Université Libre de Bruxelles
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
Faculté des Sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Face à l'essor des nouvelles technologies et l'épuisement des ressources métalliques : Proposition d'un indicateur de durabilité multicritère appliqué aux Technologies de l'Information et de la Communication

Mémoire de Fin d'Études présenté par
JUNOT David
en vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement
Finalité Gestion de l'Environnement M-ENVIG
Année Académique : 2017-2018

Directeur : Prof. Wouter ACHTEN

Remerciements

Je remercie en premier lieu mon promoteur Wouter Achten, pour son aide dans la précision du sujet et ses propositions pertinentes.

J'adresse par ailleurs mes remerciements à Louise Gonda pour sa disponibilité, ses conseils avisés et le temps qu'elle a bien accepté de me consacrer.

Je remercie Pierre D'Ans pour ses précieuses suggestions, qui m'ont permises de continuer sur une trajectoire correcte.

Merci à Vanessa Zeller pour son aide dans le domaine de l'analyse du cycle de vie.

Un grand merci à Grégoire Wallenborn pour ses ressources documentaires essentielles.

Merci également à ma belle-famille et à Cynthia de m'avoir quotidiennement soutenu et encouragé tout au long de cette épreuve du mémoire de fin d'études.

Je remercie enfin tous mes camarades du master que j'ai pu rencontrer et qui ont contribué à faire de cette année universitaire une expérience riche et formidable.

Résumé

Les nouvelles technologies de l'information et de la communication sont en train de connaître un essor sans précédent depuis cette dernière décennie, notamment avec l'émergence des smartphones, tablettes et écrans plats.

Ces outils sont cependant de plus en plus gourmands en métaux de toutes sortes et même si les quantités par équipement sont parfois non significatives, l'explosion de leur demande pourrait être problématique sur le court-moyen terme. Les problématiques de la raréfaction des métaux portent sur des paramètres d'ordre géologique, énergétique mais aussi géopolitique.

L'objectif de l'étude est de caractériser, via un indicateur, la durabilité du matériel technologique. L'indicateur se base sur des critères tels que la criticité des différents composants, la durée de vie du produit, mais aussi les quantités d'énergie utilisées lors de l'extraction des métaux et leurs réserves. L'impact se caractérise sous forme d'une note globale attribuée en fonction des impacts des différents critères.

Mots clés : Abiotic depletion potential, durabilité, épuisement, high-tech, indicateur, métaux critiques, métaux rares, réserve, ressource, technologie, TIC.

Table des matières

Table des matières 1

Table des illustrations 2

Table des abréviations 4

Liste des symboles chimiques et unités de mesure 5

Introduction 6

I. Importance des nouvelles technologies et problématiques 8

1. Présentation des TIC *8*

1.1. Etat des lieux et évolution du secteur 8

1.2. Présentation de 3 produits phares 9

2. Présentation des concepts et problématiques liés aux ressources métalliques *12*

2.1. Terminologies 12

2.2. Présentation des principaux métaux utilisés dans les TIC 20

2.3. Les impacts environnementaux liés à l'épuisement des métaux 24

II. Conception d'un indicateur d'évaluation de durabilité (IED) applicable aux nouvelles technologies 26

1. Présentation générale d'indicateurs environnementaux *26*

1.1. Les indicateurs d'épuisement des ressources en ACV 26

1.2. D'autres indicateurs liés à la durabilité et aux ressources 28

2. Conception de l'indicateur d'évaluation de durabilité (IED) *30*

2.1. Mise en contexte 30

2.2. Justification des différents critères 33

2.3. Analyse de sensibilité 50

III. Application de l'IED à d'autres technologies 60

1. Le smartphone *60*

1.1. Inventaire 60

1.2. Contribution à l'épuisement des ressources 61

1.3. Score final 62

2. La tablette tactile *63*

2.1. Inventaire 63

2.2. Contribution à l'épuisement des ressources 64

2.3. Score final 65

3. Classement des équipements *66*

Conclusion 67

Bibliographie 69

Table des illustrations

Figures

Figure 1 : Illustration de la loi de Moore 9
Figure 2 : Évolution du nombre de smartphones vendus mondialement de 2009 à 2017 10
Figure 3 : Évolution du nombre de tablettes vendues mondialement de 2010 à 2017 11
Figure 4 : Évolution du nombre d'ordinateurs vendus mondialement de 2010 à 2017 11
Figure 5 : Taux de recyclage de produits en fin de vie pour 60 éléments 16
Figure 6 : Distribution bimodale de la barrière minéralogique 17
Figure 7 : Les métaux de base et leurs sous-produits 24
Figure 8 : Impact de l'épuisement par métal selon l'abondance crustale 34
Figure 9 : Impact de l'épuisement en g Sb éq. selon la méthode CML (laptop) 36
Figure 10 : Matrice de criticité de 8 métaux 37
Figure 11 : Substitution des métaux en électronique 40
Figure 12 : Contribution des critères au score final (laptop) 49
Figure 13 : Sensibilité de substitution du palladium 53
Figure 14 : Sensibilité de substitution du tantale 54
Figure 15 : Sensibilité de substitution de l'indium 55
Figure 16 : Sensibilité de substitution du cobalt 57
Figure 17 : Sensibilité de substitution du cobalt avec plafonnement conditionnel 57
Figure 18 : Impact de l'épuisement en g Sb éq. selon la méthode CML (smartphone) 61
Figure 19 : Contribution des critères au score final (smartphone) 63
Figure 20 : Impact de l'épuisement en g Sb éq. selon la méthode CML (tablette) 64
Figure 21 : Contribution des critères au score final (tablette) 66

Tableaux

Tableau 1 : Liste des 27 matières premières critiques pour l'Union Européenne 19
Tableau 2 : Seuil de rareté des ressources en fonction du taux d'extraction 28
Tableau 3 : Contenu moyen des métaux critiques dans un notebook 31
Tableau 4 : Durabilité du produit en fonction de la note 32
Tableau 5 : Pondération des critères 32
Tableau 6 : Caractérisation de la rareté des métaux en fonction de l'abondance crustale 33
Tableau 7 : Caractérisation de l'épuisement selon la méthode CML (laptop) 35
Tableau 8 : Score de l'importance économique des métaux critiques du laptop 38
Tableau 9 : Taux de récupération des différents métaux critiques 39
Tableau 10 : Moyenne des indices de substitution par métal 41
Tableau 11 : IHH par métal 42
Tableau 12 : Contribution du ratio R/P par métal 43

Tableau 13 : Contribution ratio R/P avec TCAM de 1990 à 2016 44
Tableau 14 : Attribution de l'impact en fonction de la durée des réserves....45
Tableau 15 : Impact lié à la durée de vie de l'équipement TIC 46
Tableau 16 : Consommation énergétique de production des terres rares 47
Tableau 17 : Consommation énergétique de production des autres métaux....47
Tableau 18 : Attribution de l'impact en fonction de la consommation d'énergie par gramme de métal produit 48
Tableau 19 : Attribution de l'impact en fonction de la consommation d'énergie nécessaire à l'utilisation du laptop...48
Tableau 20 : Calcul du score final (laptop)....49
Tableau 21 : Calcul de l'épuisement des ressources abiotiques avec prise en compte de l'or et l'argent....51
Tableau 22 : Substitution du palladium et impact sur le score final 52
Tableau 23 : Substitution du tantale et impact sur le score final 54
Tableau 24 : Substitution de l'indium et impact sur le score final 55
Tableau 25 : Substitution du cobalt et impact sur le score final 56
Tableau 26 : Substitution du cobalt et impact sur le score final avec plafonnement conditionnel....58
Tableau 27 : Impacts du scénario combiné sur l'épuisement des ressources 58
Tableau 28 : Impacts du scénario combiné sur le score final et comparaison avec le score original....59
Tableau 29 : Contenu moyen des métaux critiques dans un smartphone 60
Tableau 30 : Caractérisation de l'épuisement selon la méthode CML (smartphone)....61
Tableau 31 : Calcul du score final (smartphone) 62
Tableau 32 : Contenu moyen des métaux critiques dans une tablette tactile....63
Tableau 33 : Caractérisation de l'épuisement selon la méthode CML (tablette)....64
Tableau 34 : Calcul du score final (tablette)....65
Tableau 35 : Comparaison des 3 produits....66

Table des abréviations

ACV : Analyse du Cycle de Vie

ADP : Abiotic Depletion Potential (Potentiel d'Épuisement des Ressources Abiotiques)

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CE : Commission Européenne

CML : Centrum voor Milieuwetenschappen van Leiden (Institut des Sciences de l'Environnement de l'Université de Leiden)

CPU : Central Processing Unit (processeur)

CR : Coefficient de Rareté

DEEE (ou D3E) : Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques

EMC : Egan Marino Corporation

EOL-RR : End-of-Life Recycling Rate (taux de recyclage des produits en fin de vie)

GES : Gaz à Effet de Serre

IED : Indicateur d'Évaluation de Durabilité

IE : Importance Économique

IHH : Indice de Herfindahl-Hirschmann

IS : Indice de Substitution

ITO : Indium Tin Oxide (Oxyde d'indium-étain)

LCD : Liquid Crystal Display (écran à cristaux liquides)

LCO : Lithium Cobalt Oxide

LED : Light-Emitting Diode (diode électroluminescente)

LFP : Lithium ferrophosphate

LMO : Lithium Manganese Oxide

MGP : Métaux du Groupe du Platine

MIPS : Matière Indispensable Par unité de Service

MLCC : Multi-Layer Ceramic Capacitors (condensateurs en céramique multi-couche)

NMC : Nickel Manganèse Cobalt

PEDOT : Poly(3,4-éthylènedioxythiophène)

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement

RA : Risque d'Approvisionnement

TCAM : Taux de Croissance Annuel Moyen

TIC : Technologies de l'Information et de la Communication

TUMP : Taux d'Utilisation de la Matière Première

TR : Terres Rares

UE : Union Européenne

USGS : United States Geological Survey

VA : Valeur Ajoutée

WMD : World Mining Data

Liste des symboles chimiques et unités de mesure

Ag : Argent

Au : Or

Co : Cobalt

Cu : Cuivre

Dy : Dysprosium

Ga : Gallium

Ge : Germanium

Gt : Gigatonne

In : Indium

KJ : Kilojoule

Kt : Kilotonne

Li : Lithium

Li-ion : Lithium ion

Mg : Milligramme

MJ : Mégajoule

Mt : Mégatonne

MW : Mégawatt

Nd : Néodyme

Pd : Palladium

Ppm : Partie par million

Pt : Platine

Pr : Praséodyme

Sb : Antimoine (du latin Stibium)

Sn : Étain

T : Tonne

Ta : Tantale

W : Tungstène (de l'allemand Wolfram)

Introduction

Ordinateurs, smartphones, tablettes, écrans plats… Les technologies de l'information et de la communication prennent un rôle de plus en plus considérable au sein de nos sociétés, que ce soit au niveau quantitatif (augmentation du nombre d'appareils vendus) mais aussi qualitatif (appareils toujours plus performants, moins denses et offrant toujours plus de nouvelles fonctionnalités). À l'heure actuelle, aucun pilier de nos sociétés "modernes" n'est épargné : agriculture, santé, éducation, transports, distribution de l'énergie (via les smart grids et smart pipes). Nos modes de vie contemporains dépendent de l'informatique et du numérique. Ces outils sont utilisés pour plusieurs activités quotidiennes telles que se divertir, communiquer, travailler, apprendre, approfondir ses connaissances...

La croissance économique entraîne par ailleurs certains acteurs à développer des outils toujours plus performants, qui permettent des gains de productivité ou encore de diminuer la pénibilité du travail.

La high-tech semble de plus en plus soumise à un effet de mode, facteur nécessaire dans nos sociétés de consommation. Ainsi, près d'1,5 milliards de smartphones se sont vendus dans le monde en 2016, soit plus de 47 appareils par seconde et le secteur est en pleine croissance depuis une décennie (les ventes ont été multipliées par 4,8 de 2010 à 2017, soit une augmentation de 380%).

Problématique et questions de recherche

Parallèlement à l'essor des TIC, des problématiques liées aux ressources métalliques sont mises en évidence : diminution de la teneur des minerais, gisements de moins en moins accessibles, réserves qui s'épuisent, augmentation de la consommation, faible taux de recyclage des éléments en fin de vie… L'augmentation de la consommation des TIC est liée à l'épuisement de ces ressources et notre système socio-économique est dépendant de ces outils.

Les TIC constituent-elles des outils durables ? Dans quelle(s) mesure(s) contribuent-elles à l'épuisement des ressources et quelles sont les problématiques associées à cet épuisement ? Quels sont les métaux les plus problématiques au sein des TIC ? Existe-il des solutions, ou alors la technologie telle que nous la connaissons aujourd'hui est-elle vouée à ne plus être dans les prochaines décennies ?

Méthodologie

Pour répondre à ces questions, un indicateur multicritère est proposé, dans le but d'évaluer pragmatiquement ces outils technologiques. La méthodologie de conception de l'indicateur consiste tout d'abord à recueillir la liste exhaustive des métaux critiques composants l'outil informatique. Des critères corrélés à la durabilité sont déterminés et des impacts sont calculés en fonction des propriétés propres aux différents composants. La recherche de données géologiques s'effectue sur base des références scientifiques les plus fiables en la matière, telles que l'USGS (U.S Geological Survey) ou le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières).

L'objectif est d'analyser et de déterminer les différents métaux qui ont le plus d'impact en terme d'épuisement des ressources d'une part et de caractériser l'équipement en matière de durabilité d'autre part.

Structure

Le mémoire s'intéresse principalement aux Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication en passant en revue dans un premier temps les principales technologies contemporaines, leur développement et leur évolution. Les différentes problématiques corrélées à l'épuisement des ressources métallifères sont également présentées.

Dans une deuxième partie, un indicateur d'évaluation de la durabilité sera proposé et conçu en fonction des métaux critiques qui composent le hardware d'un laptop, c'est-à-dire sa partie matérielle (en opposition à sa partie logicielle ou immatérielle appelée le software). L'accent sera particulièrement porté sur la consommation des ressources métalliques nécessaires à la fabrication des équipements terminaux. Par la suite, cet indicateur sera appliqué à 2 autres technologies : le smartphone et la tablette tactile.

I. Importance des nouvelles technologies et problématiques

Le terme de nouvelles technologies réunit des notions telles que les technologies de l'information et de la communication (TIC) mais aussi les technologies nécessaires à la transition énergétique comme par exemple les véhicules électriques ou encore les applications permettant le développement des énergies renouvelables (on parle alors pour ces dernières de technologie verte ou de cleantech). Cette première partie se focalise essentiellement sur la présentation des outils et équipements liés aux TIC.

1. Présentation des TIC

Les Technologies de l'Information et de la Communication sont, comme leur nom l'indique, des technologies qui regroupent l'informatique, internet, les données multimédias, les outils de télécommunications et qui permettent à tout utilisateur de lire, traiter, gérer, produire et transmettre des informations sous diverses formes : texte, graphique, audio, vidéo… La révolution numérique dans les pays développés se caractérise par l'apparition d'internet, les Internet of Things, l'informatique, mais aussi l'ampleur des mutations technologiques.

La high-tech a pris une place essentielle dans nos vies en l'espace de quelques dizaines d'années. Les smartphones, laptops et autres tablettes se développent et évoluent rapidement, que ce soit au niveau de leur performance (rapidité), du nombre de modèles disponibles mais aussi leurs options et la qualité des services multimédias (augmentation du nombre de mégapixels pour les caméras…)

L'informatique de manière générale contribue à l'amélioration de notre mode de vie grâce à la rapidité de circulation des données et des capitaux, des nouveaux modes de communication, des progrès médicaux, de l'automatisation d'une partie des tâches administratives, de l'augmentation de la productivité au travail…

Cette première partie souhaite avant tout mettre en évidence l'ampleur et l'utilité des TIC dans nos vies quotidiennes.

1.1. Etat des lieux et évolution du secteur

L'apparition du microprocesseur en 1971 a rendu possible l'émergence et l'introduction en masse des ordinateurs tels que nous les connaissons aujourd'hui, c'est-à-dire les PC (Personal Computers ou micro-ordinateurs) qui marquent la 4ème et dernière génération d'ordinateurs (Binet 2003, p.208). Alors que les circuits intégrés de l'époque comprenaient généralement une dizaine de composants électroniques, la miniaturisation de ces derniers aura permis d'intégrer jusqu'à 2 300 transistors au premier microprocesseur, qui était alors capable d'exécuter 60000 opérations par seconde. De nos jours, plusieurs centaines de millions de transistors sont gravés sur les microprocesseurs (Waldner, 2007).

Plusieurs lois décrivent bien l'évolution de la high-tech de ces dernières années, comme par exemple les lois empiriques de Moore. Ces dernières stipulent par exemple que la complexité des semi-conducteurs double chaque année à prix constant (Moore, 1965) ou encore que le nombre de

transistors des microprocesseurs double tous les deux ans (Moore, 1975). Ces lois se sont révélées relativement justes jusqu'à présent.

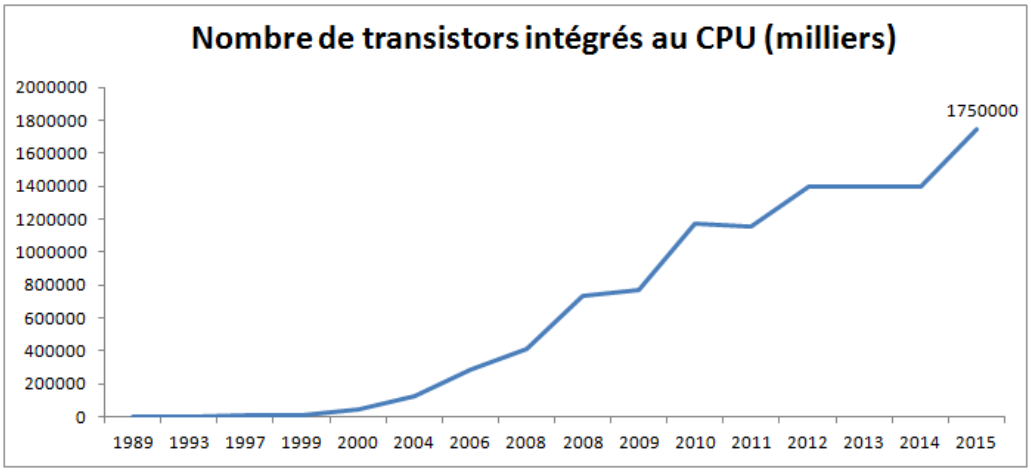

Figure 1 : Illustration de la loi de Moore : évolution du nombre de transistors intégrés au CPU de 1989 à 2015
Source : Wikipédia.

Les TIC se définissent aussi par l'apparition d'une économie du savoir, de la connaissance ou de l'immatériel. Cette économie post industrielle se caractérise principalement par 3 grands piliers, dont les Technologies de l'Information et de la Communication. L'économie de la connaissance connaît un envol grâce aux progrès technologiques, à l'élargissement du secteur tertiaire (économie de services et des activités immatérielles) mais aussi grâce à la mondialisation.

Le monde numérique (en l'occurrence le réseau Internet) augmentera de 40% par an au cours des 10 prochaines années (EMC[1], 2014). Cette augmentation se caractérise d'une part par le nombre de ménages et d'entreprises profitant des services de stockage du Web (cloud), mais aussi par le nombre d'appareils connectés. Les prévisions estiment ainsi une quantité de données stockées de l'ordre de 44 milliards de téraoctets (soit 44 zettaoctets ou encore 10^{21} octets) en 2020. Les termes de big datas ou de mégadonnées, sont utilisés pour caractériser la quantité volumineuse de données en ligne. Fin 2017, il a été dénombré plus de 4,1 milliards d'internautes, soit plus de 54 % de la population mondiale (Internet World Stats, 2018).

1.2. Présentation de 3 produits phares

Trois technologies principales peuvent être brièvement présentées : le smartphone, la tablette, l'ordinateur personnel (PC).

1.2.1. Le smartphone

Que ce soit pour envoyer des sms/mms, appeler, lire ses mails, surfer sur le web, prendre des photos, regarder des vidéos ou encore utiliser son gps, les smartphones sont aujourd'hui grandement utilisés. Le premier smartphone apparaît en 2007, avec l'iPhone d'Apple. Depuis fin 2011, deux acteurs principaux se partagent le marché : Samsung et Apple, qui se démarquent par leur quantités vendues.

[1] Egan Marino Corporation, entreprise américaine spécialisée dans le stockage de données informatiques.

Dans le même temps et pour la première fois, les ventes de smartphones commencent à dépasser celles des PC, avec 494,5 millions de smartphones vendus, contre 364 millions d'ordinateurs. Le concept de phablette émerge également : il s'agit d'un téléphone dont la taille de l'écran est supérieure à celle d'un smartphone et inférieure à celle d'une tablette (dimension comprise entre 5 et 7 pouces). Le marché du smartphone croît de manière exponentielle, avec un taux de croissance annuel moyen de près de 31% de 2009 à 2017. Le nombre d'unités vendues mondialement sur 2017 s'estime à plus d'1,46 milliards de smartphones. Leur durée de vie moyenne ne dépasserait pas les 2 ans (Raghavan & Ma cités par Belkhir & Elmeligi 2018, p.455).

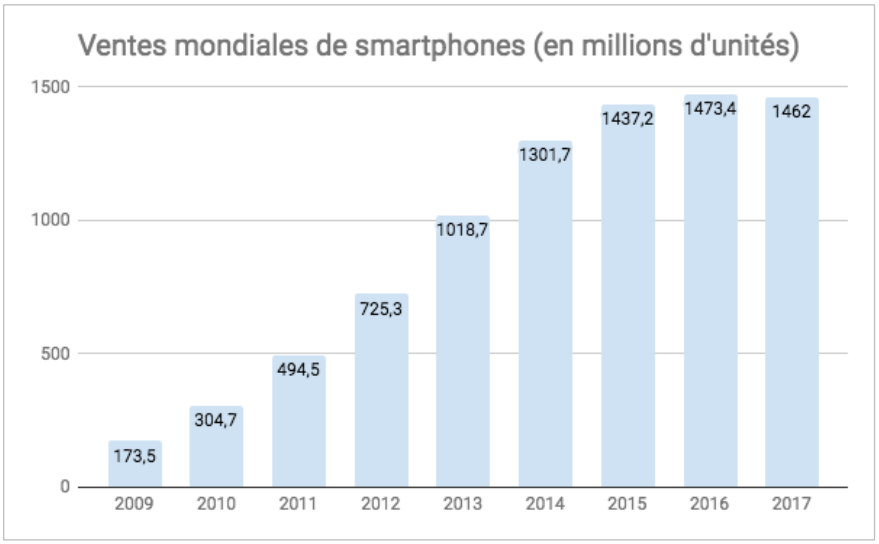

Figure 2 : Evolution du nombre de smartphones vendus mondialement de 2009 à 2017
Source : Statista, 2018b

1.2.2. La tablette tactile

La tablette tactile, tablette électronique ou numérique est un ordinateur portable ultraplat qui permet l'accès à du contenu multimédia (Journal officiel de la République Française 2011, p.3238). Elle peut être considérée comme un outil à la croisée d'un smartphone et d'un laptop. Les dimensions de l'écran varient de 5 à 10 pouces selon le modèle. Les modèles récents pèsent entre 300 et 500 g selon la dimension, poids qui a diminué depuis le début des années 2010 (35% de poids en moins pour les 9,7 pouces, 12% pour les 7 pouces). Leur durée de vie moyenne varie entre 3 et 8 ans (Digital Home, cité par Belkhir & Elmeligi 2018, p.454). Le hardware d'une tablette est similaire à celui d'un ordinateur portable : il se compose d'une carte mère, d'un processeur, d'une mémoire vive, d'une mémoire de masse et d'une batterie rechargeable.

Comme pour les smartphones, les deux principaux fournisseurs de tablettes se partageant les plus grandes parts de marché sont Samsung et Apple. Elles ont connu leur essor principalement en 2013-2014 et connaissent un net recul depuis quelques années, même si le nombre d'unités vendues reste relativement conséquent (Statista, 2018a).

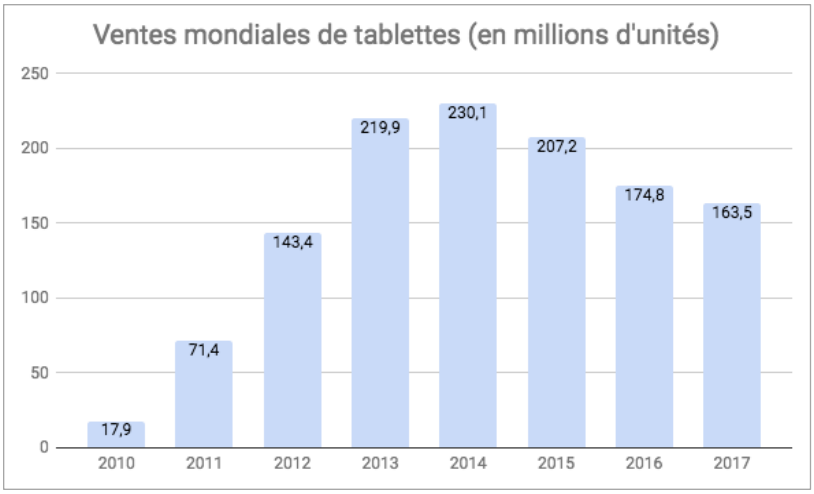

Figure 3 : Evolution du nombre de tablettes vendues mondialement de 2010 à 2017
Source : Statista, 2018a

1.2.3. L'ordinateur personnel (PC)

6 acteurs principaux se partagent le marché du PC : Lenovo, HP, Dell, Apple, Asus et Acer. Il faut distinguer 2 grands types d'ordinateurs personnels : les fixes (desktops) et les portables (laptops). Parmi les laptops, il existe plusieurs catégories : netbooks (10-12 pouces), portables (qui pèsent entre 2 et 3 kg), ultraportables (qui pèsent entre 1 et 2 kg), gamers (dont la carte graphique est plus adaptée aux jeux vidéos)... Leur intérêt réside principalement dans leur transportabilité, leur poids et leur autonomie. Plus de 364 millions d'unités se sont vendus en 2011, soit 11 appareils par seconde (dont 209 millions de laptops et 155 millions de pc fixes). Néanmoins, depuis cette même période, le marché connaît une baisse des unités vendues, avec une diminution moyenne de près de 5% de 2011 à nos jours. Cette baisse pourrait s'expliquer via la substitution des ordinateurs par la consommation de smartphones, ces derniers connaissant une croissance du nombre d'unités vendues. Les smartphones permettent en effet d'avoir accès aux mêmes fonctions de bases offertes par les PC (internet, multimédia…). La durée de vie moyenne d'un ordinateur (fixe et portable) s'estime entre 5 et 7 ans (National Energy Foundation & Apple Inc cités par Belkhir & Elmeligi 2018, p.453).

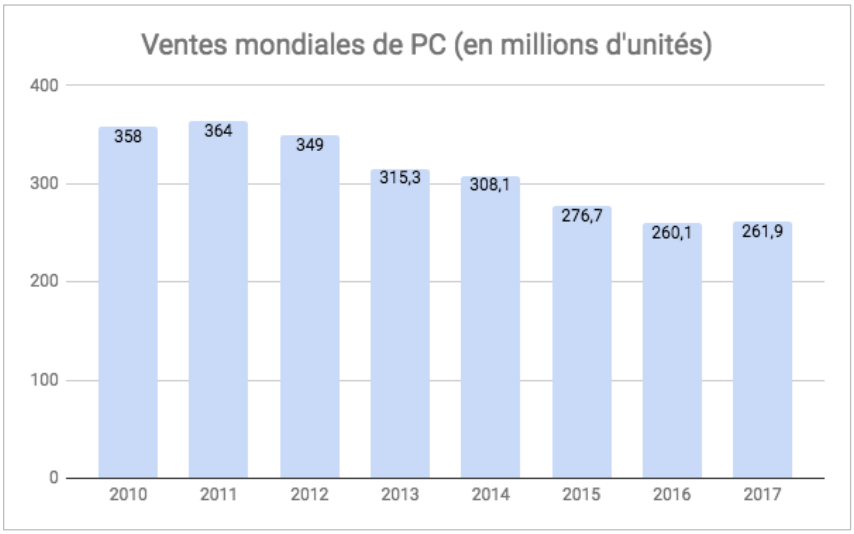

Figure 4 : Evolution du nombre d'ordinateurs vendus mondialement de 2010 à 2017
Source : Statista, 2018a

2. Présentation des concepts et problématiques liés aux ressources métalliques

Le secteur des nouvelles technologies est responsable de plusieurs impacts dommageables à l'environnement, que ce soit lors de l'extraction des ressources minières (acidification des cours d'eau), la fabrication ou l'utilisation du produit (consommation énergétique, pollution du sol, de l'air et de l'eau) et la fin de vie du produit (D3E). Différentes notions géologiques et problématiques liées aux ressources métalliques sont présentées ici.

2.1. Terminologies

Lorsqu'on parle de ressources métalliques, plusieurs termes interviennent. La présentation et la distinction de quelques définitions comme ressources / réserves, épuisement / raréfaction sera effectuée dans un premier temps, avant de détailler le concept de criticité.

2.1.1. Les différents termes géologiques

En géologie, un minerai est une roche qui contient une substance utile en proportion suffisante pour pouvoir être économiquement exploitable. Le concept de substance utile indique une nécessité particulière de l'élément à la société. C'est par exemple le cas pour les métaux et les ressources énergétiques (Arndt & Ganino 2010, p.10).

Un gisement est une accumulation de minerais dont la concentration en minéraux est suffisante pour pouvoir être exploité économiquement. Un gisement sera exploitable si la teneur du minerai (le taux de métal au sein de la roche) est supérieure au clarke du métal exploité (le clarke est la grandeur qui permet de déterminer l'abondance d'un élément dans la croûte terrestre, exprimée en pourcentage ou en ppm) (Arndt & Ganino 2010, pp.14 ; 16).

Il existe 4 grands types de minerais métallifères sur Terre, à savoir les oxydes, les sulfures, les carbonates et les silicates (Bihouix & De Guillebon 2010, p.73). Il y a également 4 principales sortes de mines (EcoInfo, 2014a) :
-les placers, qui sont des gisements de roches sédimentaires caractérisés par la présence de métaux et de minéraux de valeurs, comme l'or et les pierres précieuses ;
-les sites d'exploitation offshore (en mer) ;
-les mines de surface qui représentent plus de la moitié des mines et plus de 80% des minerais métalliques extraits ;
-les mines souterraines, qui représentent 43% des mines mondiales.

On parle de ressource non renouvelable lorsque sa vitesse de consommation est supérieure à celle de son renouvellement. C'est le cas par exemple des énergies fossiles comme le pétrole, le gaz et le charbon mais aussi des ressources métalliques. Ces ressources ont été créées à partir de processus géologiques très longs, bien supérieurs à l'échelle humaine (Bihouix & De Guillebon 2010, p.19).

Une réserve est une ressource qui a été découverte et dont l'exploitation technique et économique est possible. Il y a 3 types de réserves (Bihouix & De Guillebon 2010, p.27) :
- les réserves qui sont des ressources exploitables en l'état actuel ;
- les réserves base qui regroupent des ressources prouvées mais dont l'extraction n'est pas économiquement et/ou techniquement possible à l'heure actuelle ;
- les réserves déduites (ou potentielles) qui comprennent des quantités de ressources estimées à partir de projections géologiques.

À ces 3 notions de réserves, il est nécessaire de rajouter le potentiel géologique non identifié, qui regroupe les zones du globe non encore explorées. Les ressources ultimes sont l'agrégation de ces 3 types de réserves plus le potentiel non identifié. Les ressources ultimes représentent donc le stock total d'un élément sur Terre.

Les réserves peuvent s'accroître de 3 façons : la découverte de nouvelles ressources (dimension géologique) ; le développement des techniques d'extraction et/ou d'efficience énergétique (dimension technique) ; l'augmentation du prix de la matière première (dimension économique), car il sera alors profitable d'extraire cette ressource (Bihouix & De Guillebon 2010, p.28).

2.1.2. Épuisement et raréfaction

2.1.2.1. Définitions

On parle d'épuisement des ressources pour qualifier le fait que les quantités de matières premières et de substance utiles vont en diminuant (Van der Voet, cité par Oets & Guinée 2016, p.7), même si le terme de "dispersion" serait plus approprié, étant donné la loi physique fondamentale de conservation de la masse, énoncée par Lavoisier et stipulant que rien ne se crée, rien ne se perd, tout se transforme. Ce constat semble logique étant donné que nous vivons sur une planète aux ressources finies et que les rythmes de consommation sont croissants (une diminution des ressources a lieu même en présence d'un taux de consommation fixe ou décroissant, l'épuisement évoluant à un rythme plus lent). Les ressources métalliques étant non renouvelables, les stocks existants (et exploitables) au sein de la lithosphère décroissent.

La raréfaction désigne une ressource utile à la société dont la quantité disponible ne peut (ou ne pourra) satisfaire l'offre (Van der Voet, cité par Oets & Guinée 2016, p.7).
La raréfaction peut se distinguer selon 3 différentes formes (Hagelüken cité par EcoInfo, 2012):
- la raréfaction structurelle : concerne certains métaux (métaux secondaires) qui sont des sous-produits de grands métaux. Une augmentation de la demande de ces métaux secondaires entraînera une hausse de prix sans toutefois influer sur la production du métal principal. Leur rareté est ainsi directement corrélée à la demande du métal principal. Tant que cette dernière n'augmentera pas, le sous-produit métallique restera rare, en raison de sa production qui demeurera inférieure à la demande ;
- la raréfaction relative : concerne une production minière inférieure à la demande pendant une période en raison de la baisse de la production et/ou d'une augmentation brutale de la demande. Cette notion de raréfaction relative est corrélée au terme de criticité ;
- la raréfaction absolue : concerne la déplétion des réserves, c'est-à-dire la décroissance définitive du volume d'extraction d'une ressource après une période de croissance (Cochet cité par EcoInfo, 2012).

Il s'agit du cas où la demande dépasse la production minière et que les gisements ont été grandement exploités.

Certains experts et économistes estiment que la rareté ne devrait pas être une source d'inquiétude pour nos sociétés. Selon eux, les pénuries entraîneront théoriquement une augmentation du prix des matières premières rares, ce qui impliquera une moindre utilisation desdits éléments et encouragera l'emploi de métaux présents en plus grande quantité (Barnett & Morse; Smith; Simpson et al. cités par le PNUE 2010, p.30). La rareté peut par ailleurs être un moteur à l'innovation, aboutissant à un développement technologique et une utilisation optimale des ressources (Ayres cité par le PNUE 2010, p.30).

Il n'y a pas un réel risque d'épuisement des métaux à proprement parler (en tout cas pas au sein de la lithosphère). La question de la raréfaction concerne plutôt la possibilité d'exploitation de ressources de moins en moins accessibles et/ou de moins en moins concentrées en substance utile. Leur exploitation deviendra donc de plus en plus énergivore et chronophage, ce qui impactera le prix des métaux. Par ailleurs, certaines productions minières sont relativement concentrées au sein d'un ou quelques pays. La Chine par exemple est la 1ère productrice mondiale de terres rares (95%), d'antimoine (87%), de tungstène (84%), de gallium (83%) et de germanium (79%) pour ne citer que les 5 premières ressources (WMD, World Refining Production & USGS cités par Bihouix & De Guillebon 2010, p.106). L'Union Européenne est très dépendante des productions minières chinoises.

Les problématiques concernant l'épuisement des ressources non renouvelables viennent du fait que ces dernières diminuent un stock limité et qui ne se réapprovisionne pas. Certaines matières premières extraites sont définitivement perdues, dispersées et/ou détériorées. Leur disponibilité est également menacée par la demande croissante d'une société disposant de plus en plus de ressources financières (Andersson & Rade cités par le PNUE, 2010). De plus, les ressources sont réparties de manière hétérogène, certains pays ayant l'exclusivité de la production de certains éléments (Nagasaka et al. cités par le PNUE, 2010).

2.1.2.2. Augmentation de la consommation mondiale

Plusieurs facteurs peuvent par ailleurs expliquer l'épuisement des réserves de métaux. La production métallique mondiale connaît une importante croissance depuis quelques années, et même si le taux de production de certains métaux stagne, les quantités annuellement produites demeurent toutefois non négligeables. Alors que dans les années 70, nos sociétés consommaient globalement moins d'une vingtaine de métaux de la table de Mendeleïev, elles en consommeraient une soixantaine depuis les années 2000 (Bihouix & De Guillebon 2010, p.25).

En 1980, 3,72 Gt de minerais métalliques ont été mondialement prélevés. Au début des années 2000, le volume de minerais extrait atteignait 5,8 Gt et les prévisions pour 2020 s'estiment à 11,14 Gt. La population mondiale a certes augmenté, mais pas dans les mêmes proportions que la consommation des ressources. Ainsi, au XXème siècle, même si la population a été multipliée par 3,6, l'extraction de minerais et minéraux a été multipliée par 27 (EcoInfo, 2012). Plusieurs raisons peuvent en partie expliquer cet accroissement : l'amélioration des techniques d'extraction aurait entraîné une baisse des coûts de production, des prix et par conséquent une hausse de la demande (PNUE cité par EcoInfo, 2012). Par ailleurs, les zones d'extraction ont été transférées des pays développés vers les pays

émergents, où la main d'œuvre y est sous payée, ce qui a également contribué à la diminution des prix et influencé la demande à la hausse (EcoInfo, 2012).

L'accroissement de la production est surtout mis en évidence pour des métaux tels que le fer (ressource métallique dont la production mondiale est la plus importante) et l'aluminium. Au début des années 2000, environ 1 Gt de fer et 24 Mt d'aluminium étaient produites annuellement (USGS, 2002). En 2007, les productions de fer et d'aluminium étaient respectivement de 1,9 Gt et 38 Mt (USGS, 2008). En 2017, 1,5 Gt de fer a été produite mondialement. La même année, l'aluminium a connu une production de 60 Mt (USGS 2018, pp.21; 89). En à peine 2 décennies, le taux de production du minerai de fer a ainsi augmenté de 140% et celui de l'aluminium de 150%. Même si les volumes et l'augmentation des productions sont importants, la problématique de la raréfaction ne se pose pas vraiment pour ces métaux, étant donné les grandes quantités de réserves et leur relative abondance dans la lithosphère (82000 ppm pour l'aluminium, 63000 ppm pour le fer). La situation est en revanche plus problématique pour des métaux moins abondants et de plus en plus utilisés dans le secteur des technologies de pointe comme par exemple l'indium (0,16 ppm), qui a vu sa production primaire passée de 400 tonnes au début des années 2000 à près de 900 tonnes en 2014 (+125%) ou encore le cobalt (30 ppm) avec une production évoluant de 40 kt au début des années 2000 à 100 kt en 2016 (BRGM, 2017). La production mondiale de tantale (1,7 ppm) a bondi de plus de 77% de 2011 à 2015, avec 874 tonnes produites en 2011 et 1551 tonnes en 2015 (WMD 2017, p.39).

2.1.2.3. Diminution de la teneur des gisements métallifères

Un autre facteur explicatif porte sur la baisse de concentration moyenne de métaux dans les minerais. Par exemple, la concentration du minerai de cuivre est passée de 1,8 à 0,8% de 1930 à 2010 (Bihouix & De Guillebon 2010, p.29). La diminution de concentration impacte également les minerais d'or, de plomb, de zinc, d'uranium (Mudd cité par EcoInfo, 2014b). La teneur des gisements va en diminuant, de même que le nombre de gisements, malgré d''importants investissements réalisés dans les années 2000. Entre 2002 et 2007, 2 à 10 milliards de dollars auraient été annuellement investis dans la recherche de nouvelles réserves ; il n'y a cependant pas eu de découvertes géologiques majeures, peu de gisements ayant été décelés (Bihouix & De Guillebon 2010, p.35).

2.1.2.4. Des minerais de moins en moins accessibles

La profondeur et la difficulté d'extraction interviennent également : les gisement de surface ayant été explorés en premier, il faudra par la suite creuser plus profondément pour trouver de nouveaux gisements métallifères. Il existe une interaction entre la quantité d'énergie utilisée par rapport à la quantité de métaux extraite (Bihouix & De Guillebon 2010, pp.31-32). Dans un premier temps, il va falloir une quantité plus importante d'énergie pour aller extraire les métaux situés plus profondément (la quantité d'énergie dépensée est proportionnelle à la profondeur). Les énergies fossiles étant également moins accessibles, il va falloir utiliser plus de métaux pour leur extraction. Ces métaux serviront entre autre à construire des machines telles que des excavatrices à godets servant à extraire le charbon, des plateformes gazières et pétrolières pour les ressources énergétiques offshore. Ces machines, utiles à l'extraction des ressources nécessitent des milliers de tonnes d'acier (13,5 kt pour une excavatrice, jusqu'à 100 kt d'acier pour une plateforme gazière). Cette interdépendance avait déjà été constatée à la fin des années 70 par l'économiste Georgescu-Roegen. Il remettait en cause le

développement industriel reposant sur les ressources fossiles et les matières premières nécessaires aux outils qui serviront à extraire ces ressources (Georgescu-Roegen cité par EcoInfo, 2012).

2.1.2.5. Un faible taux de recyclage des éléments en fin de vie

Les taux de recyclage de nombreux métaux en fin de vie sont relativement modestes. Aux débuts des années 2010, sur 60 éléments, plus de la moitié ne sont recyclés qu'à moins de 1% (Graedel et al. 2011a, p.19). Par ailleurs, le recyclage de certains métaux de base tels que le cuivre et le zinc contribue à la raréfaction de certains métaux, sous-produits du cuivre et du zinc. Le recyclage du zinc entraîne par exemple la diminution de l'offre d'indium et de germanium, ces derniers étant des sous-produits du zinc (Van Hoecke & Leroy 2011, p.29).

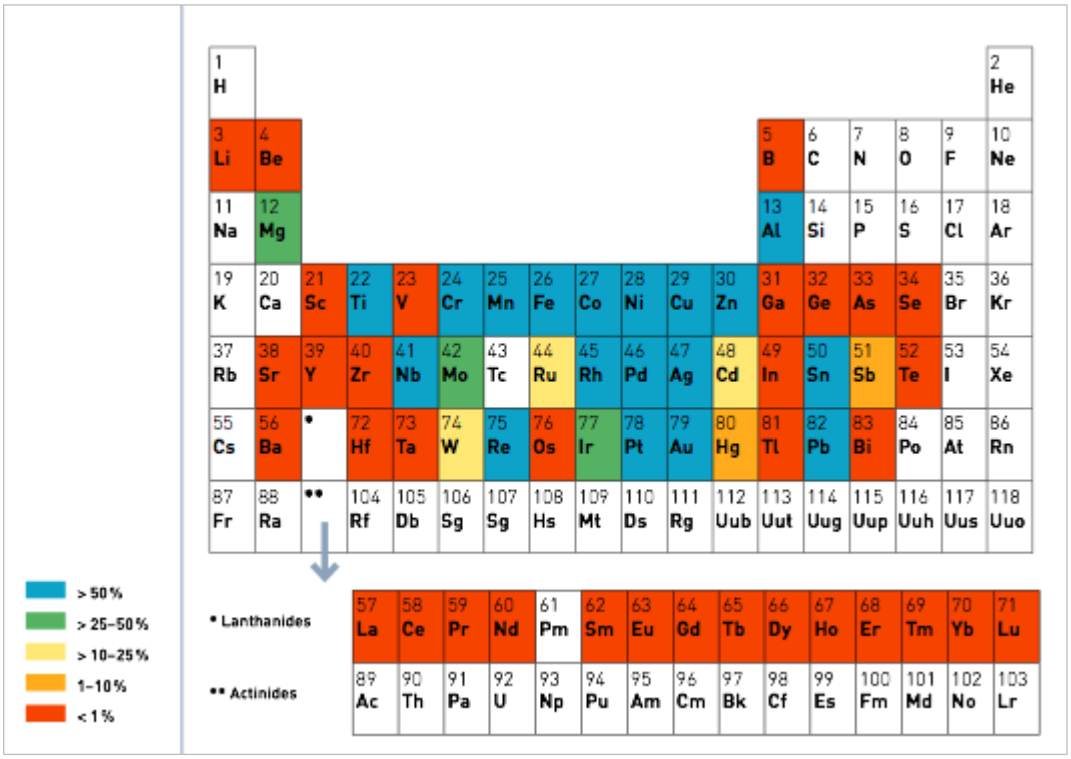

Figure 5 : Taux de recyclage de produits en fin de vie pour 60 éléments
Source : Graedel et al. 2011a, p.19

Le recyclage des métaux rares porte surtout sur ceux ayant de la valeur (métaux précieux tels que l'or, l'argent et le platine) mais aussi le cobalt (Hocquard & Samama 2012, p.10). Même si d'importantes améliorations ont été apportées grâce à la recherche dans les domaines de la métallurgie et du recyclage, les éléments dans les TIC demeurent difficilement recyclables en raison des nombreux alliages métalliques (métaux fusionnés entre eux) qui composent le hardware, mais aussi de la complexité des composants électroniques miniaturisés. Une autre limite du recyclage : la dégradation de la pureté du métal, suite à de nombreux processus de recyclage (la qualité du métal se détériore au fur et à mesure qu'il est recyclé).

Les déchets métalliques sont répartis en 3 catégories (EcoInfo, 2014c) :
- les déchets d'usine ou *home scraps* sont ceux générés durant la phase de production des marchandises. Ils sont généralement directement réinjectés dans le processus de production ;

- les nouveaux déchets ou *new scraps* concernent aussi des déchets venant du processus de production des marchandises. Ces déchets sont acheminés vers un marché des déchets (*scrap market*) où ils seront traités ;
- les vieux déchets (*old scraps*) sont ceux provenant des marchandises en fin de vie. Leur recyclage est contraignant lorsqu'ils apparaissent en petites quantités dans les produits.

Il convient aussi de bien distinguer les différentes notions de recyclage (EcoInfo, 2014c) :
le recyclage fonctionnel concerne les produits en fin de vie dont la séparation et le tri des métaux permet de les retransformer en matières premières et in fine permet l'obtention d'un métal ou d'un alliage. Le recyclage non fonctionnel quant à lui concerne les produits en fin de vie pour lesquels le métal est récupéré en tant que vieux métal, puis intégré par la suite dans un important flux de matériaux. Le recyclage non fonctionnel, même s'il permet le réemploi du métal, induit une perte irréversible de la propriété dudit matériau, ce dernier étant noyé parmi d'autres métaux.

2.1.2.6. La barrière minéralogique

Il faut aussi tenir compte de la "barrière minéralogique" qui distingue d'un côté les réserves, donc les ressources exploitables et qui sont plus ou moins concentrées en substance utile, et de l'autre la majorité des métaux présents au sein de la lithosphère et de l'hydrosphère mais qui demeurent inaccessibles en raison de leur très faible concentration en substance utile (Skinner 1976, p.263). Ces derniers ne sont donc pas exploitables en raison de critères techniques, économiques et énergétiques. Autrement dit, la problématique de la durabilité ne concerne pas directement l'épuisement des métaux rares à proprement parler mais plutôt la possibilité de l'exploitation de leurs réserves sur le long terme.

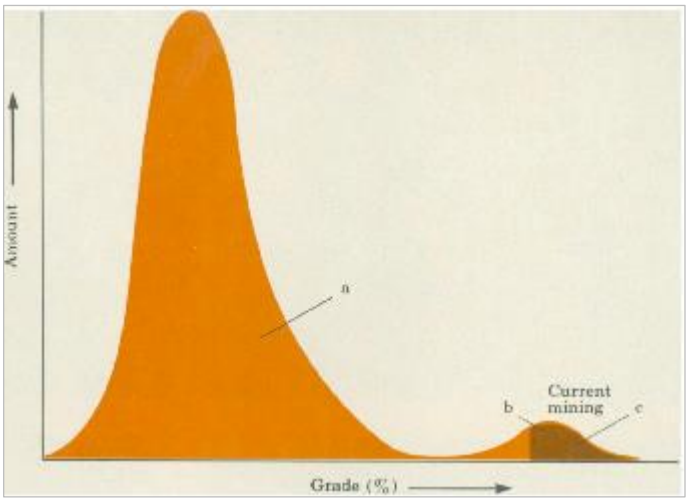

Figure 6 : Distribution bimodale de la barrière minéralogique
Source : Skinner, 1976

On distingue un premier pic de distribution caractérisé par un volume important de ressources, mais avec une très faible teneur en substance utile et un deuxième pic où les métaux ont été réunis par minéralisation géochimique (Bihouix & De Guillebon 2010, p.30).

2.1.3. Les ressources minérales métalliques

2.1.3.1. Les métaux critiques

Parmi les métaux, plusieurs termes existent aussi pour qualifier ceux en voie de raréfaction. Les termes de métaux rares, technologiques ou encore de matières premières stratégiques sont souvent utilisés pour désigner les métaux nécessaires à la high-tech et aux TIC. De manière générale, dans le cadre d'études au sein de l'Union Européenne, les termes de criticité et métaux critiques sont utilisés pour nommer ces ressources métalliques primordiales à nos sociétés (à ne pas confondre avec la criticité utilisé dans le domaine de la gestion des risques industriels). Plusieurs définitions existent autour de la criticité des métaux, ces derniers étant différemment utilisés selon l'époque et le lieu. Il n'y a toutefois pas de définition officielle de l'expression de criticité.

Ces éléments sont primordiaux pour les nouvelles technologies mais ont aussi un rôle concernant la transition énergétique. Le développement d'énergies renouvelables implique l'utilisation de néodyme et de dysprosium qui se trouvent dans les aimants permanents des génératrices d'éoliennes, ou encore d'indium et de gallium dans certains panneaux photovoltaïques. Par ailleurs, une éolienne d'une puissance d'1 MW nécessitera 10 fois plus d'acier par kWh produit qu'une centrale thermique (Bihouix & De Guillebon 2010, p.32). Les véhicules électriques exigent quant à eux du lithium et du cobalt, tous deux nécessaires au stockage de l'énergie. Ces arguments peuvent toutefois être nuancés, certains métaux nécessaires aux énergies renouvelables pouvant être substitués. Il y aura en revanche une diminution de l'efficience énergétique de la technologie considérée.

2 critères essentiels sont retenus pour définir un métal critique au sein de l'UE (Commission Européenne 2017a, pp.7;11) :

- le risque d'approvisionnement, à savoir le niveau de concentration de la production mondiale (situation monopolistique de la production par un nombre restreint de pays), la disponibilité dans le temps, le risque géopolitique lié aux producteurs, la capacité de recyclage, l'approvisionnement en provenance du recyclage ou encore la substituabilité du métal concerné ;
- leur importance économique, soit leur application industrielle, leur taux d'utilisation au sein d'un secteur économique, la part de valeur ajoutée à laquelle ils contribuent.

Un métal est donc jugé critique si sa production est concentrée dans un pays ou un petit groupe de pays (production qui induit un monopole). L'indium par exemple, était produit à 46% par la Chine en 2015 (USGS, 2017). C'est également elle qui, la même année a produit plus de 68% du germanium raffiné et 83% du gallium mondial. La Chine est aussi la principale productrice d'oxydes de terres rares, avec une production minière annuelle de 105 kt sur 2016 et 2017, soit plus de 80% de la production mondiale (USGS 2018, p.133). En 2016, 72% du platine était produit par l'Afrique du Sud, qui détenait sur la même période près de 82% des réserves mondiales. La même année, la République Démocratique du Congo produisit près de 65% du cobalt mondial (BRGM, 2017). L'accès à ces métaux pourrait donc s'avérer problématique en cas de tensions géopolitiques envers ces pays.

La criticité ne prend cependant pas en compte les disponibilités géologiques des différents métaux. 27 matières premières critiques ont été retenues par la Commission Européenne (dont les platinoïdes et

les terres rares légères et lourdes, elles-mêmes composées respectivement de 5, 5 et 10 métaux[2]). Parmi elles, se trouvent de nombreux métaux nécessaires aux nouvelles technologies (TIC et technologies vertes confondues). A noter que pour la substituabilité, la Commission Européenne ajoute à son analyse un "indice de substitution" qui permet de mesurer la difficulté à substituer le métal concerné par un autre matériau (Commission Européenne 2017b, pp. 4-8).

Antimoine	Baryte	Béryllium	Bismuth	Borate	Cobalt
Charbon à coke	Spath fluor	Gallium	Germanium	Hafnium	Hélium
Indium	Magnésium	Graphite naturel	Caoutchouc naturel	Niobium	Phosphate naturel
Phosphore	Scandium	Silicium métal	Tantale	Tungstène	Vanadium
Platinoïdes	TR lourdes	TR légères			

Tableau 1 : Liste des 27 matières premières critiques pour l'Union Européenne
Source : Commission Européenne 2017b, pp.4-8

2.1.3.2. Les classes de métaux

On peut observer 4 grandes classes de métaux : les métaux ferreux, non ferreux, précieux et spéciaux (Graedel et al. 2011b, p.11). Il ne faut pas confondre métaux critiques et métaux précieux. Ces derniers se définissent comme étant très rares et ayant une grande valeur économique. La plupart des métaux précieux sont classés comme critiques (à l'exception de l'or, de l'osmium et de l'argent), mais tous les métaux critiques ne sont pas forcément des métaux précieux. Le niobium fait ainsi partie des métaux ferreux, le cobalt et le magnésium sont parmi les non ferreux, le tantale et l'indium dans la catégorie des métaux spéciaux.

2.1.4. L'obsolescence programmée

Par définition, il s'agit de la perte de valeur d'un équipement avant son usure matérielle. L'obsolescence programmée regroupe l'ensemble des techniques destinées à raccourcir la durée de vie d'un produit, dans l'objectif d'augmenter son taux de remplacement. Il faut distinguer plusieurs types d'obsolescence (EcoInfo, 2012) :

- l'obsolescence technique, qui consiste à rendre le coût de réparation similaire au coût de remplacement et qui, économiquement va inciter à acheter un nouveau bien. Les niveaux de maintenance et de réparabilité du produit sont faibles ;

- l'obsolescence indirecte : les composants utiles au produit ne sont plus disponibles à l'achat ;

- l'obsolescence notifiée : l'utilisateur est informé d'une panne, ce qui par la suite entravera l'utilisation du produit (exemple d'une notification d'un niveau d'encre bas dans les cartouches

[2] Prise en compte de 5 platinoïdes sur 6, l'osmium n'étant pas considéré comme critique : iridium, palladium, platine, rhodium, ruthénium.
TR légères : Cérium, lanthane, néodyme, praséodyme, samarium.
TR lourdes : Dysprosium, erbium, europium, gadolinium, holmium, lutétium, terbium, thulium, ytterbium, yttrium.

d'imprimantes, avec l'impossibilité de continuer à imprimer, quand bien même la cartouche d'encre ne serait pas totalement vide) ;

- l'obsolescence par incompatibilité : il s'agit de l'incompatibilité logicielle (non prise en compte des anciennes versions d'un logiciel, d'un format de fichier trop ancien ou encore d'un système d'exploitation dont les mises à jours ne sont plus réalisées) ou matérielle (lecteurs de disquettes et CD-ROM absents des nouvelles machines) ;

- l'obsolescence psychologique : il s'agit du désir de suivre les derniers gadgets tendances et à la mode. De gros investissements sont ainsi réalisés par la publicité, le marketing et la R&D pour nous faire croire que nous avons besoin de tel ou tel nouveau produit, qui se distingue par une nouvelle fonctionnalité ;

- l'obsolescence écologique : le producteur va mettre en avant un produit plus "écologique", en raison de son efficience énergétique par exemple. Il y a par la suite un effet rebond qui se caractérise par l'annulation du bénéfice environnemental dû à l'augmentation de la consommation des nouveaux équipements plus efficients. Même si chaque produit est moins consommateur individuellement, l'économie d'énergie est annulée par la consommation totale des nouveaux biens.

Ces formes d'obsolescence conduisent au renouvellement forcé de certains équipements, donc indirectement à une augmentation de la consommation de ressources et in fine à l'accélération de l'épuisement de ces dernières.

2.2. Présentation des principaux métaux utilisés dans les TIC

De nombreux matériaux entrent dans la composition des équipements propres aux nouvelles technologies de l'information: l'argent pour les conducteurs, l'indium dans les écrans LCD, le cuivre pour les connecteurs, le germanium dans les fibres optiques, le silicium pour les puces électroniques, le palladium et le tantale pour les condensateurs (EcoInfo, 2012). Une présentation de quelques métaux permet d'avoir une appréciation de ce que représente la partie hardware des outils technologiques. 12 métaux sont présentés en fonction de leur origine, production, réserves, utilisation, taux de recyclage et leur potentielle substitution. Les données à propos de la production et des réserves portent sur l'année 2017, sauf si une autre information est stipulée.

2.2.1. L'argent (Ag)

L'argent est le meilleur matériau conducteur d'électricité. C'est grâce à cette propriété que plus de 20% de l'argent métal est destiné à l'électronique et le secteur électrique, avec 6,6 kt utilisée. Environ 1/3 de la production minière provient de mines de plomb et/ou de zinc, 30% de mines d'argent et 26% de mines de cuivre, le reste venant de mines d'or (Bihouix & De Guillebon, 2010 p.229). L'argent est un métal rare et précieux ; son abondance crustale est de 0,08 ppm.

Les deux principaux pays producteurs sont le Mexique et le Pérou avec des productions respectives de 21 et 17% (The Silver Institute cité par le BRGM, 2017). La production mondiale d'argent est estimée

à 25 kt et les réserves d'environ 530 kt (USGS 2018, p.151). Son caractère précieux lui procure un taux de recyclage en fin de vie supérieur à 50% (Graedel et al. 2011a, p.19).

Entre 1945 et 2016, le taux de croissance annuel moyen de la production minière se chiffre à 2,4%. Au début des années 90, 15 kt d'argent métal étaient annuellement produits. En à peine 3 décennies, la production a augmenté de 80% (BRGM, 2017).

2.2.2. Le cobalt (Co)

Le cobalt est un sous-produit du cuivre (65%) et du nickel (33,5%), c'est-à-dire un résidu métallique apparaissant lors de la fabrication de ces derniers (BRGM, 2017). Il fait partie des métaux non ferreux (Graedel et al. 2011b, p.11). Son utilisation principale concerne les batteries rechargeables (50%) et les superalliages en aéronautique (18%). Il est principalement produit en République Démocratique du Congo, qui assure près de 60% de la production mondiale et détenait près de la moitié des réserves totales en 2017 (USGS 2018, p.51). La production minière mondiale était d'environ 50 à 60 kt dans les années 2000. Elle se situe à 110 kt sur 2017, soit un taux de croissance de 120% en à peine 20 ans. Le métal a par ailleurs connu une envolée de son cours ces 2 dernières années, passant de 20000 €/t début 2016 à 55000 €/t fin 2017 (BRGM, 2017). La totalité des réserves connues mondialement s'estime à 7,1 Mt (USGS 2018, p.51).

Le cobalt est relativement bien recyclé, avec un taux de recyclage en fin de vie de 68% (PNUE cité par BRGM, 2017). Néanmoins, le recyclage du cobalt dans les produits en fin de vie est loin de satisfaire la demande de l'UE. Son taux de recyclage en fin de vie est nul par rapport au besoin d'approvisionnement de l'UE (Commission Européenne 2017, p.5). La substitution du cobalt est possible, mais pas sans perte de performance. Dans les aimants permanents, il peut être remplacé par le néodyme, une terre rare également critique. Dans les batteries, le cobalt pourrait être substitué par du nickel (BRGM, 2017).

2.2.3. Le cuivre (Cu)

Plus de 30% de l'usage du cuivre est destiné aux matériels électriques et électroniques. Parmi les métaux non précieux, il s'agit du meilleur conducteur électrique (le cuivre conduit mieux l'électricité que l'or), le meilleur conducteur étant l'argent. En raison de cette propriété, le cuivre est difficilement substituable sans perte de performance (BRGM, 2018).

Les principaux pays producteurs sont le Chili (27%) et le Pérou (12,1%). La production mondiale a atteint 19,7 Mt et les réserves s'estiment à 790 Mt (USGS 2018, p.53). La production minière mondiale a évolué de 13 Mt aux débuts des années 2000 à plus de 20 Mt en 2016 (augmentation de 54%). Certains bureaux de recherches estiment une consommation annuelle de cuivre à 25 Mt pour 2020 (BRGM, 2018). Par ailleurs, le cuivre est recyclé à plus de 50% (taux de recyclage qui prend en compte les chutes de fabrication et les produits en fin de vie) (BRGM, 2018).

2.2.4. Le dysprosium (Dy)

De la famille des terres rares lourdes, la quasi-totalité du dysprosium est utilisée dans les aimants permanents. Dans les équipements électroniques, il apparaît dans les disques durs d'ordinateurs, les imprimantes, les appareils photos numériques... Il se retrouve également dans les génératrices d'éoliennes. La production minière mondiale était de l'ordre de 1,45 kt en 2014. Les réserves connues en 2015 s'estimaient à 690 kt, estimation faite en fonction des réserves globales. Le principal pays producteur est la Chine (97% en 2014). Il n'est pas substituable dans les aimants permanents sans perte de performance (BRGM, 2016) et n'est recyclé qu'à moins de 1% (Graedel et al. 2011a, p.19).
2.2.5) L'étain (Sn)

Plus de 40% de l'étain est utilisé dans les soudures électroniques. L'étain est potentiellement substituable par des résines époxydes (BRGM, 2017). Les 2 principaux producteurs sont la Chine (23%) et l'Indonésie (17%). Les réserves sont de 4800 kt et la production annuelle de 290 kt (USGS 2018, p.173). Le taux de recyclage de l'étain en fin de vie dépasse les 50% (Graedel et al. 2011a, p.19).

2.2.5. Le gallium (Ga)

Le gallium est principalement utilisé dans les semi-conducteurs électroniques et optoélectroniques (87%). C'est un sous-produit de l'aluminium et il est substituable par du phosphure d'indium en optoélectronique et par des LED organiques pour l'éclairage. De 2005 à 2015, le taux de croissance annuel moyen de la production mondiale de gallium a évolué de 20,2% par an, passant de 70 t à 440 t. Etant donné qu'il n'y a pas d'évaluation normalisée des réserves de gallium, certains études les évaluent à 1350 kt, estimées selon les réserves de bauxite (BRGM, 2016). Il fait partie des métaux spéciaux et n'est recyclé qu'à moins de 1% (Graedel et al. 2011a,b, pp. 11 ; 19).

2.2.6. Le germanium (Ge)

Le germanium est utilisé à ⅓ dans les fibres optiques, à 15% dans les applications électroniques et les cellules solaires photovoltaïques. C'est principalement un sous-produit du zinc ; il n'existe cependant pas d'évaluation des réserves de germanium contenues dans les minerais de zinc. Le germanium peut se substituer par de l'arséniure de gallium ou de l'antimoniure d'indium, qui sont également critiques (BRGM, 2015). La Chine est la principale productrice minière, avec 88 t produites sur une production mondiale de 134 t (USGS 2018, p.69). Il est recyclé à moins de 1% dans les produits en fin de vie (Graedel et al. 2011a, p.19).

2.2.7. L'indium (In)

L'indium est surtout utilisé dans les écrans plats et les soudures (66%) ; c'est principalement un sous-produit du minerai de zinc. Il est substituable par de l'oxyde de zinc ou d'étain dopé en proportion variable ; ces derniers sont toutefois moins performants. De 2000 à 2015, la production minière d'indium a doublé, passant de 400 à 800 t (BRGM, 2017). Comme pour le germanium et le gallium, il n'y a pas d'évaluation normalisée des réserves, les dernières données datant de 2007. Il y avait à cette

époque 11 kt de réserves (16 kt de réserves base) pour une production mondiale de 510 t, assurée à 49% par la Chine (USGS, 2008). La production mondiale actuelle s'estime à 720 t (USGS 2018, p.79). Il se recycle à moins de 1% dans les produits en fin de vie (Graedel et al. 2011a, p.19). Il est également possible d'estimer les réserves d'indium en fonction des minerais de zinc, l'indium étant un sous-produit de ce dernier. Certaines études de 2011 estiment ainsi à environ 12,4 kt les réserves d'indium contenues dans les minerais de zinc (Tolcin cité par EcoInfo, 2012).

2.2.8. Le lithium (Li)

Le lithium se retrouve dans les batteries rechargeables (37% de l'utilisation mondiale). Des substitutions sont possibles pour le lithium des batteries, mais les technologies sont peu performantes ou plus coûteuses. (BRGM, 2017). La production minière s'estime à 43 kt. 43% sont produits par l'Australie (18,7 kt), 33% pour le Chili (14,1 kt), qui par ailleurs détient 47% des réserves mondiales. Ces dernières se chiffrent à 16 Mt (USGS 2018, p.99). Il se recycle à moins de 1% dans les produits en fin de vie (Graedel et al. 2011a, p.19).

2.2.9. Le néodyme (Nd)

Le néodyme fait partie des terres rares légères. La majeure partie du néodyme (89%) est utilisée dans les aimants permanents. Les propriétés magnétiques du néodyme permettent de fabriquer les plus puissants aimants permanents connus à ce jour. Les réserves de 2014 s'estimaient à une fourchette comprise entre 9,3 et 13,5 Mt. Il n'existe pas de substitut non critique au néodyme (il peut se remplacer par du praséodyme qui se trouve être également critique). 88% de la production minière mondiale de néodyme était réalisée par la Chine en 2014. (BRGM, 2015). Comme pour l'ensemble des terres rares, le taux de recyclage dans les produits en fin de vie s'estime à moins de 1% (Graedel et al. 2011a, p.19).

2.2.10. Le palladium (Pd)

Surtout employé dans la catalyse automobile (79%), ce métal fait partie de la famille des platinoïdes. Le palladium est employé à près de 10% par l'industrie électrique et électronique. Il y aurait 6 kt de réserves de palladium, plus de la moitié détenue par l'Afrique du Sud (52%) (BRGM, 2017). C'est un métal rare et précieux (0,0063 ppm), recyclé à plus de 50% dans les produits en fin de vie (Graedel et al. 2011a, p.19). Il serait substituable par le cuivre et le nickel dans le domaine de l'électronique (Hagelüken & Meskers 2010, p.174). 210 t de palladium sont produits annuellement, principalement par la Russie (39%) et l'Afrique du Sud (37%) (USGS 2018, p.125).

2.2.11. Le platine (Pt)

Comme le palladium, il fait partie de la famille des platinoïdes et est essentiellement employé dans la catalyse automobile (40%). Les réserves de platine s'estiment à 13 kt et sont détenues par l'Afrique du Sud à 82% (BRGM, 2017). C'est également un métal rare (0,0037 ppm) et précieux, il est recyclé à plus de 50% dans les produits en fin de vie (Graedel et al. 2011a, p.19). La production annuelle est

de 200 t, le principal pays producteur est l'Afrique du Sud (70% de la production mondiale) (USGS 2018, p.125).

2.2.12. Le tantale (Ta)

Le tantale se retrouve dans les condensateurs miniaturisés (39% de l'utilisation mondiale). Les condensateurs en céramique et en aluminium peuvent se substituer au tantale, mais avec des performances moindres (BRGM, 2015). Le tantale fait partie des métaux spéciaux et se recycle à moins de 1% (Graedel et al. 2011a, p.19). Les réserves de 112 kt sont réparties entre l'Australie (70%) et le Brésil (30%). La production annuelle de 1,3 kt est principalement effectuée par le Rwanda (30%) et la République Démocratique du Congo (28%) (USGS 2018, p.165).

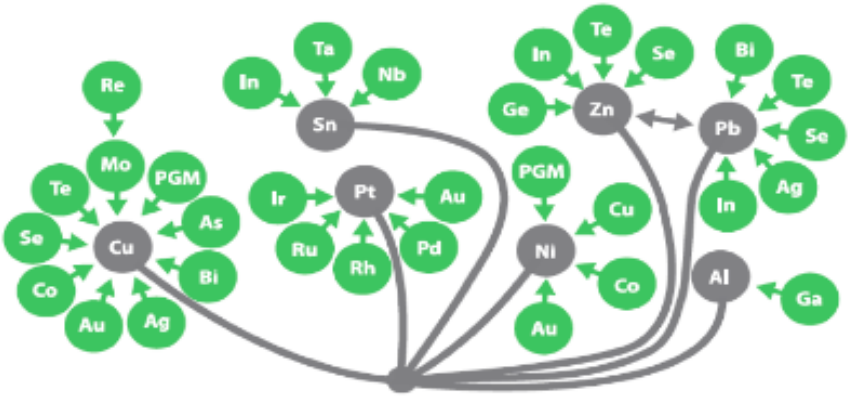

Figure 7 : Les métaux de base et leurs sous-produits
Source : Hagelüken & Meskers, 2010 repris par la Commission Européenne 2018, p.25

2.3. Les impacts environnementaux liés à l'épuisement des métaux

L'impact de l'épuisement des ressources métallifères sur l'environnement n'est pas directement mis en évidence, contrairement à l'épuisement de certaines ressources biotiques (organiques). Un phénomène tel que la déforestation entraîne des impacts environnementaux directs : perte de biodiversité due à la destruction des habitats naturels, dégradation des écosystèmes, changement climatique (les forêts étant des puits de carbone, la coupe d'arbres va contribuer à relâcher le CO_2 auparavant stocké dans l'atmosphère)…

La surexploitation des ressources halieutiques entraîne aussi directement des coûts environnementaux directs qui apparaissent clairement : dérèglement des écosystèmes via la modification des chaînes trophiques (la surpêche des grands requins entraîne l'augmentation de leurs proies, en l'occurrence des raies ; ces dernières vont alors chasser d'autres espèces de poissons plus petits, ce qui va décliner in fine le stock de ces derniers) ; dégradation des biotopes marins…

La raréfaction des métaux, même si elle n'engendre pas de conséquences directes sur la biosphère, entraîne malgré tout d'autres problématiques environnementales. Elle est tout d'abord contraire à la définition de développement durable, qui stipule que notre mode de développement actuel ne doit pas compromettre celui des générations futures (Brundtland, 1987). Or, leur développement dépend en

partie de ces ressources. A moins d'une rupture technologique (dans des domaines comme l'énergie ou en physique des matériaux), la pénurie de certains métaux pourrait entraver leur progrès, leur prospérité et donc la qualité de leur vie.

On peut analyser différents impacts environnementaux indirects qui vont être liés à l'énergie supplémentaire nécessaire à l'extraction de ressources de moins en moins faciles d'accès (consommation d'énergie qui, selon le mix énergétique, aura une conséquence sur la hausse de la teneur en CO_2 atmosphérique, ce qui entraîne un impact sur le changement climatique). Par ailleurs, de nombreux métaux sont nécessaires aux technologies vertes (énergies renouvelables) qui sont elles même essentielles à l'adaptation au changement climatique et à la transition énergétique. Différents éléments critiques apparaissent en effet dans certains types de panneaux photovoltaïques (gallium et indium), dans les éoliennes et dans les véhicules électriques (terres rares).

Les minerais étant moins concentrés et situés plus profondément, ils laisseront automatiquement derrière eux des résidus miniers plus volumineux (Ademe, 2017). Les minerais se composent en effet d'une partie utile (le métal recherché) mais aussi de morceaux de roches stériles (la gangue) et de substances nuisibles (comme par exemple l'arsenic ou le phosphore dans l'étain et le fer). Pour un minerai concentré à 1%, le volume minimum de déchets est de 100 tonnes par tonne de métal produit. Ces déchets peuvent contenir des traces de métaux lourds (éléments-traces métalliques) potentiellement toxiques, ce qui impacte les écosystèmes locaux (Bihouix & De Guillebon 2010, p.41).

L'épuisement des métaux n'impacte pas directement l'environnement. Leur exploitation contribue toutefois à des impacts directs : utilisation de cyanure ou de mercure dans certains procédés d'extraction (l'or) ; utilisation de solvants et d'acides pour le traitement des minerais qui entraîne des pollutions se répercutant sur le long terme, même après la fin de l'exploitation du gisement (drainage minier acide) (Bihouix & De Guillebon 2010, p.41).

La production d'une tonne de cuivre demande concrètement : une centaine de kg d'explosifs (80 à 150 kg de nitrate d'ammonium), 40 à 150 tonnes de déchets, 500 kg d'acide sulfurique, de 20 à 2500 kg de dioxyde de soufre émis dans l'air ((Bihouix & De Guillebon 2010, p.41).

Après avoir présenté les TIC et mis en évidence les problématiques associées à l'épuisement des ressources, un indicateur de durabilité est proposé dans l'optique d'évaluer la durabilité d'un outil tel qu'un ordinateur portable en fonction de plusieurs critères.

II. Conception d'un indicateur d'évaluation de durabilité (IED) applicable aux nouvelles technologies

1. Présentation générale d'indicateurs environnementaux

L'indicateur est une variable qui se base sur des mesures et présente de manière précise un phénomène (Joumard & Gudmundsson cités par Blaser, Böni & Wäger 2012, p.2). De manière générale, un indicateur a pour vocation la communication et l'aide à la décision. Il doit être pertinent, facile à comprendre et à interpréter.

1.1. Les indicateurs d'épuisement des ressources en ACV

En analyse de cycle de vie, les impacts sont déterminés en fonction de plusieurs catégories telles que le changement climatique, la destruction de l'ozone, l'eutrophisation, l'atteinte aux ressources abiotiques, la qualité des écosystèmes… Ils sont quantifiés selon différents indicateurs qui peuvent être la quantité de dioxyde de carbone émise, la quantité d'eau ou d'énergie utilisée, le risque pour la santé humaine ou les écosystèmes.

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation environnementale, comme par exemple EcoIndicator 99, CML 2002, ReCiPe 2008… Elles se distinguent par la nature et le nombre de catégories d'impacts et/ou de dommages, le fait de pouvoir pondérer ou normaliser, l'ancienneté de la méthode (Leroy, 2009 & Jolliet, 2010, cité par EcoInfo, 2012).

1.1.1. ReCiPe 2008

Cette méthode propose un indicateur d'épuisement des ressources minérales qui se quantifie monétairement. Les ressources minérales étant de moins en moins accessibles, leur extraction nécessitera logiquement plus de temps et d'énergie, ce qui impactera in fine les coûts de production. L'impact se caractérise par les coûts supplémentaires induits par l'augmentation de ces coûts de production (extraction) et que la société devra in fine supporter (Goedkoop & De Schryver 2009, p.110).

L'impact économique d'un métal i, exprimé en dollars se calcule ainsi : (Augmentation du coût ($/kg) / Masse de i extrait (kg)) × Production annuelle de i (kg/an) × Masse de i extrait (kg) × Valeur Actuelle Nette de dépense d'un dollar par an sur une période donné (année).

L'impact peut se calculer aussi via des valeurs monétaires : (Augmentation du coût par $ de valeur produite ($/$) / Valeur de i extrait ($)) × Valeur de la production annuelle ($/an) × Valeur Actuelle Nette de dépense d'un dollar par an sur une période donné (année) × Valeur de i extrait ($).

1.1.2. CML 2002

L'Institut des Sciences de l'Environnement de l'Université de Leiden a mis au point en 2002 un indicateur permettant de quantifier l'impact de l'épuisement des ressources abiotiques. Ces dernières regroupent les ressources minérales telles que les métaux mais également les ressources fossiles que sont le pétrole, le gaz et le charbon. Il convient en premier lieu de calculer un coefficient, le "potentiel d'épuisement de la ressource abiotique" ou Abiotic Depletion Potential (ADP). Une distinction est spécifiée sur les différentes acceptions : les "réserves ultimes" renvoient à la quantité de ressource dans la croûte ; les "réserves base" (réserves démontrées mais non exploitable économiquement) ; les "réserves" (la partie de la réserve base qui est exploitable économiquement) (Guinée et al. 2002, p.5).

Dans la formule de référence, l'ADP se détermine en divisant le taux d'extraction annuel d'un métal par le carré de ses ressources (ultimate reserves), puis de diviser le tout par le taux d'extraction d'un métal de référence (l'antimoine) lui-même divisé par le carré des ressources d'antimoine :

ADP = (Taux d'extraction de i / ressources de i ²) / (taux d'extraction de l'antimoine / ressources d'antimoine ²)

Le taux d'extraction correspond à la production annuel du métal, exprimé en quantité extraite par an (Itsubo & Inaba 2014, p.53).

Plus ce facteur est grand et plus le métal est considéré comme rare. La contribution à l'épuisement de la ressource se calcule finalement par l'ADP multiplié par la masse du métal considéré (Guinée et al. 2002, pp.12-13). La méthode de référence se base sur les ressources, mais permet des alternatives en considérant soit les réserves base et les taux d'extraction, soit les réserves uniquement.

Le problème de l'épuisement considéré ici est un problème de dilution de la ressource : cette dernière est en fait trop dispersée dans l'environnement et ne constitue donc plus in fine un stock de ressources en elle-même. L'ADP peut ainsi considérer le problème de l'épuisement comme un problème de dispersion qui induit une réduction de la concentration des réserves (Oers & Guinée 2016, p.8)

En analysant la formule de calcul de l'ADP, il est possible de déterminer à partir de quelle quantité de ressources un métal sera considéré comme rare, en fonction d'un taux d'extraction donné. Sur 2017, la production d'antimoine a été de 150 kt et les réserves s'estiment à 1500 kt (USGS 2018, p.23). Les ressources totales connues d'antimoine s'estiment à 4000 kt (BRGM, 2012a).

Soit R_i la quantité de ressources à déterminer pour le métal i ;
- t_i le taux d'extraction du métal i (production annuelle de i);
- t_{Sb} le taux d'extraction de l'antimoine (production annuelle d'antimoine) ;
- R_{Sb} les ressources d'antimoine ;

$$R_i = \sqrt{(R_{Sb}^2 / t_{Sb})} \times \sqrt{t_i}$$

Pour 2017, on a $R_i = \sqrt{((4000^2 / 150) \times t_i)} = \sqrt{(106\,667 \times t_i)}$

Cette formule permet de déterminer en fonction d'un taux d'extraction, une valeur plancher de ressources en deçà de laquelle l'élément sera considéré comme étant plus rare que l'antimoine, avec un ADP supérieur ou égal à 1.

En considérant une production annuelle hypothétique de 10 kt, et par résolution de l'équation, la valeur de R_i sera de 1032,8 kt. Conclusion : un métal ayant un taux d'extraction annuel de 10 kt sera considéré comme contribuant à l'épuisement à partir du moment où ses ressources seront inférieures ou égales à 1032,8 kt.

Taux d'extraction (kt / an)	0,5	1	5	10	25	50	75	100
Seuil plancher de rareté des ressources (kt)	230,9	326,6	730,3	1032,8	1633	2309,4	2828,4	3266

Tableau 2 : Seuil de rareté des ressources en fonction du taux d'extraction (pour 2017)
Source : calculs de l'auteur

La formule de l'ADP attribue une plus grande importance à la quantité des réserves qu'au taux d'extraction (à la production) du métal. Le potentiel d'épuisement abiotique est en effet inversement proportionnel au carré des ressources du métal considéré, ce qui implique qu'un métal ayant relativement peu de ressources sera considéré comme étant plus rare, quand bien même son taux d'extraction serait moins élevé. Ainsi, si les ressources d'un métal diminuent de moitié, son ADP quadruple ; si ses ressources triplent, son ADP se divise par 9. Or, les ressources ne déterminent pas à elles seules le risque d'épuisement d'un élément. Un métal ayant un taux de production élevé aura une durée de "vie" plus courte.

1.1.3. Eco-indicator 99

Dans cette méthode, les auteurs considèrent l'impact sur les ressources minérales via la quantité d'énergie supplémentaire induite par l'épuisement d'une ressource. La méthode se fonde sur le fait suivant : la qualité des ressources diminue avec le temps, ce qui induit un effort d'extraction croissant à terme. Cette baisse de qualité des ressources et l'augmentation de l'effort dans le temps sont alors utilisés pour définir les dommages sur les ressources minérales. Le paramètre important de cet indicateur réside dans la concentration du minerai. Si cette dernière diminue, l'effort énergétique d'extraction de la ressource sera plus important (Goedkoop & Spriensma 2000, p.76).

1.2. D'autres indicateurs liés à la durabilité et aux ressources

1.2.1. Le score de réparabilité

Ifixit est un site web qui regroupe une communauté de bricoleurs, qui œuvrent dans la réparation d'objets high-tech. Pour chaque produit, un score de réparabilité de 0 à 10 est indiqué, 10 étant le score des appareils les plus faciles à réparer. Le score est attribué en fonction de la difficulté à ouvrir le produit, à remplacer les principaux éléments et selon le type de fixations. Les scores sont très

variables d'un produit à l'autre, et concernent tout autant les tablettes, smartphones et laptops. La modularité des éléments et l'utilisation d'outils universels accordent un bonus au score.

1.2.2. L'indice de durée de vie

Le ministère français de la Transition écologique et solidaire propose dans sa feuille de route économie circulaire un indice de durée de vie, calculé en fonction de 10 critères relatifs à la robustesse et à la réparabilité, en estimant une note sur 10. Cet indice pourrait s'appliquer à de l'électroménager ou du matériel de bricolage. Les principaux critères retenus sont la mise à disposition et le coût des pièces de remplacement, la simplicité de démontage, la modularité et la possibilité de remplacement des composants mais aussi la mise à disposition de la documentation technique de réparation et la procédure à suivre pour effectuer la réparation.

1.2.3. L'indicateur MIPS (matière indispensable par unité de service)

Cet indicateur mesure la quantité de matière utile à un service. Il prend en compte 5 catégories que sont les ressources abiotiques, biotiques, les sols, l'eau et l'air. Cet indicateur se focalise sur les flux de matières directs et indirects nécessaires au cycle de vie d'un produit. Ces flux réunissent aussi les combustibles fossiles et la quantité d'eau essentielle au produit. Selon l'indicateur, l'obtention d'un kg de platine passe par l'utilisation de plus de 500 tonnes de matière, tandis qu'un kg de cuivre n'aurait besoin "que" de 0,7 tonne de matière. L'avantage de l'indicateur MIPS réside dans sa facilité de compréhension. Néanmoins, sa pertinence est relativement limitée étant donné l'agrégation de plusieurs types de matières et matériaux différents en son sein (Blaser, Böni & Wäger 2012, p.6).

1.2.4. L'empreinte écologique

Cet indicateur mesure la superficie nécessaire à la consommation d'une population. La surface prend en compte les terres et les eaux qui permettent la production de ressources mais aussi l'absorption de déchets (Kitzes cité par l'Institut de la statistique du Québec 2009, p.15). L'indicateur se caractérise sous forme d'hectares globaux, qui représente un hectare hypothétiquement productif. L'empreinte écologique détermine donc la pression de la population sur les ressources.

L'indicateur peut caractériser les impacts sous forme de planètes virtuellement consommées et ainsi distinguer une population durable et une population non durable car trop consommatrice. La valeur de référence prise pour comparaison est la capacité biologique de la planète. La capacité biologique (ou biocapacité) représente la capacité des écosystèmes à concevoir des matières premières utiles et absorber les déchets générés. La différence entre l'empreinte écologique et la biocapacité indique le solde écologique, qui permet de déterminer si la consommation des ressources est durable ou pas.

Le Québec avait par exemple une empreinte écologique de 6 hectares par personne. Parallèlement, sa biocapacité était de 1,8 hectare global par personne. Si tous les humains vivaient comme les habitants du Québec, il faudrait donc plus de 3 planètes pour pouvoir supporter leur consommation (Institut de la statistique du Québec 2009, p.13).

2. Conception de l'indicateur d'évaluation de durabilité (IED)

2.1. Mise en contexte

2.1.1. Présentation

Un indicateur de durabilité est proposé en prenant en compte les critères de criticité mais également d'autres paramètres tels que les réserves, la production et la durée de vie du produit, entre autres. L'IED est un outil d'évaluation destiné aux produits technologiques et se base sur la présence des 13 principaux métaux critiques présents au sein d'un laptop, à savoir le cobalt, le tantale, l'indium, le palladium, le platine, le gallium, 3 éléments de la famille des TR légères (le néodyme, le praséodyme et le cérium) et 4 éléments de la famille des TR lourdes (le dysprosium, l'yttrium, le gadolinium et l'europium).

La criticité est un indicateur pertinent mais qui ne prend pas en compte certaines variables telles que les critères d'ordre géologiques (abondance / rareté du métal), énergétiques (consommation à l'extraction) ou encore la production et les réserves dans son calcul.

2.1.2. Objectifs et intérêts

Du côté du consommateur, l'objectif de l'IED serait de lui permettre de faire un choix plus "responsable" lors de son achat, l'indicateur pouvant être un critère entrant en jeu lors de la prise de décision tout comme le prix ou la qualité du produit (dans des proportions certes différentes).

Parmi les fournisseurs, une saine concurrence peut s'établir pour celui qui proposera le produit le plus "durable" et qui prendra en compte la problématique de l'épuisement des métaux. L'indicateur peut alors se présenter comme un avantage compétitif en terme de marketing, tout comme le marché du bio ou celui de la seconde main.

Au niveau des concepteurs, un tel indicateur pourrait permettre de cibler les métaux les plus problématiques et mettre en avant des pistes d'amélioration à la durabilité du produit, telles que la substitution des métaux les plus problématiques ou tout autre mesure d'écoconception. L'IED apporte en outre une visibilité directe et exhaustive sur les composants du produit (les différents métaux, leur quantité, leur criticité…) et permet d'adopter un regard critique sur certains biens tels que les nouvelles technologies.

2.1.3. Inventaire

Il n'existe que peu d'études qui puissent nous présenter de manière détaillée les différents métaux présents au sein d'un ordinateur. Une étude de 2012 effectuée par l'Institut d'Ecologie Appliquée (Öko-Institut) d'Allemagne portant sur le recyclage des matières premières critiques dans les D3E présente de manière complète les masses moyennes de métaux critiques au sein d'un laptop. Etant

donné le degré de détail et de pertinence, cet inventaire a été retenu pour établir l'indicateur. Il s'agit d'un notebook de 2010.

Les laptops contiennent plusieurs composants et jusqu'à 2000 pièces individuelles (Manhart & Griesshammer, cités par l'Öko-Institut 2012, p.19). 8 composants principaux constituent le hardware : la carte mère, l'écran, la batterie, le lecteur CD/DVD, le disque dur, le ventilateur, le clavier et le châssis (façade en plastique ou en aluminium selon le modèle).

La batterie (lithium-ion) est composée de cobalt ; les axes de moteurs de disques durs de néodyme ; les bobines acoustiques de néodyme, praséodyme et dysprosium ; les haut-parleurs de néodyme et praséodyme ; les condensateurs de tantale ; les circuits imprimés de tantale, d'argent, d'or et de palladium ; la carte mère d'or, d'argent et de palladium ; les plateaux de disques durs de platine ; l'écran (affichage et rétro-éclairage) d'indium, d'yttrium, de gallium, de gadolinium, de cérium et d'europium (Öko-Institut 2012, p.30).

A noter que l'or et l'argent qui sont des métaux précieux présents dans les ordinateurs portables (et dans les TIC de manière générale) et qui étaient inclus dans la liste initiale présentée par l'Öko-Institut n'ont pas été repris dans le cadre de cette étude. Ils n'ont en effet pas été jugés comme étant critiques par la Commission Européenne, nonobstant leur caractère rare et précieux. A titre indicatif, la liste indiquait des quantités respectives d'or et d'argent de 100 et 440 mg comme contenu moyen dans un notebook.

Métal	Co	Nd	Ta	Pr	Dy	In	Pd
Masse (mg)	65000,00	2136,00	1700,00	274,00	60,00	40,00	39,00
En % du total	93,85%	3,08%	2,45%	0,40%	0,09%	0,06%	0,06%

Métal	Pt	Y	Ga	Gd	Ce	Eu	Total
Masse (mg)	4,00	1,60	1,60	0,75	0,10	0,03	69257
En % du total	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100%

Tableau 3 : Contenu moyen des métaux critiques dans un notebook
Source : Öko-Institut 2012, p.30

2.1.4. Méthodologie

2.1.4.1. Les critères

Les critères se distinguent en catégories qui prennent en compte les aspects critiques, géologiques et énergétiques des métaux. D'autres critères intrinsèques au produit sont aussi pris en compte (durée de vie moyenne du laptop)

Parmi les critères, il convient de distinguer les positifs et les négatifs. Les critères positifs sont ceux qui doivent être maximisés pour que le produit soit le plus durable possible. Ils sont inversement

proportionnels au score ; s'ils augmentent, le score final diminue. Par exemple un taux de recyclage des matériaux en fin de vie (critère positif) de 90% impactera le score final que de 10%.

Les critères négatifs doivent quant à eux être le plus bas possible et sont proportionnels au score ; leur niveau contribue à l'augmentation du score final. Un taux de concentration de la production minière de 70% impactera le score final de 70% (en prenant en compte un coefficient de pondération).

2.1.4.2. Le score

Le score final s'établit sur une échelle de 0 à 10, 0 étant la note qui représente une marchandise durable (impact d'épuisement des ressources peu élevé, excellent taux de recyclage des métaux en fin de vie, peu de métaux précieux utilisés…) et une note de 10 pour les produits les moins soutenables (utilisation d'éléments très rares et critiques, pas de substitution possible…).

In fine, une moyenne pondérée sera calculée sur l'ensemble des impacts des différents critères pour obtenir le score final de durabilité qui caractérisera l'IED.

Note	Caractéristique
De 0 à 3	Produit durable
De 3 à 7	Produit moyennement durable
De 7 à 10	Produit non durable

Tableau 4 : Durabilité du produit en fonction de la note

2.1.4.3. Pondération

Les différents critères doivent être soumis à des poids (coefficients) différents, en fonction de leur niveau d'adéquation avec l'aspect de durabilité. Les critères d'ordre géologiques sont relativement plus importants que d'autres aspects comme la consommation d'énergie ou l'importance économique par exemple.

Critères	Pondération
1) Épuisement des ressources	30,00%
2) Importance Économique	10,00%
3) Risque d'Approvisionnement	30,00%
4) Réserves / Production	15,00%
5) Durée de vie du produit	10,00%
6) Énergie	5,00%

Tableau 5 : Pondération des critères

2.2. Justification des différents critères

2.2.1. Contribution à l'épuisement des ressources (critère négatif)

Il est nécessaire dans un premier temps de convertir toutes les données de l'inventaire répertorié ci-dessus. En terme de réserves et de production, les métaux ne s'équivalent pas. 1 gramme de cobalt ne contribue pas dans les mêmes proportions à l'épuisement des ressources qu'1 gramme de platine par exemple. Il faut par conséquent aligner les différents éléments sur une même échelle.

2 méthodes seront utilisées et comparées. La plus pertinente sera retenue et justifiée.

2.2.1.1. Caractérisation en fonction du "coefficient de rareté" (CR)

Il y a une certaine corrélation établie entre l'abondance d'un métal et la quantité de ses réserves (Skinner 1976, p.265). Un facteur de caractérisation en fonction de l'abondance de l'élément peut être déterminé, en calculant un coefficient de rareté défini par la fonction inverse 1/ppm (l'unité ppm définit l'abondance d'un élément ; la rareté et l'abondance étant 2 notions opposées, la fonction inverse est nécessaire pour déterminer le coefficient de rareté).

Métal	Co	Nd	Ta	Pr	Dy	In	Pd
Ppm	30	33	1,70	8,70	6,20	0,16	0,0063
Coefficient de rareté (CR)	0,033	0,030	0,588	0,115	0,161	6,250	158,730
Masse (g)	65	2,14	1,7	0,27	0,060	0,040	0,039
CR pondéré par la masse	2,17E+00	6,47E-02	1,00E+00	3,15E-02	9,68E-03	2,50E-01	6,19E+00
En % du total	20,07%	0,60%	9,26%	0,29%	0,09%	2,32%	57,35%

Métal	Pt	Y	Ga	Gd	Ce	Eu
Ppm	0,004	29	19	5	60	2
Coefficient de rareté (CR)	270,27	0,03	0,05	0,19	0,02	0,56
Masse (g)	0,004	0,002	0,002	0,0008	0,0001	0,00003
CR pondéré par la masse	1,08E+00	5,52E-05	8,42E-05	1,44E-04	1,67E-06	1,67E-05
En % du total	10,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tableau 6 : Caractérisation de la rareté des métaux en fonction de l'abondance crustale
Sources : USGS 2008, 2018 ; BRGM 2015 à 2017 ; Lenntech ; calculs de l'auteur.

Les éléments ayant le plus d'impact sont le palladium (57% du total des éléments) en raison de son fort CR (le palladium est un métal précieux et très rare) et le cobalt (plus de 20% du total), en raison de son importance en terme de masse au sein de l'ordinateur portable (le cobalt à lui seul représente 94% de la masse total des métaux critiques).

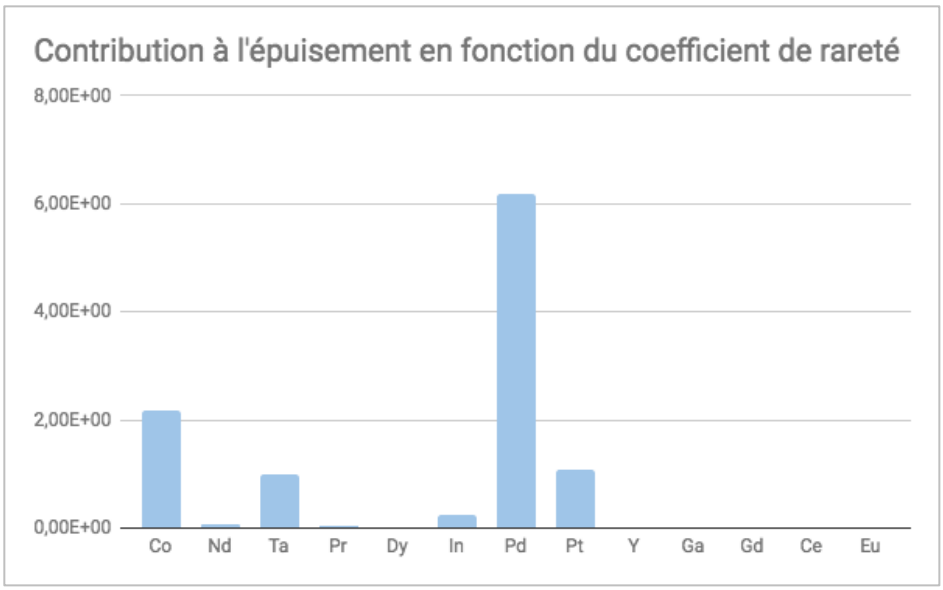

Figure 8 : Impact de l'épuisement par métal selon l'abondance crustale (sans unité)

2.2.1.2. Caractérisation en fonction du facteur d'épuisement des ressources abiotiques (CML)

En ACV, l'indicateur utilisé par la méthodologie CML de l'Université de Leiden en ce qui concerne l'épuisement des ressources abiotiques est l'ADP pour Abiotic Depletion Potential. L'unité de référence est le kg d'antimoine équivalent (Guinée et al. 2002, p.12). La formule de base se calcule à partir des ressources métalliques identifiées. Selon ces auteurs, un indicateur basé sur les réserves et le taux d'extraction serait plus pertinent dans le calcul de l'ADP (Guinée et al. 2002, p.26). Un autre facteur de caractérisation permet de prendre en compte dans le calcul de l'ADP uniquement les réserves, sans prise en compte de la production. Dans ce cas, l'ADP se calcule via la formule : 1/R, R étant les réserves du métal considéré (Guinée et al. 2002, p.27). Il paraît toutefois pertinent de retenir la production dans le calcul de ce critère, étant donné sa corrélation avec la pérennité des réserves.

Etant donné l'absence de données concernant les ressources et les réserves base, l'étude se concentre ici sur l'ADP calculé à partir des données disponibles sur les réserves, et prend également en compte les taux d'extraction (Guinée et al. 2002, p.26).

Soit i le métal considéré :

ADP = (Taux d'extraction de i / réserves de i ²) / (taux d'extraction de l'antimoine / réserves d'antimoine ²).

L'épuisement se calcule ainsi : ADP × masse de i extraite.

En 2017, les réserves mondiales d'antimoine (Sb) se quantifiaient à 1500 kt et la production était de 150 kt sur la même année (USGS 2018, p.23).

Les différentes données de réserves et productions sont récupérées à partir des bases de données de l'USGS et du BRGM pour les années 2017, sauf indication contraire. A noter que pour le cérium, les réserves ont été estimées en fonction de l'abondance crustale de l'élément, le cérium figurant parmi

les terres rares les plus abondantes. Les réserves et la production d'indium proviennent des bases de données de 2007 de l'USGS (il n'y a pas de données disponibles au-delà). Il n'existe pas d'évaluation normalisée des réserves de gallium. Les réserves estimées de 1,35 Mt font en fait référence à la quantité de gallium présente dans les réserves de bauxite. Une grande partie de ces dernières ne sera cependant pas exploité durant les prochaines années, étant donné l'importance des réserves de bauxite, ce qui indique qu'une grande part des réserves de gallium n'est en fait pas accessible pour le moment (Bihouix & de Guillebon 2010, p.249).

Métal	Co	Nd	Ta	Pr	Dy	In	Pd
Masse (g)	65	2,14	1,7	0,27	0,060	0,040	0,039
Réserves (kt)	7100	13500	110	2000	690	11	6
Production (kt)	110	23,8	1,3	2,5	1,45	0,51	0,21
ADP	3,27E-02	1,96E-03	1,61E+00	9,38E-03	4,57E-02	6,32E+01	8,75E+01
Épuisement (g éq. Sb)	2,13E+00	4,18E-03	2,74E+00	2,57E-03	2,74E-03	2,53E+00	3,41E+00
En % du total	19,54%	0,04%	25,16%	0,02%	0,03%	23,22%	31,34%

Métal	Pt	Y	Ga	Gd	Ce	Eu	Total
Masse (g)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	69,26
Réserves (kt)	13,00	500,00	1350,00	1000,00	21536,00	150,00	N/A
Production (kt)	0,20	5,00	0,44	0,40	23,00	0,10	N/A
ADP	1,78E+01	3,00E-01	3,58E-03	6,00E-03	7,44E-04	6,67E-02	N/A
Épuisement (g éq. Sb)	7,10E-02	4,80E-04	5,73E-06	4,50E-06	7,44E-08	2,00E-06	**10,89**
En % du total	0,65%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	

Tableau 7 : Caractérisation de l'épuisement selon la méthode CML (laptop)
Sources : USGS 2008, 2018 ; BRGM 2015 à 2017 ; Lenntech ; calculs de l'auteur

La contribution à l'épuisement se quantifie en gramme équivalent antimoine. La conception d'un laptop nécessite 69 g de métaux critiques, soit 10,89 g équivalent d'antimoine.

Le palladium contribue à près d'un tiers à l'épuisement des ressources. Il possède en effet de basses réserves (6 kt) et un taux d'extraction relativement élevé de 0,21 kt (3,5% des réserves extraites en un an de production). Parmi les métaux les plus massifs du laptop (cobalt, néodyme et tantale), le tantale possède les réserves les moins importantes. Ce qui explique son taux de contribution de 25%. L'indium quant à lui contribue à hauteur de 23% à l'épuisement. Tout comme le palladium, les réserves d'indium sont modestes (11 kt) et le taux d'extraction de 0,51 kt par an favorise la raréfaction de ces dernières (4,6% des réserves d'indium sont extraites annuellement). Il faut toutefois considérer les chiffres concernant l'indium avec précaution, car ces données concernent l'année 2007. Il se pourrait que les réserves aient évoluées depuis. Le cobalt enfin contribue à 20% à l'épuisement, en raison de sa quantité élevée par rapport à la masse totale. Sur 13 métaux, le palladium, le tantale, l'indium et le cobalt contribuent à peu près à la totalité de l'impact lié à l'épuisement.

Le palladium, l'indium, le platine et le tantale sont considérés comme plus rares que l'antimoine (ils ont un ADP supérieur à 1), en raison de leurs réserves peu élevées. Cependant, selon la production actuelle, les réserves d'antimoine devraient plus vite s'épuiser que ces métaux (en divisant les réserves d'antimoine par la production de 2017, la durée de vie des réserves s'estime à 10 ans, au rythme de production actuel). Ce paradoxe pourrait s'expliquer par le fait que l'ADP est inversement proportionnel au carré des réserves. Le palladium et l'indium par exemple, ont des réserves bien plus basses que l'antimoine (il y a 136 fois moins de réserves d'indium et 250 fois moins de réserves de palladium que d'antimoine). Leur potentiel d'épuisement est donc plus élevé.

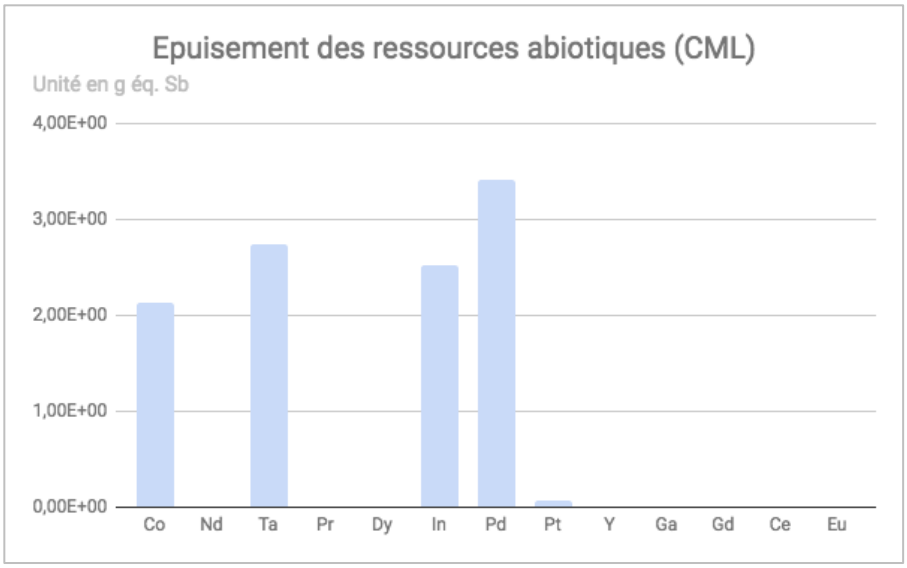

Figure 9 : Impact de l'épuisement en g Sb éq. selon la méthode CML (laptop)

2.2.1.3. Détermination du score d'impact de l'épuisement

La méthode CML semble être plus fiable étant donné qu'elle se base sur les réserves mais également la production. Le coefficient de rareté ne peut à lui seul justifier de l'épuisement des ressources ; il est plus approprié de prendre en compte le taux d'extraction. En effet, un métal peut être rare, mais s'il n'est pas exploité, ses réserves ne sont pas directement menacées. Cette méthode d'évaluation du potentiel d'épuisement des ressources abiotiques sera donc utilisée pour caractériser l'impact en matière de raréfaction.

La méthodologie CML a permis de déterminer une valeur de près de 11 g d'équivalent antimoine dans la composition du notebook. Pour la détermination du score, une solution serait d'attribuer à ces 11 grammes une valeur d'impact maximale, soit 100%. L'indicateur fixe ainsi un seuil maximum à ne pas dépasser, dans l'optique future d'améliorer la durabilité de l'équipement. La réduction des métaux les plus problématiques conduirait à une amélioration directe du score de l'IED.

Le score d'impact attribué à l'épuisement est donc de 100%. Ce score pourrait servir de référence à l'amélioration de la durabilité.

2.2.2. Calcul et prise en compte de la criticité

Présentés dans la première partie, les métaux critiques sont des matériaux qui intègrent globalement 2 critères que sont l'importance économique et le risque d'approvisionnement (Commission Européenne 2017a, pp. 7;11). Pour visualiser la criticité, le métal est schématiquement représenté sous forme d'une matrice dans un repère orthonormé avec pour abscisse le risque d'approvisionnement et pour ordonnée l'importance économique.

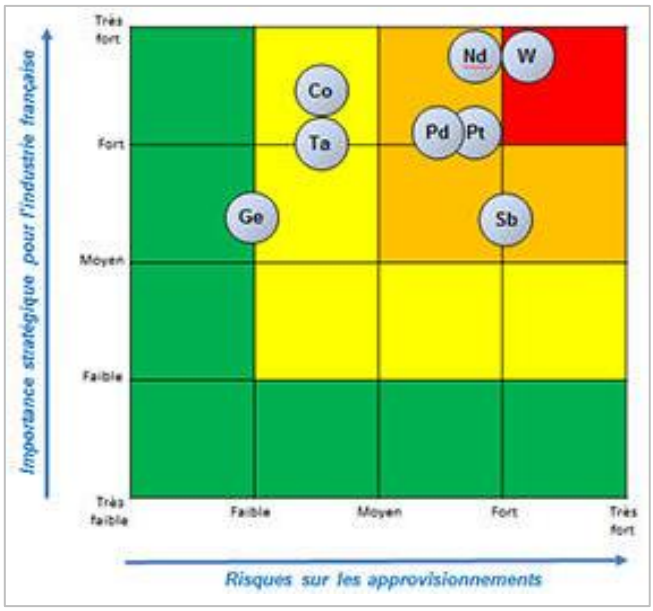

Figure 10 : Matrice de criticité de 8 métaux : germanium (Ge), tantale (Ta), cobalt (Co), palladium (Pd), platine (Pt), antimoine (Sb), néodyme (Nd), tungstène (W).
Source : BRGM, 2016a.

Il apparaît clairement que le néodyme (Nd) et le tungstène (W) sont les éléments les plus critiques.

2.2.2.1. L'importance économique (IE) (critère négatif)

L'importance économique est le 1er paramètre de détermination de la criticité. Ce critère prend en compte 3 principaux paramètres (Commission Européenne 2017a, p.7) :
- le taux d'utilisation d'une matière première dans un secteur économique donné (que l'on nommera ici TUMP) ;
- la valeur ajoutée du secteur économique concerné (VA) ;
- l'indice de substitution de la matière première, qui correspond à la difficulté de remplacement du matériau considéré (IS_{IE}). L'importance économique prend en compte cet indice qui dépend des performances et de l'efficacité des matériaux de remplacement par rapport à leur coût (on parle de performance de coût des substituts).

Il est finalement calculé en établissant la somme du produit du TUMP et de la VA, elle même multipliée par IS_{IE} : $IE = \sum(TUMP \times VA) \times IS_{IE}$

Dans l'IED, la criticité ne se présente pas sous forme de matrice, mais sous forme chiffrée, dans le but d'obtenir un score final quantifiable en pourcentage. Les matrices présentent le niveau de criticité sous forme d'une note de 1 à 5 (en considérant que la matrice est composée de 5 lignes horizontales et

5 lignes verticales). Par exemple, nous pouvons établir un score de 4/5 au tantale et 4,5/5 au cobalt en ce qui concerne l'importance économique (voir figure 10 ci-dessus). Les matrices utilisées sont celles du BRGM.

Métal	Co	Nd	Ta	Pr	Dy	In	Pd
IE (sur 5)	4,5	5,0	4	5,0	4	3,5	4,25
Masse (g)	65,00	2,14	1,70	0,27	0,06	0,04000	0,03900
En % du total	93,85%	3,08%	2,45%	0,40%	0,09%	0,06%	0,06%
Score de criticité pondéré	4,22	0,15	0,10	0,02	0,00	0,00	0,00

Métal	Pt	Y	Ga	Gd	Ce	Eu	Somme
IE (sur 5)	4,0	3,5	3,5	3	3,5	3	N/A
Masse (g)	4,00E-03	1,60E-03	1,60E-03	7,50E-04	1,00E-04	3,00E-05	69,26
En % du total	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
Score de criticité pondéré	2,31E-04	8,09E-05	8,09E-05	3,25E-05	5,05E-06	1,30E-06	4,50

Tableau 8 : Score de l'importance économique des métaux critiques du laptop
Sources : Öko-Institut 2012 p.30 ; BRGM, 2015 à 2017, 2015a p.16

Le score de l'IE du laptop se calcule en faisant la somme des scores pondérés par le taux de masse de chaque élément au sein du notebook (il s'agit du rapport de la masse de chaque métal sur la masse totale des métaux critiques). Le score final est principalement dû à l'IE du cobalt, qui représente à lui seul près de 94% de la masse totale des métaux considérés. Ce score de 4,5/5 retranscrit en pourcentage équivaut à 90% d'impact.

2.2.2.2. Le risque d'approvisionnement (RA)

Le risque d'approvisionnement est le 2ème paramètre de détermination de la criticité. Ce critère prend en compte comme paramètres la dépendance aux importations, la production mondiale, l'approvisionnement au sein de l'UE, l'indice de Herfindahl-Hirschmann (mesure de la concentration du marché, en prenant en compte les parts de marché d'un secteur), l'indice de gouvernance mondial (basé sur la paix, la démocratie, les droits de l'Homme, le développement durable et le développement humain), le taux de recyclage en fin de vie et l'indice de substitution en fonction du risque d'approvisionnement IS_{RA} (qui dépend de la production mondiale des substituts mais aussi de leur criticité et de leur sous-production) (Commission Européenne 2017a, p.11).

Par simplification, le RA est ici subdivisé en 3 sous-critères que sont le taux de recyclage des métaux en fin de vie (EOL-RR), la possibilité de substitution et l'indice de Herfindahl-Hirschmann (IHH).

a. *Taux de recyclage (critère positif)*

Les définitions concernant le taux de recyclage varient d'une étude à l'autre. Dans sa liste de métaux critiques, la Commission Européenne définit le taux de recyclage comme étant le rapport entre le recyclage du vieux métal (*old scrap*) et l'approvisionnement de l'UE en cette matière première (Commission Européenne 2017b, p.8).

Le PNUE retient le recyclage fonctionnel des produits en fin de vie (*end of life recycling rate, ou EOL RR*) et exclut la partie du recyclage non fonctionnel. Le taux de recyclage se calcule par le rapport entre les vieux métaux (old scraps) du produit en fin de vie et le contenu métallique total du produit (Graedel et al. 2011a, p.19).

Les différents taux de recyclage sont repris à partir du tableau issu de l'étude du PNUE sur les taux de recyclage des métaux dans les produits en fin de vie (Graedel et al. 2011a, p.19 ; voir figure n°5).

Métal	Co	Nd	Ta	Pr	Dy	In	Pd
Masse (g)	65,00	2,14	1,70	0,27	0,06	0,04	0,039
EOL-RR	50,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	50,00%
Quantité récupérée (g)	32,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
En % du total	99,93%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,06%

Métal	Pt	Y	Ga	Gd	Ce	Eu	Somme
Masse (g)	0,004	0,0016	0,0016	0,00075	0,0001	0,00003	69,26
EOL-RR	50,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
Quantité récupérée (g)	0,002	0	0	0	0	0	32,52
En % du total	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	46,96%

Tableau 9 : Taux de récupération des différents métaux critiques
Sources : Graedel et al. 2011a, p.19 ; calculs de l'auteur

32,5 g de cobalt sur les 69 g de métaux sont récupérés. Le taux de recyclage des métaux critiques de 47% s'explique par le taux relativement correct de récupération du cobalt. Le taux de recyclage devant être maximisé, l'impact du taux dans le score final sera de 100% - 46,96% = 53,04%.

b. *L'indice de substitution (critère négatif)*

Dans sa liste de matières premières critiques pour l'UE, la Commission Européenne a présenté un indice de substitution par métal. Ce dernier mesure la difficulté à remplacer le métal critique. Les valeurs de 0 à 1 indiquent le niveau de difficulté, 1 représentant la substituabilité la plus basse (Commission Européenne 2017b, p.8).

L'indice de substitution se calcule en intégrant les 2 dimensions de la criticité. Au niveau de l'importance économique (IS_{IE}), il se mesure par un rapport coût / performance en prenant en compte le coût du substitut et sa performance technique (dans quelle mesure le substitut peut remplacer la fonctionnalité du métal critique). Concernant le risque d'approvisionnement (IS_{RA}), l'indice se base sur la disponibilité du substitut en quantités suffisantes, sur son éventuelle criticité (le fait de remplacer un métal critique par un autre métal critique ne diminuera probablement pas le risque d'approvisionnement) mais aussi sur sa constitution en tant que sous-produit (l'approvisionnement d'un sous-produit métallique est dépendant du métal à partir duquel il est produit ; le cobalt par exemple dépend de la production du cuivre et du nickel).

Une possibilité de substitution s'accompagne toutefois d'une diminution de la note. De manière générale, une possibilité de substitution entraîne soit l'usage d'un autre métal critique, soit une baisse de performance du produit et/ou du coût.

Les terres rares sont difficilement substituables. Lorsqu'elles le sont, c'est par le biais d'autres terres rares, ce qui ne résout pas la problématique. Ainsi, dans les aimants permanents, du néodyme peut potentiellement se substituer par du praséodyme, qui est lui aussi critique (BRGM, 2015). Il n'y a quasiment pas de substitution sans perte de performance et/ou de confort d'utilisation. Le tantale pourrait ainsi se remplacer par de la céramique ou de l'aluminium. Cependant, cette substitution n'est que très peu probable dans la mesure où un smartphone pèserait dans ce cas près d'un kilogramme (Commission Européenne 2017a, p.8). Les platinoïdes (ici, le platine et le palladium) peuvent se substituer entre eux mais avec des pertes d'efficacité (Bihouix & De Guillebon 2010, p.276). Dans les écrans, l'indium peut se substituer par de l'oxyde de zinc ou de l'étain dopé. Ces derniers sont moins chers mais aussi moins performants (BRGM, 2017).

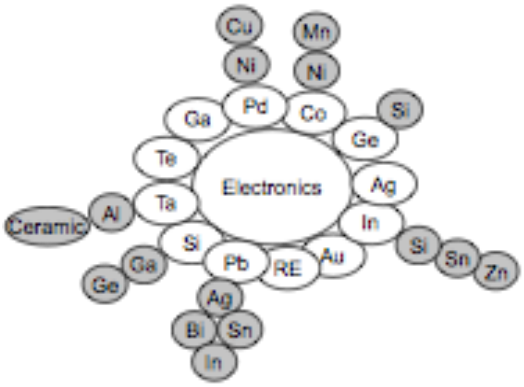

Figure 11 : Substitution des métaux en électronique
Source : Hagelüken & Meskers 2010, p.174

L'IED retiendra la moyenne des indices de substitution de l'IE et du RA pondérée en fonction de la masse pour son calcul.

Métal	Co	Nd	Ta	Pr	Dy	In	Pd
Masse (g)	65,00	2,14	1,70	0,27	0,06	0,04	0,039
En % du total	93,85%	3,08%	2,45%	0,40%	0,09%	0,06%	0,06%
IS IE	1	0,9	0,94	0,9	0,96	0,94	0,93
IS RA	1	0,93	0,95	0,93	0,89	0,97	0,98
Moyenne IS	1,00	0,92	0,95	0,92	0,93	0,96	0,96
IS pondéré	0,94	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00

Métal	Pt	Y	Ga	Gd	Ce	Eu	Total
Masse (g)	0,004	0,0016	0,0016	0,00075	0,0001	0,00003	69,26
En % du total	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100%
IS IE	0,93	0,96	0,95	0,96	0,90	0,96	N/A
IS RA	0,98	0,89	0,96	0,89	0,93	0,89	N/A
Moyenne IS	0,96	0,93	0,96	0,93	0,92	0,93	N/A
IS pondéré	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00

Tableau 10 : Moyenne des indices de substitution par métal
Sources : Commission Européenne 2017b, pp.4-8.

Le calcul de la moyenne pondérée des 13 composants permet d'obtenir un indice de substitution de 1, c'est-à-dire une très faible substituabilité. Cet indice exprimant la difficulté de substitution, un score de 100% est attribué à l'IS.

c. L'indice de Herfindahl-Hirschmann (critère négatif)

Cet indice permet de mesurer la concentration de production d'un métal, que ce soit au niveau d'un pays ou d'une entreprise. Cette concentration peut amener à des situations de monopoles, qui peuvent rendre problématique l'approvisionnement des métaux dans le cas où des tensions ou conflits géopolitiques pourraient subvenir. Selon la méthodologie du BRGM, l'indice varie entre 0 (infinité de producteurs) et 1 (situation monopolistique, avec un seul producteur) (BRGM 2015b, p.17).

L'IHH se détermine dans ce cas en fonction de la concentration géographique de la production minière. L'IHH pour le gallium n'est pas déterminé ; celui de la bauxite sera utilisé à la place, cette dernière représentant la principale source minière du gallium. L'IHH des TR légères sera calqué sur celui du néodyme, et celui des TR lourdes sur celui du dysprosium (car absence de données pour les autres terres rares).

Métal	Co	Nd	Ta	Pr	Dy	In	Pd
Masse (g)	65,00	2,14	1,70	0,27	0,06	0,04	0,04
En % du total	93,85%	3,08%	2,45%	0,40%	0,09%	0,06%	0,06%
IHH	0,43	0,76	0,24	0,76	0,94	0,24	0,33
IHH pondéré	0,40	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

Métal	Pt	Y	Ga	Gd	Ce	Eu	Total
Masse (g)	0,004	0,0016	0,0016	0,00075	0,0001	0,00003	69,26
En % du total	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1
IHH	0,54	0,94	0,18	0,94	0,76	0,94	N/A
IHH pondéré	3,12E-05	2,17E-05	4,16E-06	1,02E-05	1,10E-06	4,07E-07	0,44

Tableau 11 : IHH par métal
Source : BRGM, 2015 à 2017.

L'indice de Herfindahl-Hirschmann du notebook s'établit à 0,44 ce qui indique une forte concentration de la production minière. Le cobalt, qui détermine principalement la note finale, est en effet grandement concentré au Congo. 58% de la production mondiale est assurée par ce dernier, qui détient par ailleurs près de la moitié des réserves mondiales (USGS 2018, p.51). Les métaux les plus concernés sont cependant les terres rares lourdes (dysprosium, yttrium, gadolinium et europium). 97% du dysprosium mondial a été produit par la Chine en 2014 (BRGM, 2016). Les indices étant compris entre 0 et 1, l'impact de l'IHH est donc de 44%.

2.2.3. Rapport R/P (Réserves connues / Production minière annuelle)

Ce ratio exprimé en unité de temps (années) est le plus souvent utilisé dans l'industrie gazière et pétrolière pour estimer globalement le nombre d'années de réserves existantes par rapport à la production annuelle d'un élément. Il permet d'avoir une vision temporelle générale sur l'état des réserves à un moment donné.

Il faut cependant garder à l'esprit que ce ratio n'est pertinent que pour un instant t et ne sait prévoir les évolutions ni au niveau de l'augmentation de la production, ni au niveau de l'augmentation des réserves par la découverte de nouveaux gisements. En effet, les découvertes augmentent, influencées par l'accroissement de la demande et des prix. Les réserves de cuivre qui se quantifiaient à 100 Mt dans les années 50, se chiffrent de nos jours à environ 790 Mt. La production sur la même période a évolué de 2,4 Mt/an à 20 Mt/an. Les réserves de cuivre gravitent donc autour de 60 ans de durée de vie depuis 40 ans (Ademe, 2017 p.10 ; USGS 2018, p.53).

Par ailleurs, la consommation croît de manière exponentielle. Pour plusieurs métaux, elle double tous les 25 ans et entraîne l'épuisement des réserves plus rapidement que leur découverte. Avec un hypothétique taux de croissance de production de 3% pour le cuivre (le taux de croissance annuel moyen de la production minière de cuivre de 1900 à 2016 est de 3,25%), la durée des réserves

s'écourte de 14 ans, évoluant de 40 à 26 ans de durée. La production annuelle s'estime à environ 40 Mt au début des années 2040. Autrement dit, en prenant en compte un rythme de croissance de 3% de la production actuelle, la fin des réserves de cuivre est annoncée pour 2043, dans l'hypothèse de réserves stables et sans découverte de nouveaux gisements (Ademe 2017, p.11 ; BRGM, 2018). Le ratio doit être le plus élevé possible si l'on souhaite considérer des réserves pérennes. Comme pour le calcul du facteur d'épuisement des ressources abiotiques, les différentes données de réserves et productions concernent les années 2017, sauf indication contraire. Pour le cérium, les réserves ont été estimées en fonction de l'abondance crustale de l'élément. Les réserves et la production d'indium proviennent des bases de données de 2007 de l'USGS car il n'y a pas de données disponibles au-delà.

Par ailleurs, les réserves de gallium (1,35 Mt) ont été estimées à partir de la quantité potentielle de gallium contenue dans les réserves de bauxite (minerai d'aluminium), le gallium étant un sous-produit de cette dernière (BRGM, 2016). Cependant, la bauxite possède des réserves très importantes et une grande partie ne saurait être exploitée sur le court terme. Une bonne partie du gallium n'est donc pas directement disponible (Bihouix & De Guillebon 2010, p.249).

Pour cet indicateur, il sera calculé dans un premier temps le ratio brut sans tenir compte de la croissance de la production (scénario optimiste, étant donné que la consommation et par conséquent la production de ces métaux est croissante). Par la suite, le ratio sera révisé par des taux de croissance hypothétiques (scénario plus réaliste). Les valeurs les plus basses représentent les réserves les plus "fragiles", celles qui risquent de poser problème sur le court terme. La fonction inverse 1/(R/P) sera utilisée pour quantifier et déterminer les métaux les plus problématiques.

2.2.3.1. Calcul du ratio R/P à production constante

Métal	Co	Nd	Ta	Pr	Dy	In	Pd
Réserves (kt)	7100	13500	110	2000	690	11	6
Production (kt)	110	23,8	1,3	2,5	1,45	0,51	0,21
R/P (années)	65	567	85	800	476	22	29
1/ (R/P)	1,55%	0,18%	1,18%	0,13%	0,21%	4,64%	3,50%
En % du total	10,94%	1,24%	8,34%	0,88%	1,48%	32,74%	24,71%

Métal	Pt	Y	Ga	Gd	Ce	Eu	Total
Réserves (kt)	13	500	1350	1000	21536	150	N/A
Production (kt)	0,2	5	0,435	0,4	23	0,1	N/A
R/P (années)	65	100	3103	2500	936	1500	N/A
1/ (R/P)	1,54%	1,00%	0,03%	0,04%	0,11%	0,07%	14,16%
En % du total	10,86%	7,06%	0,23%	0,28%	0,75%	0,47%	100,00%

Tableau 12 : Contribution du ratio R/P par métal
Sources : USGS, 2008, 2018 ; BRGM 2015 à 2017 ; calculs de l'auteur

Les ratios indiquent que les durées de vie respectives des réserves d'indium et de palladium sont de 22 et 29 ans au rythme de production actuel. Les taux d'extraction de l'indium et du palladium sont les plus importants, et contribuent à eux deux à plus de 57% du total du taux d'extraction.

2.2.3.2. Calcul du ratio R/P à production croissante

Le taux de croissance de la production s'estime en fonction du taux de croissance annuel moyen (TCAM) de production minière, de 1990 à 2016. Sur cette période, les TR auront toutes le même taux de croissance annuel moyen, estimé à 4% (BRGM, 2016).

Métal	Co	Nd	Ta	Pr	Dy	In	Pd
Réserves (kt)	7100	13500	110	2000	690	11	6
Production (kt)	110	23,8	1,3	2,5	1,45	0,51	0,21
TCAM (1990-2016)	5,80%	4,00%	4,38%	4,00%	4,00%	7,10%	2,42%
R/P (années)	28	81	37	90	77	14	22
1/ (R/P)	3,57%	1,23%	2,70%	1,11%	1,30%	7,14%	4,55%

Métal	Pt	Y	Ga	Gd	Ce	Eu
Réserves (kt)	13	500	1350	1000	21536	150
Production (kt)	0,2	5	0,435	0,4	23	0,1
TCAM (1990-2016)	1,85%	4,00%	9,66%	4,00%	4,00%	4,00%
R/P (années)	44	42	62	118	94	105
1/ (R/P)	2,27%	2,38%	1,61%	0,85%	1,06%	0,95%

Tableau 13 : Contribution ratio R/P avec TCAM de 1990 à 2016
Sources : USGS 2018 ; BRGM 2015 à 2017

Le gallium qui avait des réserves estimées à plus de 3000 ans à production constante est descendu à 62 ans de durée de réserves. Le taux de croissance de ces 2 dernières décennies a été en effet très important. Avec un modeste TCAM de 2,42%, le palladium passe de 29 à 22 ans de durée de réserves. L'indium, avec un fort TCAM de 7,1% voit ses réserves évoluer de 22 à 14 ans de production, soit une diminution de 36% de la durée des réserves.

2.2.3.3. Calcul du score du critère "R/P à production croissante"

À partir du moment où l'un des éléments viendrait à manquer, c'est tout le produit qui sera remis en cause (en prenant pour hypothèse que les éléments essentiels et les différentes options propres au produit demeurent inchangés). Ce paramètre se rapproche d'un loi d'écologie végétale, dite loi du minimum ou loi des facteurs limitants (maillon le plus faible) énoncée à la base par le botaniste

allemand Sprengel (1828), puis généralisée par le chimiste allemand Liebig (1850). Cette loi est illustrée par un tonneau construit à partir de planches de dimensions différentes. Le volume de remplissage du tonneau sera dépendant de la planche la plus courte du tonneau (le liquide s'écoulant en priorité par là). Un autre exemple peut caractériser la loi du minimum : la solidité d'une chaîne est subordonnée à son maillon le plus faible. Si ce dernier cède, c'est toute la chaîne qui est rompue.

Par analogie avec un produit tel qu'un laptop, si un des éléments venait à manquer, le produit ne pourrait plus être conçu tel qu'il l'est actuellement, à moins d'une substitution. La durabilité du notebook dépend donc de son élément le plus rare, celui dont l'accessibilité à court terme est la plus problématique.

Pour le calcul du score, les impacts seront attribués en fonction de la durée restante des réserves. Au-delà de 50 ans de réserves, l'impact ne serait que de 50% (il reste une marge de risque en cas de hausse brutale de la demande). La contribution s'évalue en fonction du concept des facteurs limitants. En écologie, cette notion permet d'apprécier le facteur qui va influencer l'amplitude d'un phénomène.

Dans ce cas présent, le facteur limitant se détermine par le métal dont la durée des réserves est la plus courte. Le facteur limitant ici est l'indium, avec un ratio R/P de 14, ce qui indique que la durée de ses réserves est potentiellement de 14 ans. Toutefois, il y a une possibilité de substitution de l'indium. Ce paramètre peut potentiellement réduire l'impact du critère, à condition que le substitut ne soit pas lui-même un élément très rare et / ou critique.

Durée des réserves (années)	Impact
Entre 0 et 10	100,00%
Entre 11 et 20	90,00%
Entre 21 et 30	80,00%
Entre 31 et 40	70,00%
Entre 41 et 50	60,00%
Supérieure à 50	50,00%

Tableau 14 : Attribution de l'impact en fonction de la durée des réserves

En cas de substitution possible une diminution d'impact de 10% est d'office appliquée. Il faut ensuite que le substitut réponde à 2 paramètres :
- S'agit-il d'un élément critique ? Si oui, une augmentation de 5% est attribué au score.
- S'agit-il d'un élément rare (moins de 2 ppm) ? Si oui, une augmentation de 5% est attribué au score.

Autrement dit, si le facteur limitant se fait substituer par un élément critique et rare, la réduction d'impact de 10% s'annule.

L'indium ayant une durée de réserves de 14 ans, l'impact correspondant serait de 90% dans un premier temps. Cependant, il est possible de remplacer l'indium. Dans les écrans plats et les écrans tactiles, l'indium peut potentiellement se substituer par des nanotubes de carbone ou encore du PEDOT (poly (3,4-éthylènedioxythiophène)), qui sont des matériaux non critiques (CRM-InnoNet 2015, p.48).

Les substituts présentés ci-dessus ne sont ni rares, ni critiques. Le score d'impact corrélé à la durée des réserves s'estime donc à 90% - 10% = 80%.

2.2.4. Durée de vie moyenne du produit (critère positif)

Ce critère est à prendre en compte car la pression sur les ressources minières ne sera pas la même pour un outil qui se renouvelle tous les ans que pour un produit à plus grande longévité. Une étude d'évaluation de l'empreinte carbone globale des TIC présente un intervalle de durée de vie compris entre 5 et 7 ans (National Energy Foundation, cité par Belkhir & Elmeligi 2018, p.453). La durée de vie moyenne du laptop est donc de 6 ans. A titre comparatif, la durée de vie d'une tablette est comprise entre 3 et 8 ans, celle d'un ordinateur fixe entre 5 et 7 ans et celle d'un smartphone 2 ans (Raghavan & Ma cités par Belkhir & Elmeligi 2018, p.455).

Un score d'impact en fonction de la durée de vie de l'équipement peut alors être estimé.

Durée de vie (année)	Impact lié à la durée de vie
Entre 0 et 4	100,00%
Entre 5 et 9	75,00%
Entre 10 et 14	50,00%
Entre 15 et 20	25,00%
Supérieure à 20	0,00%

Tableau 15 : Impact lié à la durée de vie de l'équipement TIC

La durée de vie moyenne du laptop étant de 6 ans, l'impact sera donc de 75%.

2.2.5. L'énergie consommée (critère négatif)

Tout comme les métaux, l'énergie est une ressource problématique de par son caractère épuisable (à l'exclusion des énergies dites renouvelables). Étant donné son lien étroit avec la durabilité, le critère énergétique sera pris en compte dans l'EID.

Dans un premier temps sera présenté la quantité d'énergie nécessaire à l'extraction des métaux. En raison de données provenant d'études différentes, les terres rares se distinguent des autres métaux (les données ne prennent pas en compte les même paramètres lors du calcul des quantités d'énergie). La consommation d'énergie pour le cobalt, le tantale, le gallium et l'indium se calcule par la quantité d'énergie requise pour l'extraction et le processus de raffinage. Pour les terres rares, la consommation énergétique se calcule en fonction de la chaleur et de l'électricité consommée lors de leur production. L'unité est le kilojoule par gramme de métal. Une deuxième partie traitera de la consommation énergétique du produit sur sa durée de vie.

2.2.5.1. Consommation d'énergie liée à l'extraction et au raffinage

Métal	Nd	Pr	Dy	Y	Gd	Ce	Eu
Masse (g)	2,136	0,274	0,06	0,0016	0,00075	0,0001	0,00003
Électricité (kJ/g)	173	92	ND	332	996	155	ND
Chaleur (kJ/g)	219	128	ND	424	1166	200	ND
Coût énergétique unitaire (kJ/g)	392	220	350	756	2162	354	1850
Coût énergétique total (kJ)	837	60	21	1,21	1,62	0,04	0,06
En % du total	3,19%	0,23%	0,08%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%

Tableau 16 : Consommation énergétique de production des terres rares
Sources : Tharumarajah & Koltun, 2011 ; Azo Materials.

Métal	Co	Ta	In	Pd	Pt	Ga	Total
Masse (g)	65	1,7	0,04	0,039	0,004	0,0016	69,26
Énergie d'extraction (kJ/g)	193	1375	ND	ND	ND	ND	N/A
Processus de raffinage (kJ/g)	129	380	2875	ND	ND	12660	N/A
Coût énergétique unitaire (kJ/g)	322	1755	2875	5500	270500	12660	N/A
Coût énergétique total (kJ)	20930	2984	115	215	1082	20	26266,80
En % du total	79,68%	11,36%	0,44%	0,82%	4,12%	0,08%	100%

Tableau 17 : Consommation énergétique de production des autres métaux
Sources : Ashby, 2013 ; Valero & Botero, 2009.

Pour extraire et raffiner les 69 grammes de métaux critiques du laptop, il a fallu globalement 26,3 MJ, soit 7,3 kWh. Le platine, malgré sa masse relativement faible (4 mg, soit 0,006% de la masse totale des métaux critiques) contribue à 4% de la consommation d'énergie liée à son extraction. Son coût énergétique unitaire important (270,5 MJ/g) résulte de sa faible teneur dans les minerais (0,1%) et qu'il exige un haut niveau de purification (99,9%) (EcoInfo, 2014d). Le cobalt contribue à près de 80% de l'impact, dû à sa masse importante.

Pour quantifier l'impact sous forme de score, il faut tenir compte de la quantité d'énergie moyenne nécessaire pour extraire et raffiner un gramme de métal critique : 26267 kJ / 69 g = 379,25 kJ/g.

Une échelle de score peut être réalisée à partir de la consommation énergétique de production de métal vierge.

Énergie nécessaire à la production	Score
< 100 kJ/g	0,00%
Entre 100 et 200 kJ/g	25,00%
Entre 200 et 300 kJ/g	50,00%
Entre 300 et 400 kJ/g	75,00%
> 400 kJ/g	100,00%

Tableau 18 : Attribution de l'impact en fonction de la consommation d'énergie par gramme de métal produit
Source : EcoInfo, 2014d

L'énergie moyenne nécessaire à la production d'1 g de métal critique au sein du notebook étant de 379,25 kJ/g, l'impact se chiffre à 75%.

2.2.5.2. Consommation énergétique de l'équipement pendant sa phase d'utilisation

Les équipements de TIC ne consomment pas tous la même quantité d'énergie lors de leur utilisation. Le calcul se fonde sur la durée de vie et la consommation énergétique annuelle du notebook. Sachant que la durée de vie moyenne du laptop a été estimée à 6 ans et que sa consommation annuelle moyenne est de 58 kWh, la quantité totale d'énergie nécessaire à son utilisation sera de 348 kWh (Öko-Institut 2016 p.28 ; Belkhir & Elmeligi 2018, p.455). Dans la même philosophie que l'énergie nécessaire à la production, un tableau de score est attribué en fonction de la consommation.

Énergie nécessaire à l'utilisation	Score
< 100 kWh	33,00%
Entre 100 et 300 kWh	67,00%
> 300 kWh	100,00%

Tableau 19 : Attribution de l'impact en fonction de la consommation d'énergie nécessaire à l'utilisation du laptop

L'impact énergétique sur la phase d'utilisation se quantifie à 100% pour le notebook, de par sa consommation annuelle d'électricité. Malgré la faible pondération des critères énergétiques, l'enjeu ici est d'influencer l'amélioration de l'efficience énergétique au sein des appareils.

2.2.6. Agrégation et calcul du score final

Tous les scores d'impact sont réunis au sein d'un même tableau. Le score final est calculé en fonction des différents scores de chaque critère pondérés par des coefficients.

Critère	Score	Pondération	Score pondéré	En % du total
1) Épuisement	100,00%	30,00%	3,00	36,33%
2) IE	90,00%	10,00%	0,90	10,90%
3) RA				23,86%
3.1) Taux de recyclage	53,04%	10,00%	0,53	6,42%
3.2) Substitution	100,00%	10,00%	1,00	12,11%
3.3) IHH	44,00%	10,00%	0,44	5,33%
4) R/P	80,00%	15,00%	1,20	14,53%
5) Durée de vie	75,00%	10,00%	0,75	9,08%
6) Énergie				5,30%
6.1) Extraction	75,00%	2,50%	0,19	2,27%
6.2) Utilisation	100,00%	2,50%	0,25	3,03%
Score final sur 10			**8,26**	

Tableau 20 : Calcul du score final (laptop)

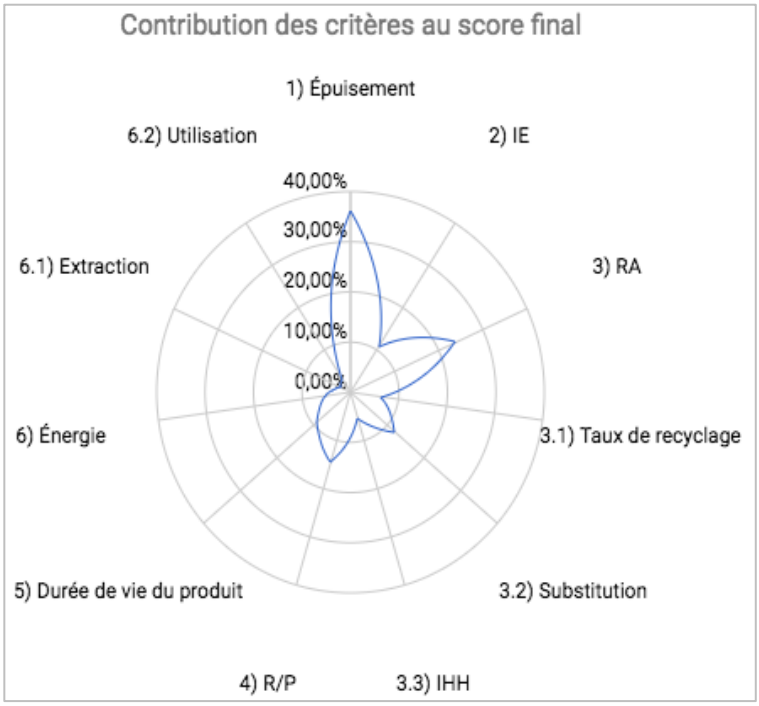

Figure 12 : Contribution des critères au score final (laptop)

Le notebook obtient une note de durabilité de 8,26/10, ce qui représente un produit non durable. Plus de 36% de la note est dû au critère de l'épuisement des ressources et près d'un quart de la note est à la charge du risque d'approvisionnement (23,86%). Dans le critère de l'épuisement, 4 métaux sont principalement responsables de l'impact : il s'agit du palladium (31%), du tantale (25%), de l'indium (23%) et du cobalt (20%) (voir tableau n°7).

En agissant sur ces éléments, (substitution, amélioration du taux de recyclage) il y aurait potentiellement des opportunités de diminuer la note finale. Une analyse de sensibilité permettrait d'ailleurs de considérer et comparer plusieurs différents scénarios.

De manière générale, le score d'impact des critères qui ont été pondérés en fonction de la masse totale correspond au score du métal dont la masse est la plus importante. En l'occurrence, dans le notebook ce métal s'avère être le cobalt (94% de la masse totale). Ainsi, les critères de l'IE et du RA dont les calculs se fondent en fonction de la masse totale des éléments au sein du laptop, sont principalement influencés par le score du cobalt.

2.3. Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité permet de tester l'indicateur en modifiant quelques paramètres. 2 scénarios sont proposés : la prise en compte de l'or et l'argent dans l'inventaire et la substitution du palladium, du tantale, de l'indium et du cobalt.

2.3.1. Prise en compte de 2 métaux précieux supplémentaires

Le palladium apparaît dans l'indicateur comme étant le métal le plus problématique. Il serait intéressant d'analyser l'ADP et la contribution à l'épuisement si l'on ajoutait l'or et l'argent dans l'inventaire. En effet, ces 2 métaux précieux sont présents dans le notebook en quantité non négligeable (100 mg d'or et 440 mg d'argent apparaissent dans les circuits imprimés et la carte mère). Ils n'ont pas été repris lors de la conception de l'IED en raison de leur caractère non critique. L'indicateur se focalise en effet exclusivement sur les métaux critiques. Si l'IED devait prendre en compte l'or et l'argent, les impacts actualisés dans le calcul de l'ADP seraient les suivants.

Métal	Co	Nd	Ta	**Ag**	Pr	**Au**	Dy	In
Masse (g)	65	2,14	1,7	0,44	0,27	0,10	0,060	0,040
Réserves (kt)	7100	13500	110	530	2000	54	690	11
Production (kt)	110	23,8	1,3	25	2,5	3,15	1,45	0,51
ADP	3,27E-02	1,96E-03	1,61E+00	1,33E+00	9,38E-03	1,62E+01	4,57E-02	6,32E+01
Épuisement (g Sb éq.)	2,13E+00	4,18E-03	2,74E+00	**5,87E-01**	2,57E-03	**1,62E+00**	2,74E-03	2,53E+00
En % du total	16,24%	0,03%	20,92%	**4,48%**	0,02%	**12,37%**	0,02%	19,31%

Métal	Pd	Pt	Y	Ga	Gd	Ce	Eu	Total
Masse (g)	0,039	0,004	0,002	0,002	0,0008	0,0001	0,00003	69,80
Réserves (kt)	6	13	500	1350	1000	21536	150	N/A
Production (kt)	0,21	0,2	5	0,435	0,4	23	0,1	N/A
ADP	8,75E+01	1,78E+01	3,00E-01	3,58E-03	6,00E-03	7,44E-04	6,67E-02	N/A
Épuisement (g Sb éq.)	3,41E+00	7,10E-02	4,80E-04	5,73E-06	4,50E-06	7,44E-08	2,00E-06	**13,10**
En % du total	26,05%	0,54%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1

Tableau 21 : Calcul de l'épuisement des ressources abiotiques avec prise en compte de l'or et l'argent
Source : USGS, 2008, 2018 ; calculs de l'auteur

Le palladium et le tantale demeurent les éléments les plus problématiques en matière d'épuisement. L'impact total de l'épuisement se quantifie à 13,1 g d'antimoine équivalent. La prise en compte de l'or et l'argent contribue à rajouter 2,21 g d'antimoine équivalent dans le calcul de l'impact total (pour rappel, l'épuisement sans l'or et l'argent s'estimait à 10,89 g d'antimoine équivalent). Ce paramètre ne contribue pas à modifier le score d'impact de l'épuisement, ce dernier étant plafonné à 100% pour une valeur de 10,89 g d'antimoine.

Il est toutefois intéressant de constater que l'or et l'argent contribuent à eux deux à près de 17% de l'impact total. Les réserves mondiales d'or estimées à 54 kt ne pourraient couvrir la production actuelle que sur une période de 17 ans. Le taux d'extraction de l'or est par ailleurs élevé (plus de 5,8% par an, soit une production annuelle dépassant les 3 kt). En ce qui concerne l'argent, la durée de vie des réserves mondiales (530 kt) s'estiment à 21 ans de la production actuelle (25 kt) (USGS 2018, pp.71;151). Le taux d'extraction de l'argent dépasse les 4,7%. Il y a par ailleurs 2,5 fois plus d'or et 11 fois plus d'argent que d'indium et de palladium dans le notebook. Toutefois, les réserves d'or sont 9 fois plus grandes que celles du palladium, les réserves d'argent 88 fois. Ces paramètres liés aux réserves viennent grandement diminuer l'ADP de ces 2 métaux précieux.

2.3.2. La substitution du palladium, du tantale, de l'indium, et du cobalt

Dans le domaine de l'électronique, ces métaux peuvent se substituer par des métaux non critiques. Le scénario proposé ici permet de voir l'évolution de l'indicateur en cas de variation de ces 4 éléments. Par simplification, les pertes de performance techniques et économiques ne sont pas considérées.

2.3.2.1. Le palladium

Le palladium est utilisé en électronique en raison de sa forte conductivité électrique (CRM-InnoNet 2015, p.67). Il est employé dans les cartes-mères, les circuits imprimés et les condensateurs et peut se substituer en partie avec des métaux de base tels que le cuivre ou le nickel (BRGM 2014a, p.79).

Taux de substitution	0%		25%		50%	
Métal	Pd	Total	Pd	Total	Pd	Total
Masse (g)	0,039	69,26	0,02925	69,25	0,0195	69,24
ADP	8,75E+01	N/A	8,75E+01	N/A	8,75E+01	N/A
Épuisement (g sb éq.)	3,41E+00	10,89	2,56E+00	10,04	1,71E+00	9,18
En % du total	31,34%	100,00%	25,50%	100,00%	18,58%	100,00%
Impact d'épuisement	N/A	100,00%	N/A	92,20%	N/A	84,30%
Score final	**8,26**		**8,02**		**7,79**	

Taux de substitution	75,00%		100,00%	
Métal	Pd	Total	Pd	Total
Masse (g)	0,00975	69,23	0	69,22
ADP	8,75E+01	N/A	8,75E+01	N/A
Épuisement (g sb éq.)	8,53E-01	8,33	0,00E+00	7,48
En % du total	10,24%	1	0,00%	1
Impact d'épuisement	N/A	76,49%	N/A	68,69%
Score final	**7,55**		**7,32**	

Tableau 22 : Substitution du palladium et impact sur le score final

Le score initial plafonné à 100% permet de mesurer le potentiel d'amélioration induit par les substitutions. L'application d'une règle de 3 permet de calculer l'impact d'épuisement en fonction de la diminution du palladium.

Etant donné sa faible masse relative parmi les métaux critiques (0,056%), la substitution du palladium n'aurait pas d'impact sur les scores des critères de l'IE et du RA, ni sur celui du critère énergétique. Les critères R/P et durée de vie ne prennent pas en compte la masse dans leurs calculs d'impacts. La variation est principalement due au critère de l'épuisement des ressources.

La substitution de 50% du palladium contribue à diminuer l'épuisement de 1,7 g d'antimoine équivalent, soit une diminution du score d'impact de 15,7%. La substitution complète du palladium contribue à une diminution du score d'impact de 31,3% et une diminution du score final de 11,38%, soit 0,94 point.

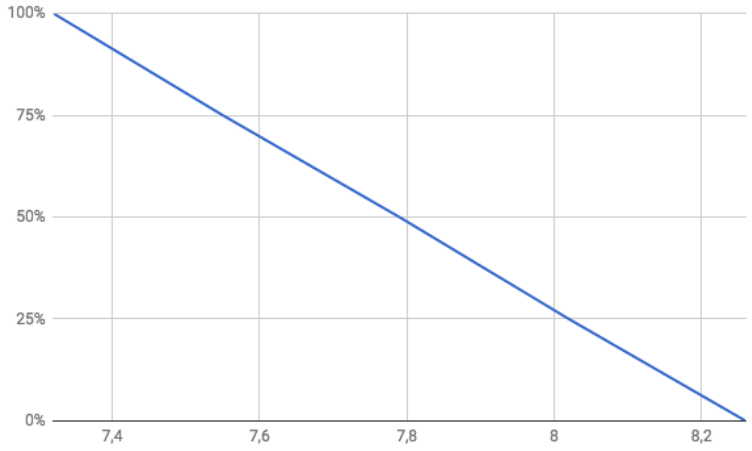

Figure 13 : Sensibilité de substitution du palladium

2.3.2.2. Le tantale

La substitution du tantale n'est pas possible sans perte de performance (à savoir la miniaturisation des composants). Les propriétés de ce métal en font un élément difficilement substituable en électronique. C'est en effet un bon conducteur thermique et électrique ; il est aussi résistant à la température (BRGM, 2012b). Dans les condensateurs, le tantale est employé sous forme de poudre, ce qui permet leur miniaturisation. 2 éléments non critiques offrent une possibilité de substitution : l'aluminium et la céramique. Les condensateurs en aluminium sont cependant sensibles à la chaleur. Les condensateurs en céramique multi-couches (MLCC) seraient l'alternative la plus optimale, même si les propriétés du matériau sont globalement moins intéressantes que le tantale (BRGM 2012c, p.29 ; CRM-InnoNet 2015, p.87).

Taux de substitution	0%		25%		50%	
Métal	Ta	Total	Ta	Total	Ta	Total
Masse (g)	1,70	69,26	1,28	68,83	0,85	68,41
ADP	1,61E+00	N/A	1,61E+00	N/A	1,61E+00	N/A
Épuisement (g sb éq.)	2,74E+00	10,89	2,05E+00	**10,2**	1,37E+00	**9,52**
En % du total	25,16%	100,00%	**20,14%**	100,00%	**14,39%**	100,00%
Impact d'épuisement	N/A	100,00%	N/A	**93,67%**	N/A	**87,42%**
Score final du laptop	**8,26**		**8,07**		**7,87**	

Taux de substitution	75%		100%	
Métal	Ta	Total	Ta	Total
Masse (g)	0,425	67 ,98	0	67,56
ADP	1,61E+00	N/A	1,61E+00	N/A
Épuisement (g sb éq.)	6,85E-01	**8,83**	0,00E+00	**8,15**
En % du total	**7,75%**	1	0,00%	1
Impact d'épuisement	N/A	**81,09%**	N/A	**74,84%**
Score final du laptop	**7,68**		**7,49**	

Tableau 23 : Substitution du tantale et impact sur le score final

La substitution complète du tantale contribuerait à diminuer l'impact total de l'épuisement de plus de 25%, avec une diminution de 2,74 g d'antimoine équivalent. Etant donné sa masse relativement peu importante (2,45% de la masse totale des métaux critiques), la substitution du tantale n'a aucun impact sur l'IE, l'IS, l'IHH, le ratio R/P et l'énergie. Il y a une légère amélioration du taux de recyclage (évolution du taux de 47 à 48,1%, ce qui se traduit par un impact de 51,9% au lieu de 53%. En substituant 100% du tantale, on aurait une note finale de 7,49/10, soit une amélioration de 0,77 point (diminution de 9,32%).

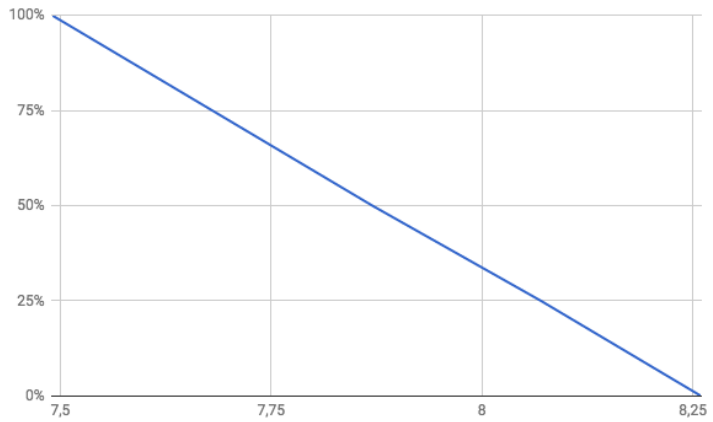

Figure 14 : Sensibilité de substitution du tantale

2.3.2.3. L'indium

Certaines études indiquent que des revêtements en nanotubes de carbone pourraient être employés comme alternative aux ITO (oxyde d'indium-étain) utilisés dans les écrans plats et tactiles. Le carbone est une ressource qui n'est ni rare, ni critique. Il existe par ailleurs d'autres substituts non critiques : le poly (3,4-éthylènedioxythiophène) (PEDOT) est un composé organique conducteur et transparent qui a aussi été développé comme substitut de l'indium dans les écrans tactiles (CRM-InnoNet 2015, p.48).

Taux de substitution	0%		25%		50%	
Métal	In	Total	In	Total	In	Total
Masse (g)	0,04	69,26	0,03	69,25	0,02	69,24
ADP	6,32E+01	N/A	6,32E+01	N/A	6,32E+01	N/A
Épuisement (g sb éq.)	2,53E+00	10,89	1,90E+00	**10,26**	1,26E+00	**9,63**
En % du total	23,22%	100,00%	**18,49%**	100,00%	**13,14%**	100,00%
Impact d'épuisement	N/A	100,00%	N/A	**94,22%**	N/A	**88,43%**
Score final du laptop	**8,26**		**8,08**		**7,91**	

Taux de substitution	75%		100%	
Métal	In	Total	In	Total
Masse (g)	0,01	69,23	0	69,22
ADP	6,32E+01	N/A	6,32E+01	N/A
Épuisement (g sb éq.)	6,32E-01	**8,99**	0,00E+00	**8,36**
En % du total	**7,03%**	100,00%	0,00%	100,00%
Impact d'épuisement	N/A	**82,56%**	N/A	**76,77%**
Score final du laptop	**7,73**		**7,41**	

Tableau 24 : Substitution de l'indium et impact sur le score final

La substitution de la totalité de l'indium diminue le score de 0,85 point soit une baisse de 10,29%. Le taux d'impact lié à l'épuisement des ressources diminue quant à lui de plus de 23%. L'intérêt dans cet indicateur serait de substituer complètement l'indium, étant donné qu'il s'agit de l'élément ayant les réserves les plus basses (l'indium est le facteur limitant dans le critère R/P). En substituant totalement l'indium, le score d'impact du critère R/P diminue de 10%, passant de 80 à 70%. L'indium n'étant plus présent, le palladium devient le facteur limitant (22 ans de réserves).

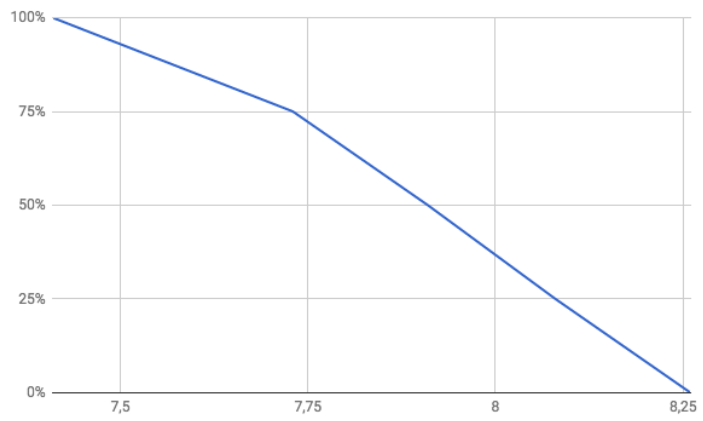

Figure 15 : Sensibilité de substitution de l'indium

2.3.2.4. Le cobalt

Le cobalt présent dans la batterie rechargeable du notebook peut partiellement se substituer. Il existe plusieurs types de batteries Li-ion, caractérisées par des quantités variables de cobalt. Les batteries principalement utilisées dans les notebooks sont des batteries dont la cathode est composée d'oxyde de lithium-cobalt, ou cobaltate de lithium (LCO). La cathode est composée de 60% de cobalt et offre une grande capacité de puissance et d'énergie. D'autres types de batteries ayant des caractéristiques différentes possèdent une cathode avec des quantités de cobalt moins élevés. Les cathodes composées d'oxyde de lithium-nickel-manganèse-cobalt (NMC) contiennent de 40 à 48% de cobalt en moins que les cathodes en LCO. Les cathodes en NMC contiennent en effet 12 à 20% de cobalt, et malgré leur capacité de puissance et d'énergie plus faible, elles peuvent quand même être employées dans les batteries d'équipements portables. Leur coût est également moindre que celui des LCO et elles ont une durée de vie plus longue (BRGM 2014b, p.38).

Il existe d'autres types de cathodes qui ne contiennent pas de cobalt comme les oxydes de lithium-manganèse (LMO) ou encore les cathodes à base de phosphate de fer et lithium (LFP). Ces 2 types de cathodes ne fournissent cependant pas suffisamment d'énergie pour pouvoir être exploités au sein des batteries de laptops (BRGM 2014b, p.38).

Taux de substitution	0%		25%		50%	
Métal	Co	Total	Co	Total	Co	Total
Masse (g)	65,00	69,26	48,75	53,01	32,50	36,76
ADP	3,27E-02	N/A	3,27E-02	N/A	3,27E-02	N/A
Épuisement (g sb éq.)	2,13E+00	10,89	1,60E+00	**10,36**	1,06E+00	**9,83**
En % du total	19,54%	100,00%	**15,41%**	100,00%	**10,83%**	100,00%
Impact d'épuisement	N/A	100,00%	N/A	**95,14%**	N/A	**90,27%**
Score final du laptop	**8,26**		**8,11**		**8,05**	

Taux de substitution	75%		100%	
Métal	Co	Total	Co	Total
Masse (g)	16,25	20,51	0,00	4,26
ADP	3,27E-02	N/A	3,27E-02	N/A
Épuisement	5,32E-01	**9,29**	0,00E+00	**8,76**
En % du total	**5,72%**	100,00%	0,00%	100,00%
Impact d'épuisement	N/A	**85,31%**	N/A	**80,44%**
Score final du laptop	**7,95**		**8,25**	

Tableau 25 : Substitution du cobalt et impact sur le score final

Une faille est constatée lors de la substitution du cobalt à 100%. La note est en effet plus élevée que pour des substitutions de 25, 50 et 75%, alors même qu'il ne reste plus 1 mg de cobalt au sein du notebook. Cela s'explique essentiellement par le fait que les impacts de plusieurs critères sont calculés en fonction du taux de la masse de chaque élément au sein du notebook. L'Importance Économique et les 3 sous-critères du Risque d'Approvisionnement (le taux de recyclage, l'IS et l'IHH) sont en effet calculés selon une moyenne pondérée. Le cobalt étant l'élément le plus massif parmi les métaux critiques (65 g), son score est mathématiquement corrélé à l'impact du critère, calculée sous forme de moyenne. Cependant, en le substituant, d'autres métaux vont contribuer à caractériser l'impact. Le cobalt a un très bon taux de recyclage dans les produits en fin de vie (50%). S'il n'y a plus de cobalt au sein du laptop, le taux de recyclage chute logiquement, les autres métaux n'étant que très peu recyclé (le platine et le palladium ont des taux de recyclage corrects mais ne contribuent qu'à hauteur de 0,06% de la masse totale à eux deux, ce qui ne permet pas d'influencer le taux de recyclage de manière significative). La diminution du taux de recyclage contribue in fine à l'augmentation du score, ce qui induit une problématique.

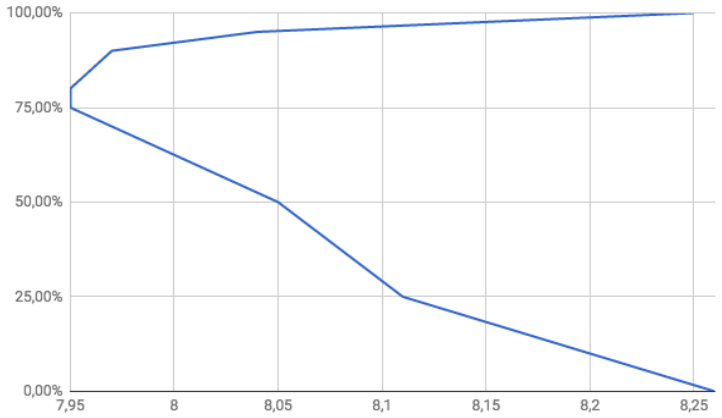

Figure 16 : Sensibilité de substitution du cobalt

Pour que le score soit cohérent, il convient d'ajouter ici un plafonnement conditionnel. Lors d'une substitution unique du cobalt supérieure à 75% (point de bascule), l'impact du critère "recyclage" sera plafonné à 60,27% (impact du critère "recyclage" pour une substitution du cobalt à 75%) et l'impact du critère "IHH" sera plafonné à 45% (impact du critère "IHH" pour une substitution du cobalt à 75%).

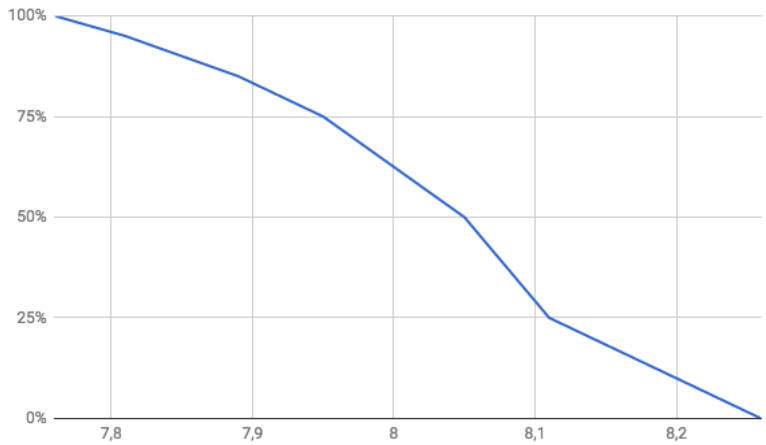

Figure 17 : Sensibilité de substitution du cobalt avec plafonnement conditionnel

Taux de substitution	0%	25%	50%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
Score final	8,26	8,11	8,05	7,95	7,92	7,89	7,85	7,81	7,76

Tableau 26 : Substitution du cobalt et impact sur le score final avec plafonnement conditionnel

Une substitution totale du cobalt au sein des batteries contribuerait à diminuer le score final de 0,5 point. L'impact de l'épuisement des ressources diminuerait de 20% tandis que le score final baisserait de 6,05%.

2.3.2.5. Scénario combiné

Après avoir vu l'influence de la substitution de chaque métaux sur le score final, ce scénario propose une substitution simultanée des 4 éléments.

L'hypothèse retenue est la suivante : le notebook est désormais équipé d'une batterie composée d'une cathode en oxyde de lithium-nickel-manganèse-cobalt (NMC) composé de 12% de cobalt (contre 60% pour la batterie LCO d'origine composée de cobaltate de lithium). La batterie LCO contient 60% de cobalt soit 65 g. Par application d'une règle de 3, une batterie NMC ayant une teneur en cobalt de 12% contient 13 g de cobalt. La carte mère ne contient plus "que" 85% du palladium d'origine, 15% ayant été remplacé par du cuivre. Des condensateurs en céramique multicouche remplacent 10% des condensateurs au tantale. L'indium est substitué à 100% par des revêtements en nanotubes de carbone dans l'écran. Par ailleurs, des recherches ont permis une amélioration du taux de recyclage du cobalt, qui passe de 50 à 60%.

Métal	Co	Nd	Ta	Pr	Dy	In	Pd
Masse (g)	**13**	2,14	**1,53**	0,27	0,060	**0,00**	**0,033**
ADP	3,27E-02	1,96E-03	1,61E+00	9,38E-03	4,57E-02	6,32E+01	8,75E+01
Épuisement (g sb éq.)	4,26E-01	4,18E-03	2,47E+00	2,57E-03	2,74E-03	0,00E+00	2,90E+00
En % du total	7,25%	0,07%	41,98%	0,04%	0,05%	0,00%	49,39%

Métal	Pt	Y	Ga	Gd	Ce	Eu	Total
Masse (g)	0,004	0,002	0,002	0,0008	0,0001	0,00003	17,04
ADP	1,78E+01	3,00E-01	3,58E-03	6,00E-03	7,44E-04	6,67E-02	N/A
Épuisement (g sb éq.)	7,10E-02	4,80E-04	5,73E-06	4,50E-06	7,44E-08	2,00E-06	**5,87**
En % du total	1,21%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%

Tableau 27 : Impacts du scénario combiné sur l'épuisement des ressources

La quantité d'antimoine équivalent a été divisée par 1,86, soit une diminution d'impact sur l'épuisement de 46%. Cette baisse s'explique principalement par la suppression totale de l'indium (50,4% de la contribution) et une diminution importante de la quantité de cobalt (34% de la contribution). La modification du type de cathode de la batterie a également contribué à diviser la

masse totale de métaux critiques par 4, soit une diminution de 75%. A la base, l'impact de 10,89 g d'antimoine équivalent était plafonné à 100%. Une règle de 3 indique un impact de 53,93% pour 5,87 g d'antimoine équivalent.

	Scénario original		Scénario combiné		Variation
Critère	Score	Score pondéré	Score	Score pondéré	
1) Épuisement	100,00%	3,00	53,93%	1,62	**-46,07%**
2) IE	90,00%	0,90	90,46%	0,90	0,51%
3) RA					
3.1) Taux de recyclage	53,04%	0,53	54,12%	0,54	2,04%
3.2) Substitution	100,00%	1,00	98,00%	0,98	-2,00%
3.3) IHH	44,00%	0,44	46,00%	0,46	4,55%
4) R/P	80,00%	1,20	70,00%	1,05	**-12,50%**
5) Durée de vie du produit	75,00%	0,75	75,00%	0,75	0,00%
6) Énergie					
6.1) Extraction	75,00%	0,19	100,00%	0,25	33,33%
6.2) Utilisation	100,00%	0,25	100,00%	0,25	0,00%
Score final sur 10		**8,26**		**6,80**	**1,46**

Tableau 28 : Impacts du scénario combiné sur le score final et comparaison avec le score original

Les substitutions prises en compte ont permis de diminuer le score final de 1,46 point, soit une amélioration de près de 18%. Il n'y a pas eu d'impact sur les critères de durée de vie et de l'énergie d'utilisation.

Quelques incohérences subsistent pour quelques critères : l'IE, l'IHH et le taux de recyclage ont légèrement augmenté, malgré des améliorations du recyclage du cobalt. Cela s'explique par la diminution des quantités recyclées au sein du notebook, étant donné qu'une bonne partie du cobalt a été substituée. L'énergie d'extraction a également augmenté, en raison de la part plus importante du platine dans la masse totale, ce dernier ayant un coût énergétique très élevé. Ces contresens sont toutefois annulés en raison de l'amélioration des critères géologiques (épuisement et R/P) dont la pondération est plus élevée.

La diminution de 12,5% du ratio R/P est principalement due à la suppression complète de l'indium. Le facteur limitant est désormais le palladium, avec une durée de vie de ses réserves estimée à 22 ans (ce qui correspond à un impact de 80%). Cependant, le palladium peut se substituer par des métaux non rares et non critiques, ce qui permet de diminuer l'impact de 10%.

En remplaçant partiellement ces 4 métaux par des substituts moins critiques, le notebook sera probablement un peu plus lourd, un peu plus lent à recharger et/ou un peu plus cher à produire, mais contribuera dans de moindres proportions à l'épuisement des ressources métalliques.

III. Application de l'IED à d'autres technologies

A partir du moment où l'inventaire des différentes technologies est disponible, il est possible d'appliquer l'IED à ces dernières. 2 autres produits sont étudiés ici : le smartphone et la tablette tactile. L'IED ayant déjà été présenté et analysé dans la partie précédente, cette partie mettra en avant les impacts sur l'épuisement des ressources et le score final uniquement.

Les différents inventaires de métaux critiques sont tirés d'une étude de l'Öko-Institut, traitant de l'efficience des ressources dans le secteur des TIC.

1. Le smartphone

Parmi les outils présentés, le smartphone est celui dont la popularité est la plus importante. Le nombre d'unités vendues annuellement dépasse de loin les ventes de PC et tablettes réunis (Statista, 2018b). Il se pourrait que ce soit également le plus problématique, étant donné sa durée de vie 3 fois plus courte que celle des PC, tablettes et autres écrans LCD (Belkhir & Elmeligi 2018, p.455). Son aspect miniaturisé implique par ailleurs une difficulté supplémentaire en matière de recyclage.

1.1. Inventaire

L'inventaire du smartphone est relativement identique à celui du notebook. 2 métaux non présents dans le laptop s'ajoutent à l'inventaire : le magnésium et le tungstène. L'inventaire n'a pas répertorié de dysprosium ni de platine au sein du smartphone. Le magnésium, bien que considéré comme critique, ne sera pas pris en compte dans l'étude étant donné ses réserves virtuellement infinies et l'absence de fiche de criticité le concernant (USGS 2018, p.103). Il s'agit d'un smartphone de 160 g (Öko-Institut 2016, p.12)

Métal	Co	W	Nd	Ta	Pd	Pr	In
Masse (mg)	5380,00	440,00	50,00	20,00	10,00	10,00	10,00
En % du total	90,86%	7,43%	0,84%	0,34%	0,17%	0,17%	0,17%

Métal	Y	Ga	Gd	Eu	Ce	Total
Masse (mg)	0,40	0,40	0,20	0,10	0,03	5921,13
En % du total	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%

Tableau 29 : Contenu moyen des métaux critiques dans un smartphone
Source : Öko-Institut 2016, p.11

Un smartphone de 160 g contient 5,9 g de métaux critiques, principalement composés de cobalt et de tungstène.

1.2. Contribution à l'épuisement des ressources

Métal	Co	W	Nd	Ta	Pd	Pr	In
Masse (g)	5,38	0,44	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01
ADP	3,27E-02	1,39E-01	1,96E-03	1,61E+00	8,75E+01	9,38E-03	6,32E+01
Épuisement (g sb éq.)	1,76E-01	6,12E-02	9,79E-05	3,22E-02	8,75E-01	9,38E-05	6,32E-01
En % du total	9,91%	3,45%	0,01%	1,81%	49,24%	0,01%	35,58%

Métal	Y	Ga	Gd	Eu	Ce	Total
Masse (g)	0,0004	0,0004	0,0002	0,0001	0,00003	5,92
ADP	3,00E-01	3,58E-03	6,00E-03	6,67E-02	7,44E-04	N/A
Épuisement (g sb éq.)	1,20E-04	1,43E-06	1,20E-06	6,67E-06	2,23E-08	1,78
En % du total	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%

Tableau 30 : Caractérisation de l'épuisement selon la méthode CML (smartphone)
Sources : USGS 2008, 2018 ; BRGM 2015 à 2017 ; Lenntech ; calculs de l'auteur.

Comme pour le notebook, le palladium est celui dont la contribution à l'impact de l'épuisement est la plus élevée (près de la moitié de l'impact total). Avec un impact de près de 36%, l'indium est 2è du classement. Ces deux métaux contribuent à eux deux à 85% de l'impact total. Le tantale cependant ne contribue pas à l'impact dans les mêmes proportions que dans le cas du laptop (il y a 85 fois moins de tantale dans le smartphone que dans le notebook). L'impact de la fabrication d'un smartphone s'estime à 1,78 g d'antimoine équivalent. Cet impact est plafonné à 100%, comme lors du calcul d'impact du laptop.

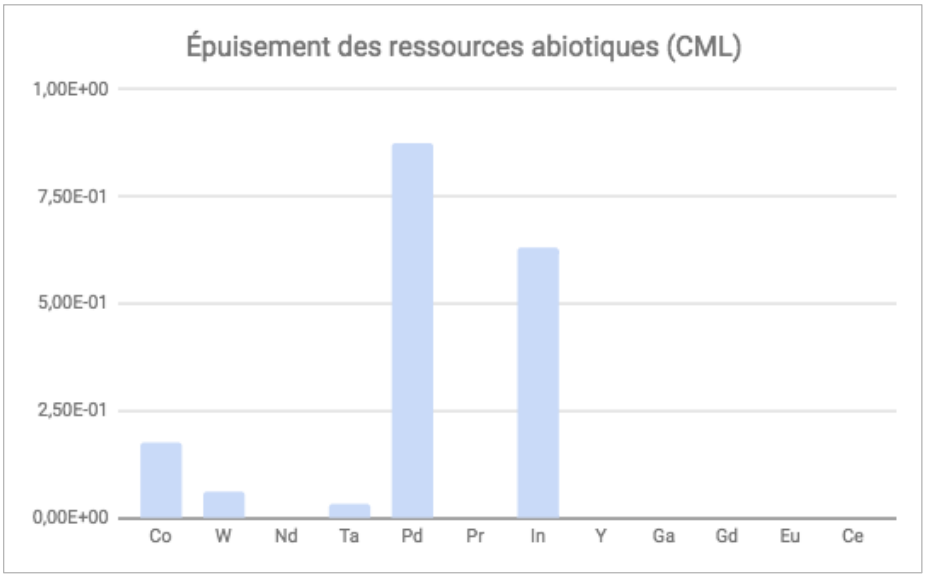

Figure 18 : Impact de l'épuisement en g Sb éq. selon la méthode CML (smartphone)

1.3. Score final

Critère	Score	Pondération	Score pondéré	En % du total
1) Épuisement	100,00%	30,00%	3,00	35,91%
2) IE	90,76%	10,00%	0,91	10,86%
3) RA				23,66%
3.1) Taux de recyclage	53,18%	10,00%	0,53	6,37%
3.2) Substitution	99,54%	10,00%	1,00	11,92%
3.3) IHH	44,93%	10,00%	0,45	5,38%
4) R/P	80,00%	15,00%	1,20	14,36%
5) Durée de vie	100,00%	10,00%	1,00	11,97%
6) Énergie				3,23%
6.1) Extraction	75,00%	2,50%	0,19	2,24%
6.2) Utilisation	33,00%	2,50%	0,08	0,99%
Score final sur 10			**8,35**	

Tableau 31 : Calcul du score final (smartphone)

Le score final est de 8,35/10 (soit 0,09 point de plus qu'un laptop). Le smartphone a un impact moindre en valeur absolu (1,78 g contre 10,89 g d'antimoine équivalent pour le notebook). Il y a en effet 12 fois plus de cobalt, 85 fois plus de tantale, 4 fois plus d'indium et 3,9 fois plus de palladium dans le laptop que dans le smartphone. Toutefois, ce dernier a une durée de vie 3 fois plus courte et pèse 15 à 20 fois moins qu'un ordinateur portable. Ce facteur doit être pris en compte si l'on souhaite caractériser l'impact relatif d'un outil sur une période temporelle déterminée.

Une méthode comparative serait de caractériser 1 kg de produit fini. Sachant que 160 g de smartphone contribue à 1,78 g d'antimoine équivalent, 1 kg de smartphone contribuerait à 11,125 g d'antimoine équivalent. Pour un laptop dont le poids moyen s'estime à 2,8 kg, la contribution est de 10,89 g d'antimoine équivalent. 1 kg de laptop contribue donc à hauteur de 3,89 g d'antimoine équivalent, soit 2,86 fois moins qu'un smartphone.

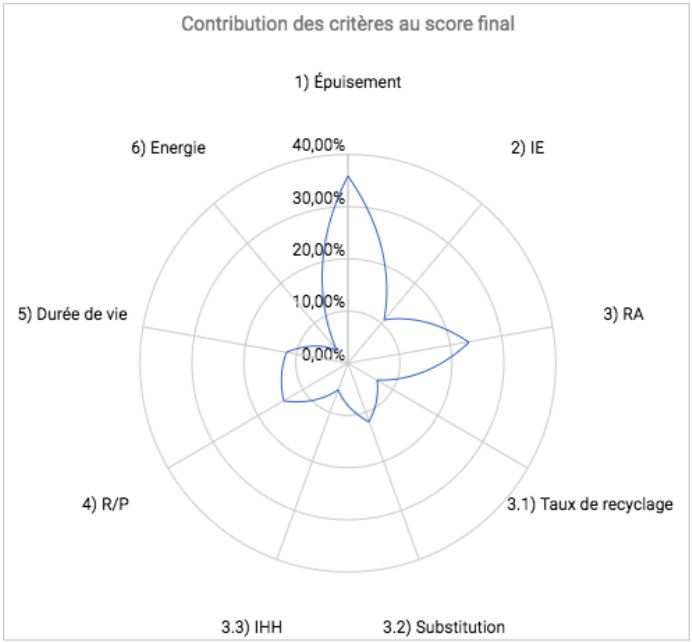

Figure 19 : Contribution des critères au score final (smartphone)

2. La tablette tactile

2.1. Inventaire

Comme pour l'analyse du smartphone, le magnésium n'a pas été repris dans ce cas d'étude. Il s'agit d'une tablette de 432 g (Öko-Institut 2016, p.13).

Métal	Co	Nd	W	Pr	Ta	In	Pd
Masse (g)	15,55	0,6	0,27	0,15	0,04	0,02	0,01
En % du total	93,42%	3,60%	1,62%	0,90%	0,24%	0,12%	0,06%

Métal	Y	Ga	Gd	Eu	Ce	Total
Masse (g)	0,002	0,002	0,001	0,0003	0,0001	16,65
En % du total	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	100,00%

Tableau 32 : Contenu moyen des métaux critiques dans une tablette tactile
Source : Öko-Institut 2016, p.12

2.2. Contribution à l'épuisement des ressources

Métal	Co	Nd	W	Pr	Ta	In	Pd
Masse (g)	15,55	0,6	0,27	0,15	0,04	0,02	0,01
ADP	3,27E-02	1,96E-03	1,39E-01	9,38E-03	1,61E+00	6,32E+01	8,75E+01
Épuisement (g sb éq.)	5,09E-01	1,18E-03	3,76E-02	1,41E-03	6,45E-02	1,26E+00	8,75E-01
En % du total	18,48%	0,04%	1,36%	0,05%	2,34%	45,92%	31,78%

Métal	Y	Ga	Gd	Eu	Ce	Total
Masse (g)	0,002	0,002	0,001	0,0003	0,0001	16,65
ADP	3,00E-01	3,58E-03	6,00E-03	6,67E-02	7,44E-04	N/A
Épuisement (g sb éq.)	6,00E-04	7,16E-06	6,00E-06	2,00E-05	7,44E-08	2,75
En % du total	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%

Tableau 33 : Caractérisation de l'épuisement selon la méthode CML (tablette)
Sources : USGS 2008, 2018 ; BRGM 2015 à 2017 ; Lenntech ; calculs de l'auteur.

Il est intéressant de constater que dans la tablette tactile, l'indium est l'élément le plus problématique, contribuant à près de 46% de l'impact à lui seul, alors que dans le notebook et le smartphone, il s'agit du palladium. L'enjeu de la substitution complète de l'indium par les nanotubes de carbone serait d'autant plus avantageuse dans cet outil. L'impact de l'épuisement s'estime à 2,75 g d'antimoine équivalent. L'indium et le palladium contribuent à 77,7% de l'impact.

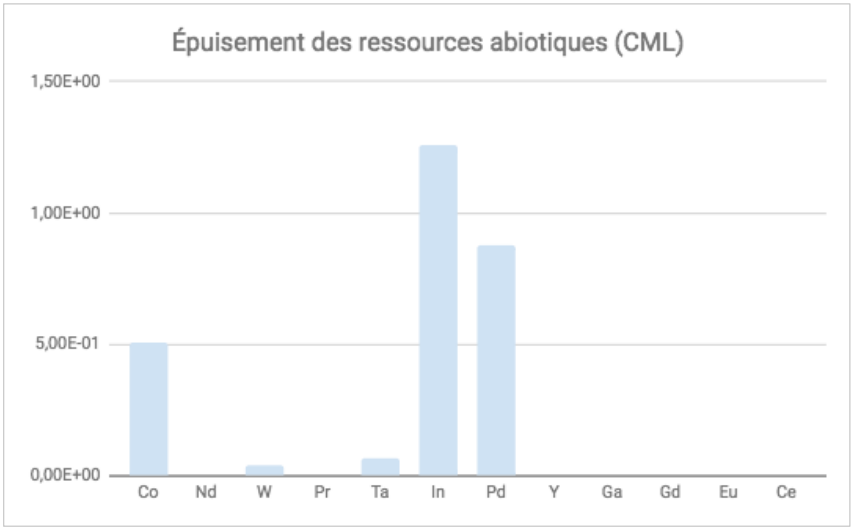

Figure 20 : Impact de l'épuisement en g Sb éq. selon la méthode CML (tablette)

2.3. Score final

Critère	Score	Pondération	Score pondéré	En % du total
1) Épuisement	100,00%	30,00%	3,00	37,04%
2) IE	90,55%	10,00%	0,91	11,18%
3) RA				24,36%
3.1) Taux de recyclage	52,98%	10,00%	0,53	6,54%
3.2) Substitution	99,52%	10,00%	1,00	12,29%
3.3) IHH	44,79%	10,00%	0,45	5,53%
4) R/P	80,00%	15,00%	1,20	14,82%
5) Durée de vie	75,00%	10,00%	0,75	9,26%
6) Energie				3,33%
6.1) Extraction	75,00%	2,50%	0,19	2,32%
6.2) Utilisation	33,00%	2,50%	0,08	1,02%
Score final sur 10			**8,10**	

Tableau 34 : Calcul du score final (tablette)

La tablette obtient un score final de 8,10/10. Toutefois, une substitution complète de l'indium dans l'écran tactile apporterait probablement une nette amélioration de la durabilité du produit. Pour une tablette tactile de 432 g, l'impact de l'épuisement se chiffre à 2,75 g d'antimoine équivalent, soit 6,37 g d'antimoine équivalent pour 1 kg de tablette.

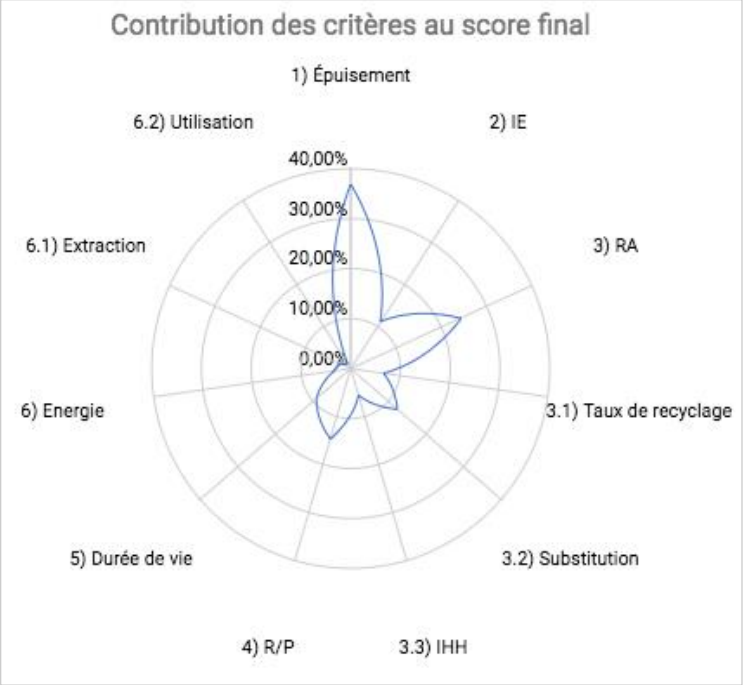

Figure 21 : Contribution des critères au score final (tablette)

3. Classement des équipements

À partir des différents scores, un classement des 3 équipements peut être réalisé.

Équipement	Score	Épuisement (g sb éq.)	Pour 1 kg de produit fini (g sb éq.)
Notebook	8,26	10,89	3,89
Smartphone	8,35	1,78	11,13
Tablette tactile	8,1	2,75	6,37

Tableau 35 : Comparaison des 3 produits

La tablette tactile est la technologie ayant la note la moins élevée et le smartphone apparaît comme l'élément le moins durable avec un score de 8,35/10. Le notebook, même s'il se situe intermédiairement, contribue à l'épuisement des ressources de manière plus importante (6 fois plus que le smartphone et 4 fois plus que la tablette, en terme d'antimoine équivalent). La tablette a également un bon potentiel de réduction de son score en cas de substitution complète de l'indium, ce dernier contribuant à presque la moitié de l'impact de l'épuisement, avec 1,26 g d'antimoine équivalent. Pour rappel, le polymère PEDOT et les nanotubes en carbone sont des matériaux qui peuvent potentiellement substituer l'indium dans les écrans tactiles.

L'impact de l'épuisement diminuerait donc à hauteur de 1,49 g d'antimoine équivalent (2,75 g – 1,26 g), ce qui correspond à un impact de 54%, soit près de 46% de diminution d'impact.

Conclusion

Limites et difficultés méthodologiques

Plusieurs limites ont été identifiées lors de la conception de l'IED.

Certains critères pris en compte dans l'indicateur sont très fluctuants, que ce soit spatialement (les métaux sont critiques au sein de l'UE et plus généralement dans les pays développés, mais ne concernent pas tous les Etats) ou temporellement (réserves et productions sont des notions variables, qui évoluent tous les ans). L'indicateur n'est donc pas universel et concerne essentiellement les produits finis au sein de l'UE. Par ailleurs, les quantités de métaux retenues dans l'inventaire de l'Öko-Institut datent de 2012 ; étant donné que le secteur des TIC évolue rapidement, il n'est pas improbable que ces quantités aient quelque peu changé depuis. L'indicateur doit être actualisé tous les ans pour une évaluation fiable et cohérente.

Le but de l'indicateur traite de la durabilité et il semble pertinent de retenir des critères d'ordre géologiques dans l'IED. Des choix personnels ont néanmoins été faits : le choix de certains critères a été effectué arbitrairement, comme par exemple le fait de retenir l'aspect énergétique dans l'indicateur. Par ailleurs, des paramètres tels que la pondération des critères ou encore l'attribution des impacts en fonction de la durée des réserves ne peuvent s'établir que de manière relativement subjective.

Pour refléter au mieux la réalité, l'inventaire des métaux critiques du produit doit être effectué le plus justement possible. Or, dans le secteur des TIC, les composants sont relativement nombreux et sont présents sous forme d'alliages complexes et extrêmement miniaturisés. Par ailleurs, les inventaires renseignent des quantités moyennes de métaux, ces derniers étant difficilement quantifiable d'un point de vue technique. Il n'existe ainsi que très peu d'études qui reprennent en détail les différents éléments présents au sein d'un outil tel qu'un ordinateur. Il faudra veiller en amont à obtenir les données les plus adéquates en vue de réaliser un indicateur qui se veut le plus fiable possible.

Certaines données ne sont pas facilement (voire pas) accessibles. Malgré une base de données riche et relativement complète, certaines données géologiques n'existent pas. Les informations concernant les réserves précises de chaque terre rare ou de certains autres métaux tels que l'indium ou le gallium ne sont pas renseignées pour les dernières années. Il faut donc établir des estimations, ce qui pourrait diminuer l'exhaustivité de l'indicateur.

Les différentes méthodes d'évaluation existantes pour quantifier l'impact de l'épuisement des ressources abiotiques engendrent des résultats différents, en fonction de la formule de calcul choisie. L'indicateur a présenté des impacts selon la méthodologie CML en retenant la formule du rapport entre le taux d'extraction (la production annuelle) et le carré des réserves pour la caractérisation de l'impact en gramme d'antimoine équivalent. D'autres formules indiquent des résultats différents, qui pourtant ont la même interprétation. Dans l'hypothèse où l'indicateur servirait de comparaison entre différents produits, il faudra veiller à ce que les mêmes formules du calcul de l'ADP soient utilisées.

Réponse à la problématique

De par l'exploitation de métaux rares et de par leur composition, les TIC n'apparaissent pas comme des outils dont la durabilité à terme semble possible. En ce qui concerne la problématique de l'épuisement, il faut bien comprendre que la raréfaction des métaux n'est pas vraiment due à un épuisement au sens propre du terme (la croûte terrestre regorge de ressources), mais plutôt à une diminution des ressources facilement accessibles et économiquement exploitables.

L'indicateur a permis de mettre en évidence le caractère plus problématique de certains métaux au sein des TIC tels que le palladium, le tantale et l'indium en raison de leur réserves relativement basses. Le cobalt, même s'il dispose de réserves relativement importantes (7,1 Mt) est utilisé dans les batteries en quantité relativement importante. Malgré leur dénomination, les terres rares contribuent à la raréfaction dans de moindres proportions. Elles pourraient faire l'objet d'une augmentation de la demande, en raison de leur utilisation dans les technologies vertes. Leurs productions minières sont par ailleurs très concentrées.

Des substituts de matériaux non critiques existent et pourraient se présenter comme une réelle opportunité pour le futur de ces technologies. Toutefois, l'amélioration de leur durabilité passera probablement par un sacrifice partiel de leur performance technique, à savoir la rapidité, la miniaturisation, la faible densité et le nombre d'applications et d'options proposées. La course à la performance est ce qui permet pourtant l'avantage concurrentiel des grandes entreprises du secteur numérique. Le domaine des technologies de pointe se caractérise par des investissements massifs dans la recherche pour proposer des produits toujours plus performants. D'ailleurs, il est de nos jours peu probable que la demande renonce à la performance technique induite par les TIC au détriment d'outils plus durables. À quoi bon dans ce cas proposer en amont un produit un tant soit peu plus durable s'il n'y a pas adéquation avec la demande en aval…

La résolution de la question liée à la raréfaction des ressources passe avant tout par une remise en cause de certains « besoins » matériels, induits par la société de consommation. La sobriété matérielle couplée à la substitution de certains métaux et donc au renoncement de la performance à tout prix seraient des solutions potentielles.

Discussion

Les problématiques liées à l'épuisement des ressources métalliques ont été analysées mais l'indicateur n'a pas pris en compte d'autres impacts liés à la consommation des TIC, qu'ils soient environnementaux, éthiques et/ou sociaux.

Le coltan, minerai de tantale ou encore la cobaltite, minerai de cobalt qui sont grandement produits en République Démocratique du Congo sont des minerais qui font l'objet de nombreuses critiques en raison des conditions de travail des mineurs ou encore des guerres civiles qui y font rage, liées aux situations de contrôle et de monopole sur les ressources. La toxicité de certains métaux dans les équipements en fin de vie serait également un type d'impact environnemental à prendre en compte. Le plomb, le mercure et certains métaux comme le cadmium et l'antimoine sont des métaux toxiques qui peuvent se retrouver dans l'environnement s'ils ne parviennent pas à des centres de tri spécialisés dans les D3E. Un indicateur actualisé et renforcé pourrait prendre en compte ces différents paramètres, dans une optique de développement réellement durable.

Bibliographie

Articles et ouvrages scientifiques

Ademe (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie), Geldron A. (2017). *L'épuisement des métaux et minéraux : faut-il s'inquiéter ?* Fiche technique, 23 p.

Arndt N. & Ganino C. (2010). *Ressources minérales. Origine, nature et exploitation***.** Dunod, 173 p.

Ashby M. F. (2013). *Materials and the Environment: Eco-informed Material Choice* (*2è ed.).* Elsevier, 628 p.

Auverlot D. (2013). *Les approvisionnements en métaux critiques : un enjeu pour la compétitivité des industries françaises et européennes ?*, 34 p.

Bauraing E., Nicolas J. & Von Frenckell M. (2000). *Les indicateurs de performance environnementales*. Fondation Universitaire Luxembourgeoise, 28 p.

Belkhir L. & Elmeligi A. (2018). *Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations*. Journal of Cleaner Production, pp.448-463.

Bihouix P. (2011). *Des limites de l'économie circulaire : la question des métaux.* Momentum Institut.

Bihouix P. (2014). *L'âge des low-tech : vers une civilisation techniquement soutenable*. Edition du Seuil Collection Anthropocène, 338 p.

Bihouix P. & De Guillebon B. (2010). *Quel futur pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société***.** Edition Edp Sciences, 299 p.

Binet A. (2003). *Le Second xxe siècle (1939-2000)*, Paris, Ellipses, 704 p.

Blanchard P., Da Silva F., Dupont J., Fautrat G., Halopeau B., Lesieur S., Lkhaoua P. & Pesesse E. (2010). Analyse de la stratégie de gestion des matières premières critiques de la France : état des lieux et analyse, 71 p.

Blaser F., Böni H. & Wäger P. (2012). *Indicateurs destinés à évaluer l'utilisation des ressources naturelles*. Académie Suisse des sciences, 19 p.

Botero E., Valero A. & Valero A. (2009). *Exergy, Energy System Analysis and Optimization Volume III : Artificial Intelligence and Expert Systems in Energy Systems Analysis Sustainability Considerations in the Modeling of Energy Systems*. Edition EOLSS Publication, 444 p.

BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières). (2012a). *Fiche de synthèse : L'antimoine*.

BRGM. (2012b). *Fiche de synthèse : Le tantale.*

BRGM. Audion A.-S. & Piantone P. (2012c). *Panorama 2011 du marché du tantale*, 88 p.

BRGM. Labbé J.-F. (2014a). *Panorama 2012 du marché des platinoïdes*, 215 p.

BRGM. Audion A.-S., Hocquard C. & Labbé J.-F. (2014b). *Panorama 2013 du marché du cobalt,* 156 p.

BRGM. Bru K., Christmann P., Labbé J.-F. & Lefebvre G. (2015a). *Panorama 2014 du marché des Terres Rares*, 193 p.

BRGM. Christmann P. & Labbé J.-F. (2015b). *Notice de réalisation et d'utilisation des fiches de synthèse sur la criticité des matières premières minérales non-énergétiques*. 61 p.

Brundtland H. (1987). *Rapport Brundtland : Our Common Future*, 349 p.

Commission Européenne (2014). *Report on critical raw materials for the EU*, 41 p.

Commission Européenne (2017a). *Methodology for establishing the EU list of critical raw materials - Guidelines*, 25 p.

Commission Européenne (2017b). *Communication de la Commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité Économique et Social Européen et au Comité des Régions relative à la liste 2017 des matières premières critiques pour l'UE*, 8 p.

Commission Européenne (2018). *Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy*, 68 p.

CRM-InnoNet (Critical Raw Materials Innovation Network). Tercero Espinoza L., Hummen T., Brunot A., Hovestad A., Pena Garay I., Velte D., Smuk L., Todorovic J., van der Eijk C. & Joce C. (2015). *Critical Raw Materials Substitution Profiles*, 96 p.

EcoInfo, Berthoud Françoise et al. (2012) *Impacts écologiques des Technologies de l'Information et de la Communication, les faces cachées de l'immatérialité.* Edition Edp Sciences Collection Quinte Sciences, 222 p.

Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., De Schryver A., Struijs J. & van Zelm R. (2009). *ReCiPe 2008 : A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level - First edition, Report I: Characterisation*, 126 p.

Goedkoop M. & Spriensma R. (2000). *The Eco-indicator 99 : A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment - Methodology Report*. PRé Consultants (2nde édition), 132 p.

Guinée J., Huppes G., de Koning A. & van Oers L. (2002). *Abiotic resource depletion in LCA*, 75 p.

Guinée J. & van Oers L. (2016). *The Abiotic Depletion Potential: Background, Updates, and Future*. Resources, MDPI, 12 p.

Hagelüken C. & Meskers C. (2010). *Chapter 10 : Complex Life Cycles of Precious and Special Metals*. In T. Graedel & E. van der Voet (Eds.), *Linkages of Sustainability*. Strüngmann forum reports, pp.163-197.

Hocquard C. & Samama J.-C. (2012). *Les défis des métaux "critiques"*. Géologues n°170, pp.7-13.

Institut de la statistique du Québec (2009). *L'empreinte écologique : revue de littérature et analyse critique - Cahier technique et méthodologique*, 61 p.

JLCA (Life Cycle Assessment Society of Japan). Itsubo N. & Inaba A. (2014). *Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling. Chapter 2 - Characterization and Damage, Evaluation Methods*. JLCA news english edition n°18, 151 p.

JORF (Journal officiel de la République Française) (2011). *Vocabulaire de l'audiovisuel et de l'informatique*.

Moore G. (1965). *Cramming more components onto integrated circuits.* Electronics, volume 38, n°8.

Moore G. (1975). *Progress In Digital Integrated Electronics*. Intel.

(The) National Academy of Sciences (2007). *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy*, 4 p.

Öko-Institut, Buchert M., Manhart A., Bleher D. & Pingel D. (2012). *Recycling critical raw materials from waste electronic equipment*, 80 p.

Öko-Institut, Manhart A., Blepp M., Fischer C., Graulich K., Prakash S., Priess R., Schleicher T. & Tür M. (2016). *Resource Efficiency in the ICT Sector,* 86 p.

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) Graedel T. & Gerst M. (2010).
Metal stocks in society - Scientific Synthesis, 48 p.

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) Graedel T., Allwood J., Birat J.-P., Reck B.K., Sibley S.F., Sonnemann G., Buchert M. & Hagelüken C. (2011a). *Recycling Rates of Metals – A Status Report*, 44 p.

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) Graedel T., Buchert M., Reck B. & Sonnemann G. (2011b). *Assessing mineral resources in society : metal stocks & recycling rates*, 31 p.

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) Reuter M. A., Hudson C., van Schaik A., Heiskanen K., Meskers C. & Hagelüken C. (2013). *Metal Recycling : Opportunities, Limits, Infrastructure. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel*, 316 p.

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) Hertwich E., van der Voet E., Suh S. & Tukker A. (2010). *Assessing the Environmental Impacts of Consumption and Production - Priority Products and Materials*, 108 p.

Skinner B. (1976). *A Second Iron Age Ahead?* American Scientist, Vol. 64, No. 3, pp. 258-269.

Tharumarajah R. & Koltun P. (2011). *Cradle to gate assessment of environmental impact of rare earth metals*. Australian Life Cycle Assessment Society, 5 p.

USGS (United States Geological Survey). (2008). *Mineral commodity summaries 2008,* p.81.

USGS. (2018). *Mineral commodity summaries 2018*, 200 p.

Van der Voet E. (2012). *Criticality and Abiotic Resource Depletion in LCA,* 16 p.

Van Hoecke M.-P. & Leroy M. (2011). *Métaux : matériaux stratégiques et pénurie - Quelles stratégies adopter pour faire face ?* L'actualité chimique - décembre 2011 - n° 358, pp.24-29.

Waldner J.-B. (2007). *Nano-Informatique & Intelligence Ambiante - Inventer l'ordinateur du XXIème Siècle*. Hermes Science, London, 302 p.

WMD (World Mining Data). Reichl C., Schatz M. & Zsak G.(2017). *Minerals Production - Volume 32.* 248 p.

Articles en ligne et sites web

24-carats. (2015). *Qu'est-ce qu'un métal précieux ?*. En ligne sur : http://www.24-carats.fr/metauxprecieux.html. Consulté le 26 février 2018.

Azo Materials. (n.d). *Dysprosium*. En ligne sur : https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1125. Consulté le 08 mai 2018.

Azo Materials. (n.d). *Europium Properties and Applications*. En ligne sur : https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1128. Consulté le 08 mai 2018.

BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières). (2016a). *Fiches de criticité des substances minérales*. En ligne sur : http://www.brgm.fr/projet/fiches-criticite-substances-minerales-0. Consulté le 25 février 2018.

BRGM. *Fiches de synthèse sur la criticité des métaux* : *Argent (2017) ; Cobalt (2017) ; Cuivre (2018) ; Dysprosium (2016) ; Étain (2017) ; Gallium (2016) ; Germanium (2015) ; Indium (2017) ; Lithium (2017) ; Néodyme (2015) ; Palladium (2017) ; Platine (2017) ; Tantale (2015).* En ligne sur : http://www.mineralinfo.fr/page/fiches-criticite.

EcoInfo. (2014a). *Les mines de minerais métallifères*. En ligne sur : https://ecoinfo.cnrs.fr/2014/04/28/1-les-mines-de-minerais-metalliferes/. Consulté le 10 mai 2018.

EcoInfo. (2014b). *Épuisement des ressources naturelles*. En ligne sur : https://ecoinfo.cnrs.fr/2014 /03/11/1-epuisement-des-ressources-naturelles/. Consulté le 28 février 2018.

EcoInfo. (2014c). *Le recyclage des métaux.* En ligne sur : https://ecoinfo.cnrs.fr/2014/09/03/3-le- recyclage-des-metaux/. Consulté le 03 mai 2018.

EcoInfo. (2014d). *L'énergie des métaux*. En ligne sur : https://ecoinfo.cnrs.fr/2014/09/03/2-lenergie- des-metaux/. Consulté le 10 mai 2018.

EcoInfo. (2014). *Les matériaux dans les équipements terminaux*. En ligne sur : http://ecoinfo.cnrs.fr/2014/04/11/les-materiaux-dans-les-equipements-terminaux/. Consulté le 25 février 2018.

EcoInfo. (2014). *Situation et tendances des matières premières.* En ligne sur : https://ecoinfo.cnrs.fr/2014/04/24/situation-et-tendances-des-matieres-premieres/. Consulté le 25 mars 2018.

EcoInfo. (2015). *Des matériaux critiques pour l'Union Européenne.* En ligne sur : https://ecoinfo.cnrs.fr/2015/10/14/2-des-materiaux-critiques-pour-lunion-europeenne/. Consulté le 25 février 2018.

EMC. (2014). *The digital universe of opportunities : rich data and the increasing value of the internet of things.* En ligne sur : https://france.emc.com/leadership/digital-universe/2014iview/executive- summary.htm. Consulté le 23 février 2018.

Ifixit. (n.d). *Tablet Repairability Scores*. En ligne sur : https://www.ifixit.com/tablet-repairability. Consulté le 05 mai 2018.

Ifixit. (n.d). *Smartphone Repairability Scores*. En ligne sur : https://www.ifixit.com/smartphone- repairability. Consulté le 05 mai 2018.

Internet World Stats. (2018). *World Internet Users and 2018 Population Stats.* En ligne sur : https://www.internetworldstats.com/stats.htm. Consulté le 25 mars 2018.

Lenntech. (2018). *Cerium*. En ligne sur : https://www.lenntech.com/periodic/elements/ce.htm. Consulté le 04 mai 2018.

Lenntech. (2018). *Europium*. En ligne sur : https://www.lenntech.com/periodic/elements/eu.htm

Lenntech. (2018). *Gadolinium*. En ligne sur : https://www.lenntech.com/periodic/elements/gd.htm.

Lenntech. (2018). *Praseodymium.* En ligne sur : https://www.lenntech.com/periodic/elements/pr.htm.

Lozac'h Y. (n.d). *Gangue*. Encyclopædia Universalis. En ligne sur : http://www.universalis.fr/encyclopedie/gangue/. Consulté le 08 mai 2018.

Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2017). *L'affichage environnemental des produits.* En ligne sur : https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/laffichage-environnemental-des-produits.

Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2018). *Feuille de route économie circulaire : mieux consommer pour faire durer nos produits.* En ligne sur : https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/ feuille-route-economie-circulaire-mieux-consommer-faire-durer-nos-produits.

Panou G. (n.d). *Minéralurgie*. Encyclopædia Universalis. En ligne sur : https://www.universalis.fr/encyclopedie/mineralurgie/. Consulté le 08 mai 2018.

Pavillon M.-J. (n.d). *Métaux - Gisements métallifères.* Encyclopædia Universalis. En ligne sur :https://www.universalis.fr/encyclopedie/metaux-gisements-metalliferes/1-definitions/. Consulté le 31 mars 2018.

Statista. (2018a). *Shipment forecast of tablets, laptops and desktop PCs worldwide from 2010 to 2022 (in million units).* En ligne sur : https://www.statista.com/statistics/272595/global-shipments- forecast-for-tablets-laptops-and-desktop-pcs/. Consulté le 24 février 2018.

Statista. (2018b). *Global smartphone shipments forecast from 2010 to 2022 (in million units).* En ligne sur : https://www.statista.com/statistics/263441/global-smartphone-shipments-forecast/.

Webelements. (n.d). *Abundance in Earth's crust.* En ligne sur : https://www.webelements.com/periodicity/abundance_crust/. Consulté le 31 mars 2018.

Wikipédia. (2017). *Facteur limitant.* En ligne sur: https://fr.wikipedia.org/wiki/Facteur_limitant.

Wikipédia. (2018). *Loi de Liebig sur le minimum.* En ligne sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Liebig_sur_le_minimum. Consulté le 14 avril 2018.

ZDNet. (n.d). *Les chiffres clés du marché IT et de l'Internet*. En ligne sur : http://www.zdnet.fr/chiffres-cles.htm. Consulté le 24 janvier 2018.