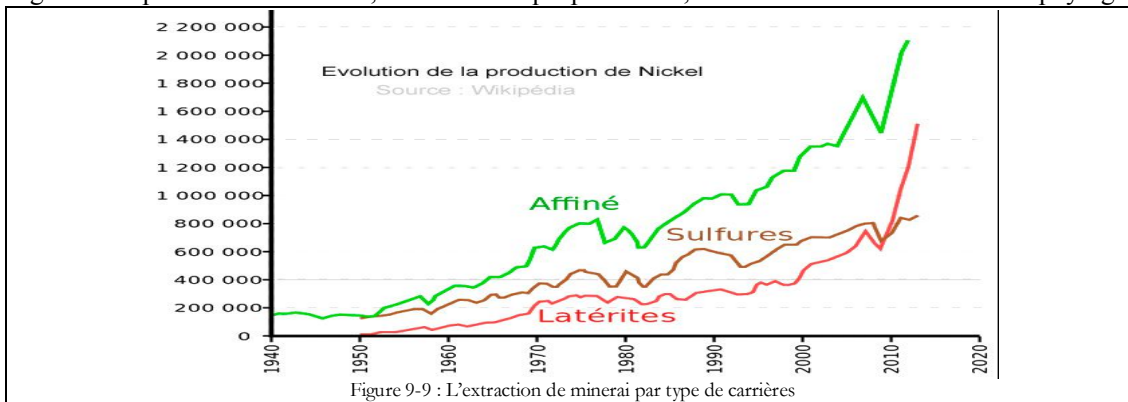
Le nickel est extrait essentiellement :

- ⇒ soit de latérite, dont la teneur en nickel dépasse 1 %, et la teneur en cobalt 0,1 %, formée dans des régions au climat chaud et humide, par dégradation de la péridotite des fonds océaniques émergés, exploitée notamment en Nouvelle-Calédonie, en Indonésie, aux Philippines et à Cuba ;
- ⇒ soit de gisements sulfurés, souvent remontés avec les roches magmatiques de la croûte et du manteau terrestre, riches en nickel et fer. Les péridotites exploitées peuvent en contenir jusqu'à 3,1 kg par tonne.

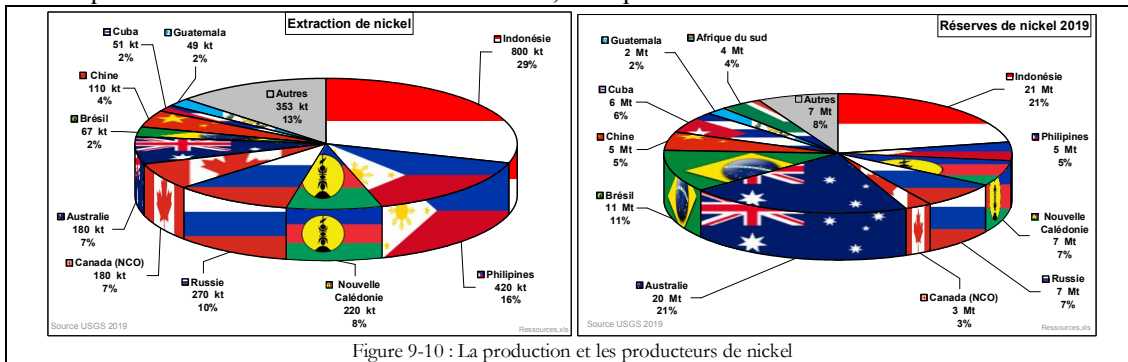
En effet, dans la nature, on trouve le nickel, substitué au fer dans des roches riches en fer, parfois en magnésium. Il est parfois mixé à d'autres métaux de transition, comme le cobalt, le cuivre, le manganèse.

On le trouve sous forme de silicates, en faible concentration, dans les roches détritiques ou les latérites, par exemple, la nouméite (en Nouvelle Calédonie), un silicate complexe de nickel et de magnésiumⁱ, la saprolite, la limonite et la smectiteⁱⁱ davantage altérés. On trouve le nickel également combiné au soufre dans divers composés, seulⁱⁱⁱ, ou conjointement avec le fer^{iv} ou avec le cuivre^v.

Il est parfois combiné à l'arsenic, sous forme d'arséniures ou d'arséniates^{vi}. Il apparaît aussi sous forme d'oxydes, de sulfates, de carbonates, de phosphates, d'antimoniures^{vii}, de phosphures, de sulfoarséniures^{viii}... constituant des filons excentrés de roches magmatiques. Les mines de latérites sont en général exploitées à ciel ouvert, donc sans risque particulier, mais avec une détérioration du paysage.



La production de nickel est en croissance et concentrée sur quelques nations et peu de sociétés, dont Eramet qui extrait le nickel en Nouvelle Calédonie, avec près de 10% du marché.



Au rythme de consommation actuel, les réserves de nickel, au taux de concentration actuellement exploitées de façon rentable, correspondent à une consommation sur seulement **une quinzaine d'années seulement**. Mais il est probable que le taux de récupération du nickel dans des pièces usagées, actuellement proche de 50% tendent à s'accroître. Par exemple, concernant les batteries, de nombreuses sociétés sont en création pour recycler les batteries usées.

9.5 La criticité du cobalt

Le cobalt a des usages traditionnels, notamment comme colorant bleu des poteries. Ses usages actuels sont donnés par la Figure 9-11 : des aciers spéciaux inoxydables, pour les turbines, des aimants. Une part croissante de sa consommation est actuellement la fabrication des cathodes des accumulateurs lithium-ion de type NMC, où C signifie cobalt, ou d'oxyde de cobalt et lithium (LiCoO₂). Néanmoins, compte tenu de son coût de purification notamment, on peut penser que l'usage du cobalt dans les batteries est destiné à disparaître. Les fabricants de batteries comme Panasonic, n°1 mondial, partenaire de Tesla ou le chinois SVLOLT Energy Technology annoncent des solutions pour diminuer le taux de cobalt dans les cathodes ou le pour remplacer.

Ce cobalt est mêlé à du nickel ou du cuivre dans la plupart des mines. S'il faut l'en séparer, un traitement complexe de purification s'en suit. L'extraction du cobalt à partir du minerai et sa purification s'obtient par une série de réactions chimiques, à partir de l'arséniure de cobalt :

La production annuelle est de 65 kt et les réserves sont estimées à 6 Mt. La disponibilité est donc d'un peu plus d'une centaine d'années, à production des mines constante. Des réserves inexploitées existent probablement au Cameroun et ailleurs.

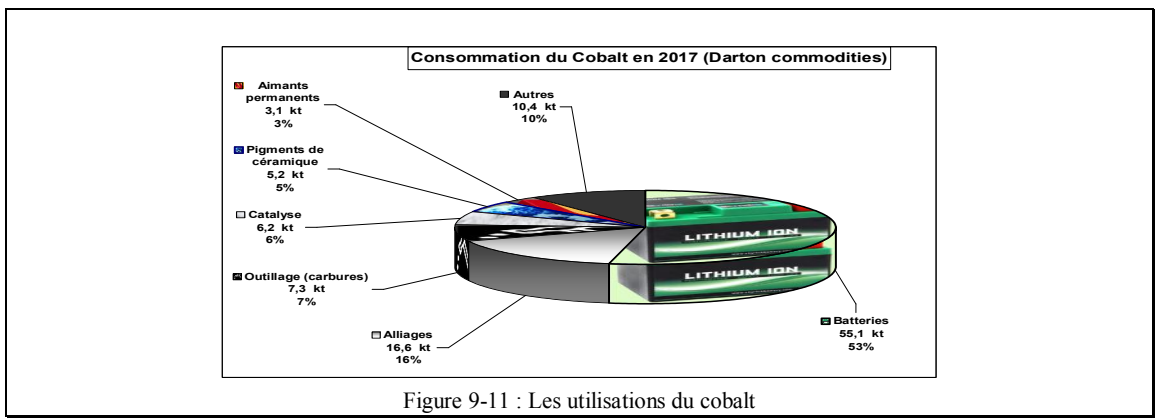


Figure 9-11 : Les utilisations du cobalt

Comme le montre la Figure 9-12 : Les pays extracteurs du cobalt, la production de cobalt provient pour plus de 50% des mines à ciel ouvert du Congo et d'une petite dizaine d'autres pays. La plupart des mines sont à ciel ouvert, et ne nécessite pas d'énormes investissements.

Pour le développement des batteries au lithium utilisées pour le transport, la localisation des mines de cobalt concentrées pour plus de la moitié dans la république du Congo, risque de poser un problème d'approvisionnement puis d'épuisement.

Mais, malgré un rapport [capacité de charge sur poids] moins favorable pour l'utilisation des batteries pour le transport, la recherche d'économies, de rapidité de charge et d'accroissement de la longévité pourra inciter à utiliser d'autres alliages pour les cathodes, comme le phosphate de fer et aussi conduira à trouver des technologies de substitution.

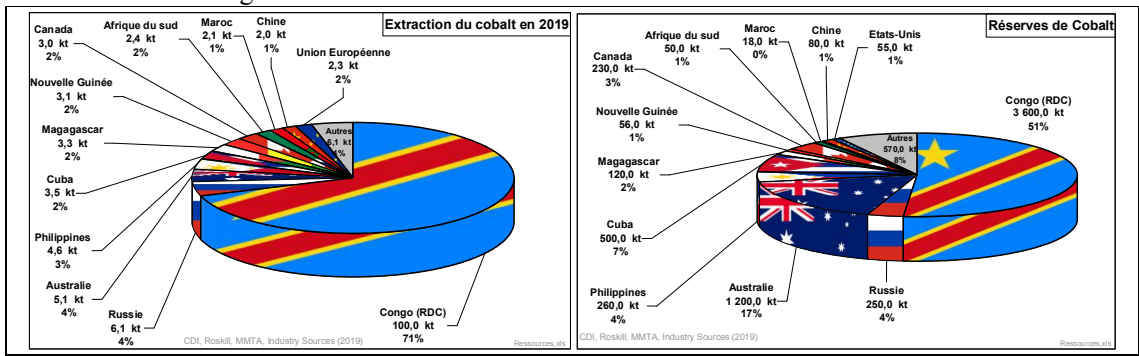


Figure 9-12 : Les pays extracteurs du cobalt

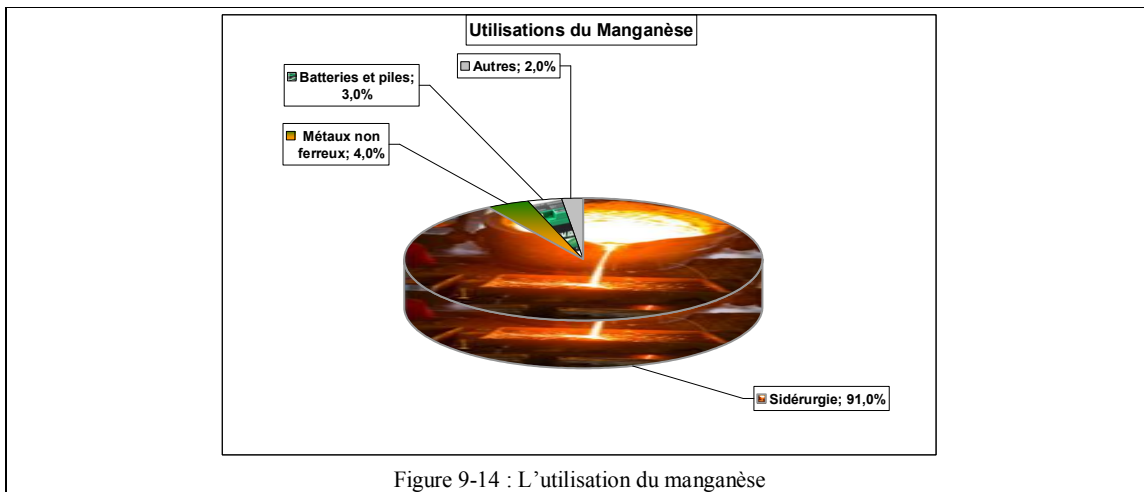
Figure 9-13 : Les réserves de cobalt par pays

9.6 L'épuisement du manganèse

Le manganèse est le 4^{ème} métal le plus utilisé après le fer, l'aluminium et le cuivre et devant le zinc.

Près de 90 % de la production de manganèse est utilisée pour la préparation d'alliages ferreux et non-ferreux.

L'utilisation du manganèse n'est donc pas très visible, car il est mélangé à d'autres métaux, mais elle est fondamentale pour leur conférer des propriétés mécaniques essentielles. Il est surtout utilisé dans des alliages avec le fer pour en améliorer sa dureté. Mélangé (à 14%) à de l'acier, il le rend moins oxydable, amagnétique et plus durs. Indispensable pour les blindages, les outils, les rails, les armes, comme les épées de Tolède. Il est mélangé à l'aluminium pour faciliter le soudage ou le cuivre, pour diminuer la corrosion du bronze. Le manganèse est aussi utilisé pour les cathodes des batteries au lithium NMC, parmi les plus performantes actuellement. Son utilisation pour les cathodes de batteries au lithium ne devrait pas impacter très fortement sa consommation.



Il est extrait annuellement de l'ordre de 25 Mt de manganèse. Les réserves annoncées s'élèvent à près de 840Mt.

La durée de disponibilité limitée à 33 ans à récupération constante. Mais le manganèse a connu une croissance décennale de son extraction de 75%. Si cette croissance se poursuit, sa disponibilité calculée serait de seulement 23 ans, à réserves identiques.

A consommation croissante, la disponibilité du manganèse risque d'être limitée à une vingtaine d'années, ce qui est extrêmement court et préoccupant.

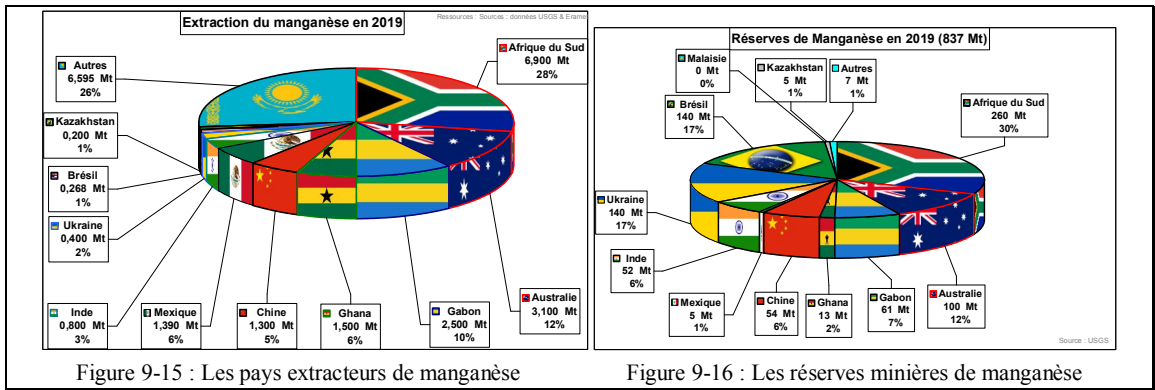


Figure 9-15 : Les pays extracteurs de manganèse

Figure 9-16 : Les réserves minières de manganèse

9.7 Le risque d'épuisement de l'argent

L'argent est utilisé dans l'industrie (électricité, électronique, brasures, soudures et autres alliages : 41%). L'usage en photographie n'est plus important, mais les fabricants d'électronique, d'ordinateurs, de téléphones portables et de tablettes en consomment de plus en plus. (23%).

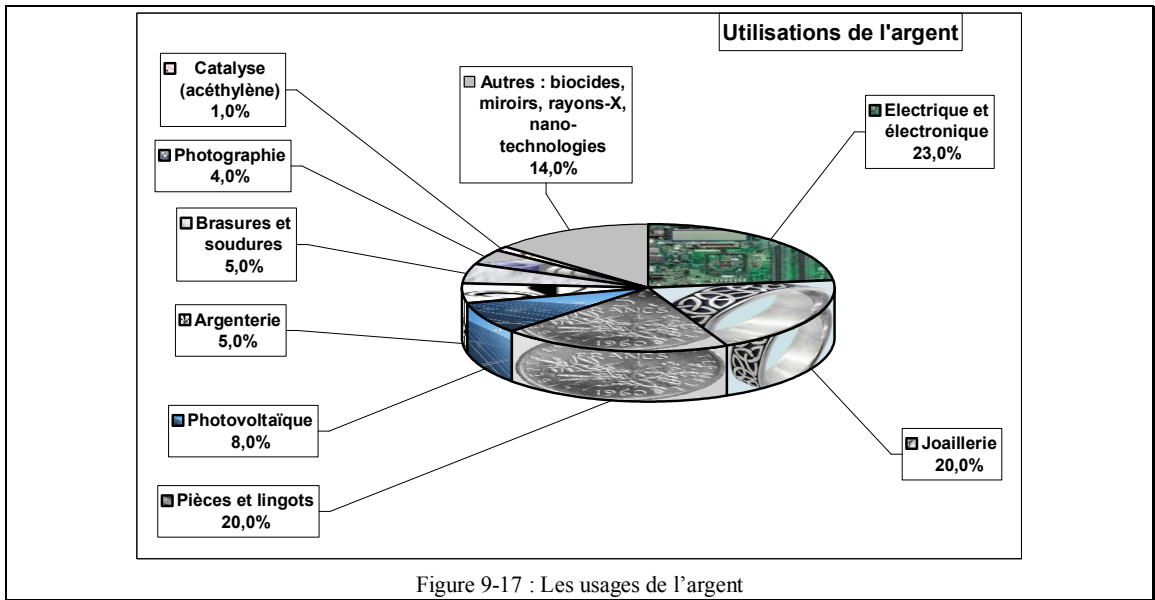


Figure 9-17 : Les usages de l'argent

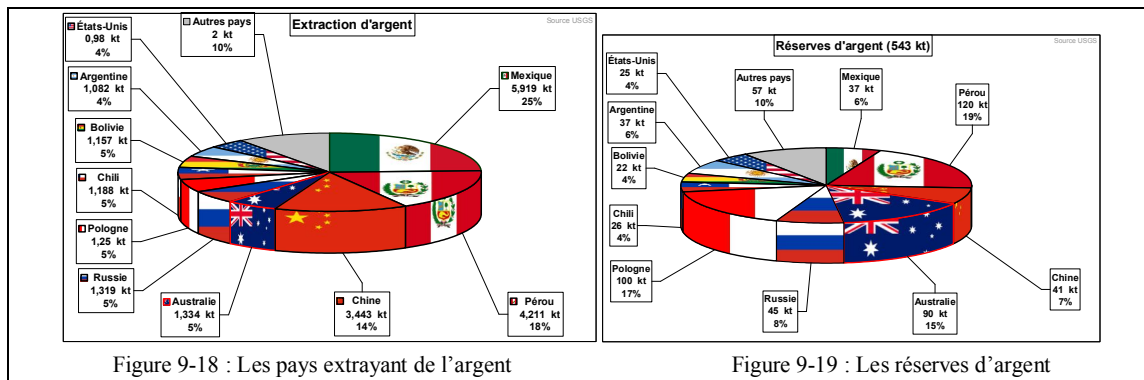


Figure 9-18 : Les pays extrayant de l'argent

Figure 9-19 : Les réserves d'argent

L'argent est extrait de divers pays, mais pour près de 60% d'Amérique latine. Le minerai est, pour moitié, un sous-produit d'autres métaux : plomb, zinc, cuivre. Les réserves certifiées les plus optimistes sont estimées en 2020 à 540 kt d'argent, pour une extraction annuelle de 20 kt.

Les réserves connues d'argent sont surtout en Pologne, en Australie et en Amérique latine.

Depuis 1950, 93% des réserves d'argent ont été épuisées, notamment dans les états américains producteurs d'argent métal, en dépit des progrès technologiques d'extraction. La qualité des minerais s'est également dégradée de plus de 95% dans les 100 dernières années aux États-Unis.

L'argent est un métal cher, néanmoins, le taux de recyclage reste faible (20%) et pourrait être amélioré.

Au rythme de consommation actuelle et sans exploitation nouvelle, l'épuisement de l'argent est donc annoncé pour dans seulement une vingtaine d'années.

9. 8 L'épuisement de l'or

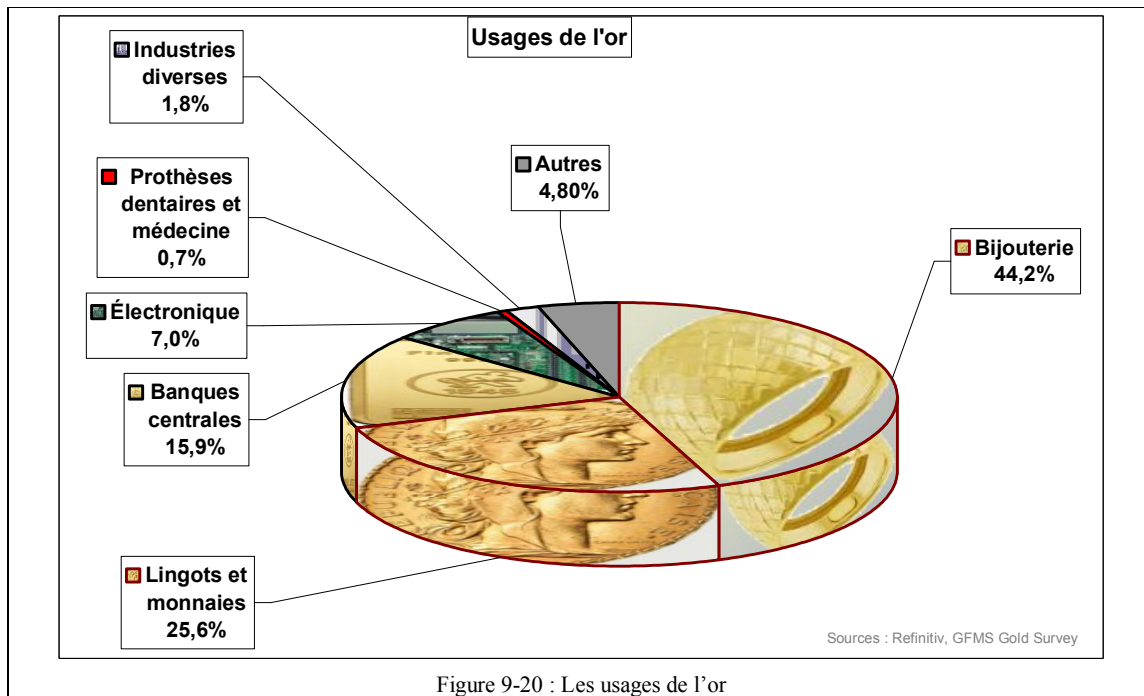


Figure 9-20 : Les usages de l'or

L'or, inoxydable est utilisé en bijouterie pour sa beauté, pour thésauriser et fabriquer des pièces de monnaie, car il est aussi rare donc cher et en électronique, car il est aussi conducteur. Les fabricants de cartes électroniques d'ordinateurs, de téléphones portables et de tablettes... consomment une part importante des métaux précieux.

La teneur moyenne de l'écorce terrestre est de 0,005 ppm. L'eau de mer contient de 1 à 10 mg d'or/m³.

Près de 3.500 t d'or ont été extraites en 2019, dans un grand nombre de pays, comme indiqué Figure 9-21. Les réserves sont estimées à 54.000 tonnes en 2019, ce qui induit une durée de disponibilité de seulement 16 ans. Malgré sa valeur, le taux de recyclage, est limité à 34%, sans doute parce que les possédants d'or ne revendent guère leurs bijoux et parce que le recyclage des appareils électroniques n'est pas assez structuré.

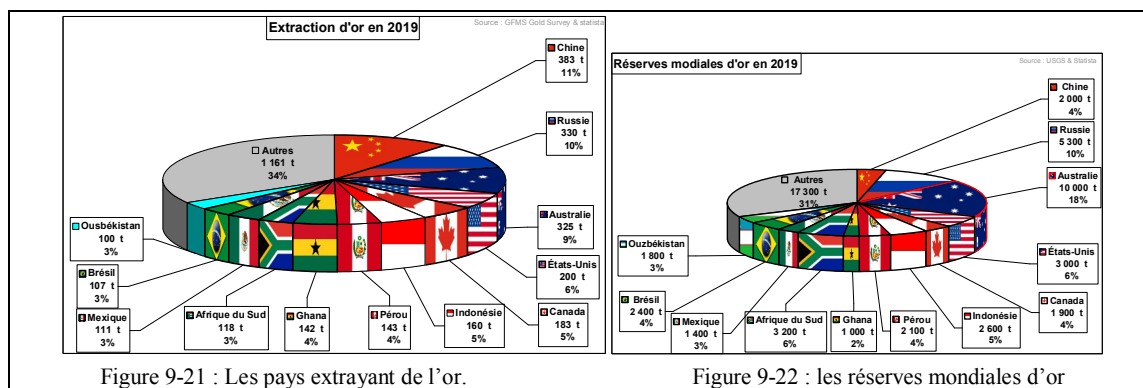


Figure 9-21 : Les pays extrayant de l'or.

Figure 9-22 : les réserves mondiales d'or

9.9 La disponibilité des platinoïdes

Les platinoïdes, c'est un groupe de 6 métaux voisins dans le tableau de Mendeleïev : le ruthénium (Ru), le rhodium (Rh), le palladium (Pd), l'osmium (Os), l'iridium (Ir) et le platine (Pt), appelés aussi PGM, les Platinum Group Minerals. Ces éléments sont parmi les plus rares de l'écorce terrestre. Le palladium et le platine sont les plus importants. Généralement ils sont extraits comme sous-produits de l'exploitation du nickel. Leurs propriétés chimiques proches (surtout les propriétés catalytiques) font que, dans la nature, ils sont presque toujours associés entre eux, le platine et le palladium étant majoritaires. Ce sont des métaux précieux, dont le coût est très élevé, plus que celui de l'or. Le ruthénium et l'iridium ont des applications spécialisées. L'osmium, quant à lui, n'a qu'une production très minime (<1 t/an) et des usages de micro-niche. Les usages majeurs du platine, du palladium et du rhodium sont donnés dans le tableau ci-après. Le reste fait l'objet d'investissements et sert pour l'électronique, les piles à combustibles, la verrerie, les prothèses dentaires, la pharmacie. La fabrication de composants électroniques utilise 13% du palladium, surtout pour la production de condensateurs multicouches en céramique (MLCC) et en électrodéposition pour les connecteurs et les composants de puces des cartes électroniques et les circuits intégrés.

Famille	Elément	Extraction	Prod. /10ans	Réserves	mondial maxi*	Épuisé dans	Usages majeurs	
Platinoïdes	Platine	188,139 t		69 310 kt	37%	148ans	Pots catalytiques, Catalyse industrielle et pétrolière, bijouterie, dentaire	Pt
	Palladium	210,6 t	-10,0%		50%			Pd
	Rhodium	23,203 t			50%			Ro

Compte tenu de leur prix, une part significative des ces métaux est recyclée.

Recyclage des platinoïdes	Platine	Palladium	Rhodium
Recyclé	70 t	106 t	12 t

Taux de recyclage	37,57%	82,84%	49,87%
Pots catalytiques d'automobiles	40%	67%	100%
Catalyse industrielle	27%	18%	
Bijouterie	31,30%	0,40%	
Industrie	1,70%	13,80%	

Compte tenu des réserves prouvées, la disponibilité des platinoïdes est de seulement 14 ans, mais selon certaines publications des réserves probables de 69.000 t, conduisent, à consommation constante, à un épuisement dans environ 150 ans. Naturellement, le développement de la motricité électrique induira une baisse de la demande pour les pots catalytiques cours des prochaines décennies. En revanche, la motricité à base de pile à combustibles des voitures devrait induire une consommation croissante de platinoïdes, dans les prochaines décennies.

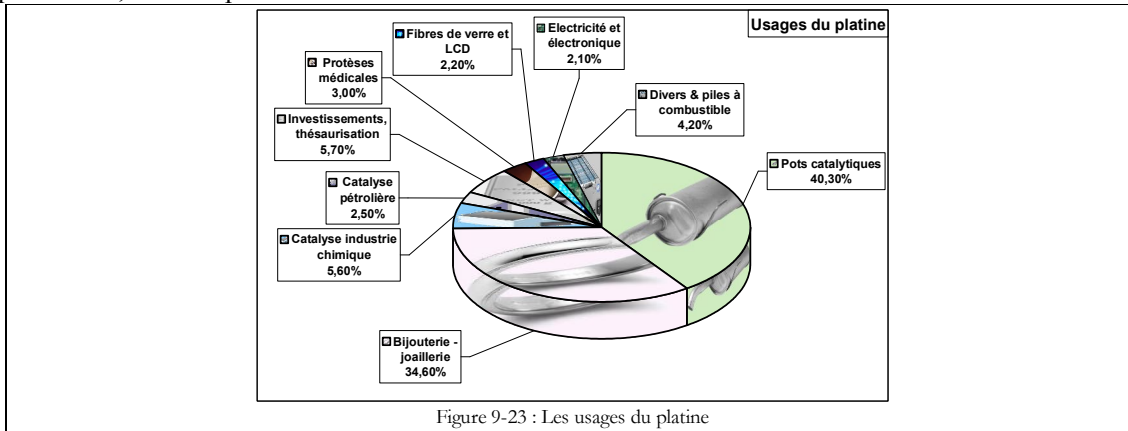


Figure 9-23 : Les usages du platine

Pour une extraction de 423 t, il y a un stock de 70 kt de platinoïdes sur terre, soit une disponibilité de l'ordre de 160 années. L'épuisement du platine et du palladium n'est pas des plus critiques. Les réserves connues sont surtout concentrées à plus de 780% en Russie et en Afrique du Sud, ce qui cependant pourrait s'avérer un souci.

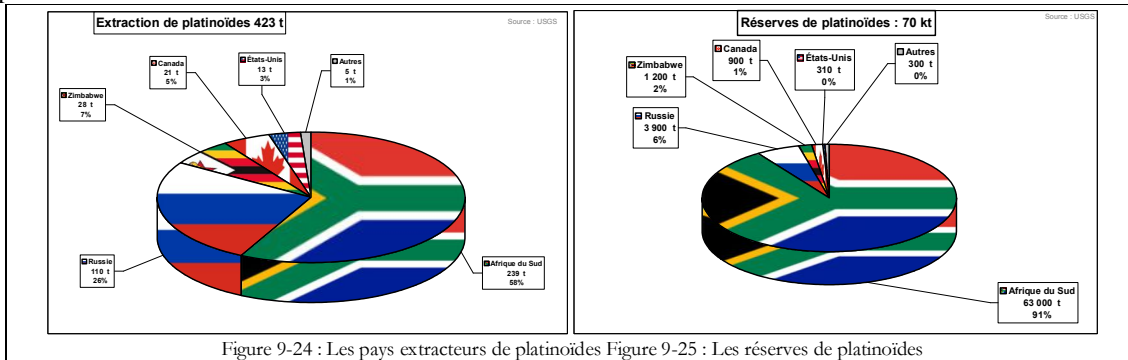
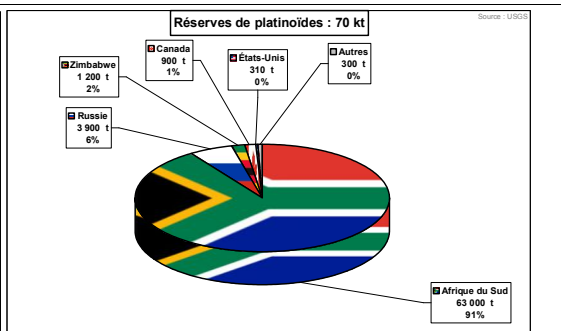


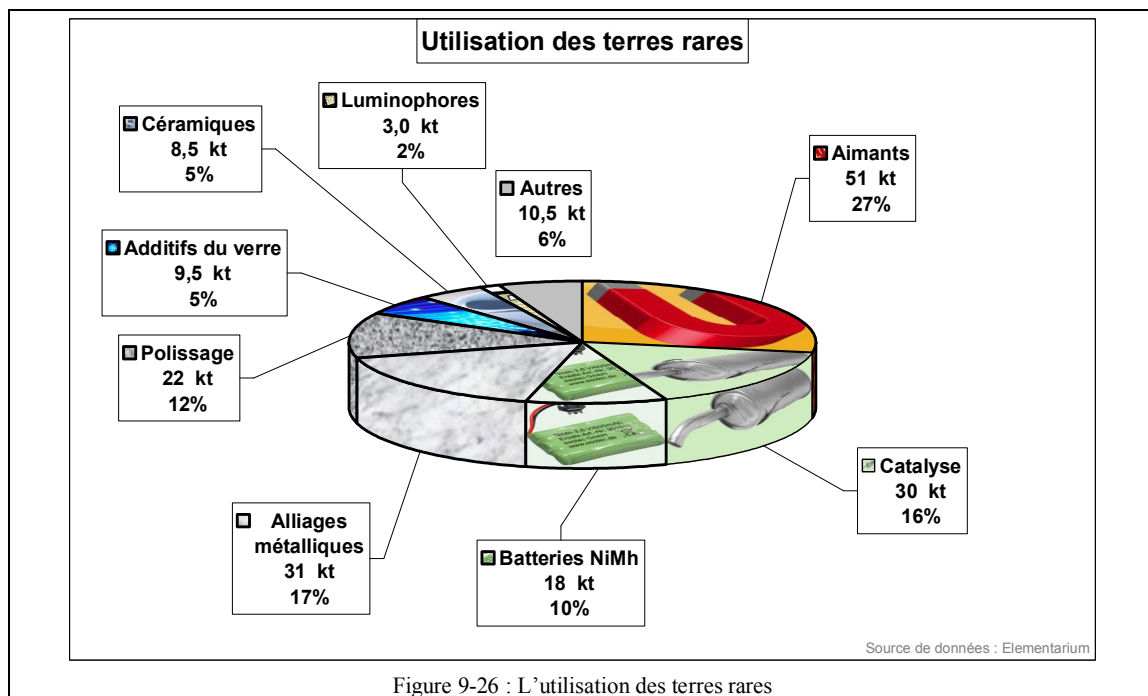
Figure 9-24 : Les pays extracteurs de platinoïdes



9. 10La disponibilité des terres rares

Dans le tableau périodique des éléments, figure le groupe de 17 éléments de la 3^{ème} colonne du tableau et sa prolongation par la ligne des lanthanides, aux propriétés voisines, que l'on a aussi appelé terres rares. Certains éléments, sont assez répandus, en dépit de l'adjectif qui les qualifie.

La plupart des terres rares (lanthane, cérium, yttrium, europium, terbium et gadolinium) possèdent des propriétés particulières qui les rendent très utiles.



Leurs usages ont été très limités jusque dans les années 1960 (ferrocérium des pierres à briquet), puis divers usages technologiques ont commencé à apparaître dans les années 1970 (europium pour les écrans cathodiques couleur, lasers, etc.) puis ils se sont diversifiés et étendus. Ils ont permis de développer des technologies ultrasophistiquées, pour lesquelles ils sont devenus indispensables et entre autres, pour des applications préconisées pour des considérations écologiques.

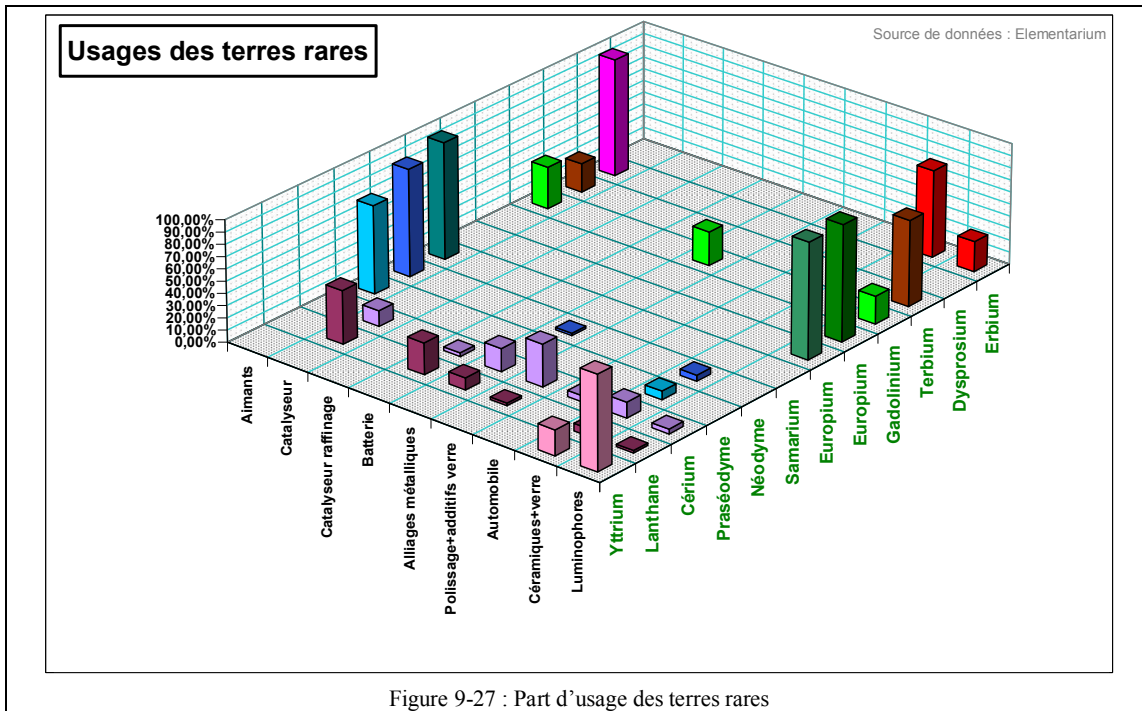
Parmi les applications concernées citons :

- ⇒ la coloration de verre et de céramique ;
- ⇒ en optique : télévision couleur, LED, éclairage fluorescent, lasers, radiographie ; polissage du verre ;
- ⇒ en chimie, des catalyses : cracking du pétrole, pots catalytiques (un quart des usages) ;
- ⇒ en industrie, des produits réfractaires, résistant aux très hautes températures ;
- ⇒ en aéronautique, pour les ailettes de turboréacteurs, capables de résister aux forces centrifuges ;
- ⇒ pour piéger et stocker l'hydrogène ;
- ⇒ pour fabriquer des panneaux photovoltaïques ;
- ⇒ en électrotechnique, pour des génératrices (éoliennes) et des moteurs électriques (transport, électroménagers) incorporant des aimants permanents performants (néodyme, dysprosium, samarium) pour un quart des usages.

Le lanthane a été utilisé pour la fabrication des batteries NiMh, qui sont remplacées de plus en plus par des batteries au lithium, avec des cathodes au phosphate de fer. Contrairement à ce qui est dit, même à la télévision, par des commentateurs bien connus, il n'est pas utilisé de terres rares pour les batteries des voitures électriques de demain.

Les plus utilisés sont le cérium (40,2 %), le lanthane (27,8 %) et le néodyme (17,6 %).

Le tableau ci-après (inspiré de Wikipédia) donne une liste plus détaillée d'applications par élément.



Les minerais de terres rares ont été localisés actuellement en grande partie (30 à 40%) en Chine. Mais depuis que la Chine a décidé de réduire leurs quotas d'exportation, la remontée des prix a conduit à l'ouverture ou à la réouverture de mines dans le monde, aux Etats-Unis (Californie), en Australie, en Suède, au Brésil, au Vietnam, en Russie, à Gakara au Burundi. Au Brésil, un projet étudie la récupération de terres rares à partir des résidus miniers de phosphate. La Figure 9-28 montre que la répartition des minerais de terres rares est très éparpillée, mais ne sont pas exploités en Europe. La concentration de certaines terres rares est trois fois plus importante que celle du cuivre et deux fois plus que celle du zinc. Cependant, la séparation les unes des autres des 17 terres rares est chimiquement complexe, en raison de leurs propriétés proches, mais maîtrisée depuis longtemps par Rhône Poulenc, Rhodia puis Solvay à La Rochelle. Cette séparation s'applique aux minerais comme aux alliages à recycler.

Les réserves mondiales d'oxydes de terres rares ont été estimées à 110 Mt pour une production annuelle de l'ordre de 130.000 t, soit un délai d'épuisement de 800 ans, très supérieur au délai d'épuisement de la plupart des éléments. Face à un accroissement de consommation important, ces métaux très dilués (comme les terres rares), sont stratégiques pour l'économie, ont pour certains des gisements de longévité limitée. Certains (comme la Chine) restreignent l'exportation, créant une grande volatilité des prix. Ceci fragilise la compétitivité des industries qui les produisent ou utilisent. Cependant, les réserves connues apparaissent critiques concernant le dysprosium et le terbium. Le néodyme (en concentration de 28 ppm dans la croûte terrestre) est rationné par les chinois, mais une réserve très importante aurait été découverte dans le Pacifique en 2018, par les Japonais. Le recyclage des terres rares (complexe dans le cas des alliages) a un coût supérieur à leur valeur en 2020.

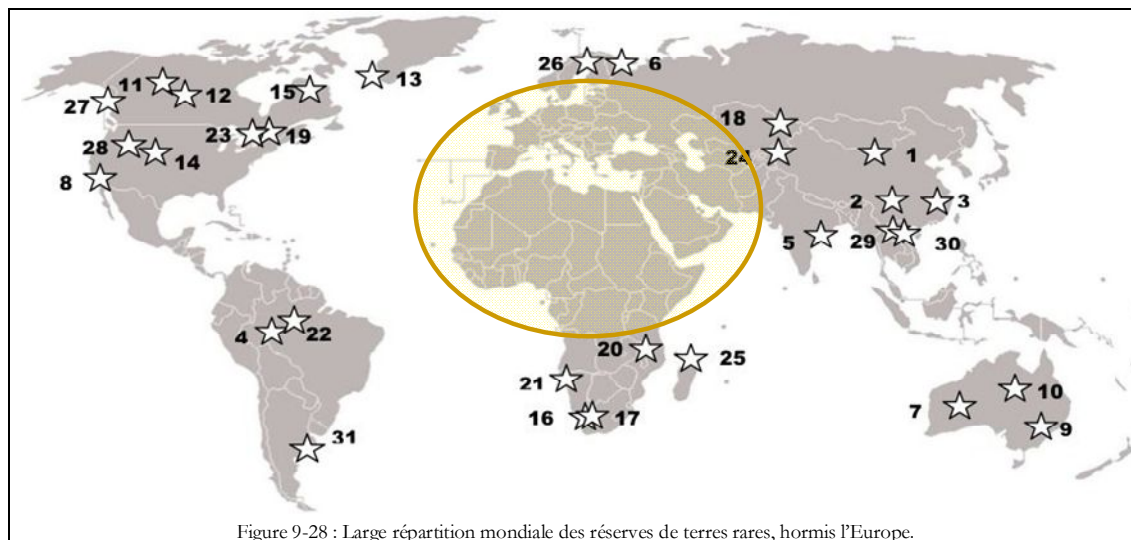


Figure 9-28 : Large répartition mondiale des réserves de terres rares, hormis l'Europe.

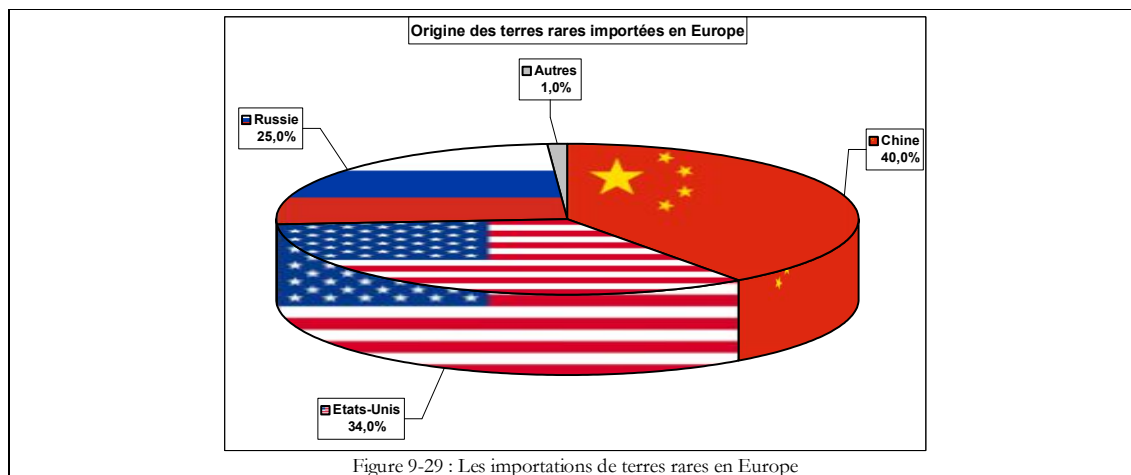


Figure 9-29 : Les importations de terres rares en Europe

De nouveaux procédés sont nécessaires et ici ou là se développent pour recycler ces métaux. C'est le cas de Rhodia à La Rochelle pour récupérer les poudres luminophores (terbium, yttrium, europium, gadolinium, lanthane et cérium) qui recouvrent l'intérieur des lampes basse consommation (LBC). Or, seulement un tiers de ces lampes usagées sont actuellement rendues, par méconnaissance. Sont ainsi récupérables 15 t d'yttrium, 1 t. de terbium et 1 t d'europium.

Les terres rares sont des métaux dont la plupart ne sont pas rares.

Le fort développement des produits électroniques, des technologies de l'information et de la communication (TIC), de l'aéronautique, allié à l'innovation technologique dans la recherche de performances et de rendements, a fait exploser la demande en nouveaux métaux. Leurs propriétés techniques spécifiques sont difficilement remplaçables, ce qui posera problème lorsqu'elles le deviendront.

La criticité des minerais et terres rares est sensible dans le secteur de l'électronique et des moteurs. Le profil de consommation des métaux a également évolué rapidement ces dernières années.

9. 10. 1. L'épuisement de l'indium

L'indium est utilisé pour réaliser la fine couche (ITO) transparente et conductrice des écrans LCD et tactiles essentiellement en oxyde d'indium (In_2O_3), à 90 % avec 10 % d'oxyde d'étain SnO_2 . Il est donc utilisé pour les tablettes et téléphones notamment et mixé avec du cuivre et de sélénium, pour certains panneaux solaires. La quantité demandée est donc en forte croissance depuis trente ans. Elle a été multipliée par 12 en 30 ans et son prix très instable (180\$/kg en 2020).

L'indium est principalement tiré du minerai de zinc, la sphalérite (ZnS), issue des gisements volcano-plutoniques polymétalliques (source BRGM) et pour 5% des minerais de cuivre et d'étain. Ils en contiennent un très faible pourcentage (0,01% au maximum). Le métal source peut aussi être issu du recyclage. La quantité d'indium produite a été estimée de seulement 760 t/an en 2019.

La quantité disponible et la durée de disponibilité de l'indium est réduite par la quantité et disponibilité du zinc.

Une solution pourrait être de le substituer par des matériaux de nanotechnologies comme le graphène (cristal de carbone).

9. 10. 2. Le caractère indispensable du tantale

Le tantale est un métal de transition, gris-bleuté, dense, malléable, ductile et très dur. Il possède le quatrième plus haut point de fusion parmi les métaux (après W, Re et Os).

Le tantale est très résistant à la corrosion par les acides et a une permittivité élevée. Il est utilisé pour réaliser les condensateurs les plus miniaturisés et les plus robustes, nécessaire à la miniaturisation de l'électronique.

Sa dureté et sa résistance à la chaleur sont prisés pour les outils de coupe et les superalliages. Notamment les alliages de tantale sont utilisés pour la fabrication de pales des turbines des turboréacteurs, proches de la chambre de combustion. Stable et non toxique, il est couramment utilisé en orthopédie.

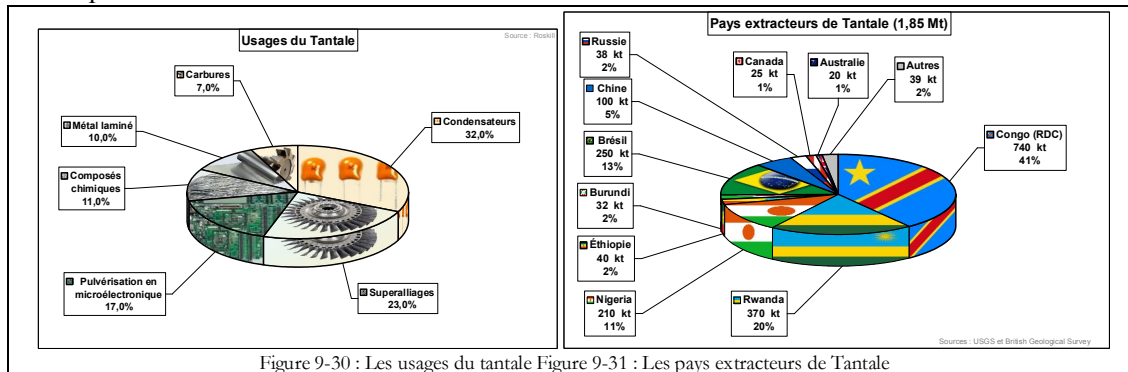


Figure 9-30 : Les usages du tantale Figure 9-31 : Les pays extracteurs de Tantale

La Figure 9-30 : Les usages du tantale Figure 9-31 montre que sur 1,85 Mt de tantale extrait, les trois quart le sont du continent africain.

Les réserves mondiales sont estimées à 140 Mt, soit de l'ordre de 75 ans de disponibilité.

9. 10. 3. La criticité du tungstène

Le tungstène (sigle W comme Wolfram) est l'élément qui présente la plus haute température de fusion, d'où un certain nombre d'utilisations particulières en hautes température.

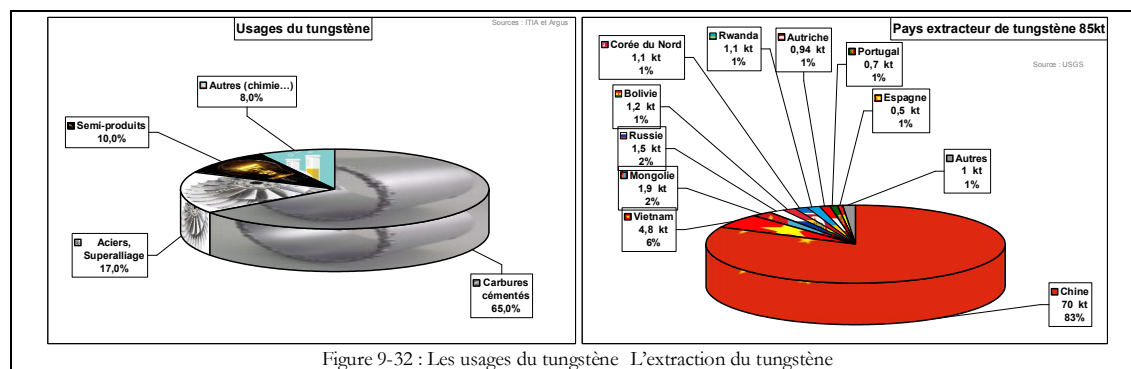


Figure 9-32 : Les usages du tungstène L'extraction du tungstène

Le tungstène, élément très lourd à haute température de fusion est utilisé pour fabriquer :

- ⇒ en carbures de tungstène ultra-durs (WC et W_2C), des embouts ou des céramiques réfractaires ;
- ⇒ en aciers superalliages, des pales de turbines, des plaquages ;
- ⇒ des outils d'usure de grande dureté, pour les mines et les forages, en aciers mixé jusqu'à 80% de tungstène ;
- ⇒ les contacts de disjoncteurs ;
- ⇒ des aciers inoxydables réfractaires ;
- ⇒ en semi-produits : les filaments des ampoules électriques, des tubes cathodiques de postes de télévision ;
- ⇒ des anodes de tubes à rayons X ;
- ⇒ les électrodes en filaments à très haut point de fusion ;
- ⇒ le bouclier thermique des véhicules spatiaux ou le divertor du réacteur thermonucléaire ITER ;
- ⇒ comme pigment inorganique ;
- ⇒ comme catalyseur,
- ⇒ de l'armement, des explosifs (Dense Inert Metal Explosive) ;
- ⇒ comme lubrifiant aux hautes températures ($>500^\circ$), sous forme de disulfure de tungstène ;
- ⇒ comme soudure sur du verre borosilicate (de même coefficient de dilatation).

La production annuelle de tungstène était en 2019 de 85 kt en progression de 50% sur la décennie. Les réserves sont estimées à 2.800 kt¹⁰, ce qui représente cinquante ans de production annuelle. Cependant plus de 80% du tungstène est extrait de Chine.

10 Les leviers pour prolonger le délai d'épuisement des mines

Pour repousser l'épuisement des métaux il existe 4 voies :

- ⇒ réduire la consommation ;
- ⇒ trier les déchets et concevoir des articles pour recycler les matières critiques, c'est l'économie circulaire ;
- ⇒ produire avec des produits de substitution ;
- ⇒ découvrir des technologies alternatives moins rares, voie de l'évolution technologique.

La quantité de matière consommée pour un usage donné (qui s'appelle l'intensité matière) a tendance à être réduite par les industriels. Comme le montre la Figure 5-2, la quantité de matière consommée par habitant décroît en moyenne de 15% par décennie, malgré l'accroissement du PIB. Aller au-delà est la voie contraignante proposée par certains collapsologues. Mais dans les démocraties, il paraît peu probable que beaucoup de dirigeants se fasse élire dans la durée avec un programme de réduction la consommation par la réduction du niveau de vie. Une réduction volontaire significative de la consommation planétaire me paraît peu probable, même si, à l'égard de l'épuisement des ressources, il faudrait le regretter.

L'économie circulaire s'organise, à partir du moment où le recyclage coûte moins cher que l'extraction. Ce n'est, hélas, pas le cas général. Les primes au changement de véhicule par exemple ne vont guère dans ce sens. L'accroissement du coût des ressources minières suite à la raréfaction des mines les plus riches en minéraux aura divers effets pour réduire la consommation, pour découvrir des consommations alternatives, pour accroître le taux de recyclage, découvrir de nouvelles mines ou rentabiliser des anciennes. Mais on peut craindre que ces effets s'avèrent trop tardifs.

La tendance du marché à vendre des objets de faible durée de vie, pour en revendre prochainement, commence à ne plus être appréciée par les tranches de population qui acceptent de payer plus cher pour avoir des objets de meilleure qualité et réparables. La tendance inverse qui consiste à accroître la conception d'objets conçus pour durer, pouvoir être réparés ou recyclés. Mais, il semble utopique de penser que cette tendance va se généraliser rapidement à l'humanité entière.

La voie de l'évolution technologique, ainsi que la conception des objets en vue de faciliter le recyclage de leurs matériaux composants reste une façon efficace, pour faire face à la raréfaction prochaine des ressources minières, mais qui s'est révélée insuffisante jusqu'à présent.

Quelles voies pour changer le paradigme de la surconsommation ?

Sans doute, l'éducation dès l'enfance pour préserver les ressources, comme dans les tribus anciennes.

11 Les risques de la proximité de l'épuisement des ressources

L'utilisation du feu existe depuis 500 à 700.000 ans (Homo Erectus puis Neandertal), l'Homo Sapiens existe depuis 300.000 ans, l'agriculture probablement depuis 9.000 ou 10.000 ans.

Le tableau de l'épuisement des métaux montre que le risque d'épuisement interviendra à court terme à l'échelle humaine :

Compte tenu des réserves identifiées, les délais d'épuisement sont de quelques dizaines d'années pour la plupart des métaux indispensable ou courants. C'est donc un problème très préoccupant qui devrait nous conduire à imaginer des fabrications plus durables et des processus de recyclage généralisés à tous les niveaux, des fabricants aux consommateurs.

Après la disparition inéluctable des métaux, qu'est-ce qui évitera à nos descendants de subir le retour à l'économie du 18^{ème} siècle, en ne conservant que l'agriculture et l'utilisation d'énergie abondante et les savoirs acquis notamment dans l'industrie et en médecine ?

Comment éviter alors un mode de vie plus sobre, un niveau de vie plus restreint, des emplois plus rares et surtout des conflits internationaux meurtriers, pour accéder aux dernières ressources disponibles ?

12 Annexe

Elément	Extraction 2019 ou 2018	Prod. /10ans	Réserves mondiales	Recyclage mondial max ^{1*}	Epuisement (consommation =)	Epuisement (consommation croissante)	Usages majeurs	Symbol	Niveau de prix en 2019
Aluminium	339 Mt	60,73%	30 000 Mt	80,0%	88ans	50ans	Construction, emballage, aéronautique, transports, céramique	Al	1,55 €/kg
Cuivre	20,34 Mt	25,54%	870 Mt	24%	43ans	32ans	Electricité, plomberie	Cu	5,52 €/kg
Fer	2 490 Mt	0	81 090 Mt	83,0%	33ans	33ans	Constructions, Transports...	Fe	0,103 €/kg
Etain	0,32 Mt	0%	11,60 Mt	36% (BRGM)	36ans	13ans	Soudures, conserves	Sn	15, €/kg
Zinc	13,5 Mt	20,0%	261 Mt	30%	19ans	17ans	Galvanisation, chimie	Zn	1,1 €/kg
Plomb	4,7 Mt	0	96 Mt	56%	20ans	20ans	Batteries	Pb	1, €/kg
Titane	7,60 Mt	12,41%	817 Mt	8%	108ans	95ans	Colorant blanc, aéronautique, mécanique (T<600°C), canalisation, outils	Ti	7, €/kg
Cobalt	0,14 Mt	157%	7 Mt	20%	49ans	25ans	Batterie au Lithium	Co	91 000 €/kg
Nickel	2,70 Mt	68,8%	97 Mt	50%	36ans	26ans	Aciers inox Batteries	Ni	11 000 €/kg
Manganèse	25,25 Mt	35,09%	837 Mt	10%	33ans	23ans	Alliages d'aciers	Mn	2,4 €/kg
Chrome	17,02 Mt	40,0%	196 Mt	38%	11ans	10ans	90% alliages inox, chimie	Cr	9 300 €/kg
Argent	24 kt	0	543 kt	50%	22ans	22ans		Ag	8 000 €/kg
Or	3 kt	0	54 kt	34%	16ans	16ans	10% = industriel + dentaire	Au	51 800 €/kg

Données de calcul des dates d'épuisement des métaux les plus courants (sources diverses, dont USGS, BGS, Statistica...)
Tableau de la disponibilité des éléments.

ⁱ De formule (Ni,Mg)₃[Si₂O₅](OH)₄)

ⁱⁱ (Fe, Ni)O(OH) n(H₂O)

ⁱⁱⁱ La millérite NiS, la polydymite Ni₃S₄

^{iv} Dans la pyrrhotite (Fe,Ni)₉S₈, la pentlandite (Ni,Fe)₉S₈,

^v Dans la chalcopryrite CuFeS₂

^{vi} Comme la nickéline (NiAs) de couleur rouge, la chloantite NiAs₃, la smaltite, l'annabergite ou "nickel ocre" Ni₃(AsO₄)₂ 8(H₂O), l'aerugite...

^{vii} Breithauptite ou alliage NiSb

^{viii} (Gersdorffite NiAsS ou disomose.