

La consommation de métaux du numérique : un secteur loin d'être dématérialisé

Liliane Dedryver
avec l'aide de Vincent Couric



FRANCE STRATÉGIE
ÉVALUER. ANTICIPER. DÉBATTRE. PROPOSER.

Table des matières

Résumé	3
1. La partie cachée de l'iceberg : la consommation en métaux du numérique	6
1.1 Bilan de la consommation	6
1.1.1 Une consommation du numérique qui s'inscrit dans une tendance globale de croissance de la demande mondiale en métaux	6
1.1.2 Une transition numérique alimentée par une grande diversité de métaux.....	8
1.2 Le risque d'épuisement des ressources, principal enjeu de la consommation en métaux ?	11
1.2.1 L'épuisement des métaux disponibles, un concept difficile à appréhender à l'échelle d'une vie humaine.....	12
1.2.2 Un concept d'épuisement supplanté à court terme par le risque concret de tensions d'approvisionnement	14
1.2.3 L'apaisement des tensions par la recherche de substitutions	19
1.3 Une exploitation des métaux primaires à l'origine d'une consommation forte en énergie et en eau.....	21
1.3.1 Coût énergétique des métaux primaires	21
1.3.2 Empreinte hydrique de l'extraction et du raffinage des métaux primaires	24
1.4 Des enjeux environnementaux, sociaux et sanitaires rendus invisibles par la délocalisation des activités extractives en dehors de l'Europe	26
1.4.1 Pollutions des cours d'eau, des sols, de l'air, et atteinte à la biodiversité	27
1.4.2 Conditions de travail dans les exploitations minières.....	28
1.4.3 Impacts sur les populations locales	28
1.4.4 Instabilités politiques	29
1.5 Illustration de la géopolitique des métaux.....	30
1.5.1 La Chine et les terres rares : un levier de pression utile, mais dont l'efficacité est à nuancer	30
2. Le recyclage des métaux ne peut pas constituer l'unique réponse à la croissance de la consommation en matières	32
2.1 État des lieux de la production et du recyclage des déchets numériques dans le monde.....	33
2.1.1 Des e-déchets de plus en plus nombreux.....	33
2.1.2 Un quart des e-déchets produits sont des déchets numériques	35
2.1.3 Un taux de collecte et de recyclage des DEEE dramatiquement bas	37

2.2	Les mines urbaines, une industrie extractive en devenir ?.....	38
2.3	Limites du recyclage pour alimenter notre production future.....	39
2.3.1	Un taux de recyclage des petits métaux très faible.....	39
2.3.2	Obstacles à l'industrialisation du recyclage des métaux dans les déchets numériques	40
2.3.3	Des facteurs économiques jouant sur le taux de recyclage des métaux encore peu connus.....	43
2.3.4	Limites structurelles du recyclage pour alimenter notre consommation future .	45

Résumé

Loin de l'image de secteur immatériel qui lui est trop souvent associée, le numérique alimente sa croissance exponentielle grâce à une quantité également croissante de métaux. Les réseaux sont ainsi de grands consommateurs de cuivre, alors que l'ensemble de nos équipements nécessite pour leurs fonctions technologiques une quantité de petits métaux (tantale, gallium, germanium) et métaux précieux (or, platine). Bien que consommés en très faibles quantités, ces métaux sont vite devenus indispensables, par leurs caractéristiques exceptionnelles, pour amplifier les performances de nos équipements. Cette consommation s'inscrit dans un contexte de forte hausse de la demande mondiale de métaux, aussi bien en volume qu'en diversité des métaux consommés.

S'il n'y a pas à moyen terme de risque d'un épuisement des ressources métalliques, cette forte croissance de la demande peut engendrer des tensions d'approvisionnement, liées notamment à l'interdépendance économique entre métaux, qui contraint structurellement la disponibilité de certains petits métaux, ou à la compétition entre les usages.

L'extraction et le raffinage de ces métaux nécessitent de l'énergie, le plus souvent carbonée, et de grandes quantités d'eau, et contribuent à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, ainsi qu'à l'amplification du stress hydrique dans les pays producteurs.

À l'autre bout de la chaîne, la croissance de la consommation de matière se retrouve dans la croissance des déchets : depuis le début des années 2000, du fait de la croissance de la consommation et de l'accélération du rythme de remplacement des équipements, la quantité de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) générée annuellement à l'échelle mondiale ne cesse de progresser. Elle devrait ainsi atteindre 52 millions de tonnes en 2021 (contre 45 millions de tonnes en 2016), dont un quart de déchets du numérique. La plupart de ces déchets sont mis en décharge, brûlés ou ont fait l'objet d'un commerce illégal et d'un traitement non conforme aux normes. Cette absence de gestion de la fin de vie est d'autant plus inquiétante que les DEEE sont des déchets dangereux et polluants.

La réponse traditionnelle aux problèmes liés à la consommation croissante en métaux nécessaires pour alimenter notre modèle de consommation numérique et aux déchets qu'elle produit a été et reste encore très largement limitée aux politiques de recyclage. Néanmoins, si les grands métaux (cuivre, fer, etc.) et les métaux précieux (or, platine) sont relativement bien recyclés, la majorité l'est très peu. En particulier, la quasi-totalité des petits métaux utilisés pour les fonctions high-tech dans le secteur numérique n'est quasiment pas recyclée.

Plusieurs raisons techniques ou économiques limitent le développement du recyclage de ces métaux :

- ces petits métaux, présents dans des quantités très faibles, sont le plus souvent utilisés sous la forme d'alliages complexes. Or, si ces alliages permettent d'amplifier les performances notamment énergétiques et rendent possible la miniaturisation des équipements, ils complexifient énormément le recyclage ;
- l'industrialisation des processus de recyclage dans le numérique est par ailleurs complexifiée par la multiplicité des équipements ;
- les métaux subissent une « dégradation de l'usage » : le métal recyclé peut perdre une partie de ses performances technologiques.

Par ailleurs, du fait de la croissance de notre consommation et du décalage temporel et spatial entre production et recyclage, le recyclage de nos équipements ne permettra jamais de couvrir l'ensemble de nos besoins.

Face aux enjeux environnementaux, le recyclage des métaux contenus dans les équipements numériques ne peut donc pas constituer l'unique réponse et doit s'accompagner de politiques visant à réduire notre consommation de matière primaire.

Ce document de travail, premier d'une série de trois documents, s'appuie sur les travaux présentés lors d'un cycle de séminaires sur l'impact environnemental du numérique qui s'est tenu à France Stratégie en 2018-2019¹.

¹ <https://www.strategie.gouv.fr/projets/limpact-environnemental-numerique>

La consommation de métaux du numérique : un secteur loin d'être dématérialisé

Liliane Dedryver

avec l'aide de Vincent Couric

1 La partie cachée de l'iceberg : la consommation en métaux du numérique

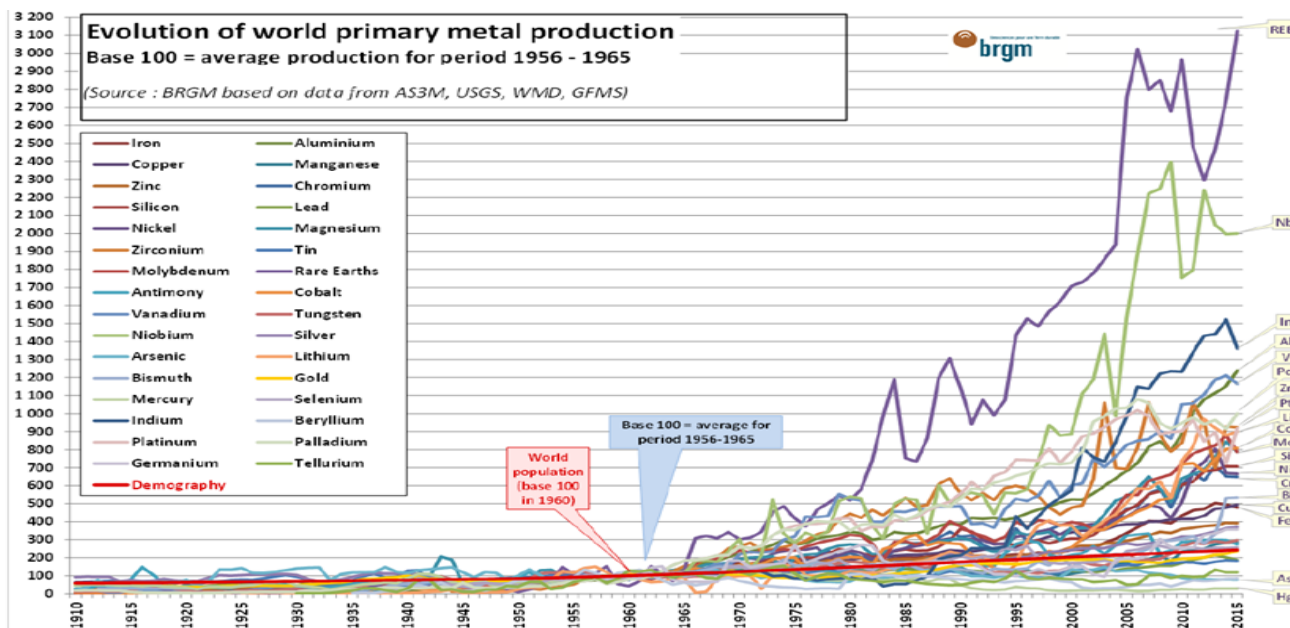
Si la problématique de la consommation énergétique du numérique commence, dans une certaine mesure, à obtenir un écho auprès du grand public, l'autre facette de la consommation en ressources de ce secteur – la consommation en métaux – demeure cantonnée aux discussions de spécialistes. Or le numérique, loin de l'image de secteur immatériel qui lui est trop souvent associée, alimente en réalité sa croissance exponentielle grâce à une quantité également croissante de métaux.

Dresser le bilan des impacts du numérique sur l'environnement requiert donc nécessairement de se pencher sur la question de la consommation en métaux de ce secteur. Pour ce faire, il convient, dans un premier temps, d'objectiver cette consommation en s'interrogeant sur les différents métaux utilisés dans les infrastructures et équipements numériques, les volumes mobilisés, ainsi que sur leurs finalités. Cette objectivation servira, dans un second temps, de socle à une analyse de l'ensemble des impacts de cette consommation en termes d'épuisement des ressources, de consommation énergétique et en eau, d'atteintes à l'environnement, à la santé et aux conditions de vie des populations, ainsi que de risques de dépendance géostratégique.

1.1 Bilan de la consommation

1.1.1 Une consommation du numérique qui s'inscrit dans une tendance globale de croissance de la demande mondiale en métaux

Graphique 1 – Évolution de la production mondiale primaire de métaux



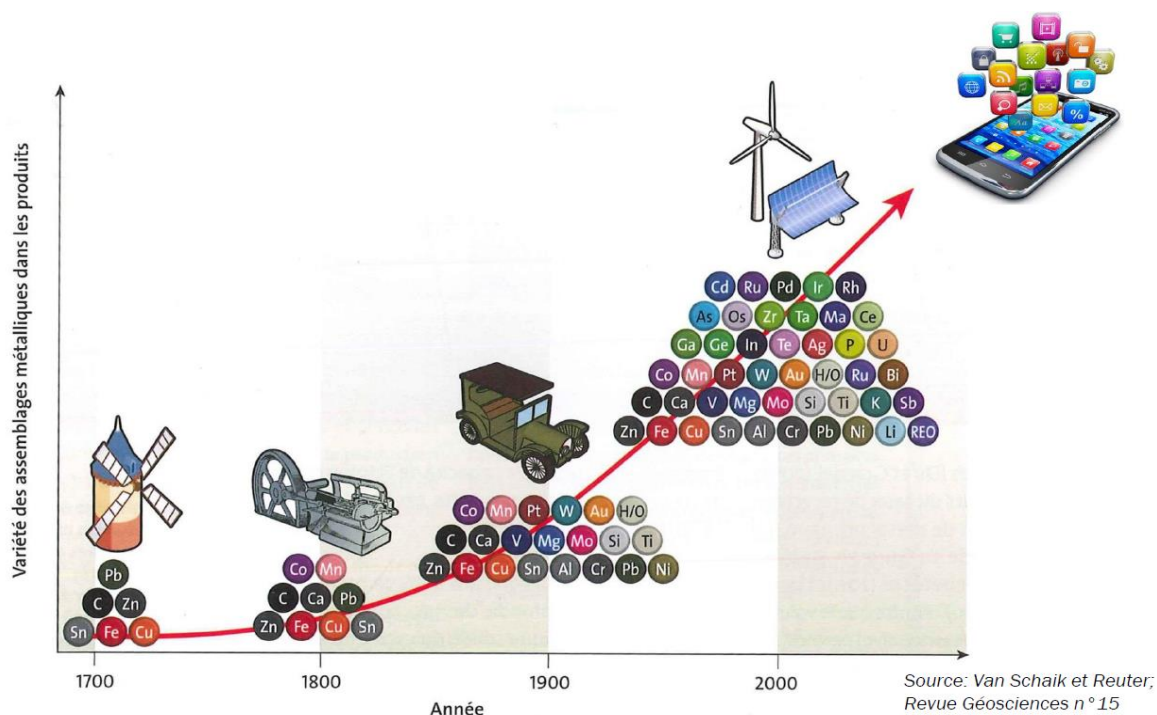
Source : BRGM (données AS3M, USGS, WMD, GFMS)

Note de lecture : la production de cuivre en 2015 était cinq fois plus élevée que la production moyenne sur la période 1956-1965. Une croissance nettement plus forte que celle de la population mondiale, qui a « seulement » doublé entre 1960 et 2015.

Le graphique 1 présenté par le BRGM² montre, d'une part, qu'on assiste depuis les années 1960 à une croissance généralisée des besoins en métaux dans le monde, d'autre part que cette croissance est bien plus rapide que celle de la population mondiale. Olivier Vidal explique que cette hausse de la consommation en matières premières tient à trois facteurs : croissance démographique (augmentation numérique des consommateurs de métaux), augmentation du niveau de vie (augmentation de la demande individuelle en métaux), et développement industriel (augmentation de la masse de métaux utilisée pour la production)³.

Pour satisfaire ses besoins, la population mondiale consomme donc une quantité croissante de métaux. Or, cette croissance ne porte pas uniquement sur la quantité en tonnes de métal consommée chaque année, mais aussi sur la variété des métaux sollicités.

Figure 1 – Illustration de l'augmentation du nombre de métaux utilisés selon l'évolution technologique



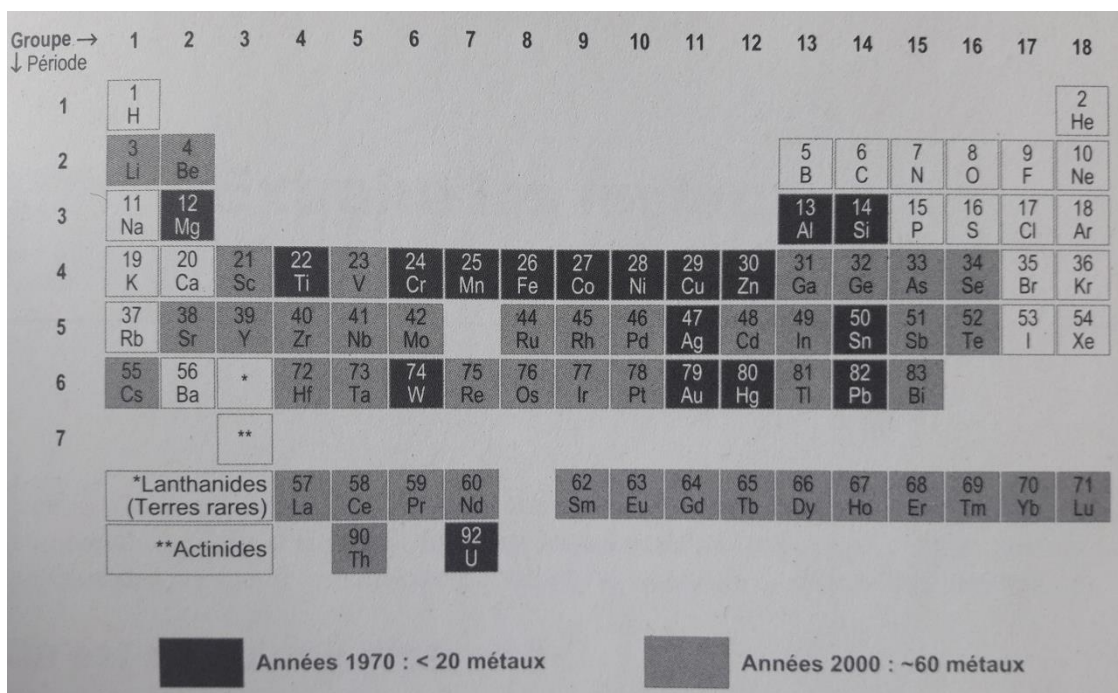
Source : Van Schaik et Reuter, revue Géosciences, n° 15

Ainsi, comme l'illustre la figure 1, nous sommes passés depuis la fin du XIX^e siècle d'une économie fondée sur l'exploitation de moins d'une dizaine de métaux à une économie sollicitant une soixantaine de métaux.

² Graphique tiré de la présentation de Gaétan Lefebvre du BRGM lors du séminaire organisé le 21 janvier 2019 par France Stratégie : « La consommation croissante en matières premières du numérique : l'urgence d'une prise de conscience ». Consultable en ligne à l'adresse : <https://www.strategie.gouv.fr/debats/consommation-croissante-matieres-premieres-numerique-lurgence-dune-prise-de-conscience>.

³ *Matières premières et énergies*, Hermes Science, 2018.

Figure 2 – Évolution du nombre d'éléments chimiques mobilisés dans la production et la consommation humaine



Source : Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon, Quel futur pour les métaux ?

Comme l'expliquent Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon⁴, cette double croissance de la consommation en métaux irrigue l'ensemble des secteurs économiques et notamment l'aéronautique, l'agriculture, l'automobile, le bâtiment, la chimie, l'énergie, ainsi que les nouvelles technologies.

C'est bien relativement à cette tendance générale de l'utilisation croissante des métaux qu'il faut analyser la consommation spécifique du numérique.

1.1.2 Une transition numérique alimentée par une grande diversité de métaux

Pour mieux comprendre l'utilisation des métaux dans le numérique, il convient de distinguer deux catégories fonctionnelles de métaux :

- les métaux utilisés pour les fonctions structurelles du numérique ;
- les métaux utilisés pour les fonctions technologiques.

La première catégorie concerne les métaux utilisés en grande quantité dans le numérique, notamment dans les réseaux de télécommunications, et regroupe des grands métaux⁵ tels que le cuivre, l'aluminium et certains aciers.

⁴ Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon (2010), *Quel futur pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société*, p. 142-215, octobre.

⁵ Classification économique des métaux.

La seconde catégorie concerne une grande diversité de métaux utilisés pour leurs propriétés dites « high-tech » dans des quantités très faibles. Les métaux concernés sont principalement des petits métaux et des métaux précieux⁶.

Le cuivre, un métal historiquement au cœur des fonctions structurelles du numérique

Propriétés du cuivre

Le cuivre est un métal utilisé à grande échelle dans de nombreux secteurs en raison de ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques, et plus particulièrement pour ses deux propriétés dominantes : sa très haute conductibilité électrique et thermique d'une part, et sa résistance à la corrosion d'autre part.

Ces deux propriétés dominantes expliquent la forte utilisation du cuivre pour la génération, la distribution et la transmission d'électricité, mais également pour la fabrication des équipements électriques et électroniques.

Consommation mondiale et usages numériques du cuivre

En 2017, selon l'International Copper Study Group⁷, la consommation totale de cuivre dans le monde s'élevait à 24 millions de tonnes. Cette consommation a progressé depuis 1900 à un taux de croissance annuel moyen de 3,4 %.

Sur ces 24 millions de tonnes, la part de consommation liée à la conductivité électrique du cuivre atteint quasiment 60 %, soit environ 11 millions de tonnes pour la génération, la distribution et la transmission d'électricité, et 3 millions de tonnes pour le sous-ensemble des équipements électriques et électroniques auquel le numérique appartient⁸.

Dans le numérique, le cuivre est utilisé comme support physique de transmission des données dans les réseaux de télécommunications fixes (réseaux DSL et réseaux coaxiaux), et pour assurer des fonctions de connexion électrique (du fait de sa conductivité) au sein de certains composants des équipements électroniques tels que les ordinateurs, les téléphones mobiles et les tablettes.

Ce sont actuellement les réseaux télécoms qui concentrent l'essentiel du tonnage de cuivre immobilisé par le numérique. Ainsi, en France, l'Arcep indiquait dans un rapport de 2011⁹ que la boucle locale cuivre d'Orange, support des réseaux DSL, était constituée de 110 millions de paires-kilomètres de câbles de cuivre.

Les équipements électroniques sont à l'origine d'une consommation en cuivre très inférieure en termes de tonnage. En effet, en considérant qu'une tonne de cuivre est nécessaire pour produire 250 000 smartphones et tablettes¹⁰, les 1,4 milliard de nouveaux smartphones

⁶ *Id.*

⁷ « World Copper Factbook 2018 », International Copper Study Group.

⁸ « Copper, Sustainability & Responsible Sourcing », International Copper Association, 25 avril 2018.

⁹ Arcep (2011), *Rapport au Parlement sur les coûts de la boucle locale cuivre de France Télécom et leur évolution dans le cadre de la transition du cuivre vers la fibre*, novembre.

¹⁰ Estimation de l'Institut européen du cuivre présentée dans une infographie.

vendus dans le monde en 2017¹¹ (dont 20 millions en France) ont nécessité la consommation de 5 600 tonnes de cuivre (dont 80 tonnes pour la France).

Les petits métaux, des « vitamines » au service des nouvelles technologies numériques

À côté de grands métaux comme le cuivre, le numérique sollicite un grand nombre de petits métaux et métaux précieux. Bien que consommés en très faibles quantités, ces métaux sont vite devenus indispensables, par leurs caractéristiques exceptionnelles, pour amplifier les performances de nos équipements.

Parmi ces petits métaux, on trouve l'indium, utilisé dans les écrans plats, mais également les terres rares comme le néodyme, présent dans la quasi-totalité des disques durs, le tantale, présent dans les condensateurs électroniques, ainsi que le gallium et le germanium, nécessaires à la fabrication des semi-conducteurs.

Les besoins de ces métaux pour le numérique ne cessent de croître. En effet, ils sont, entre autres, à l'origine des sauts de performances entre les générations successives de nos équipements numériques et revêtent donc une importance économique essentielle.

Focus sur la consommation en tantale du numérique

À l'échelle mondiale, la production annuelle de tantale était évaluée à environ 1 800 tonnes en 2017, autant en 2018¹². Les condensateurs électroniques en tantale, qui permettent de stocker des charges électriques importantes dans de très faibles volumes, représentent environ la moitié de cette consommation totale¹³.

Ces condensateurs ont rendu possible la miniaturisation des équipements numériques, facteur essentiel de leur diffusion à grande échelle dans nos sociétés. La demande en tantale de l'industrie numérique a longtemps été portée par le nombre croissant de condensateurs contenus dans l'électronique grand public, tels les smartphones et les disques durs.

Mordor Intelligence, qui publie tous les ans un rapport sur l'évolution du marché du tantale, estime que la demande en condensateurs devrait désormais, sur la période 2018-2023, reposer sur la numérisation et la robotisation de l'industrie, et que le marché du tantale devrait continuer à croître à un taux de croissance annuel moyen de 5,8 %¹⁴.

¹¹ Communiqué de presse de l'Institut GfK en date du 24 janvier 2018 estimant à 1,46 milliard le nombre de smartphones vendus dans le monde en 2017.

¹² « Mineral Commodity Summaries », United States Geological Survey (USGS), février 2019 : le marché mondial était de 1 810 tonnes en 2017 et estimé à 1 800 tonnes en 2018.

¹³ « Fiche de synthèse sur la criticité des métaux –le tantale », BRGM, août 2015.

¹⁴ Mordor Intelligence (2018), "Tantalum Market, Segmented by Product Form, Application, and Geography, Growth, Trends, and Forecast (2019-2024)", octobre.

Focus sur la consommation en gallium et germanium du numérique

Moins connus que le silicium, le gallium et le germanium sont également principalement utilisés en raison de leurs propriétés de semi-conducteurs. En 2017, leur production est évaluée à environ 320 tonnes pour le gallium et 106 tonnes pour le germanium¹⁵.

Le gallium et le germanium sont utilisés en optoélectronique, en particulier dans les circuits intégrés et les systèmes de communication sans fil (notamment dans les systèmes Wifi et pour les réseaux mobiles 3G puis 4G). Indépendamment de ses fonctions de semi-conducteur, le germanium est aussi utilisé dans la fibre optique comme « dopant » de la silice pour augmenter l'indice de réfraction afin de limiter la dissipation du signal optique.

La demande en gallium et germanium dans le secteur numérique devrait trouver de nouveaux relais de croissance avec le développement du véhicule autonome, de la 5G et de l'internet des objets.

Bien que les quantités de gallium et de germanium utilisées dans un smartphone soient inférieures à un gramme par appareil, il convient de mettre ce chiffre en perspective avec le nombre des nouveaux équipements numériques commercialisés chaque année. Ainsi, avec 1,4 milliard de smartphones vendus par an, la demande totale en gallium et en germanium pour ces produits est en réalité de plusieurs centaines de tonnes par an, ce qui certes reste faible par rapport à la demande en cuivre, mais élevé au regard de la production totale de ces métaux.

Il ressort des éléments susmentionnés que la consommation en métaux du numérique s'inscrit pleinement dans une tendance multisectorielle de croissance des besoins en métaux. S'il est donc disproportionné de stigmatiser le numérique par rapport à d'autres secteurs sur ce terrain, l'objectivation de la consommation en métaux du numérique constitue un préalable indispensable à une prise de conscience trop longtemps repoussée. En effet, concernant le numérique, le principal enjeu pour la société est sans aucun doute de briser l'illusion d'un secteur immatériel, pour permettre une appréhension pleine et entière de ses impacts et à terme le développement de nouveaux leviers d'action.

Au-delà de cet enjeu macroscopique, l'objectivation de la consommation en métaux du numérique permet également de recentrer l'attention sur l'ensemble des métaux réellement sollicités et non seulement sur quelques métaux fortement médiatisés tels que le cobalt, le tantale ou les terres rares. La transition numérique repose en effet sur un mix des trois familles de métaux que sont les grands métaux, les petits métaux et les métaux précieux. L'étude des impacts de la consommation en métaux du numérique se devra donc de présenter les enjeux liés à l'exploitation de ces trois familles distinctes de métaux.

1.2 Le risque d'épuisement des ressources, principal enjeu de la consommation en métaux ?

La consommation en métaux, tout comme celle en pétrole, est souvent abordée dans les publications grand public sous l'angle du risque d'épuisement des ressources naturelles disponibles pour alimenter nos économies. Ce prisme de l'épuisement n'est cependant pas

¹⁵ Pour ces marchés, il n'existe pas de statistiques officielles de production, les chiffres publiés par l'USGS ou les consultants spécialisés reposant sur des estimations recueillies auprès des producteurs et des utilisateurs.

nécessairement toujours le plus pertinent pour analyser l'impact de nos consommations en métaux. En effet, tout dépend de l'échelle de temps retenue pour étudier cette question.

1.2.1 L'épuisement des métaux disponibles, un concept difficile à appréhender à l'échelle d'une vie humaine

« Ressources » et « réserves », deux notions indispensables pour aborder le risque d'épuisement

Définition des notions de « ressources » et « réserves »

Pour comprendre le concept d'épuisement potentiel des métaux, il convient tout d'abord de distinguer deux notions de base : les ressources, d'une part, et les réserves, d'autre part.

Selon l'USGS¹⁶, une « ressource » est une concentration minérale d'une substance donnée, située sur ou dans la croûte terrestre en forme et en quantité telles qu'il y a des chances raisonnables de déboucher sur une extraction économique. La ressource est une notion principalement géologique.

Le degré de connaissance de cette ressource évolue dans le temps au fur et à mesure des travaux de projection géologique et de prospection effectués. En fonction des degrés de connaissance des ressources identifiées, on parle de ressources « supposées », puis « indiquées », puis « mesurées », par ordre croissant de connaissances. Il existe également des estimations, soumises à de récurrentes actualisations, du stock de ressources non identifiées, issues de modèles mathématiques fondés sur des analyses géologiques.

La « réserve » est, quant à elle, la part de la ressource qui est techniquement et économiquement exploitable dans les conditions du marché étudiées à une date donnée. La réserve est une notion principalement économique. Cette notion est sujette à fluctuation en fonction de l'évolution des facteurs influant l'économie du minage, tels que l'évolution du prix de la matière première et des coûts d'extraction et de traitement, eux-mêmes dépendant des coûts de l'énergie et des évolutions technologiques.

Le caractère relatif du concept d'épuisement d'un métal

S'interroger sur l'état d'épuisement d'un métal donné revient à répondre à une question pratique : au rythme d'exploitation actuel et étant donné les ressources, ou réserves connues, quand aurons-nous consommé tout le métal connu/disponible ?

L'épuisement est donc une notion intrinsèquement relative, qui dépend à la fois d'un niveau de connaissances et de technologies, ainsi que des conditions économiques et d'investissement, le tout à un instant donné.

En effet, comme le soulignent Philippe Bihoux et Benoît de Guillebon, « il existe trois leviers pour augmenter les réserves :

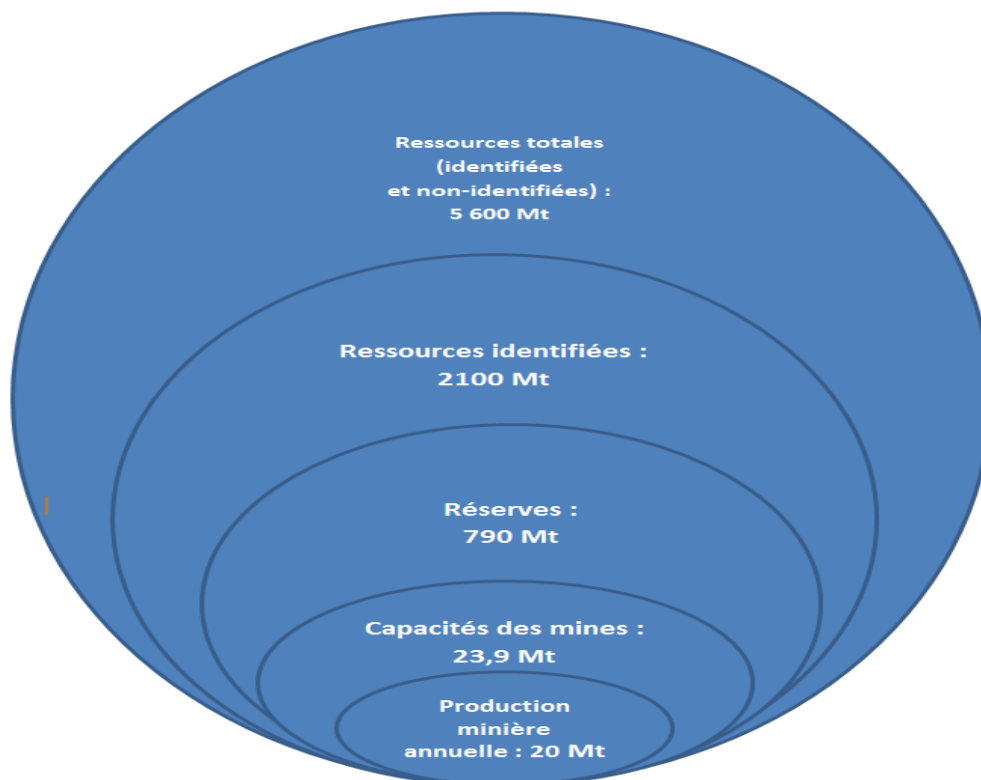
- trouver de nouvelles ressources par l'exploration ou l'amélioration de la connaissance géologique ;

¹⁶ « Mineral commodity summaries 2019 », United States Geological Survey, p.195.

- améliorer les techniques de production, qui permettent par exemple d'extraire une quantité plus grande de métal du minerai, d'économiser de l'énergie, d'exploiter des minerais de concentration plus faible, etc ;
- faire varier les conditions économiques (augmenter le prix de marché de la ressource)¹⁷. »

Cette évolutivité explique pourquoi la durée avant l'épuisement des réserves connues d'un métal donné est régulièrement repoussée et pourquoi un tel concept demeure, à l'échelle d'une vie humaine, difficile à appréhender.

Figure 3 – Production minière, réserves et ressources mondiales de cuivre en 2017



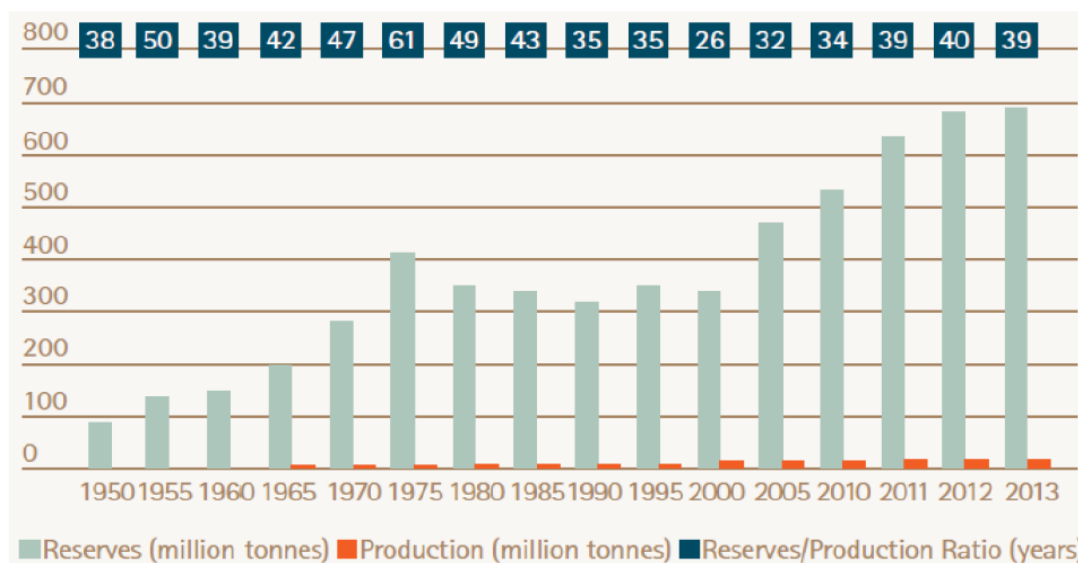
Source : *The World Copper Factbook 2018*, International Copper Study Group (d'après des données USGS)

Comme le montre la figure 3, l'USGS évaluait la production mondiale de cuivre en 2017 à environ 20 millions de tonnes et les réserves à 790 millions de tonnes. En se fondant sur des études de 2014, l'USGS estimait par ailleurs les ressources identifiées de cuivre à 2,1 milliards de tonnes et les ressources ultimes (incluant une estimation des ressources encore non connues) à 5,6 milliards de tonnes¹⁸.

¹⁷ Philippe Bihoux et Benoît de Guillebon (2010), *Quel futur pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société*, p. 27, octobre.

¹⁸ USGS, *Copper Mineral Commodity Summaries*, janvier 2018.

Graphique 2 – Évolution des réserves de cuivre sur la production annuelle de cuivre en millions de tonnes pour la période 1950-2013¹⁹



Source : International Copper Association, 2017

Comme illustré par le graphique 2, le temps d'épuisement d'un métal donné s'obtient par le ratio des réserves identifiées à un instant t sur la production annuelle correspondante, ou par un ratio ressources sur production. Si d'après l'USGS, sur la période 1950-2013, le temps restant avant l'épuisement du cuivre est en moyenne de quarante ans (pour plus de deux cents ans de ressources), ce temps moyen dissimule en réalité des variations annuelles non négligeables, rythmées par des cycles identifiables sur le graphique.

Au cours du dernier cycle, sur la période 2000-2013, le ratio réserves/production a ainsi progressé de vingt-six à trente-neuf ans. Ces cycles s'expliquent notamment par des phénomènes ponctuels d'investissement dans l'exploration minière lorsque le ratio réserves/production devient trop faible.

1.2.2 Un concept d'épuisement supplanté à court terme par le risque concret de tensions d'approvisionnement

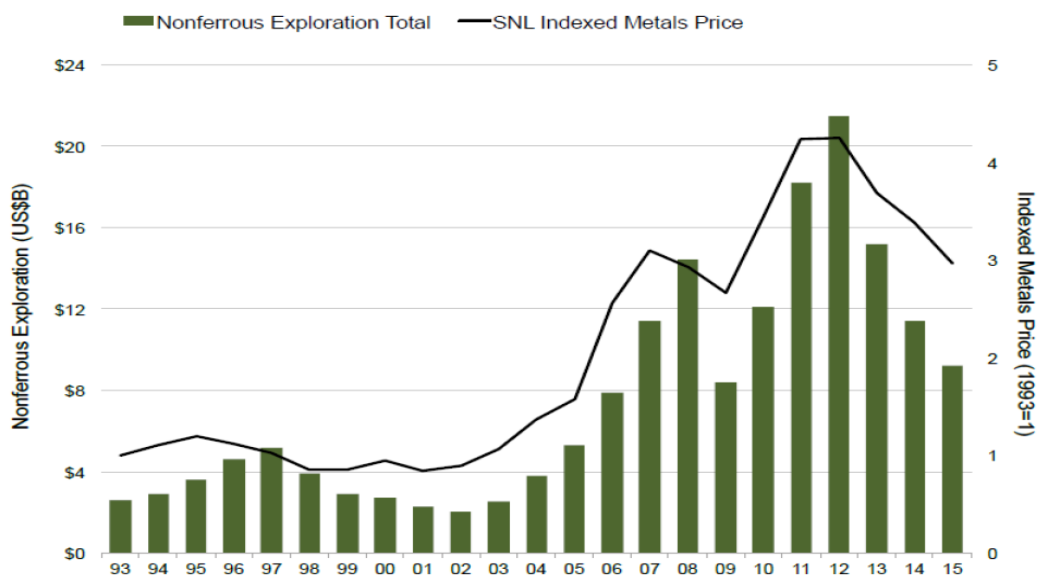
L'absence de risque, à l'échelle humaine, d'un épuisement des ressources naturelles en métaux n'empêche pas l'apparition de tensions d'approvisionnement, liées à l'absence d'alignement automatique de l'offre sur la demande.

Existence de tensions d'alignement temporel de l'offre sur la demande dans le secteur minier

Tout d'abord, il convient de préciser que, de manière générale, dans le secteur minier, l'alignement de l'offre sur la demande n'est pas instantané. En effet, tant l'exploration que la mise en exploitation d'un nouveau gisement prennent du temps. Au total, il existe en pratique plusieurs décennies (entre dix et trente ans, en fonction des cas) entre le lancement de la phase d'exploration et la production de la première tonne de minerai.

¹⁹ Historical copper reserves vs annual copper production in million tonnes.

Graphique 3 – Estimation globale des budgets d'exploration des métaux non ferreux entre 1993 et 2015



Source : SNL Metals and Mining, 2016

Note de lecture : en 1993, le budget mondial alloué à l'exploration des gisements de métaux non ferreux était proche de 3 milliards de dollars. En 2012, ce budget dépassait les 20 milliards de dollars. Le prix de ces métaux a, quant à lui, été multiplié par quatre entre 2001 et 2011.

En outre, comme le montre le graphique 3, les cycles d'investissements dans l'exploration sont fortement dépendants de l'évolution des prix des matières premières²⁰.

Une interdépendance économique entre métaux, qui contraint structurellement la disponibilité de certains petits métaux

Au-delà des enjeux de temporalité susmentionnés, l'absence d'alignement de l'offre sur la demande peut, pour certains types de métaux, être plus structurelle et provoquer des tensions pérennes. Ces tensions trouvent leur origine dans la notion d'interdépendance économique.

La notion d'interdépendance économique des métaux

Pour des raisons économiques, le sort de certains petits métaux est intrinsèquement lié à celui d'autres métaux. En effet, la demande et le cours de certains petits métaux ne permettent pas de couvrir les coûts liés à une exploitation minière spécifique. C'est pourquoi, tirant bénéfice de l'interdépendance géologique de certains métaux au sein d'un même minerai, l'exploitation conjointe de plusieurs métaux est pratiquée. Cette exploitation conjointe peut prendre deux formes, la sous-production et la coproduction.

Beaucoup de petits métaux ne sont extraits qu'en tant que sous-produits d'autres métaux. Ils sont ainsi obtenus en tant que résidus de l'exploitation principale de grands métaux (ou d'autres petits métaux). Dans ce cas, l'extraction des petits métaux secondaires vient uniquement améliorer l'équation économique d'un projet dont la rentabilité est déjà assurée par le métal principal.

²⁰ Ademe (2017), *L'épuisement des métaux et minéraux : faut-il s'inquiéter ?*, juin.

Il existe un cas différent d'interdépendance économique, cette fois-ci principalement *entre* petits métaux. Certains métaux sont ainsi exploités en véritable coproduction, c'est-à-dire que la décision d'exploiter un gisement est conditionnée à la possibilité d'extraire un ensemble de métaux. Dans ce cas, la rentabilité du projet repose sur l'exploitation conjointe de chacun des métaux présents.

En pratique, plus de la moitié des soixante métaux utilisés actuellement sont liés au destin d'autres métaux²¹.

**Tableau 1 – Principales interdépendances entre grands et petits métaux
(en gras, les principales sources des petits métaux cités)**

Grands métaux exploités	Principaux sous-produits (non dépendants)	Principaux sous-produits (totalement dépendants)
Fer	Zn, Pb	
Aluminium		Ga, V
Chrome	Pd, Pt	
Cuivre	Ag, Au, Mo, Pd, Pt, Zn	As, Bi, Co, Ir, Os, Re, Rh, Ru, Se, Te
Titane		Zr, Hf
Plomb – Zinc	Ag	As, Bi, Cd, Co, Ga, Ge, In, Sb, Tl
Nickel	Ag, Au, Cu, Pd, Pt	Co, Ir, Os, Rh, Ru, Se, Te
Étain	Ag	In, Nb

Source : Bihouix et de Guillebon, Quel futur pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société, p.33

Vulnérabilité des métaux dépendants

Cette interdépendance économique des métaux a des conséquences plus ou moins fortes sur la disponibilité globale des petits métaux concernés.

Pour les sous-produits, la quantité de petits métaux secondaires disponible sur le marché est entièrement dépendante de la production du métal primaire. Comme l'explique Florian Fizaine, « si les demandes du sous-produit et du produit primaire n'évoluent pas dans le même sens ou dans les mêmes ordres de grandeur, le sous-produit va alors être rationné ou au contraire surproduit²² ».

²¹ Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon (2010), *Quel futur pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société*, p. 33-34.

²² Florian Fizaine, *Les métaux rares : opportunité ou menace ? Enjeux et perspectives associées à la transition énergétique*, 2015, p. 52.

Pour les coproduits, la quantité de métal produite sera moins décorrélée de l'évolution de son marché puisque la rentabilité de l'exploitation dépend en partie des revenus tirés de la commercialisation de chaque coproduit.

L'interdépendance économique explique donc pourquoi, pour certains petits métaux, on assiste à une absence d'alignement de l'offre sur la demande et à l'apparition de situations de pénurie.

L'interdépendance entre métaux appliquée au numérique

Le secteur numérique, qui mobilise de nombreux petits métaux pour ses fonctions high-tech, est un secteur particulièrement sensible aux effets de l'interdépendance économique des métaux. Le tantale, le germanium et le gallium, dont les usages numériques ont été présentés *supra*, ne sont pas des métaux viables de manière autonome.

Le tantale est principalement exploité sous forme de coproduit²³ : coproduit historique de l'étain dans la région des grands lacs (Rwanda et République démocratique du Congo), qui concentre actuellement l'essentiel de la production mondiale de tantale, mais également coproduit du lithium en Australie, où l'ouverture de nouvelles exploitations a été rendue possible par la demande croissante en lithium.

Le germanium et le gallium sont exclusivement des sous-produits de métaux principaux. Le gallium est un sous-produit de la bauxite d'aluminium (liée à la production d'aluminium)²⁴ et le germanium n'est récupérable qu'à partir de minerai de zinc²⁵.

Pour ces deux petits métaux, il n'existe pas de marché officiel et la vente fait l'objet d'accord de gré à gré. Il n'existe, en outre, ni évaluation normalisée des réserves ni données fiables sur la quantité de métal produite chaque année et sur les prix. Cette absence totale de structuration et de transparence de ces deux marchés est problématique face à la croissance de la demande pour ces petits métaux. De plus, il s'agit d'un marché de petite taille, en termes d'acteurs : une seule anomalie, d'offre ou de demande, est susceptible de créer une défaillance de marché particulièrement dangereuse pour les industries numériques.

Enfin, le risque géopolitique n'est pas négligeable, eu égard à la concentration des exploitations de petits métaux dans certains pays, potentiellement susceptibles de mener des guerres commerciales ou d'être frappées par des déstabilisations internes (guerres, ou autre). Ainsi, 58 % de la production mondiale de tantale provient d'exploitations artisanales en République démocratique du Congo et au Rwanda²⁶, pays instables pour des raisons politico-militaires.

Des tensions amplifiées par l'existence d'une compétition entre les usages

Les tensions inhérentes à la croissance de la demande pour les petits métaux, dont les capacités de production sont dépendantes d'autres métaux, sont en pratique amplifiées par

²³ BRGM, « Fiche de criticité du tantale », août 2015.

²⁴ BRGM, « Fiche criticité du gallium », août 2016.

²⁵ BRGM, « Fiche criticité du germanium », novembre 2015.

²⁶ Présentation de Gaétan Lefebvre du BRGM lors du séminaire organisé le 21 janvier 2019 par France Stratégie : « La place des métaux dans la transition numérique ».

l'existence d'une compétition entre différents usages. En effet, le numérique est loin d'être le seul secteur dont les besoins en petits métaux augmentent.

On assiste par exemple à une compétition entre le secteur numérique et le secteur énergétique sur certains métaux pour alimenter ces deux transitions majeures de notre époque. C'est par exemple le cas du gallium, qui est utilisé pour la construction de panneaux photovoltaïques. Cette compétition pour l'accès aux métaux entre le secteur numérique et le secteur énergétique n'est pas limitée aux petits métaux. Certains grands métaux tels que le cuivre y participent pleinement.

Le cuivre est un métal indispensable aux fonctions structurelles du secteur énergétique. Le cuivre, comme l'acier et l'aluminium, a historiquement été utilisé à grande échelle dans ce secteur pour la construction des réseaux électriques. En 2017, Réseau de transport d'électricité (RTE) estimait que les réseaux électriques français représentaient une immobilisation de 170 000 tonnes de cuivre. Cette quantité devrait augmenter de 30 000 tonnes d'ici 2026 pour assurer le raccordement du parc éolien en mer et les interconnexions aux frontières.

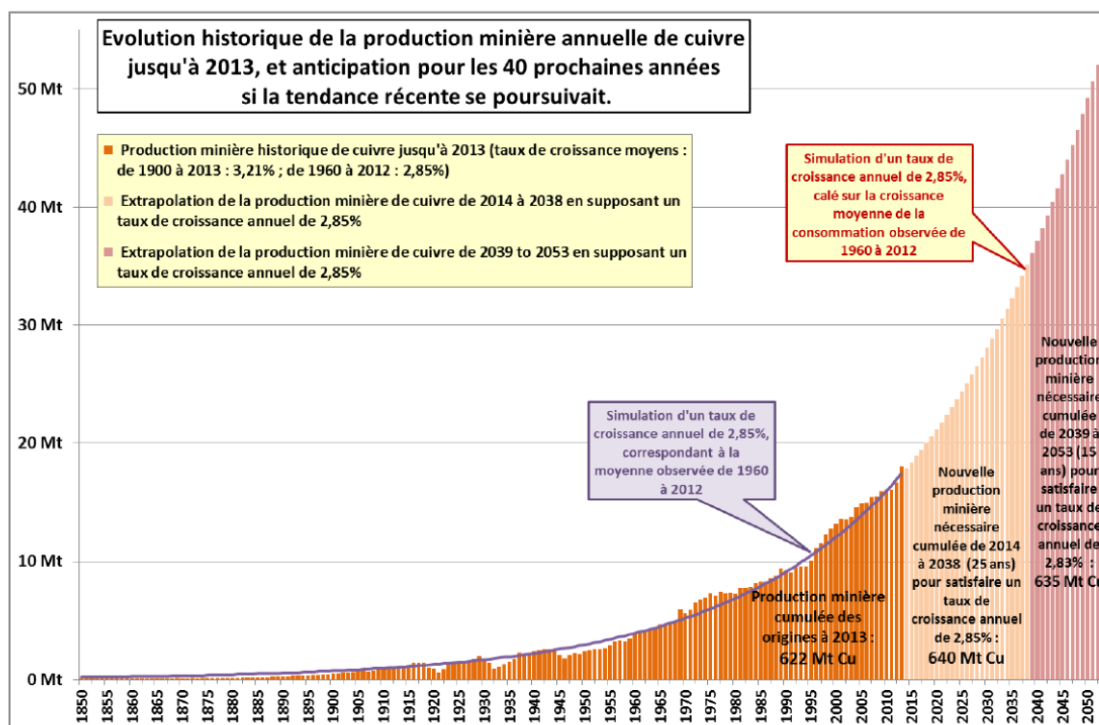
La consommation en cuivre du secteur énergétique devrait par ailleurs trouver un nouveau relai de croissance avec le développement de la voiture électrique. Gaétan Lefebvre du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) indiquait²⁷ qu'une croissance annuelle de 5 % à 10 % de ce parc devrait représenter une consommation additionnelle de 4 millions de tonnes de cuivre d'ici 2030, dont 1 million de tonnes pour le réseau, les infrastructures de recharge et de stockage et 3 millions de tonnes pour les véhicules légers²⁸.

Bien qu'à court terme la compétition sur le cuivre soit moins problématique que celle sur les petits métaux dans la mesure où le marché du cuivre est un marché structuré et diversifié, à moyen terme un maintien de la croissance actuelle pourrait tout de même constituer un véritable défi pour l'industrie minière.

²⁷ Présentation de Gaétan Lefebvre du BRGM lors du séminaire organisé le 21 janvier 2019 par France Stratégie : « La consommation croissante en matières premières du numérique : l'urgence d'une prise de conscience ».

²⁸ Un véhicule électrique requiert 60 à 80 kilos de cuivre, là où un véhicule à essence n'en sollicite que 20.

Graphique 4 – Évolution de la production minière de cuivre et projection de la production future



Source : Jean-François Labbé (BRGM), 2016²⁹

Note de lecture : entre 1850 et 2013, 622 Mt de cuivre ont été produites. En supposant que la production annuelle de cuivre continue de croître au même rythme que celui observé entre 1960 et 2012, on extrairait en vingt-cinq ans 640 Mt.

Comme l'illustre le graphique 4³⁰, le maintien d'une croissance de 2,85 % par an signifierait qu'en vingt-cinq ans (de 2014 à 2038) davantage de cuivre devrait être extrait que la totalité du cuivre extrait depuis le début de son exploitation jusqu'en 2013, soit 640 millions de tonnes. Au regard des réserves actuelles en cuivre, évaluées à 790 millions de tonnes, on comprend que cette estimation de production cumulée sur vingt-cinq ans constitue bien un défi pour l'industrie minière sur l'ensemble des trois leviers permettant d'augmenter les réserves (voir page 12 les solutions proposées par Bihoux et Guillebon).

1.2.3 L'apaisement des tensions par la recherche de substitutions

La question de la substituabilité se pose à partir du moment où les entreprises risquent, à court comme à long terme, d'être contraintes d'assurer leur production sans recourir (ou à un coût supérieur) à certaines ressources.

Cette recherche est actuellement menée, notamment en ce qui concerne certains métaux rares : le silicium sur isolant est à ce titre en développement comme alternative à l'arséniure

²⁹ « Les limites physiques de la contribution du recyclage à l'approvisionnement en métaux », *Annales des Mines – Responsabilité et environnement*, 2016/2 (n°82).

³⁰ Graphique tiré de la présentation de Gaëtan Lefebvre du BRGM lors du séminaire du 21 janvier 2019, *op. cit.* Accessible en ligne à l'adresse : <https://www.strategie.gouv.fr/debats/consommation-croissante-matieres-premieres-numerique-lurgence-dune-prise-de-conscience>.

de gallium, un semi-conducteur de plus en plus difficile à produire et dont le prix augmente tendanciellement. Cette recherche reste toutefois soumise à d'évidentes limites, comme l'inertie d'une matière première, conditionnant les chaînes de production, avec un coûteux renouvellement.

Il convient en outre de noter que la substitution, bien que permettant aux entreprises de réduire leur dépendance à des métaux sous tensions, ne constitue qu'une solution de transition puisqu'en reportant la demande sur d'autres métaux, elle ne permet pas – à moyen et long termes – de résoudre la pression globale sur les métaux dans le monde.

Comprendre l'importance de la notion de ressource non renouvelable sur le long terme

Comme le rappellent Philippe Bihoux et Benoît de Guillebon, « une ressource non renouvelable, dans son acception communément admise, est une ressource qui ne se renouvelle pas à l'échelle d'une vie humaine, soit de l'ordre d'un siècle³¹ ».

Suivant cette définition, la majorité des ressources minérales et notamment les métaux sont non renouvelables. Ces derniers ont en effet des rythmes de renouvellement pouvant aller de plusieurs millions à plusieurs milliards d'années³².

La quantité de métaux disponible sur terre, tous métaux confondus, est finie, à l'échelle humaine. Il existe donc bien un seuil au-delà duquel l'humanité ne pourra plus aller puiser dans les ressources de la Terre pour satisfaire ses besoins. Toute la difficulté est justement de déterminer ce seuil, ou plutôt le seuil de chaque métal, au vu de notre connaissance limitée des caractéristiques du sous-sol terrestre.

Comme l'indique Florian Fizaine³³, il est cependant possible de fixer un seuil théorique maximal qui, bien que profondément absurde, a le mérite de permettre de visualiser le caractère fini des ressources et de s'interroger sur le caractère durable du rythme de consommation actuel.

Ainsi, à supposer que l'ensemble de la masse de la Terre soit exploitable (soit environ 6×10^{24} kilos) et que la consommation mondiale continue de croître à un taux de 3 % par an – en partant d'une consommation annuelle mondiale en ressources (toutes ressources confondues) évaluée à 90 milliards de tonnes (dont 70 de ressources minérales)³⁴ –, il faudrait à l'humanité environ huit cent cinquante ans pour engloutir la Terre.

Sachant que nous n'irons évidemment pas exploiter les ressources terrestres au-delà d'une certaine profondeur se limitant *a priori* à la lithosphère, l'échéance réelle sera bien plus proche. À titre d'illustration : la mine d'or de Mponeng, en Afrique du Sud, la plus profonde du monde³⁵, n'atteint que quelque 4 kilomètres de profondeur.

³¹ Philippe Bihoux et Benoît de Guillebon (2010), *Quel futur pour les métaux ?*, op. cit., p. 19.

³² Il est intéressant de rappeler que les plus vieux fossiles du genre Homo retrouvés à ce jour remontent à 2,8 millions d'années.

³³ Présentation de Florian Fizaine de l'université de Savoie-Mont Blanc lors du séminaire organisé le 21 janvier 2019 par France Stratégie : « La consommation croissante en matières premières du numérique : l'urgence d'une prise de conscience ».

³⁴ UNEP, *Global material flows and resource productivity*, 2016.

³⁵ Selon Reuters, en novembre 2012, dans l'article « Anglogold suspends work at world's deepest mine ».

1.3 Une exploitation des métaux primaires à l'origine d'une consommation forte en énergie et en eau

1.3.1 Coût énergétique des métaux primaires

Bilan de la consommation énergétique des métaux primaires

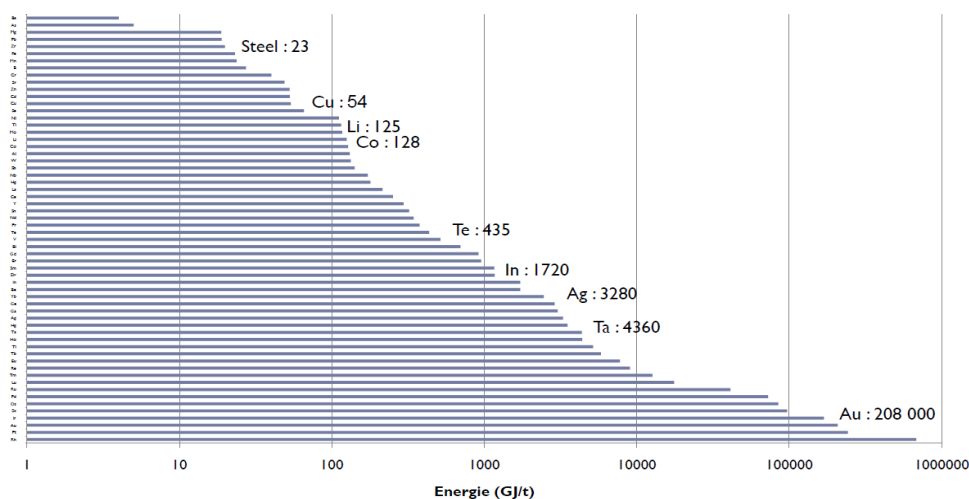
Des métaux qui représentent une part croissante de la consommation énergétique totale

Selon Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon³⁶, en 2010, 8 % à 10 % de l'énergie primaire³⁷ mondiale était consacrée à extraire, transporter et raffiner les ressources métalliques tous secteurs confondus. Cet ordre de grandeur se retrouve dans les travaux de Florian Fizaine, qui estimait en 2015, en se fondant sur les données de consommation moyenne individuelle de chaque métal et la production mondiale de chaque métal, que cette part était proche de 10 %³⁸.

Qui plus est, selon un article publié en 2011 par Norgate et Jahanshahi³⁹, la part relative de l'énergie primaire mondiale consacrée aux métaux devrait croître de 40 % d'ici 2030. Cette augmentation du poids du secteur des métaux serait certes liée à la croissance des volumes de métaux consommés tous secteurs confondus, mais surtout à une tendance globale à la baisse des concentrations en métaux dans les minerais exploités, une fois les plus concentrés épuisés (voir *infra*).

Tous les métaux ne consomment pas la même quantité d'énergie

Graphique 5 – Consommations énergétiques unitaires moyennes des différents métaux (en GJ/t)



Source : Fizaine (2018), d'après Nuss et al. (2014)

³⁶ Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon (2010), *Quel futur pour les métaux ?*, op. cit., p.40.

³⁷ Olivier Vidal définit l'énergie primaire comme étant une « source d'énergie présente directement dans la nature, qui doit être souvent transformée et transportée pour pouvoir être consommée sous forme d'énergie finale ».

³⁸ *Ibid.*, p. 102.

³⁹ « Reducing the greenhouse gas footprint of primary metal production : Where should the focus be ? », *Minerals Engineering*, 2011.

Il convient de noter que cette consommation énergétique globale des métaux cache en réalité d'énormes disparités. En effet, en pratique tous les métaux sont loin de consommer la même quantité d'énergie. Comme l'illustre le graphique 5, il existe ainsi un facteur 1 000 entre la consommation énergétique moyenne de l'acier (23 GJ/t) et celle de l'or (208 000 GJ/t).

Ce graphique montre, par ailleurs, que l'analyse de la consommation énergétique des métaux ne peut pas non plus se faire à l'échelle d'une catégorie (grands métaux, petits métaux et métaux précieux), mais nécessite bien une analyse au cas par cas de chaque métal. Il suffit de prendre l'exemple du lithium (125 GJ/t) et du tantale (4360 GJ/t, soit quasiment trente-cinq fois plus d'énergie requise que pour le lithium) pour constater que la consommation énergétique unitaire au sein de la catégorie des petits métaux n'est pas homogène.

Pour comprendre les différentiels de consommation entre métaux, plusieurs paramètres doivent être pris en compte.

Paramètres de la consommation énergétique des métaux

Lors de son intervention à France Stratégie, Florian Fizaine a indiqué que la consommation énergétique unitaire des métaux est fonction de nombreux paramètres.

La consommation énergétique dépend tout d'abord de la concentration du gisement en minerai. On constate une tendance générale à la baisse de la concentration moyenne des minerais exploités dans le temps. Cela s'explique par le fait que l'homme a d'abord exploité les minerais les plus concentrés et qu'au fur et à mesure de l'épuisement des gisements, il exploite des minerais de moins en moins riches. Ainsi, s'il fallait extraire 55 tonnes de minerai pour produire une tonne de cuivre dans les années 1930, il en faut aujourd'hui 125 pour le même résultat⁴⁰. On comprend donc que la dépense énergétique nécessaire à l'extraction d'un métal est inversement proportionnelle à la concentration du métal exploité dans un minerai donné⁴¹. La décroissance progressive de la concentration en métal des minerais exploités par l'homme entraîne donc une augmentation de la dépense énergétique pour une même quantité de métal produite et, par ricochet, une croissance globale des coûts d'extraction (premier poste de dépense de l'industrie minière, devant la main-d'œuvre).

Le deuxième paramètre faisant varier la consommation énergétique est la taille du grain attendue à l'issue de l'opération de broyage. Ainsi, plus le grain broyé est fin, plus l'énergie consommée pour la même quantité de métal broyé est élevée⁴². On comprend aisément ce phénomène par un ratio de rentabilité énergétique rapportant l'énergie nécessaire au broyage au nombre de petits grains : leur petite taille indique souvent une faible concentration du minerai en métal recherché, rendant leur broyage moins rentable énergétiquement que celui d'un minerai plus concentré tolérant un grain plus épais.

⁴⁰ Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon (2010), *Quel futur pour les métaux ?*, op. cit., p.29.

⁴¹ Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon, *ibid.*, p. 31.

⁴² Shahriar *et al.* (2007), « Effective Factors Investigation on Choice between Surface and Underground Mining », juin.

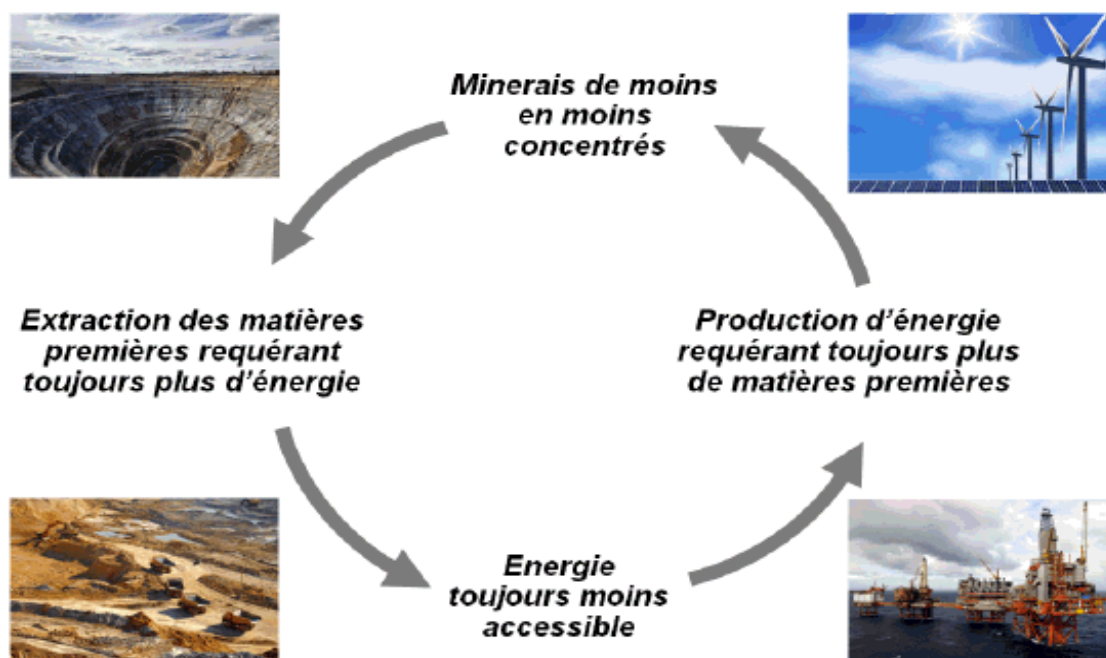
Les méthodes d'excavation ont également un impact sur la consommation énergétique des métaux. Dans un article de 2007, Shariar montre⁴³ ainsi que les mines souterraines ont tendance à consommer entre 2 et 10 fois plus d'énergie que les mines à ciel ouvert. Comme l'explique Florian Fizaine lors de son intervention à France Stratégie, ce n'est pas pour autant que les mines souterraines n'existent plus. En effet, ces dernières peuvent avoir des modèles économiques différents en se concentrant sur des gisements beaucoup plus concentrés et en dernière instance rentables, malgré le coût énergétique de l'excavation.

Enfin, le choix de la technologie de réduction et d'affinage n'est pas sans incidences sur l'énergie consommée pour produire une quantité de métal donnée. Dans le cas du nickel par exemple, la concentration en métal du gisement amène à favoriser certaines techniques plutôt que d'autres (pyrométallurgie dans le cas des gisements peu concentrés, acide sous pression en cas de forte concentration). La classification des différentes technologies en fonction de leur efficacité énergétique dépend également du métal et des caractéristiques de chaque minerai exploité.

Le cercle vicieux de l'énergie et des métaux

Un cercle vicieux semble inévitable : toujours plus d'énergie pour extraire des métaux, toujours plus de métaux pour produire l'énergie. Comme l'écrivent Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon, cette remarque vaut également pour les énergies renouvelables, si bien que, dans tous les cas : « [...] l'extraction de métaux est de plus en plus énergivore et la production d'énergie de plus en plus consommatrice de métaux⁴⁴. »

Figure 4 – Cercle vicieux de l'énergie et des métaux



Source : Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon, *ibid.*

⁴³ *Ibid.*

⁴⁴ Résumé de *Quel futur pour les métaux ?* par Benoît de Guillebon pour la Société géologique de France. Consultable à l'adresse : <https://www.geosoc.fr/metiers-formations/domaines-d-activites/ressources-minerales/pour-en-savoir-plus/tensions-et-contraintes-des-substances-minerales/352-quel-futur-pour-les-metiaux/file.html>

La consommation énergétique liée à l'extraction des métaux représente une part croissante de la consommation énergétique mondiale : de 10 % en 2012, elle pourrait atteindre 40 % en 2030, malgré une croissance du volume total d'énergie.

1.3.2 Empreinte hydrique de l'extraction et du raffinage des métaux primaires

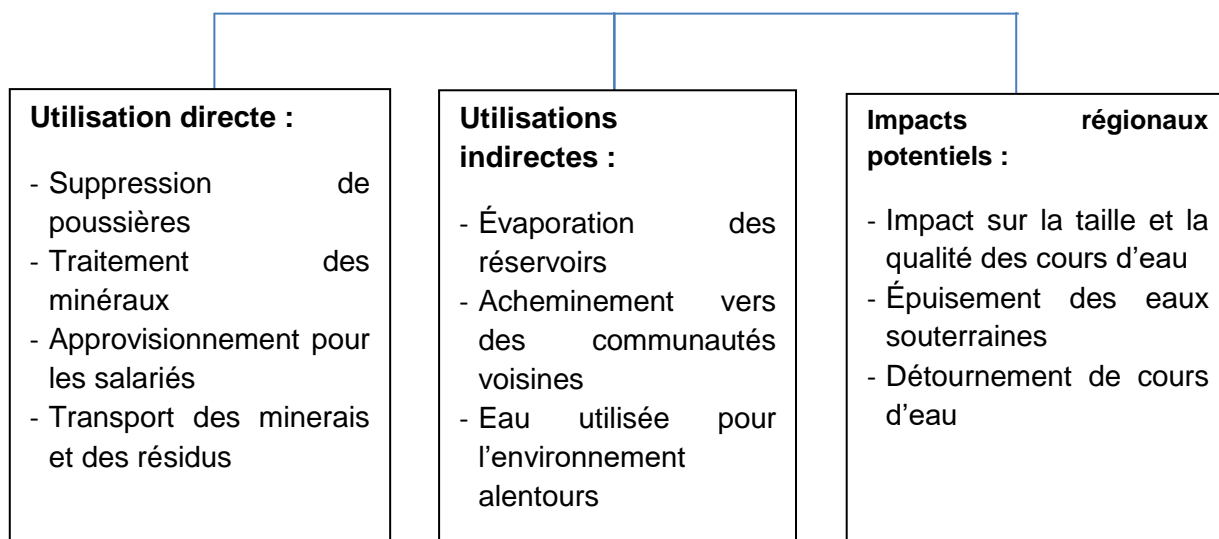
Outre le problème de la consommation énergétique, l'extraction et le raffinage des métaux sollicitent une autre ressource terrestre : l'eau. Comme l'explique l'Ademe⁴⁵, l'eau constitue une ressource indispensable à l'exploitation minière.

Il existe deux principaux impacts liés à l'utilisation de l'eau : la consommation et la dégradation de la qualité des eaux. La présente partie se concentre sur la problématique de consommation en eau de l'exploitation des minerais.

Bilan de la consommation en eau de l'exploitation minière

Des ressources en eau sont nécessaires dans la quasi-totalité du processus de production des métaux. On constate cependant que les phases de broyage et de concentration du minerai concentrent l'essentiel des besoins en eau (70 % de la consommation en eau de l'industrie minière⁴⁶).

Tableau 2 – Usage extractif de l'eau et impacts régionaux de l'extraction



Source : Ossa-Moreno et al. (2018), *The Hydro-economics of Mining*

Comme pour l'énergie, la consommation en eau des exploitations minières n'est pas homogène et varie d'un métal à l'autre et, pour un même métal, en fonction des caractéristiques propres à chaque exploitation et notamment de la concentration en métal. Des études indiquent en effet que la baisse de concentration en métal des minerais exploités a généralement pour effet d'augmenter la consommation en eau⁴⁷.

⁴⁵ Ademe (2017), *L'épuisement des métaux et minéraux : faut-il s'inquiéter ?*, op. cit.

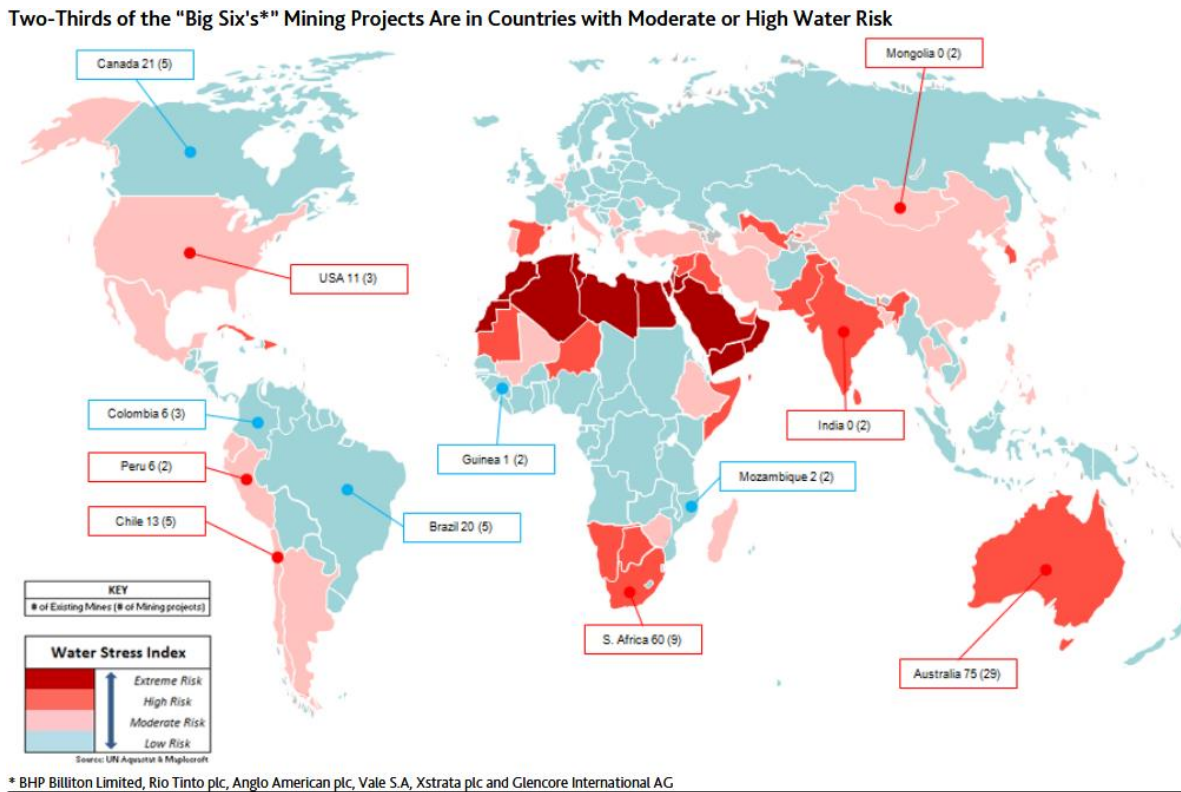
⁴⁶ *Ibid.*

⁴⁷ G.M. Mudd (2008), "Sustainability reporting and water resources: a preliminary assessment of embodied water and sustainable mining", *Mine Water Environ.*, 27, p. 136-144.

La consommation en eau est aussi dépendante de l'environnement juridique et notamment des législations régulant l'approvisionnement, l'utilisation et l'évacuation de l'eau dans les exploitations minières. Le ratio d'efficacité hydrique varie donc largement d'une exploitation à une autre, de même que ses conséquences sur les eaux sur place (pollution, etc.). Tirer une loi générale quant à l'empreinte hydrique semble donc difficile, de même que l'établissement d'une norme commune acceptable.

La consommation des exploitations minières, un facteur d'amplification du stress hydrique mondial ?

Figure 5 – Carte des six principaux projets de minage et de leur implantation selon le stress hydrique



Source : Toledano et Roorda, 2014

Cette consommation en eau des exploitations minières entre en concurrence avec d'autres usages, dont les besoins quotidiens des populations locales ou encore l'agriculture. La concurrence entre usages peut provoquer de fortes tensions, tout particulièrement pour les nombreux gisements situés dans des zones d'ores et déjà soumises à un stress hydrique. Ainsi, d'après le Columbia Center on Sustainable Investment, environ 70 % des exploitations minières des six principales compagnies minières dans le monde sont localisées dans des pays où il existe un stress hydrique⁴⁸.

⁴⁸ Toledano P. et Roorda C. (2014), *Leveraging mining investments in water infrastructure for broad economic development: models, opportunities and challenges*, Columbia Center on Sustainable Investment, mars.

Pour résoudre ce problème, plusieurs pistes sont creusées simultanément par l'industrie minière, à savoir : l'utilisation de sources d'approvisionnement alternatives, d'une part, et l'amélioration de l'efficacité hydrique des techniques minières, d'autre part.

Il convient de rappeler que la désalinisation de l'eau, envisagée pour alimenter certaines exploitations minières⁴⁹, ne constitue pas une solution soutenable. En effet, le coût énergétique et environnemental du recours à l'eau désalinisée est particulièrement inquiétant : selon un rapport de l'IEA de 2016, la désalinisation ne représente que 0,7 % des besoins annuels du monde en eau, mais compte à elle seule pour un quart de la consommation énergétique totale du secteur ; en 2040, l'eau désalinisée pourrait atteindre 4 % de l'approvisionnement en eau, pour 60 % de la consommation énergétique du secteur⁵⁰.

Plutôt que de recourir à de l'eau douce, l'industrie minière étudie la possibilité d'utiliser de l'eau salée (sans désalinisation) pour certaines phases du processus de production afin de réduire la concurrence avec les autres usages locaux de l'eau.

La dernière solution envisagée vise à améliorer l'efficacité en termes de consommation en eau des techniques minières, notamment en réduisant la consommation en eau des techniques, en réduisant les pertes d'eau (par évaporation en particulier), en recyclant les eaux usagées et en réutilisant l'eau nécessaire à la production⁵¹.

Une grande partie de l'énergie et de l'eau du numérique est donc consommée au stade de l'extraction et de la production des matières premières nécessaires à la fabrication des équipements.

Loin d'être un enjeu secondaire, l'extraction et la production des métaux se situent bien au centre du futur du secteur, en ce qui concerne sa soutenabilité énergétique et hydrique.

L'accroissement de la demande en métaux, doublé d'un épuisement des gisements les plus accessibles, entraîne une augmentation sans précédent des ressources énergétiques et hydriques nécessaires qui fait planer un doute sur la stabilité de l'approvisionnement du secteur.

1.4 Des enjeux environnementaux, sociaux et sanitaires rendus invisibles par la délocalisation des activités extractives en dehors de l'Europe

L'éloignement géographique entre la production et la consommation – de même que la tendance à l'invisibilisation de la première pour ne pas culpabiliser la seconde – ne doit pas nous tromper sur l'impact réel de notre consommation. En effet, s'ils ne nous atteignent pas directement, les problèmes qu'elle pose existent et touchent directement les producteurs, souvent extra-européens dans le cas du numérique.

⁴⁹ L'Ademe mentionne dans sa fiche l'exemple des mines de cuivre au Chili.

⁵⁰ International Energy Agency, « Water Energy Nexus 2016 ».

⁵¹ *Ibid.*

1.4.1 Pollutions des cours d'eau, des sols, de l'air, et atteinte à la biodiversité

Les activités d'extraction et de production de métaux, lorsqu'elles sont insuffisamment contrôlées, peuvent être la source d'une intense pollution, affectant divers aspects de l'environnement.

Les auteurs du *Guide pour l'évaluation des projets EIE du domaine minier*⁵² indiquent que ces pollutions touchent les ressources en eau de surface et souterraine, la qualité de l'air, du sol et déstabilisent la faune et la flore.

Effets sur la qualité de l'eau

De multiples risques de pollution des eaux de surface et souterraines sont liés aux exploitations minières. On retiendra notamment les risques d'écoulement d'acide de mine riche en métaux toxiques, le ruissellement d'eaux chargées de sédiments lors de tempêtes, le débordement des bassins de décantation de résidus toxiques de la mine, ou, pire, la rupture du barrage de retenue de ces bassins.

Impacts des projets miniers sur la qualité de l'air

Les exploitations minières produisent également des émissions atmosphériques qui portent atteinte à la qualité de l'air. Dans son rapport, l'Environmental Law Alliance Worldwide, indique que « les plus importantes sources de pollution atmosphérique dans les opérations minières sont : les particules de matières transportées par le vent [...] et les émissions de gaz ».

Impacts des projets miniers sur la qualité du sol

Les exploitations minières peuvent également entraîner une contamination des sols sur de grandes étendues.

Comme le relève une étude commanditée par l'Union européenne⁵³, les impacts des projets miniers sur la qualité des sols « appartiennent généralement à deux catégories : (1) les sols contaminés provenant des poussières fouettées par le vent et (2) les sols contaminés à partir de déversements de produits chimiques et de résidus ».

Impacts des projets miniers sur la faune et la flore

Les différentes pollutions susmentionnées sont à l'origine de perturbations graves des écosystèmes. Sans les lister de manière exhaustive, on peut notamment retenir que :

- l'acidification des cours d'eau et le dépôt de métaux nocifs dans leur lit provoquent une contamination – voire une disparition – de la faune aquatique qui peut s'étendre très en aval des sites minières. La pollution des réserves d'eau de surface et souterraines a également des impacts sur les animaux terrestres qui s'y abreuvent et sur la croissance des plantes ;
- la déforestation ainsi que les bruits et vibrations créés par les exploitations minières font fuir les animaux résidant à proximité de ces dernières.

⁵² Environmental law alliance worldwide (2010), *Guide pour l'évaluation des projets EIE du domaine minier*.

⁵³ MINEO consortium (2000), *Review of potential environmental and social impacts of mining*.

1.4.2 Conditions de travail dans les exploitations minières

Si les conditions de travail varient en fonction des législations nationales, la concentration des activités extractives dans les pays en voie de développement – ou en tout cas moins regardants sur ces questions – amène à considérer qu'il s'agit d'un enjeu majeur dans de nombreuses exploitations.

Les risques relatifs à la sécurité et la santé des mineurs varient également d'un site minier à un autre en fonction des caractéristiques des minerais exploités et des processus d'excavation et de production des métaux⁵⁴.

Le niveau de risque dépend enfin de la taille des exploitations, les risques les plus forts se concentrant dans les extractions minières artisanales⁵⁵.

Les travailleurs des mines sont notamment soumis aux risques suivants :

- éboulement et explosion dans les mines ;
- inhalation des poussières, exposition à des radiations et à des produits chimiques toxiques à l'origine de maladies respiratoires, cancers, affections neurologiques et aberrations chromosomiques ;
- troubles musculaires et squelettiques liés à la pénibilité du travail ;
- maladies liées aux conditions d'hébergement des travailleurs (par exemple cholera).

1.4.3 Impacts sur les populations locales

Détérioration des qualités de vie et migrations

Les pollutions engendrées par les activités minières ont un impact direct sur les moyens de subsistance des populations locales pouvant, à terme, les forcer à l'exil.

Les atteintes à la qualité des eaux et des sols et à la biodiversité ont en effet des conséquences sur les activités agricoles et de pêche, ainsi que sur les ressources en eau potable des populations autochtones.

Dans un article⁵⁶, Saleem H. Ali évoque ainsi les conséquences de la dégradation des eaux et des sols chinois autour de la plus grande mine de terres rares du monde, à Bayan Obo en Mongolie intérieure. S'appuyant sur des enquêtes menées par des journalistes du *Monde*, Ali estime que les paysans environnants ont été contraints à abandonner l'agriculture en raison de la pollution des cours d'eau engendrée par les activités extractives : substances chimiques toxiques, matières radioactives, etc. Comme le disent finalement les paysans eux-mêmes, « [...] il a fallu se rendre à l'évidence : les légumes ne poussaient plus⁵⁷ ».

⁵⁴ Worker and Community Health Impacts Related to Mining Operations Internationally : A Rapid Review of the Literature, Carolyn Stephens & Mike Ahern London School of Hygiene & Tropical Medicine, 2001.

⁵⁵ Sur les risques liés aux extractions minières artisanales, voir notamment le rapport de l'OMS (2017), *Santé et extraction minière artisanale et à petite échelle de l'or*.

⁵⁶ « Social and Environmental Impact of the Rare Earth Industries », *Resources*, 13 février 2014.

⁵⁷ « En Chine, les terres rares tuent des villages », *Le Monde*, 19 juillet 2012.

Impacts sur la santé des populations

Les populations locales peuvent subir les conséquences indirectes des contaminations des eaux, de l'air et des sols. Dans un documentaire audiovisuel réalisé dans le cadre de la mission « Environmental & Health Impacts of Abandoned Mines in Sub-Saharan African Countries », l'Unesco présente les conséquences des pollutions engendrées par d'anciennes mines de cuivre en Ouganda sur la santé des populations riveraines⁵⁸. Ces populations, non informées des risques encourus, sont notamment exposées aux contaminants par leur consommation en eaux polluées, et en végétaux et animaux ayant consommé les mêmes eaux.

1.4.4 Instabilités politiques

Même s'il ne s'agit que d'un maillon d'une chaîne complexe de causes de conflits armés, l'industrie extractive joue un rôle non négligeable dans l'instabilité politique de certaines régions d'exploitation.

Le cas du tantale dans l'Afrique des Grands Lacs est l'exemple tristement célèbre de cette « malédiction des ressources naturelles⁵⁹ ». L'exploitation du tantale, abondamment présent en République démocratique du Congo, a par exemple financé (et finance toujours) de nombreux groupes paramilitaires, en particulier à partir des années 2000. La hausse brutale de la demande en téléphones portables au tournant du millénaire fait grimper la demande, et la concurrence industrielle se double d'une concurrence politico-militaire entre factions armées et hommes politiques. Un processus pervers de « commercialisation du conflit » permet sa pérennisation par les affaires, entretenue par une demande croissante en tantale, nécessaire pour produire des condensateurs utilisés notamment dans la fabrication des smartphones, ordinateurs et tablettes.

La commercialisation des « minerais du sang », dont le tantale fait partie, fait l'objet d'un suivi particulier par la communauté internationale et notamment par l'OCDE qui a publié un guide⁶⁰. En 2017, l'Union européenne s'est inspirée de ces lignes directrices pour adopter un règlement encadrant l'importation en Europe des minéraux et métaux (or, étain, tungstène et tantale) provenant de zones de conflit⁶¹. Le périmètre de ce règlement, issu d'un processus long de négociations entre les trois co-législateurs européens, a été largement commenté et critiqué en ce qu'il ne régule pas l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement et plus spécifiquement les acteurs utilisant des composants contenant ces métaux⁶².

⁵⁸ Vidéo disponible : <https://www.youtube.com/watch?v=gF7k5l1CJZw>.

⁵⁹ Voir Le Billon P. et Hocquard C. (2007), « Filières industrielles et conflits armés : le cas du tantale dans la région des Grands Lacs », *Ecologie & politique*, vol. 34, n° 1, p. 83-92.

⁶⁰ OCDE, *Guide sur le devoir de diligence pour des chaînes d'approvisionnement responsables en minerais provenant de zones de conflit ou à haut risque*.

⁶¹ Règlement (UE) 2017/821 du Parlement européen et du Conseil du 17 mai 2017 fixant des obligations liées au devoir de diligence à l'égard de la chaîne d'approvisionnement pour les importateurs de l'Union qui importent de l'étain, du tantale et du tungstène, leurs minerais et de l'or provenant de zones de conflit ou à haut risque.

⁶² Voir notamment Mureille van der Meulen (2017), "The EU responsible trading strategy for minerals from conflict zones: A path towards peace, stability and development?"

Bien que rarement évoquées, les conséquences des exploitations minières sur l'environnement et, plus largement, sur les populations environnantes, ainsi que les conditions de travail des mineurs, dans les pays où l'extraction se concentre, sont en réalité déjà bien documentées.

L'existence de rapports publics de banques d'affaires, tels que celui de la Barclays sur les risques liés à l'activité minière, est révélatrice d'une conscience aigüe de ces conséquences au sein des milieux d'affaires⁶³.

La société civile dans les pays occidentaux n'ignore pas complètement ces risques non plus. Pour preuve, la levée de boucliers quasi automatique constatée en France ou ailleurs en Europe face aux projets d'ouverture de mines. On retiendra à ce titre l'opposition rencontrée par le projet d'extraction aurifère de la « Montagne d'or » en Guyane.

Force est de constater que nous nous trouvons dans une situation paradoxale où nos sociétés développées consomment la majorité des métaux extraits au niveau mondial, sans vouloir en assumer la production, par peur des conséquences négatives qu'elle peut avoir sur notre environnement. Cette situation est d'autant plus dommageable que nous disposons, grâce à nos législations environnementales et sociales avancées, des leviers pour assainir les conditions d'extraction et de production des métaux.

1.5 Illustration de la géopolitique des métaux

Si on considère avec Yves Lacoste que la géopolitique est « l'étude des rivalités de pouvoir(s) et/ou d'influence(s) sur un territoire donné⁶⁴ », manifestement il existe une géopolitique des métaux à l'échelle mondiale, très bien insérée dans un large ensemble de géopolitiques, à commencer par la rivalité entre les États-Unis et la Chine pour le leadership technologique mondial.

1.5.1 La Chine et les terres rares : un levier de pression utile, mais dont l'efficacité est à nuancer⁶⁵

Les terres rares désignent un ensemble de dix-sept métaux : les quinze lanthanides, ainsi que deux éléments supplémentaires que sont le scandium et l'yttrium. Bien que le nom de ces éléments suggère une rareté géologique, les terres rares sont relativement abondantes dans la croûte terrestre. On les appelle ainsi car leur concentration est généralement trop faible pour qu'elles soient exploitables économiquement. Ces métaux sont particulièrement utilisés pour les deux transitions énergétique et numérique, en raison de leurs multiples propriétés physico-chimiques.

Avec la montée des inquiétudes environnementales en Europe et aux États-Unis dans les années 1970 et 1980, un volume conséquent de l'activité minière a été délocalisé des pays développés vers les pays en voie de développement. Ces délocalisations concernent notamment les terres rares, dont le marché était jusque-là dominé par les États Unis (grâce au site de Mountain Pass, en Californie).

⁶³ Barclays (2015), *Environmental and Social Risk Briefing. Mining & Metals*.

⁶⁴ Yves Lacoste « La géographie, la géopolitique et le raisonnement géographique », *Hérodote*, n°146-147.

⁶⁵ John Seaman (2019), « Rare earths and China : a review of changing criticality in the new economy », IFRI Center for Asian Studies, janvier.

La Chine mène depuis lors une politique volontariste de production de matières premières, qui lui permet notamment d'atteindre le rang de producteur quasi exclusif de terres rares. En 2010, elle assurait ainsi 95 % de la production mondiale, dissuadant les autres États disposant de réserves (Australie – États-Unis) de les exploiter par une politique de prix très concurrentiels.

Tableau 3 – Estimation de réserves mondiales de terres rares en 2017 (USGS, 2018)

<u>World Mine Production and Reserves:</u>	<u>Mine production^e</u>		<u>Reserves⁷</u>
	<u>2016</u>	<u>2017</u>	
United States	—	—	1,400,000
Australia	15,000	20,000	⁸ 3,400,000
Brazil	2,200	2,000	22,000,000
Canada	—	—	830,000
China	⁹ 105,000	⁹ 105,000	44,000,000
Greenland	—	—	1,500,000
India	1,500	1,500	6,900,000
Malawi	—	—	140,000
Malaysia	300	300	30,000
Russia	2,800	3,000	¹⁰ 18,000,000
South Africa	—	—	860,000
Thailand	1,600	1,600	NA
Vietnam	220	100	<u>22,000,000</u>
World total (rounded)	129,000	130,000	<u>120,000,000</u>

À partir du milieu des années 2000, la Chine impose une politique de plus en plus stricte de quotas d'exportation, qui culmine en 2010, avec des exportations plafonnées à environ 30 000 tonnes par an (sur une production totale estimée à 130 000 tonnes par l'USGS). La Chine justifie cette politique par une volonté de gérer plus durablement ses ressources (prise en compte des impacts environnementaux des activités extractives, imposition de seuils maximaux d'extraction et réorganisation de la filière des terres rares se traduisant par la fermeture des mines clandestines) et de se concentrer sur son marché intérieur. Les prix montent en flèche, avec une augmentation générale des prix, jusqu'à plus de 500 % pour certaines terres rares. Cette crise des terres rares amène les États-Unis, l'Union européenne et le Mexique à porter le dossier devant le tribunal d'arbitrage de l'OMC, qui leur donne gain de cause. Un quasi-retour à la normale des échanges est acté en 2015.

Les effets de cette politique temporaire des quotas sont cependant beaucoup plus durables. La Chine s'est ainsi notamment appuyée sur les quotas pour soutenir sa stratégie de montée dans la chaîne de valeur du numérique de son industrie. Les entreprises de haute technologie étrangères étant incitées à délocaliser leur production en Chine – et à partager leur savoir-faire – en échange, entre autres, d'un accès privilégié et sécurisé aux ressources primaires. Les matières premières ont été pour la Chine un véritable levier de développement de son économie.

La question de l'accès aux terres rares n'est pas pour autant réglée. Les inquiétudes quant aux terres rares ont récemment refait surface dans le cadre de la guerre commerciale menée par les États-Unis contre la Chine⁶⁶. Dans le marché numérique, les tensions culminent avec la décision du président Donald Trump, en 2019, d'exclure l'équipementier chinois Huawei du marché américain pour des raisons de sécurité nationale, et l'interdiction qui en découle

⁶⁶ Voir la synthèse chronologique du site *Phonandroid* dans son article « Huawei, Android, ARM et Trump : le point sur la situation », du 3 juillet 2019.

pour Huawei d'utiliser le système d'exploitation Android de Google sur ses équipements. En réponse, la Chine se déclare le 28 mai 2019, par l'intermédiaire du *Global Times*, prête à priver les États-Unis des terres rares, dont elle produit actuellement 90 % du volume mondial. La visite du président Xi Jinping le 20 mai sur un site d'extraction de terres rares semble confirmer les menaces chinoises.

Toutefois, cette menace, concernant le secteur numérique, doit être relativisée eu égard à la faible quantité de terres rares achetées par les États-Unis pour les besoins de ce secteur. En effet, la production des équipements numériques consommateurs de terres rares est d'ores et déjà fortement concentrée dans des pays tiers et principalement en Chine. La dépendance des pays développés dans le secteur numérique se situe donc moins au niveau des métaux, que plus en aval de la chaîne de production.

Il convient cependant de noter que ce qui est actuellement vrai pour le numérique ne l'est pas nécessairement pour tous les secteurs, les terres rares étant également indispensables à la transition énergétique bas carbone ainsi que pour les technologies de défense et duales.

La dépendance aux terres rares, et plus largement aux métaux, dans le secteur numérique pourrait, par ailleurs, à nouveau être un axe stratégique si les États-Unis et l'Europe faisaient le choix de redevenir des puissances industrielles du numérique.

Ainsi, la question des matières premières, souvent reléguée au second rang par les préoccupations de consommation énergétique en phase d'usage, se situe au cœur de l'impact environnemental du numérique.

Qu'il s'agisse de l'extraction elle-même, ou des procédés de transformation nécessaires à l'obtention de métaux exploitables, le processus de production est parcouru de bout en bout par des questions de gestion des ressources minérales, énergétiques et hydriques qui seront amenées à se renforcer dans un avenir proche.

À ces questions économiques, sur lesquelles l'attention se concentre trop souvent, se superpose également un enjeu humain, celui du coût de ces activités sur les populations et la biosphère des pays où nous délocalisons notre production.

2 Le recyclage des métaux ne peut pas constituer l'unique réponse à la croissance de la consommation en matières

La réponse traditionnelle aux problèmes liés à la consommation croissante en matières premières, et plus spécifiquement en métaux nécessaires pour alimenter notre modèle de consommation numérique, a été et reste encore très largement limitée aux politiques de recyclage.

On peut certes comprendre les avantages que représente le recyclage dans l'inconscient collectif : avantages directs tenant à la réduction de l'exploitation de nouvelles matières premières et de la quantité de déchets, mais aussi avantages indirects tels que la réduction des dégâts causés à l'environnement et à la santé humaine par l'exploitation minière et le stockage, voire la destruction des déchets, ou une plus grande indépendance à l'égard des fournisseurs étrangers.

Mais nous verrons dans cette partie que la maîtrise des impacts environnementaux du numérique ne pourra se faire en reposant uniquement sur le recyclage. En effet, nos sociétés produisent des montagnes de plus en plus grosses de déchets électroniques, dont le taux de recyclage demeure excessivement bas.

Si la mise en place et l'amélioration des filières de collecte et de recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) est un axe de travail identifié, nous verrons que certaines propriétés limitent intrinsèquement le potentiel du recyclage à court et moyen termes.

2.1 État des lieux de la production et du recyclage des déchets numériques dans le monde

2.1.1 Des e-déchets de plus en plus nombreux

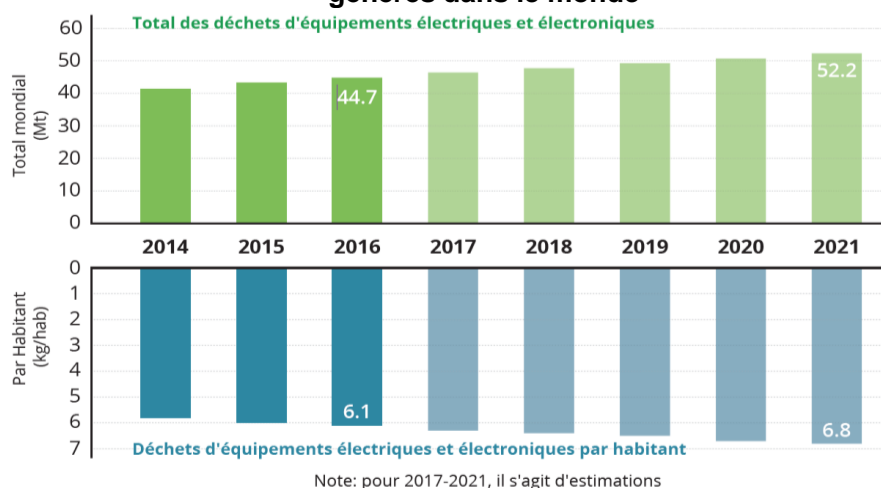
45 millions de tonnes de DEEE générées à l'échelle mondiale en 2016

L'article 3 de la directive européenne sur les DEEE définit les équipements électriques et électroniques ou EEE comme « les équipements fonctionnant grâce à des courants électriques ou à des champs électromagnétiques et les équipements de production, de transfert et de mesure de ces courants et champs, conçus pour être utilisés à une tension ne dépassant pas 1 000 volts en courant alternatif et 1 500 volts en courant continu⁶⁷ »

Les déchets sont quant à eux définis par la directive européenne comme étant « toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire⁶⁸ ».

La catégorie de déchets regroupant ces équipements, les DEEE, est aussi communément appelée « e-déchets ».

Graphique 6 – Déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) générés dans le monde



Source : UNU, UIT, ISWA, *Suivi de déchets d'équipements électriques et électroniques à l'échelle mondiale 2017*

⁶⁷ Directive 2012/19/UE du Parlement européen et du Conseil en date du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE).

⁶⁸ Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil en date du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives.

Depuis le début des années 2000, la quantité de e-déchets générée annuellement à l'échelle mondiale ne cesse de progresser. Le poids des e-déchets produits annuellement est ainsi passé de 41,8 millions de tonnes métriques en 2014 à 44,7 en 2016 (graphique 6), soit l'équivalent du poids de 4 500 tours Eiffel⁶⁹. Cette production de déchets devrait continuer de progresser à un taux de croissance annuel de 3 % à 4 % pour atteindre 52 millions de tonnes en 2021. Un tel taux de croissance fait de la filière des DEEE la filière de déchets qui progresse le plus vite dans le monde⁷⁰.

Rapportée à la population mondiale, chaque être humain génère en moyenne 6,1 kilos de e-déchets en 2016, contre 5,8 en 2014.

20 kilos d'e-déchets par habitant dans les pays les plus riches contre 1 kilo dans les plus pauvres

Avec une production annuelle moyenne de 22,2 kilos de déchets électroniques par Français en 2013, la France occupe la huitième position du classement mondial des producteurs de e-déchets⁷¹. Trois ans plus tard, le même rapport signale cependant une baisse timide mais réelle, avec 21,3 kilos par habitant⁷².

La comparaison des chiffres français et mondiaux suffit à comprendre les disparités régionales dans la génération de ces déchets, de même que le relatif dynamisme de certains agrégats massifs de population portant la croissance mondiale, comme le montre le tableau ci-dessous.

Une analyse géographique de ces chiffres montre qu'il existe de fortes disparités régionales dans la génération de ces déchets.

Tableau 4 – Production et collecte des e-déchets par continent

Indicateur	Afrique	Amériques	Asie	Europe	Océanie
Pays dans la région	53	35	49	40	13
Population dans la région (millions)	1,174	977	4,364	738	39
Poids (kg/hab)	1,9	11,6	4,2	16,6	17,3
Indication de poids (Mt)	2,2	11,3	18,2	12,3	0,7
Répertoriés comme collectés et recyclés (Mt)	0,004	1,9	2,7	4,3	0,04
Taux de collecte (régional)	0%	17%	15%	35%	6%

Source : UNU, UIT et ISWA, « Suivi de déchets d'équipements électriques et électroniques à l'échelle mondiale 2017 »

⁶⁹ Baldé C. P., Forti V., Gray V., Kuehr R. et Stegmann P. (2017), « Suivi des déchets d'équipements électriques et électroniques à l'échelle mondiale 2017 », Université des Nations unies (UNU), Union internationale des télécommunications (UIT) et Association internationale des déchets solides (ISWA).

⁷⁰ Rhys Gareth Charles, Douglas P., Hallin I. L., Matthews I. et Liversage G. (2016), *An investigation of trends in precious metal and copper content of RAM modules in WEEE: Implications for long term recycling potential*.

⁷¹ Baldé C. P., Wang F., Kuehr R. et Huisman J. (2014), « Suivi de déchets d'équipements électriques et électroniques à l'échelle mondiale 2014 », Université des Nations unies (UNU), IAS – SCYCLE.

⁷² Mise à jour de l'étude en 2017.

Ainsi, si l'Asie comme agrégat de population est le premier producteur de déchets mondiaux, il fait figure de bon élève au niveau de la production individuelle. À titre de comparaison, si l'Europe avait une population semblable, elle générerait environ 74 Mt de déchets. Ces chiffres sont toutefois à mettre en regard des déchets collectés et recyclés : avec un tiers de sa production recyclée, l'Europe ne génère plus que 8 Mt de déchets bruts, contre 9,4 pour le continent américain⁷³. L'Afrique reste à ce stade très en retrait des autres continents à la fois en production globale et en production par habitant.

On remarque que les différentes externalités négatives de la production de minerais exigées par le numérique pèsent le plus souvent sur des populations encore peu numérisées, notamment en Afrique, mais également dans certains espaces sud-américains, moyen-orientaux, et dans une moindre mesure asiatique eu égard à leur numérisation croissante. La réciproque est simple : les populations bénéficiant des équipements numériques sont peu, si ce n'est pas, touché par les effets délétères de la production, en raison de la délocalisation des activités à fortes externalités négatives en dehors des pays concernés.

Une augmentation des e-déchets liée à la croissance de la consommation et à l'accélération du rythme de remplacement

Cette croissance de la production des e-déchets est tout d'abord la conséquence directe de la croissance de la consommation en équipements électriques et électroniques dans le monde. En 2016, la consommation en nouveaux EEE était d'environ 60 millions de tonnes. Or la consommation d'aujourd'hui représente les déchets de demain.

Cette croissance de la consommation trouve évidemment sa première source dans les pays développés, mais aussi dans les pays en développement où « *les revenus disponibles augmentent [et où] une classe moyenne mondiale en pleine croissance peut dorénavant dépenser plus en équipements électriques et électroniques, ce qui génère toujours plus de déchets* »⁷⁴. Les taux de croissance en de la consommation en EEE se situent ainsi entre 13 et 23 %, contre 1 % et 5 % dans les pays développés⁷⁵.

La croissance de la production d'e-déchets est également portée par des cycles de remplacement des produits de plus en plus courts qui réduisent la durée de vie des produits.

2.1.2 Un quart des e-déchets produits sont des déchets numériques

Le Partenariat sur la mesure des TIC distingue six grandes catégories de DEEE :

- les équipements d'échange thermique, plus communément appelés équipements de réfrigération et de congélation, tels que réfrigérateurs, congélateurs, climatiseurs et pompes à chaleur ;
- les écrans et moniteurs tels que les télévisions, ordinateurs portables, ordinateurs bloc-notes et tablettes ;

⁷³ La répartition de la production de e-déchets sur le continent américain se répartit comme suit : 7 Mt en Amérique du nord, 3 Mt en Amérique du Sud et 1,2 en Amérique centrale. Aux États-Unis et au Canada la production de déchets par habitant est d'environ 20 kg et pour le reste du continent en moyenne de 7 kg.

⁷⁴ Baldé C. P., Forti V., Gray V., Kuehr R. et Stegmann P. (2017), « Suivi des déchets d'équipements électriques et électroniques à l'échelle mondiale 2017 », *op. cit.*

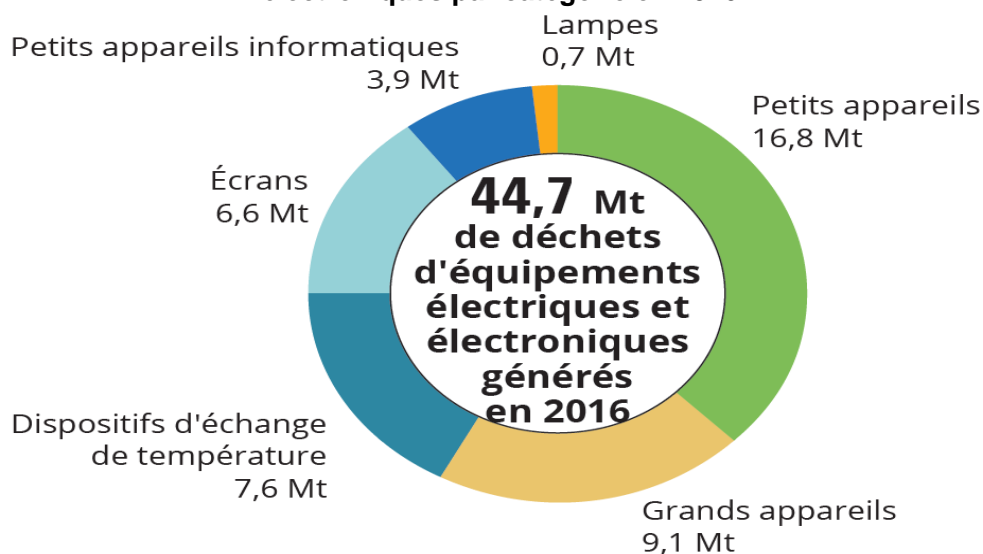
⁷⁵ Baldé C. P., Forti V. et Kuehr R. (2018), « E-waste statistics. Guidelines on classification, reporting and indicators, second edition ».

- les lampes ;
- les gros équipements tels que les lave-linge, sèche-linge, lave-vaisselle, cuisinières électriques, grosses imprimantes et panneaux photovoltaïques ;
- les petits équipements tels que notamment les aspirateurs, micro-ondes, équipements de ventilation, grille-pain, bouilloires électriques, rasoirs électriques, pèse-personnes, calculatrices, appareils de radio, caméras vidéo, jouets électriques et électroniques, petits jouets électriques et électroniques, petits appareils électriques et électroniques, petits appareils médicaux, petits instruments de contrôle et de surveillance ;
- les petits équipements informatiques et de télécommunications tels que les téléphones mobiles, systèmes de positionnement mondial (GPS), calettes de poche, routeurs, ordinateurs de poche, imprimantes et téléphones.

Les équipements numériques au sens strict⁷⁶ se concentrent donc les deux catégories suivantes : écrans et petits équipements IT.

Outre leur répartition géographique, l'analyse par catégorie des déchets électriques et électroniques est éclairante pour comprendre la dynamique des e-déchets.

Figure 6 – Estimation des quantités totales de déchets d'équipements électriques et électroniques par catégorie en 2016



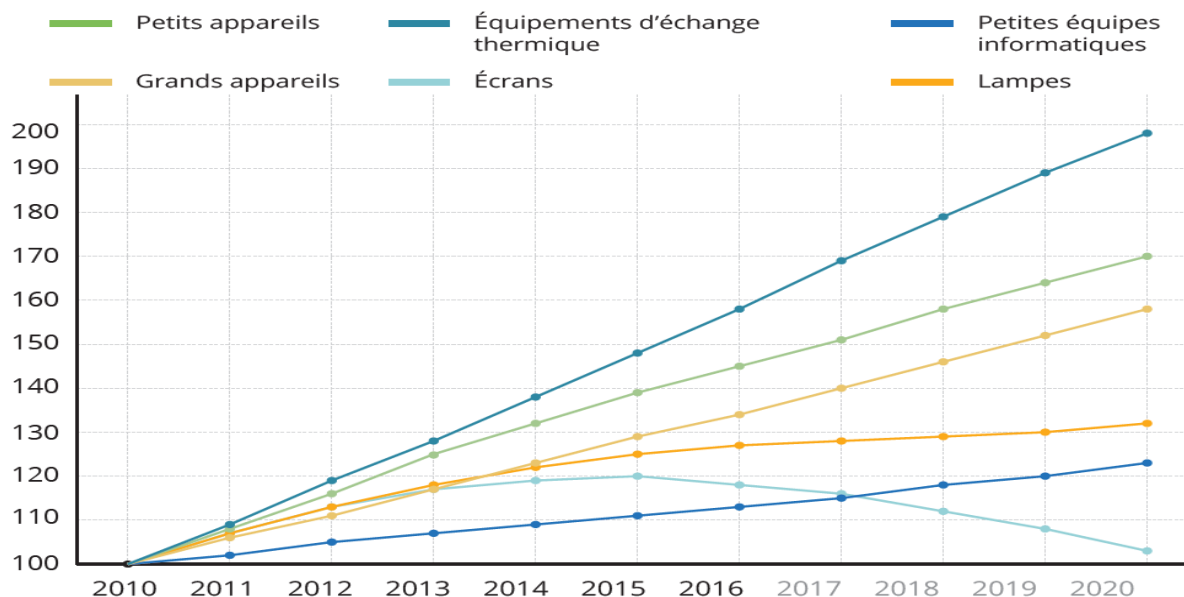
Source : UNU, UIT et ISWA, « Suivi de déchets d'équipements électriques et électroniques à l'échelle mondiale 2017 ».

La figure 6 montre que trois catégories d'EEE représentent ensemble les trois quarts des e-déchets générés annuellement, à savoir : les « petits appareils », les « grands appareils » et les « dispositifs d'échange de température ».

Les équipements numériques, avec 10,5 Mt de déchets produits en 2016, représentaient cependant 23 % des e-déchets (en poids).

⁷⁶ Ne prenant pas en compte les EEE qui seront connectés *via* l'IoT par exemple.

Graphique 7 – Croissance des déchets d'équipements électriques et électroniques par catégories au niveau mondial (base 100 en 2010)



Source : UNU, UIT et ISWA, Suivi de déchets d'équipements électriques et électroniques à l'échelle mondiale 2017

Note de lecture : entre 2010 et 2020, le poids des déchets de petits équipements informatiques a augmenté de 20 % malgré la tendance à la miniaturisation des équipements.

Les projections de croissance montrent que l'ensemble des catégories tendent à produire plus de déchets, à l'exception notable des écrans.

La croissance moins forte des petits équipements IT et le déclin de la catégorie des écrans s'expliquent par l'unité de mesure des e-déchets retenue, à savoir le poids. La catégorie des petits équipements IT croît ainsi moins rapidement que les autres catégories du fait de la miniaturisation constante dans le secteur numérique. Le déclin des écrans s'explique quant à lui par le remplacement des lourds écrans à tubes cathodiques par des écrans plats.

2.1.3 Un taux de collecte et de recyclage des DEEE dramatiquement bas

Au-delà d'un simple constat sur la croissance des e-déchets dans le monde, le rapport commun de l'UNU, de l'UIT et de l'ISWA alerte également sur le taux dramatiquement bas de collecte et de recyclage de ces DEEE.

Ces trois institutions indiquent en effet que seuls 20 % de ces déchets sont documentés comme ayant été collectés et recyclés par le biais de canaux appropriés. Cela alors même que 66 % de la population mondiale est couverte par une législation sur les DEEE.

En Europe, qui bénéficie pourtant d'une législation commune sur les DEEE, le taux de collecte atteint seulement 35 % (tableau 4).

On peut alors légitimement s'interroger sur le sort des 65 % restants. Ceux-ci sont mis en décharge, brûlés ou ont fait l'objet d'un commerce illégal et d'un traitement non conforme aux normes.

Interpol révélait en 2015 dans le cadre de son programme Countering WEEE Illegal Trade (CWIT)⁷⁷ que ces 65 % restants (6,15 millions de tonnes) étaient soit :

- exportés (1,5 million de tonnes) ;
- recyclés dans des conditions non conformes en Europe (3,15 millions de tonnes) ;
- dépouillés de leurs composants précieux (750 000 tonnes) ;
- simplement jetés dans des poubelles (750 000 tonnes).

Cette absence de gestion de la fin de vie est d'autant plus inquiétante que les DEEE sont des déchets dangereux. Ils contiennent en effet des substances toxiques qui, lorsqu'elles ne sont pas traitées correctement, peuvent polluer notre environnement et présentent des risques pour la santé. Là encore, l'exportation des conséquences néfastes de notre consommation trouve à s'appliquer : bien qu'étant une pratique interdite par la Convention de Bâle, l'exportation de nos déchets numériques vers des pays en voie de développement reste un réel fléau non documenté.

2.2 Les mines urbaines, une industrie extractive en devenir ?

Le concept de « mine urbaine » désigne selon Jean-François Labbé « les déchets et métaux déjà extraits antérieurement et qui se retrouvent désormais dans l'anthroposphère⁷⁸ ». On y trouve notamment des VHU (véhicule hors d'usage), des DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques). Un tel terme marque un certain changement de perception vis-à-vis de nos déchets, considérés désormais comme des ressources à part entière.

Ce changement de perception est illustré dans le rapport susmentionné de l'ONU, qui propose une valeur économique des matières présentes dans ces déchets. Selon l'ONU, la valeur totale des matières premières « secondaires » présentes dans les DEEE générés en 2016 est estimée à environ 55 milliards d'euros⁷⁹.

Tableau 5 – Valeur potentielle des matières brutes contenues dans les DEEE en 2016

Matière	Kilotonnes (kt)	M€
Fer (Fe)	16 283	3 582
Cuivre (Cu)	2 164	9 524
Aluminium (Al)	2 472	3 585
Argent (Ag)	1,6	884
Or (Au)	0,5	18 840
Palladium (Pd)	0,2	3 369
Plastiques	12 230	15 043

Source : UNU, UIT et ISWA, « Suivi de déchets d'équipements électriques et électroniques à l'échelle mondiale 2017 »

⁷⁷ Huisman J., Botezatu I., Herreras L., Liddane M., Hintsu J., Luda di Cortemiglia V., Leroy P., Vermeersch E., Mohanty S., van den Brink S., Ghenciu B., Dimitrova D., Nash E., Shryane T., Wieting M., Kehoe J., Baldé C.P., Magalini F., Zanasi A., Ruini F. et Bonzio A. (2015), *Countering WEEE Illegal Trade (CWIT) Summary Report, Market Assessment, Legal Analysis, Crime Analysis and Recommendations Roadmap*, août, Lyon, France

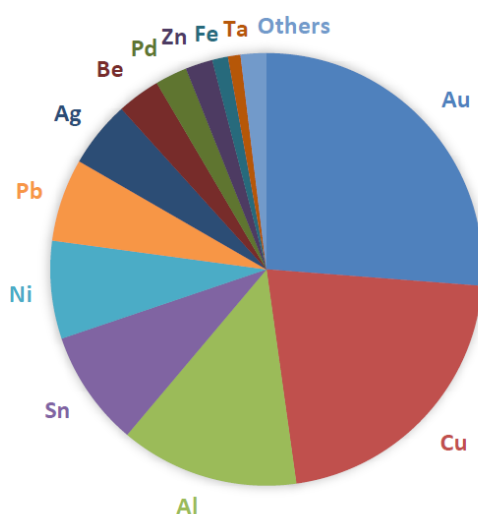
⁷⁸ https://www.univ-orleans.fr/sites/default/files/OSUC/documents/conf_ensciterre_labbe.pdf

⁷⁹ Baldé C. P., Forti V., Fray V., Kuehr R. et Stegmann P.(2017), « Suivi des déchets d'équipements électriques et électroniques à l'échelle mondiale 2017 », chapitre 9, UNI, UIT, ISWA.

Ces 55 milliards sont répartis comme illustré dans le tableau 5. On note que l'or présent dans les DEEE constitue la principale source de valeur de ces biens, avec près de 19 milliards d'euros pour seulement 500 tonnes de matière.

Concernant plus spécifiquement les équipements numériques, le rapport présente le potentiel économique des matériaux présents dans les téléphones portables mis au rebut en 2016 : pour un total de 435 kilotonnes de téléphones mobiles, les trois institutions estiment que les matières brutes qui les composent représenteraient une valeur de 9,4 milliards d'euros.

Figure 7 – Valeur des principaux métaux présents dans les cartes électroniques des ordinateurs



Source : Florian Fizaine d'après UNEP (2013)

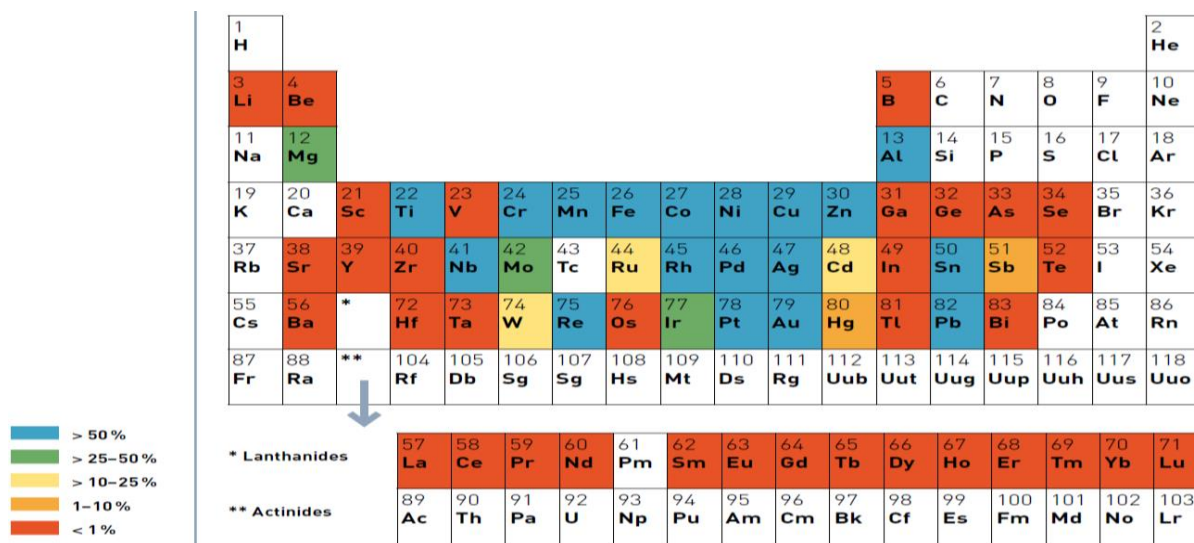
Pour les ordinateurs, la figure 7 montre que la valeur des métaux présents dans les cartes électroniques est principalement portée par la valeur de l'or (18 dollars), du cuivre (14 dollars), de l'aluminium (9 dollars), de l'étain (6 dollars), du nickel, du plomb et de l'argent (entre 3 et 5 dollars).

2.3 Limites du recyclage pour alimenter notre production future

2.3.1 Un taux de recyclage des petits métaux très faible

Tous les métaux présents dans les déchets collectés ne bénéficient pas des mêmes taux de recyclage.

Figure 8 – Taux de recyclage de métaux issus de produits en fin de vie



Source : UNEP, « *Recycling Rates of Metal. A Status Report* », 2011

Comme le montre la figure 8, si quelques métaux sont relativement bien recyclés, la majorité l'est très peu. Les métaux bénéficiant d'un fort taux de recyclage en fin de vie sont principalement des grands métaux, comme le cuivre, le plomb (70 %) ⁸⁰, le fer (70 %) ou l'aluminium (55 %), mais aussi les métaux précieux tels que l'or (> 50 %), l'argent (> 50 %) et le platine (> 50%). En revanche, la quasi-totalité des petits métaux, et notamment les terres rares, n'est quasiment pas recyclée.

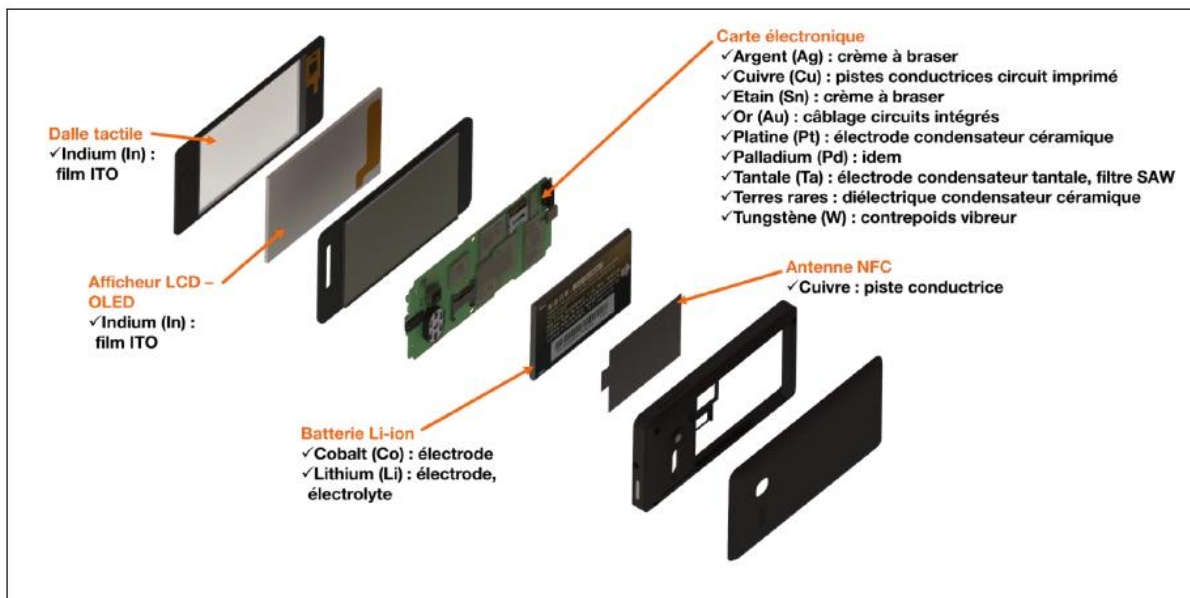
Or le secteur numérique mobilise de nombreux petits métaux pour ses fonctions high-tech. Les principaux petits métaux utilisés dans le numérique ne font pas exception à la règle : indium (< 1 %), néodyme (< 1 %), tantale (< 1 %), gallium (< 1 %), germanium (< 1 %).

2.3.2 Obstacles à l'industrialisation du recyclage des métaux dans les déchets numériques

Comme a été expliqué précédemment, les équipements numériques sont composés d'une multiplicité de métaux – plus de 50 métaux dans un smartphone par exemple –, dont un grand nombre de petit métaux et de métaux précieux.

⁸⁰ Chiffres de Bihoux et de Guillebon, *Quel futur pour les métaux*, p.89.

Figure 9 – Principaux éléments dans les composants d'un téléphone



Source : Orange

Ces petits métaux, présents dans des quantités très faibles, sont le plus souvent utilisés sous la forme d'alliages complexes. Or, si ces alliages permettent d'amplifier les performances notamment énergétiques et rendent possible la miniaturisation des équipements, ils complexifient énormément le recyclage.

Les industriels du recyclage sont confrontés à deux principales contraintes techniques :

- l'identification des différents métaux utilisés dans chaque composant des équipements numériques, qui nécessite d'analyser finement chaque alliage ;
- la séparation technique des métaux présents dans ces alliages en vue de leur réutilisation.

Pour répondre efficacement à ces deux contraintes techniques, les industriels du recyclage doivent réaliser des investissements élevés dans des technologies de pointe. Florian Fizaine cite ainsi l'exemple de la société UMICORE : « Un milliard de dollars a été investi dans l'usine de recyclage et de raffinage d'Umicore exploitant des DEEE en Belgique (Hagelüken et Corti, 2010). Cette usine extrait 30 tonnes d'or, 37 tonnes de métaux du groupe du platine, 1 000 tonnes d'argent et 68 500 tonnes d'autres métaux par an à partir de déchets. Cela en fait la troisième mine d'or du monde⁸¹. »

Florian Fizaine précise que, par comparaison, une usine de recyclage de papier ne requiert que 30 à 50 millions de dollars d'investissement.

Le premier obstacle au lancement d'une activité de recyclage est la disponibilité de stocks initiaux suffisants d'équipements, alimentés par la suite par un flux régulier. En la matière, le

⁸¹ En anglais dans le texte : "For instance, one billion dollars has been invested in the Umicore recycling and refining plant operating WEEE in Belgium (Hagelüken and Corti, 2010). This plant extracts 30 tons of gold, 37 tons of platinum group metals, 1000 tons of silver, and 68,500 tons of other metals per year from wastes. That makes it the third gold mine in the world."

taux de collecte relativement bas des équipements numériques constitue un frein évident au développement de tels gisements urbains.

L'industrialisation des processus de recyclage dans le numérique est par ailleurs complexifiée par la multiplicité des équipements : chacun nécessitant une phase d'identification et des processus de séparation qui lui sont propres, et donc des coûts propres. Cette multiplicité des équipements limite les économies d'échelle.

Mécanisation du désassemblage : le Robot Daisy développé par Apple

Dans le cadre de son programme de recyclage, Apple a annoncé en 2018 le lancement du robot Daisy. Il convient de noter que ce robot se limite au désassemblage des smartphones de la marque à la pomme et ne réalise pas d'opération de recyclage des métaux à proprement parler. Ses fonctions consistent donc à séparer les différents composants tels que l'écran, les vis, les batteries, etc.

Un tel outil pourrait éventuellement participer à l'amélioration de l'industrialisation des processus et *in fine* à la rentabilité économique du recyclage. Pour en évaluer l'impact réel sur le modèle économique du recyclage, il faudrait connaître la répartition de l'ensemble des coûts du recyclage des équipements numériques faisant apparaître la part du désassemblage par rapport au coût total du recyclage d'un métal donné. De telles machines pourraient par ailleurs, si elles sont développées en partenariat avec des industriels du recyclage, permettre de répondre à un besoin technique : l'obtention de « fractions plus homogènes et de meilleure qualité [permettant d'] améliorer les performances des opérations aval de métallurgie⁸² ».

Il convient en outre de noter que le recyclage des équipements numériques est une activité relativement incertaine et donc risquée dans la mesure où le rythme soutenu d'innovations ne permet pas nécessairement d'amortir dans le temps les investissements consentis pour un projet.

Enfin, le procédé de recyclage des alliages ne permet pas de récupérer les métaux sous leur forme la plus pure, des traces d'autres métaux persistant à l'issue de la séparation. Or, les fonctions high-tech pour lesquelles ces métaux étaient utilisés initialement dans le numérique nécessitent des niveaux de pureté élevés. Les métaux secondaires récupérés en fin de vie des équipements numériques doivent donc être réutilisés à des fins moins « nobles », s'appuyant moins sur leur propriété d'origine. Ils subissent donc une « dégradation de l'usage ». Cette dégradation de l'usage peut soulever des difficultés économiques pour l'entreprise, qui doit alors trouver de nouveaux débouchés pour ses métaux. Alain Geldron précise qu'on parle alors de recyclage en boucle ouverte⁸³.

Les contraintes technico-économiques fortes qui pèsent sur le recyclage des métaux présents dans les équipements numériques limitent l'industrialisation et la rentabilité des projets et font du développement de cette activité un véritable challenge.

⁸² Carencotte F., Geldron A., Villeneuve J. et Gaboriau H. (2012), « Économie circulaire et recyclage des métaux », *Geosciences*, p.64-71.

⁸³ Geldron A. (2012), « Peut-on recycler à l'infini ? », *Pour la science*, n° 421, novembre.

Certaines initiatives pourraient cependant alléger les contraintes pesant sur cette activité :

- le développement de partenariats entre fabricants et recycleurs, dans lesquels les premiers communiqueraient aux seconds des informations détaillées sur les alliages présents dans leurs équipements, pourrait réduire les coûts d'identification et accélérer le lancement du recyclage ;
- la standardisation accrue de certains composants permettrait de créer des économies d'échelle.

2.3.3 Des facteurs économiques jouant sur le taux de recyclage des métaux encore peu connus

État de l'art

Dans son intervention, Florian Fizaine⁸⁴ dresse un constat alarmant : notre connaissance des facteurs économiques du recyclage des métaux est très faible. Seules quelques études souvent anciennes et concernant les grands métaux comme l'aluminium et le cuivre sont disponibles.

Ces travaux ne sont pas suffisants pour comprendre les facteurs économiques influant sur le taux de recyclage des métaux du numérique. En effet, le cœur du problème ne se situe pas du côté des grands métaux ferreux, bien que des progrès soient nécessaires à ce niveau, mais à l'échelle des petits métaux.

Influence du prix et de la concentration sur le taux de recyclage des métaux présents dans les ordinateurs

Florian Fizaine a étudié les taux de recyclage des différents métaux dans les cartes électroniques au niveau européen pour expliquer les variations des taux de recyclage entre métaux. Les résultats de ses travaux ont été publiés en 2018⁸⁵.

En prenant en compte trois paramètres : le prix du métal, la concentration métallique du produit et la concentration moyenne du métal dans les mines au niveau mondial, il propose un modèle pour prédire l'augmentation du taux de recyclage des métaux présents dans les cartes électroniques.

Ses travaux montrent que si ces trois paramètres jouent bien sur le taux de recyclage des métaux, certains ont une influence plus forte que d'autres. Très peu élastique au prix des matières premières, le taux de recyclage l'est en revanche à la concentration du métal dans les produits concernés (une hausse de concentration de 1 % augmente de 2,5 % le taux de recyclage). De même, ce taux est très élastique au rapport de concentration métallique produit/mine (une hausse de 1 % du rapport augmente de 6 % le taux de recyclage).

Il est à ce titre logique que l'or présent dans nos équipements numériques bénéficie d'un taux supérieur de recyclage. En effet, la concentration en or de nos smartphones est bien supérieure à celle des mines exploitées actuellement.

⁸⁴ Présentation de Florian Fizaine de l'université de Savoie Mont Blanc lors du séminaire organisé le 21 janvier 2019 par France Stratégie : « La consommation croissante en matières premières du numérique : l'urgence d'une prise de conscience ».

⁸⁵ Fizaine F. (2018), "The Economics of Recycling Rate: new insights from a Waste Electrical and Electronic Equipment", FAERE Policy Paper, 2019-01.

Les futures politiques publiques devraient se polariser sur l'écoconception de produits plus fortement concentrés en métal

La première conclusion pouvant être tirée par les pouvoirs publics de ces travaux est que, contrairement aux idées reçues, les politiques publiques visant à jouer sur le facteur prix des métaux sont en réalité assez peu efficaces pour encourager le recyclage.

De la même manière, les politiques publiques visant à internaliser les externalités environnementales dans le prix des métaux ne sauraient produire les effets recherchés sur l'augmentation du taux de recyclage :

« À 100 dollars la tonne d'équivalent CO₂, l'augmentation des prix des métaux reste très modérée pour la plupart des métaux. À l'exception de l'aluminium (hausse de prix de 35 %) et de l'acier (+ 100 %), l'impact est faible pour les métaux communs : cuivre (+ 3,68 %), nickel (+ 3,10 %), zinc (+ 13,78 %). Les métaux précieux et mineurs obtiennent des résultats similaires : or (+ 3,13 %), argent (3,05 %), palladium (1,99 %), indium (+ 2,5 %). Par conséquent, en raison d'une faible élasticité du prix du métal à la taxe carbone et d'une faible élasticité du taux de recyclage au prix du métal, l'augmentation du prix du métal grâce à l'internalisation des externalités ne devrait pas aider à atteindre l'objectif de taux de recyclage élevé⁸⁶. »

Aussi, paradoxalement, la concentration métallique des produits, notamment par rapport à la concentration moyenne dans les mines, semble être la condition du développement du recyclage. La mise en place de politiques publiques incitant les fabricants à concevoir des équipements plus facilement dissociables et dont les composants seraient plus fortement concentrés en métal pourrait améliorer la rentabilité économique du recyclage.

Florian Fizaine alerte cependant sur le fait que la mise en place de telles politiques publiques implique un arbitrage entre deux leviers de l'économie circulaire, à savoir : la réduction de cette concentration pour diminuer l'empreinte métallique unitaire des produits (1^{er} R de l'économie circulaire pour Réduire) et la stimulation du recyclage (4^e R pour Recycler).

Nécessité de compléter notre connaissance du sujet

Florian Fizaine rappelle que les résultats apportés par son étude ne constituent que des premiers éléments de réponse, qui présentent un certain nombre de limites tenant notamment à la faible disponibilité de données.

Il conviendrait que les pouvoirs publics accompagnent des projets de recherche visant à développer le niveau de connaissance globale sur les facteurs influant sur le taux de recyclage des petits métaux, par exemple en :

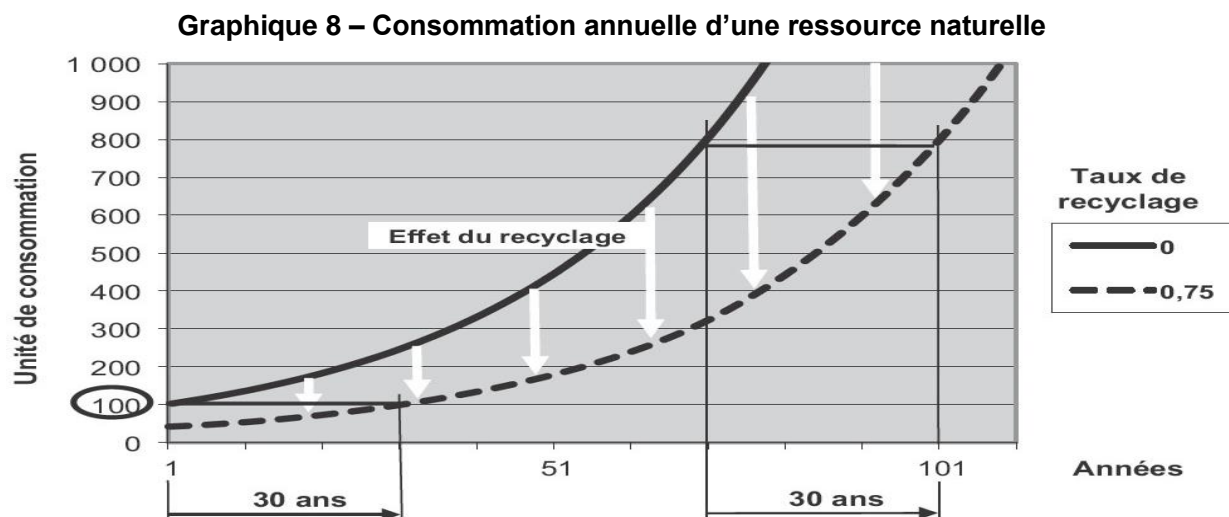
- libérant l'accès aux données : les chercheurs ont besoin de données à la fois plus nombreuses et plus qualitatives ;
- encourageant la création d'équipes interdisciplinaires car ces questions relèvent de problématiques interdisciplinaires à la fois économiques, mais aussi techniques et réglementaires ;
- soutenant financièrement ces travaux scientifiques et l'accès aux données.

⁸⁶ *Ibid* (en anglais dans le texte).

2.3.4 Limites structurelles du recyclage pour alimenter notre consommation future

Limite liée à la croissance de la demande

Dans un article de 2014⁸⁷, François Grosse souligne les limites du recyclage pris en lui-même. Il ne critique pas tant la démarche qu'il en conteste l'interprétation comme *deus ex machina*. Son analyse est simple : en ne considérant que le recyclage sans questionner notre modèle de croissance (quantitativement ou qualitativement), la démarche devient, sinon vaine, très peu efficace.



Source : François Grosse, 2014

Note de lecture : la courbe en gras correspond à la production d'une matière sans recyclage, croissant au taux annuel de 3 %. La courbe en pointillés correspond à la production de cette même matière si l'on suppose que 75 % de cette matière sont recyclés (on n'extrait donc que 25 % des besoins). On observe que la courbe d'extraction avec recyclage est la même que celle sans recyclage, mais décalée de trente ans.

La logique voudrait que si l'humanité décide de recycler en permanence 75 % des déchets d'un métal donné, elle n'a alors besoin de prélever que 25 % de ses besoins dans les stocks naturels. Or, selon François Grosse, un tel syllogisme ne tient qu'avec une consommation constante dudit métal.

En effet, comme l'illustre le graphique 8, en considérant une croissance de 3 % par an de la consommation, le niveau de ponction initial dans les stocks naturels est retrouvé trente ans plus tard (les 25 % de N sont devenus les 100% à N+30).

Comme l'écrit l'auteur, « l'augmentation continue des volumes recyclés année après année ne procure au final que du temps supplémentaire » tant que l'on ne prend pas en compte les deux autres paramètres nécessaires à la durabilité : une croissance des consommations matérielles inférieure à 1 % et un taux d'addition au stock inférieur à 20 %⁸⁸.

⁸⁷ Grosse F. (2014), « Les limites du recyclage dans un contexte de demande croissante des matières premières », *Annales des Mines – Responsabilité et environnement*, n°76, p.58 à 63, avril.

⁸⁸ Le taux d'addition au stock est « la proportion du flux de matière première consommée qui est consacrée à l'augmentation nette du stock de matière en cours d'usage. L'autre part des consommations est

Des taux de croissance et d'addition au stock ne respectant pas ces limites hautes et basses rendent dérisoires les mesures consacrées au recyclage à moyen terme. Ainsi, le recyclage cumulé du fer entre 1900 et 2012 n'a retardé que de 12 ans la ponction cumulée opérée sur la ressource naturelle comme le montrent les deux graphiques ci-dessous. Sans recyclage, la ponction cumulée équivalente aurait été atteinte en 2000.

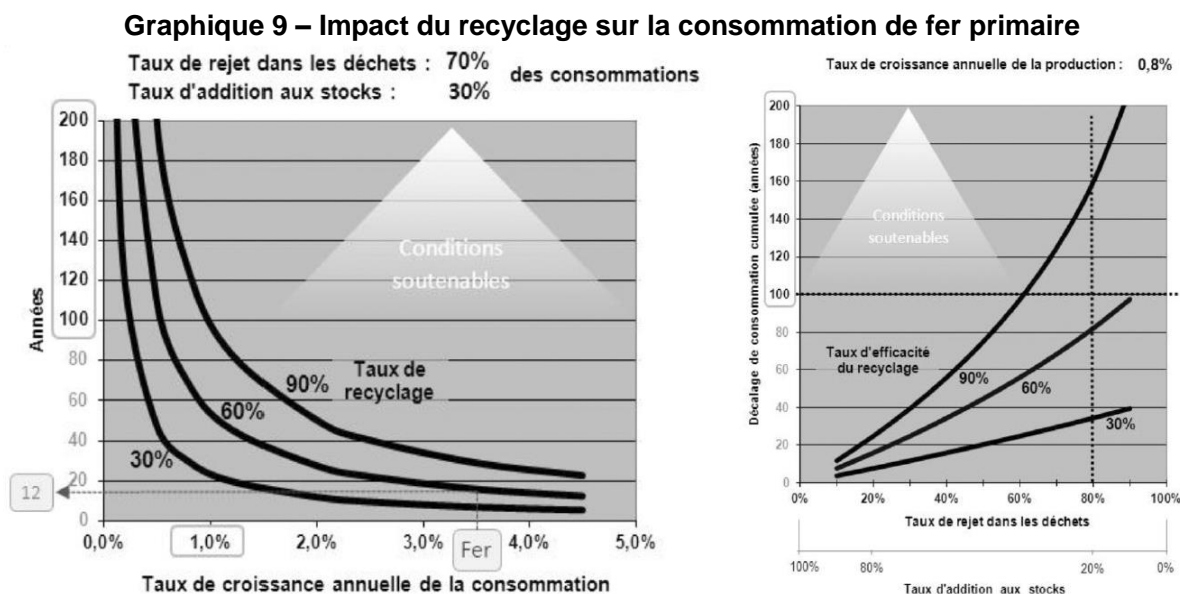


Figure 4a (à gauche) : Le temps gagné grâce au recyclage contre l'épuisement progressif de la ressource naturelle (en ordonnée) est relié au taux annuel de croissance de la consommation totale de la matière première en question (en abscisse), suivant trois taux différents d'efficacité du recyclage (la proportion des déchets de ce matériau recyclés dans la production de matière neuve).

Figure 4b (à droite) : Le même temps gagné grâce au recyclage (en ordonnée) est relié au taux d'addition aux stocks de l'économie (la proportion des consommations totales du matériau en question qui est destinée à accroître le stock de matière en cours d'usage), toujours selon trois taux d'efficacité du recyclage. La seconde abscisse est le taux de rejet de cette matière dans les déchets, c'est-à-dire le rapport entre les déchets produits et les consommations totales de matière neuve.

Source : François Grosse, 2014

Cette analyse du rapport entre recyclage, croissance de la consommation matérielle et augmentation du taux d'addition au stock est confirmée par Jean-François Labbé⁸⁹. Ce dernier était par ailleurs l'idée d'une croissance continue de la demande à moyen et long termes portée par la croissance démographique mondiale, le désir d'une part croissante de la population d'accéder à une société de consommation, l'évolution technologique stimulant la demande de certains métaux (notamment néodyme, praséodyme, dysprosium) non compensée par la baisse de quelques autres (cadmium, mercure).

Cependant, comme le souligne Olivier Vidal, « une croissance infinie [de la consommation des matières premières] n'est pas nécessaire⁹⁰ ». En effet, une fois que le monde aura atteint un développement équivalent et « un PIB/habitant correspondant au niveau de saturation », la demande en matières premières devrait se stabiliser, et le recyclage pourra devenir la « principale source de matières premières ». Reste à savoir à quelle échéance cette stabilisation se produira.

consacrée, quant à elle, à remplacer une masse équivalente de matières rejetées dans les déchets (sans variation du stock utilisé, par conséquent) ».

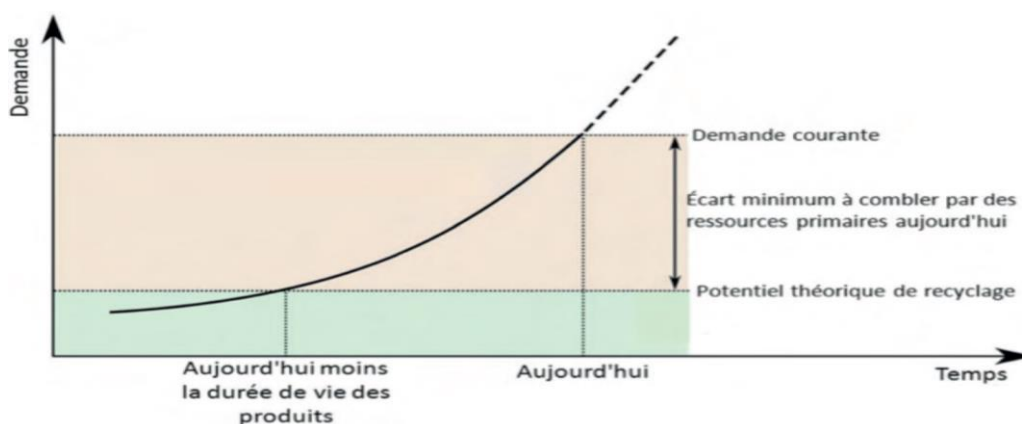
⁸⁹ Labbé J.-F. (2016), « Les limites physiques de la contribution du recyclage à l'approvisionnement en métaux », *Annales des Mines – Responsabilité et environnement*, n°82, p.45-56, février.

⁹⁰ Vidal O., *Matières premières et énergie*, p.20.

Limité liée au décalage temporel

Même en faisant l'hypothèse d'un taux de recyclage de 100 % des déchets générés, en cas de croissance de la demande le besoin de matière minérale primaire ne disparaîtrait pas complètement pour autant. Comme l'écrit le chercheur Tercero Espinoza, « la contribution relative du matériau recyclé dépend du laps de temps entre la production primaire et le recyclage d'un métal donné⁹¹ ». Autrement dit, l'efficacité du recyclage en termes de baisse de l'extraction primaire de métaux dépend essentiellement de l'intervalle de temps entre la production d'un équipement et sa fin de vie (mise au rebut et recyclage). Pendant cet intervalle de temps, la substitution de l'extraction par le recyclage n'est pas possible et doit être comblée (figure 10).

Figure 10 – Modèle de la demande courante en matières minérales issues du recyclage compte tenu d'une demande croissante



Source : Jean-François Labbé (2016), d'après Tercero Espinoza, mars 2012

Le tableau 6 ci-dessous illustre ce phénomène de décalage temporel. Pour un taux de recyclage de 100 %, et étant donné un taux de croissance annuel de 3 % et une durée moyenne de séjour dans les usages de dix ans, le recyclage ne couvrirait que 74 % de la consommation. Ce pourcentage passe à 61 % pour un taux de croissance annuel de 5 %, et à 47 % pour une durée de séjour de vingt-cinq ans.

Tableau 6 – Taux maximaux de couverture de la consommation par la production secondaire selon divers taux de recyclage

Taux maximaux possibles de couverture de la consommation par la production secondaire selon divers taux de recyclage en fin de vie "K"							
K = 100%		Durée moyenne de séjour du métal dans ses usages (d)					
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans
Taux de croissance annuel de la consommation (R)	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	1%	99.0%	97.1%	95.1%	90.5%	78.0%	60.8%
	2%	98.0%	94.2%	90.6%	82.0%	61.0%	37.2%
	3%	97.1%	91.5%	86.3%	74.4%	47.8%	22.8%
	4%	96.2%	88.9%	82.2%	67.6%	37.5%	14.1%
	5%	95.2%	86.4%	78.4%	61.4%	29.5%	8.7%
	10%	90.9%	75.1%	62.1%	38.6%	9.2%	0.9%

Source : Jean-François Labbé (2016)

⁹¹ Ibid.

Limite liée au décalage spatial

Le recyclage des métaux du numérique est également soumis à des limites spatiales souvent peu prises en considération. Dans la mesure où une grande partie des équipements numériques sont produits en dehors des frontières européennes, les matières obtenues à la suite du recyclage en Europe ne serviront probablement pas à la production de nouveaux équipements numériques pour diverses raisons : coût d'acheminement, perte d'emplois dans l'industrie extractive, etc.

Autrement dit, même si les procédés de recyclage des équipements numériques permettaient d'obtenir des matériaux de haute qualité n'imposant pas une dégradation de l'usage, ce recyclage ne conduirait pas nécessairement à une réduction de l'empreinte environnementale du numérique, mais permettrait de réduire l'empreinte globale de nos consommations.

Conclusion

Souvent reléguée au second rang par les préoccupations de consommation énergétique en phase d'usage, la consommation de matières premières se situe pourtant au cœur de l'impact environnemental du numérique.

Qu'il s'agisse de l'extraction elle-même ou des procédés de transformation nécessaires à l'obtention de métaux exploitables, le processus de production est parcouru de bout en bout par des questions de gestion des ressources minérales, énergétiques et hydriques qui seront amenées à se renforcer dans un avenir proche.

À ces questions économiques, sur lesquelles l'attention se concentre trop souvent, se superpose également un enjeu humain, celui du coût de ces activités sur les populations et la biosphère des pays où nous délocalisons notre production.

Bien que le recyclage soit un modèle vers lequel nos économies doivent nécessairement tendre et dont il faut accompagner la généralisation, ses limites intrinsèques ne lui permettent pas d'être l'alpha et l'omega d'une politique de réduction des impacts matériels du numérique.

Continuer à idéaliser le recyclage reviendrait à véhiculer une image fautive aux citoyens : celle d'un monde où une consommation sans limite n'a pas de conséquence puisque tout est recyclé. Or cette image d'Épinal est devenue dangereuse. D'une part, elle conduit à déresponsabiliser les agents économiques : au contraire, les pouvoirs publics devraient informer les citoyens que quand ils mettent au rebut un équipement, la majeure partie de l'équipement ne retournera pas à l'état de matériaux pour servir dans la construction d'un nouvel équipement, mais deviendra un pur déchet. D'autre part, elle nous détourne de politiques publiques permettant de stabiliser à court terme les impacts de notre consommation. D'autres leviers complémentaires au recyclage doivent donc également être mobilisés pour renforcer son efficacité et limiter la consommation de matières du numérique.

RETROUVEZ LES DERNIÈRES ACTUALITÉS DE FRANCE STRATÉGIE SUR :



www.strategie.gouv.fr



[@strategie_Gouv](https://twitter.com/strategie_Gouv)



[france-strategie](https://www.linkedin.com/company/france-strategie)



[francestrategie](https://www.facebook.com/francestrategie)



[@FranceStrategie_](https://www.instagram.com/FranceStrategie_)



[StrategieGouv](https://www.youtube.com/StrategieGouv)



FRANCE STRATÉGIE



Premier ministre

France Stratégie

Institution autonome placée auprès du Premier ministre, France Stratégie contribue à l'action publique par ses analyses et ses propositions. Elle anime le débat public et éclaire les choix collectifs sur les enjeux sociaux, économiques et environnementaux. Elle produit également des évaluations de politiques publiques à la demande du gouvernement. Les résultats de ses travaux s'adressent aux pouvoirs publics, à la société civile et aux citoyens.