Quiz Introduction : Impacts environnementaux du numérique

Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions :
http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/fr/

Table des matières

I - Exercice : Équivalent CO_2 **3**

II - Exercice : Smartphones vendus **4**

III - Exercice : Cycle de vie **5**

IV - Exercice : Impacts de la fabrication **6**

V - Exercice : Matériaux dans un smartphone **7**

VI - Exercice : De l'or dans les smartphones **8**

VII - Exercice : Du tantale les smartphones **9**

VIII - Exercice : De l'indium dans un smartphone **10**

IX - Exercice : Réserves d'indium **11**

X - Exercice : Bloqueur de pub **12**

XI - Exercice : Impacts du télétravail **13**

Solutions des exercices **14**

Glossaire **21**

Références **22**

Bibliographie **23**

Webographie **24**

Crédits des ressources **26**

Contenus annexes **29**

Exercice : Équivalent CO_2

[solution n°1 p. 14]

Tous les impacts environnementaux peuvent-ils se traduire en **équivalent CO_2** ?

A Oui

B Non, car les scientifiques n'arrivent pas se mettre d'accord sur les équivalences.

C Non, car la mesure du rejet de CO_2 n'est qu'un des impacts environnementaux parmi d'autres.

Exercice : Smartphones vendus

[solution n°2 p. 14]

Combien de smartphones ont été vendus dans le monde en 2019 ?

- **A** environ 10 millions
- **B** environ 100 millions
- **C** environ 1 milliard
- **D** environ 10 milliards

Exercice : Cycle de vie

[solution n°3 p. 15]

Quelle est la phase du cycle de vie qui concentre le plus d'impacts environnementaux pour les objets numériques ?

- **A** La fabrication
- **B** L'usage
- **C** Le transport
- **D** Le traitement de fin de vie

Exercice : Impacts de la fabrication

[solution n°4 p. 16]

Quels impacts environnementaux sont significatifs lors de la fabrication des objets numériques ?

- **A** Gaz à effet de serre
- **B** Toxicité
- **C** Utilisation d'eau douce
- **D** Épuisement des métaux

Exercice : Matériaux dans un smartphone

[solution n°5 p. 16]

Combien y a-t-il d'éléments du tableau périodique différents dans un smartphone ?

- **A** Entre 10 et 20
- **B** Entre 20 et 30
- **C** Entre 30 et 50
- **D** Plus de 50

Exercice : De l'or dans les smartphones

[solution n°6 p. 17]

Où trouve-t-on de l'or dans un smartphone ?

- **A** Dans le boîtier
- **B** Dans les cartes et les composants
- **C** Dans la batterie
- **D** Dans l'écran
- **E** Dans la dalle tactile

Exercice : Du tantale les smartphones

[solution n°7 p. 17]

Où trouve-t-on du tantale dans un smartphone ?

- **A** Dans les condensateurs (accumulateur d'énergie)
- **B** Dans la partie tactile de l'écran
- **C** Dans le processeur

Exercice : De l'indium dans un smartphone

[solution n°8 p. 18]

Où trouve-t-on de l'indium dans un smartphone ?

- **A** Dans la partie tactile de l'écran
- **B** Dans le processeur
- **C** Dans la batterie

Exercice : Réserves d'indium

[solution n°9 p. 18]

Dans l'hypothèse où on ne découvrirait pas d'autres réserves, dans combien de temps les réserves d'indium seront-elles épuisées ?

La production actuelle d'indium est de l'ordre de 760 tonnes par an. La croissance de la demande est de 5,1% par an et les réserves actuelles sont estimées à 380 000 tonnes.

- **A** Dans environ 65 ans
- **B** Dans environ 175 ans
- **C** Dans environ 325 ans
- **D** Dans environ 500 ans

Exercice : Bloqueur de pub

[solution n°10 p. 19]

Installer un bloqueur de publicités et de cookies sur un navigateur permet de :

A Réduire l'impact direct du numérique

B Réduire l'impact indirect du numérique

Exercice : Impacts du télétravail

[solution n°11 p. 20]

En généralisant le télétravail grâce au numérique, nous allons réduire les émissions de gaz à effet de serre.

A Vrai

B Faux

Solutions des exercices

Solution n°1

[exercice p. 3]

Tous les impacts environnementaux peuvent-ils se traduire en **équivalent CO_2** ?

A Oui

B Non, car les scientifiques n'arrivent pas se mettre d'accord sur les équivalences.

C Non, car la mesure du rejet de CO_2 n'est qu'un des impacts environnementaux parmi d'autres.

Les gaz à effet de serre sont un bon indicateur du réchauffement global, mais l'urgence climatique ne doit pas faire oublier les autres enjeux environnementaux : pollution, épuisement des ressources...

Pour mesurer l'impact du numérique, comme celui de tout autre secteur d'activité, il est indispensable de faire des études multicritères, qui combinent plusieurs indicateurs, et cela pour toutes les phases de la vie d'un produit ou d'un service.

Solution n°2

[exercice p. 4]

Combien de smartphones ont été vendus dans le monde en 2019 ?

A environ 10 millions

B environ 100 millions

C environ 1 milliard

D environ 10 milliards

Près de 1,4 milliard de smartphones neufs ont été vendus en 2019 !

Ce chiffre a légèrement baissé en 2020 à cause de la crise du COVID mais le remplacement des smartphones pour l'utilisation de la 5G devrait à nouveau booster les ventes.

La durée d'utilisation moyenne d'un smartphone en France se situe entre 20 et 24 mois, autrement dit beaucoup moins que leur durée de vie possible en y faisant attention et en changeant la batterie.

Quoi qu'il en soit, si on prend une durée de vie moyenne de 3 ans pour un smartphone, nous pouvons estimer que le nombre de smartphones en usage dans le monde est de l'ordre de 4 milliards, plus un très grand nombre qui attendent dans des tiroirs.

Source : France Stratégie, 2020, "La consommation de métaux du numérique : un secteur loin d'être dématérialisé"[1] [09/02/2022]

Solution n°3

[exercice p. 5]

Quelle est la phase du cycle de vie qui concentre le plus d'impacts environnementaux pour les objets numériques ?

A La fabrication

B L'usage

C Le transport

D Le traitement de fin de vie

La phase de fabrication, qui inclut toutes les opérations nécessaires, de l'extraction des matières premières jusqu'à l'assemblage finale de l'objet, concentre une grande partie des impacts :

- épuisement des ressources,
- consommation de grandes quantité d'eau,
- utilisation et rejet de produits toxiques
- mais aussi utilisation de combustibles fossiles émetteurs de gaz à effet de serre.

Si on regarde plus finement les différentes étapes de fabrication, c'est la production de la carte électronique qui génère la majorité des gaz à effet de serre.

Exemple : Émissions de carbone d'un iPhone 12 au cours de son cycle de vie :

- 83% production
- 2% transport
- 14% use
- <1% end-of-life

Quelle est l'empreinte environnementale d'un terminal aux différentes étapes de son cycle de vie ? *(cf. p.29)*

1. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjttrLi3_P1AhXMEcAKHUChD4UQFnoECAQQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.strategie.gouv.fr%2Fsites%2Fstrategie.gouv.fr%2Ffiles%2Fatoms%2Ffiles%2Ffs-2020-dt-consommation-metaux-du-numerique-juin.pdf&usg=AOvVaw3toUTti4cOHWcYFL_nPScU

Solution n°4

[exercice p. 6]

Quels impacts environnementaux sont significatifs lors de la fabrication des objets numériques ?

- **A** Gaz à effet de serre
- **B** Toxicité
- **C** Utilisation d'eau douce
- **D** Épuisement des métaux

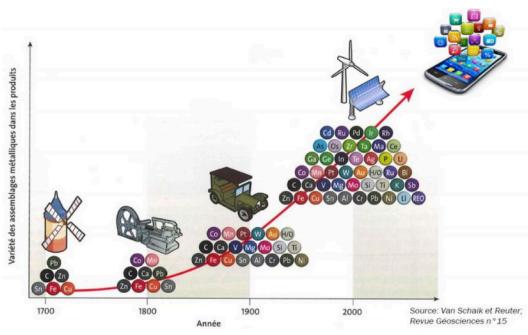
Solution n°5

[exercice p. 7]

Combien y a-t-il d'éléments du tableau périodique différents dans un smartphone ?

- **A** Entre 10 et 20
- **B** Entre 20 et 30
- **C** Entre 30 et 50
- **D** Plus de 50

Un smartphone contient plus de 50 éléments différents !



Une très grande partie sont des métaux, parfois communs (Acier, Cuivre, Zinc, Aluminium, ...) mais aussi précieux (Or, Argent, ...), voire rares (Tantale, Niobium, Indium, Hafnium, Palladium, ...).

De nombreux métaux spécifiques sont utilisés pour leurs propriétés physico-chimiques spécifiques à l'implémentation des nombreuses fonctionnalités d'un smartphone. Par exemple, le Néodyme et le praséodyme sont utilisés pour produire les vibrations du téléphone.

Il est frappant de constater qu'avec le progrès technologique le nombre d'éléments nécessaires à leur fabrication ne cesse d'augmenter. Nous sommes passés d'une économie fondée sur l'exploitation de moins d'une dizaine de métaux à la fin du 19ème siècle à celle de plus de 60 aujourd'hui.

Source : Rapport du sénat, 100 millions de téléphones portables usagés : l'urgence d'une stratégie, 2021[2] *[09/02/2022]*

Solution n°6

[exercice p. 8]

Où trouve-t-on de l'or dans un smartphone ?

- **A** Dans le boîtier
- **B** Dans les cartes et les composants
- **C** Dans la batterie
- **D** Dans l'écran
- **E** Dans la dalle tactile

Des bijoux de technologie !

En dehors de son utilisation dans le secteur financier, l'or (Au) est un métal précieux utilisé principalement dans le secteur de la bijouterie et dans l'industrie électronique (environ 6% de l'or en circulation dans le monde est utilisé dans l'industrie électronique).

Notons que l'or présent dans les déchets électroniques constitue la principale source de valeur de ces déchets, avec près de 19 milliards d'euros pour seulement 500 tonnes de matière.

Source : France Stratégie, 2020. "La consommation de métaux du numérique : un secteur loin d'être dématérialisé"[3] *[10/02/2022]*

Solution n°7

[exercice p. 9]

Où trouve-t-on du tantale dans un smartphone ?

- **A** Dans les condensateurs (accumulateur d'énergie)
- **B** Dans la partie tactile de l'écran
- **C** Dans le processeur

Le tantale, Késako ?

2. https://www.senat.fr/rap/r15-850/r15-8501.html
3. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjCicbMoKL2AhWtxYUKHdjWBggQFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.strategie.gouv.fr%2Fsites%2Fstrategie.gouv.fr%2Ffiles%2Fatoms%2Ffiles%2Ffs-2020-dt-consommation-metaux-du-numerique-juin.pdf&usg=AOvVaw3toUTti4cOHWcYFL_nPScU

Le tantale fait partie des métaux rares (à ne pas confondre avec les terres rares). Il fait partie de ces métaux dont l'utilisation a explosé du fait des nouvelles technologies, notamment des smartphones.

Les principales mines de tantale se trouvent en Australie et au Canada. Mais ce métal est aussi exploité dans de nombreuses mines artisanales en République Démocratique du Congo par exemple, ce qui soulève d'importants problèmes à cause des conditions d'extraction, des conflits armés et du travail des enfants.

La soudaine demande de tantale liée à la miniaturisation de nos smartphones que l'on souhaite suffisamment plats pour les glisser dans nos poches, a fait exploser le nombre de mines artisanales et les conflits armés autour de ces ressources.

Solution n°8

[exercice p. 10]

Où trouve-t-on de l'indium dans un smartphone ?

A Dans la partie tactile de l'écran

B Dans le processeur

C Dans la batterie

L'indium, what else ?

Les premiers écrans tactiles étaient résistifs, c'est-à-dire qu'il fallait physiquement appuyer dessus avec son doigt ou un stylet. Nos smartphones modernes ont des écrans capacitifs, avec un champ électrostatique qui reconnaît les perturbations causées par le simple contact de la peau.

Pour que cela fonctionne, il faut revêtir l'écran d'un film qui conduit l'électricité tout en étant transparent. Ce film est fait d'oxyde d'indium-étain (abrévié "ITO"). L'indium est aussi utilisé dans les LED pour leur donner une lumière bleue.

Enfin, dans les circuits intégrés, pour rendre le silicium conducteur d'électricité à certains endroits seulement, il faut le doper en y ajoutant des impuretés comme par exemple de l'indium.

Solution n°9

[exercice p. 11]

Dans l'hypothèse où on ne découvrirait pas d'autres réserves, dans combien de temps les réserves d'indium seront-elles épuisées ?

La production actuelle d'indium est de l'ordre de 760 tonnes par an. La croissance de la demande est de 5,1% par an et les réserves actuelles sont estimées à 380 000 tonnes.

A Dans environ 65 ans

B Dans environ 175 ans

C Dans environ 325 ans

D Dans environ 500 ans

Des réserves d'indium très limitées.

Dans l'hypothèse où :

- on ne découvrirait pas d'autres réserves,
- on ne parviendrait pas à extraire de l'indium là où il est très peu concentré,
- et si la demande restait constante (à 5,1% de croissance annuelle) sur toute la durée concernée,

alors la durée de production serait en effet de 65 ans.

Cela dit, la probabilité pour que toutes ces conditions restent réunies sur 65 ans est faible, voire nulle parce qu'il est très probable qu'un métal de substitution serait utilisé. Ce petit calcul permet cependant de réaliser que ces ressources métalliques ne sont pas infinies !

Le recyclage permettrait de repousser cette limite mais pas de la supprimer !

Source : Fiche de synthèse sur la criticité des métaux-L'indium, brgm, 2017[4] [10/02/2022]

Solution n°10

[exercice p. 12]

Installer un bloqueur de publicités et de cookies sur un navigateur permet de :

A

☐ Réduire l'impact direct du numérique — Il limite les données transmises et collectées (et donc l'impact direct du numérique)

B

☐ Réduire l'impact indirect du numérique

- Il limite la fonction de génération de consommation de produit de la publicité (et donc l'impact indirect du numérique financé par la publicité).

4. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj11ejj2PX1AhUOV8AKHeQWDI4QFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.mineralinfo.fr%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fdocuments%2F2020-12%2Ffichecriticiteindium170921.pdf&usg=AOvVaw2DEmCWtHu__vS8OGi0bHit

- Bloqueurs de pub : uBlock Origin (Firefox[5] / Chrome)[6], Adguard Adblocker[7], Poper blocker (Firefox[8] / Chrome)[9].
- Gestionnaire de cookies : Adequa (Firefox[10] / Chrome)[11].
- Les paramètres avancés des navigateurs permettent de bloquer les cookies et les données de sites tiers.

Solution n°11

[exercice p. 13]

En généralisant le télétravail grâce au numérique, nous allons réduire les émissions de gaz à effet de serre.

A Vrai

B Faux

On ne sait pas...

Intuitivement, l'impact du télétravail semble largement positif au niveau environnemental grâce notamment à la réduction du trafic routier. Pourtant, la balance environnementale globale du télétravail est plus complexe à établir qu'il n'y paraît. De nombreux effets indirects viennent ainsi réduire les bénéfices environnementaux attendus. Pour ce qui est du télétravail comme pour de nombreux autres sujets, il faut être vigilant à ne pas faire de corrélations trop simples qui ne permettent pas de rendre compte de la complexité nos systèmes sociétaux et économiques.

Source : rapport de l'ADEME[12] sur la Caractérisation des effets rebond induits par le télétravail, Septembre 2020.

5. https://addons.mozilla.org/en-US/firefox/addon/ublock-origin/
6. https://chrome.google.com/webstore/detail/ublock-origin/cjpalhdlnbpafiamejdnhcphjbkeiagm?hl=fr
7. https://adguard.com/fr/download.html
8. https://poperblocker.com/fr/installer-2/
9. https://chrome.google.com/webstore/detail/pop-up-blocker-for-chrome/bkkbcggnhapdmkeljlodobbkopceiche?hl=fr
10. https://addons.mozilla.org/fr/firefox/addon/adequa-mozilla/
11. https://chrome.google.com/webstore/detail/adequa/icceppfappmmehbceklpljipmpgehalo?hl=fr
12. https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/3776-caracterisation-des-effets-rebond-induits-par-le-teletravail.html

Glossaire

ADEME

ADEME : Agence de la transition écologique

Attribution des impacts

Un exemple concret des enjeux liés à l'attribution est donné par le laitier[13] : les conventions diffèrent entre les cimentiers et les sidérurgistes (voir cet article des Échos[14]) si bien qu'une partie de leurs émissions de gaz à effet de serre n'est pas attribuée.

DEEE

DEEE : déchets d'équipements électriques et électroniques

Différents processus de décision

Attention, lorsque ces décisions concernent des changements de large échelle c'est la méthodologie ACV-C et non ACV-A qui doit être utilisée.

Éco-organisme

Éco-organisme : société de droit privé détenue par les producteurs et distributeurs pour prendre en charge, dans le cadre de la Responsabilité élargie du producteur (REP), la fin de vie des équipements qu'ils mettent sur le marché (source : Wikipédia)

Suppléments

Le lecteur intéressé par cette question peut se référer aux travaux cités dans la partie "Pour aller plus loin" autour des sources de variations dans les ACV de smartphones, tablettes et ordinateurs fixes.

Système de refroidissement à eau

Il existe des systèmes de refroidissement à eau utilisés en particulier pour les PC de jeu.

13. https://fr.wikipedia.org/wiki/Laitier_(m%C3%A9tallurgie)
14. https://www.lesechos.fr/industrie-services/immobilier-btp/quand-le-ciment-et-lacier-verdissent-par-un-artifice-de-comptage-du-co2-1175912

Références

Faits sur les éléments des terres rares

Faits sur les éléments des terres rares. Disponible sur www.rncan.gc.ca[15]. Modifié en février 2021.

Intel

Intel's Fundamental Advance in Transistor Design Extends Moore's Law, Computing Performance. SANTA CLARA, Calif., Nov. 11, 2007. Disponible sur intel.com[16]

Rapport de l'ADEME

Le rapport de l'ADEME cité ci-dessus est en fait une synthèse du rapport de 139 pages de l'ACV.

15. https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/mines-materiaux/faits-mineraux-metaux/faits-sur-les-elements-des-terres-rares/20631#L1
16. https://www.intel.com/pressroom/archive/releases/2007/20071111comp.htm

Bibliographie

[Berlingen, 2020] Flore Berlingen. *Recyclage Le Grand Enfumage*. Ed. Rue de l'échiquier, 2020

[GreenIT.fr, 2019] *Empreinte environnementale du numérique mondial* – Octobre 2019 – GreenIT.fr

[Grosse, 2014] François Grosse. *Les limites du recyclage dans un contexte de demande croissante de matières premières*. Annales des Mines - Responsabilité et environnement, 2014/4 (N° 76), p. 58-63. DOI 10.3917/re.076.0058

[The ShiftProject, 2018] *Lean ICT – Les impacts environnementaux du Numérique* – Octobre 2018 – The ShiftProject

Webographie

[ADEME, 2011] ADEME - *Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique- Volet courrier électronique: Synthèse* - Juillet 2011 - Disponible sur le site de l'ADEME.

[Barroso et Hölzle, 2007] Luiz André Barroso et Urs Hölzle. *The Case for Energy-ProportionalComputing*, IEEE Computer, Vol. 40, No. 12, Décembre 2007. Disponible en ligne [06/02/2022]

[Bol et al., 2021] David Bol, Thibault Pirson, Rémi Dekimpe. *Moore's Law and ICT Innovation in the Anthropocene* [en ligne]. IEEE Design, Automation and Test in Europe Conference, 2021. Disponible sur le site de l'Université de Louvain [28/01/2022]

[Briens , 2015] La section 2.3 du chapitre 2 de la thèse de François Briens (p. 81) décrit plus en détail les limites des modélisations économiques usuelles en présence de ruptures profondes. Cette thèse est disponible sur la base de thèse en ligne [23/07/2021]

[Brockway et al., 2021] Paul Brockway, Steve Sorrell, Gregor Semieniuk, Matthew Kuperus Heun, Victor Court. *Energy efficiency and economy-wide rebound effects: A review of the evidence and its implications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021. Disponible sur hal [28/01/2022]

[Clément, 2020] Louis-Philippe P.-V.P. Clément, Quentin E.S. Jacquemotte, Lorenz M. Hilty. *Sources of variation in life cycle assessments of smartphones and tablet computers* [en ligne sur abonnement]. Environmental Impact Assessment Review, 2020, volume 84. Disponible sur le site d'Elsevier [27/01/2022]

[Dedryver et Couric, 2020] Liliane Dedryver et Vincent Couric. *La consommation de métaux du numérique : un secteur loin d'être dématérialisé* [en ligne], 08/2020. Disponible sur le site www.strategie.gouv.fr [27/01/2022]

[Eustache et Ferret, 2014] Patrick Eustache et Robert Ferret. *Électricité : bases et applications aux datacentres*, Cours réalisé pour formation ANF EcoInfo, Septembre 2014. Disponible en ligne [06/02/2022]

[Flipo et Gossart, 2009] Fabrice Flipo, Cédric Gossart. *Infrastructure numérique et environnement : l'impossible domestication de l'effet rebond*. [en ligne]. Terminal. Technologie de l'information, culture & société, 2009. Disponible sur Hal [28/01/2022]

[Forti et al., 2020] Vanessa Forti, Cornelis Peter Baldé, Ruediger Kuehr et Garam Bel. *Suivi des déchets d'équipements électriques et électroniques à l'échelle mondiale pour 2020* [en ligne]. 2020. Disponible en ligne [27/01/2022]

[Fressoz, 2021] Jean-Baptiste Fressoz. *Pour une histoire des symbioses énergétiques et matérielles*. Annales des mines, série responsabilité et environnement, 2021. Disponible sur hal [28/01/2022]

[Gossart, 2014] Cédric Gossart. *Rebound effects and ICT: a review of the literature*. ICT Innovations for Sustainability, 2014. Disponible sur hal [28/01/2022]

[Hischier et al., 2005] *Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective?: The environmental impacts of the Swiss take-back and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE)*, R. Hischier, P.Wäger, J.Gauglhofer, Environmental Impact Assessment Review, Volume 25, Issue 5, July 2005, Pages 525-539. Disponible en ligne.

[Jancovici, 2014] Jean-Marc Jancovici. *Pourrait-on alimenter la France en électricité uniquement avec de l'éolien ?*, Juillet 2014. Disponible en ligne [06/02/2022]

[Latroche, 2019] Michel Latroche. *Les terres rares, et après ?*. CNRS Le journal, 05/2019. Disponible sur lejournal.cnrs.fr [28/01/2022]

[Rapport d'information pour le Sénat, 2016] *100 millions de téléphones portables usagés : l'urgence d'une stratégie*, Rapport d'information pour le Sénat, 2016 [27/01/2022]

[Schneider, 2009] François Schneider. *Sur l'importance de la décroissance des capacités de production et de consommation dans le Nord Global pour éviter l'Effet Rebond* [en ligne]. La décroissance économique pour la soutenabilité écologique et l'équité sociale, Mylondo (Ed), Recherche et Décroissance, Collection Ecologica, Editions du Croquant, 2009. Disponible le site [28/01/2022]

[Teehan et Kandlikar, 2012] Paul Teehan, Milind Kandlikar. *Sources of variation in life cycle assessments of desktop computers* [en ligne]. Journal of industrial ecology, 2012. Disponible sur le site de Wiley. [27/01/2022]

[Vidal et al., 2013] Demande et criticité de certains métaux impliqués dans la transition énergétique, O. Vidal et al. *Metals for a low-carbon society*. Nature Geoscience, vol. 6, n° 11, 2013

[Wallenborn, 2018] Grégoire Wallenborn. *Rebounds Are Structural Effects of Infrastructures and Markets*. Frontiers in Energy, 2018. Disponible sur le site du journal [28/01/2022]

Crédits des ressources

Synthèse des résultats de l'ACV de l'envoi d'un mail de 1 Mo d'après une étude de l'ADEME p. 37,
Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique, ADEME 2011 (page 7)[17]

Synthèse des résultats de l'ACV du Dell Latitude 7300. Les catégories d'impacts environnementaux prises en compte sont : épuisement des ressources abiotiques, potentiel d'acidification, potentiel d'eutrophisation, potentiel de destruction de la couche d'ozone, potentiel de création d'ozone photochimique, potentiel de réchauffement climatique. L'ACV considère deux scénarios d'usage, l'un en Europe et l'autre aux États-Unis. p. 37,
Life Cycle Assessment of Dell Latitude 7300[18]

Consommation électrique d'un ordinateur de bureau p. 43,
Zoom[19]

Contribution au potentiel de réchauffement climatique (GWP: Global Warming Potential), exprimé en Kg éq CO2 à 100 ans, des différentes phases du cycle de vie d'un ordinateur portable Dell 7300 utilisé en Europe. Cette catégorie d'impact est directement liée aux aspects énergétiques, d'où l'importance de préciser la région d'usage car le mix énergétique n'est pas le même partout. On constate que la phase de production (Manufacture) prédomine. La fin de vie (EoL: End of Life) apparaît en négatif en raison de l'énergie récupérée lors de cette phase, par exemple par incinération des éléments plastiques. p. 30
Source : Life Cycle Assessment of Dell Latitude 7300, rapport détaillé de 67 pages[20] *; synthèse de 2 pages*[21]

Contribution au potentiel de réchauffement climatique des différentes phases du cycle de vie d'un smartphone, en l'occurrence l'iPhone 12 d'Apple, utilisé aux États-Unis. Dans le cas des smartphones, la phase de production représente une part encore plus grande des impacts. p. 30
Source : Product Environmental Report iPhone 12[22]

Contribution au potentiel de réchauffement climatique des différentes phases du cycle de vie d'un smartphone Nokia Lumia 820 (région d'usage non précisée). On constate que l'assemblage des composants par le fabricant a un impact mineur par rapport à l'extraction des matières premières (Raw materials) et la fabrication des composants (Component manufacture). p. 30
Source : Nokia Lumia 820 Eco profile[23]

Composition d'un smartphone classique p. 46,
source données Orange pour une étude du Sénat[24]

---

17. https://ademe.typepad.fr/files/acv_ntic_synthese_courrier_electronique.pdf
18. https://www.delltechnologies.com/asset/en-us/products/laptops-and-2-in-1s/technical-support/full-lca-latitude7300-anniversary-edition.pdf
19. https://gitlab.inria.fr/learninglab/mooc-impacts-num/mooc-impacts-num-ressources/-/raw/master/docs/Partie1/FichesConcept/Images/profil.png
20. https://www.delltechnologies.com/asset/en-us/products/laptops-and-2-in-1s/technical-support/full-lca-latitude7300-anniversary-edition.pdf
21. https://corporate.delltechnologies.com/content/dam/digitalassets/active/en/unauth/data-sheets/products/laptops/lca-latitude_7300_25th_anniv_notebook.pdf
22. https://www.apple.com/environment/pdf/products/iphone/iPhone_12_PER_Oct2020.pdf
23. https://thelumiablog.files.wordpress.com/2012/10/lumia_820_eco_profile.pdf
24. https://www.senat.fr/rap/r15-850/r15-8501.html

Contribution des différents composants d'un ordinateur portable Dell 7300 au potentiel de réchauffement climatique. Les cartes électroniques (PWB, pour Printed Wiring Board) et le disque dur SSD sont responsables de la majorité des émissions de gaz à effet de serre. p. 31

Source : Life Cycle Assessment of Dell Latitude 7300, rapport détaillé de 67 pages[25] ; synthèse de 2 pages[26]

Une mine de cuivre dans le centre de la Roumanie. La majorité des mines sont exploitées à ciel ouvert, par opposition aux mines sous-terraines (qui bien que minoritaires sont néanmoins nombreuses). p. 32

Source : Cristian Bortes[27], CC BY 2.0[28], via Wikimedia Commons

Une mine de coltan en République Démocratique du Congo. Cette mine, située à Luwowo, respecte la norme CIRGL-RDC qui garantit des minerais sans lien avec les conflits en cours dans la région. p. 33

Source : MONUSCO Photos[29], CC BY-SA 2.0[30], via Wikimedia Commons

L'exemple de la Katy Freeway à Houston : malgré ses 26 voies elle n'a pas permis de résoudre les problèmes de congestion à cause du trafic induit p. 51, , ,

Source: Aliciak3yz[31], CC BY-SA 4.0[32], via Wikimedia Commons

Tonnage de DEEE par catégorie en France en 2018 (en milliers de tonnes) p. 54,

Données extraites de Implementation of the WEEE Directive[33]

Types de traitement des DEEE en France en 2019 p. 55,

Données extraites du registre Ademe 2020 (chiffres 2019)

Économie circulaire p. 58,

Source : G.Mannaerts, CC BY-SA 4.0, Wikimedia Commons[34]

Les limites du recyclage dans un contexte de demande croissante p. 59,

Adaptée d'une figure de Françoise Berthoud

Flux de traitement des DEEE en France en 2019 en milliers de tonnes p. 56,

Données extraites du registre Ademe 2020 (chiffres 2019)

Incinération de câbles électriques pour en récupérer le cuivre à Agbobloshie au Ghana p. 35

source : Muntaka Chasant[35], CC BY-SA 4.0[36], via Wikimedia Commons

Illustration de la caractérisation des ressources et réserves minières p. 61

Source : A. Boubault, BRGM

---

25. https://www.delltechnologies.com/asset/en-us/products/laptops-and-2-in-1s/technical-support/full-lca-latitude7300-anniversary-edition.pdf
26. https://corporate.delltechnologies.com/content/dam/digitalassets/active/en/unauth/data-sheets/products/laptops/lca-latitude_7300_25th_anniv_notebook.pdf
27. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ro%C8%99ia_Poieni_open-pit_copper_mine.jpg
28. https://creativecommons.org/licenses/by/2.0
29. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SRSG_visits_coltan_mine_in_Rubaya_(13406579753).jpg
30. https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0
31. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Katy-Freeway.jpg
32. https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0
33. https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee/implementation-weee_en
34. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Economie_circulaire.png
35. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=81933169
36. https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0

Évolution de la production minière, des réserves et de la durée fictive d'épuisement des réserves pour le cuivre. p. 62

M. Leguérinel, M. Le Gleuher. Le cuivre : revue de l'offre mondiale en 2019. Rapport final. BRGM/RP-69037-FR. BRGM, 2019. Disponible sur infoterre.brgm.fr[37]

p. 16

D'après BRGM - Géosciences n°15, p. 61. Source : Van Schaik et Reuter, 2012 (adapté d'Achzet et Reller).[38]

37. http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-69037-FR.pdf
38. https://fr.calameo.com/read/005719121e125db2b66cb

Contenus annexes

1. Quelle est l'empreinte environnementale d'un terminal aux différentes étapes de son cycle de vie ?

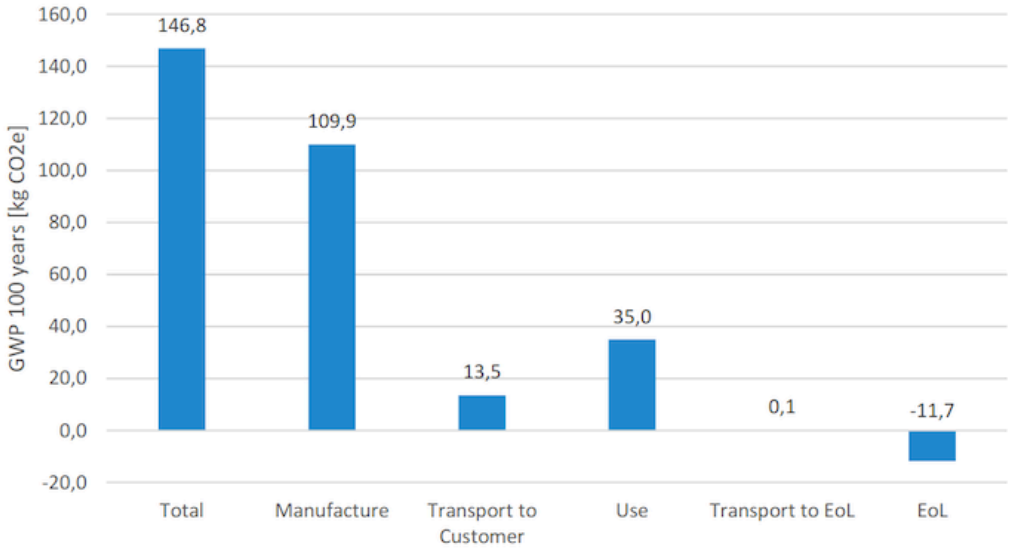
1.1. Introduction

Les impacts environnementaux associés au matériel informatique ne se limitent pas aux effets de leur consommation d'électricité lorsqu'on les utilise, loin de là ! Évaluer ces impacts nécessite de prendre en compte l'ensemble du **cycle de vie** de l'appareil : sa production, sa distribution, son usage et sa fin de vie.

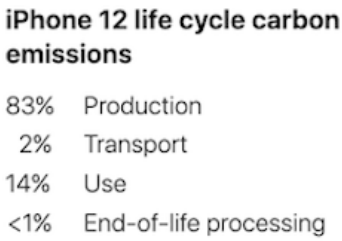
De plus, il existe **différents types d'impacts** : diminution des ressources minérales exploitables, consommation d'eau, pollutions diverses, sans oublier bien-sûr les impacts environnementaux liés à la production de l'énergie utilisée tout au long du cycle de vie.

Nous présentons dans cette fiche le cas des terminaux (ordinateurs fixes avec écran, ordinateurs portables, smartphones, tablettes...), pour lesquels la phase de production concentre une **large part des impacts environnementaux**, y compris de ceux liés à la consommation énergétique des appareils (cf trois figures ci-dessous).

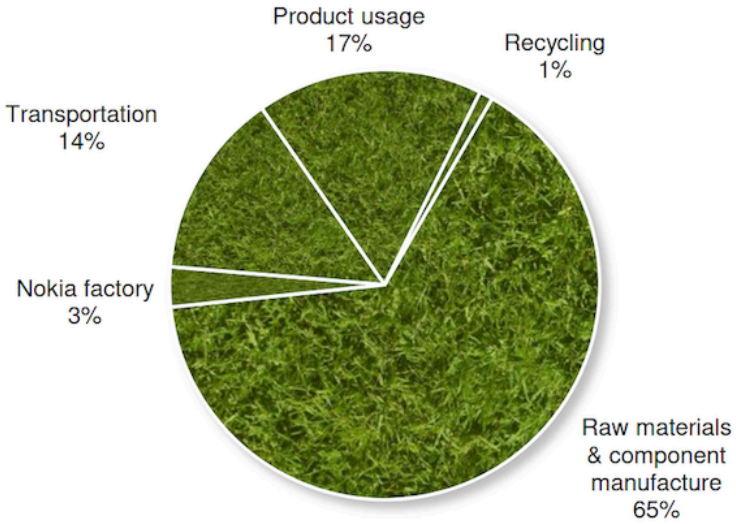
> 💬 Remarque
>
> Les chiffres présentés tout au long de cette fiche visent à fournir des ordres de grandeur des impacts environnementaux plus que des valeurs précises. Beaucoup sont obtenus en réalisant des **analyses de cycle de vie** (ACV), qui sont des processus complexes et dont la bonne compréhension du résultat nécessite un examen attentif. On trouvera des informations complémentaires dans la fiche concept *L'analyse de cycle de vie* *(cf. p.36)*.



Contribution au potentiel de réchauffement climatique (GWP: Global Warming Potential), exprimé en Kg éq CO2 à 100 ans, des différentes phases du cycle de vie d'un ordinateur portable Dell 7300 utilisé en Europe. Cette catégorie d'impact est directement liée aux aspects énergétiques, d'où l'importance de préciser la région d'usage car le mix énergétique n'est pas le même partout. On constate que la phase de production (Manufacture) prédomine. La fin de vie (EoL: End of Life) apparaît en négatif en raison de l'énergie récupérée lors de cette phase, par exemple par incinération des éléments plastiques.



Contribution au potentiel de réchauffement climatique des différentes phases du cycle de vie d'un smartphone, en l'occurrence l'iPhone 12 d'Apple, utilisé aux États-Unis. Dans le cas des smartphones, la phase de production représente une part encore plus grande des impacts.



Contribution au potentiel de réchauffement climatique des différentes phases du cycle de vie d'un smartphone Nokia Lumia 820 (région d'usage non précisée). On constate que l'assemblage des composants par le fabricant a un impact mineur par rapport à l'extraction des matières premières (Raw materials) et la fabrication des composants (Component manufacture).

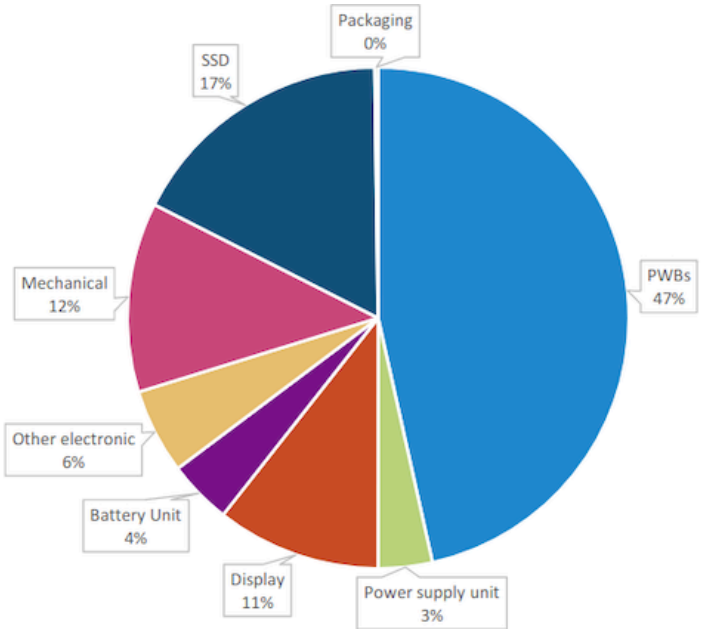
1.2. La phase de production

La production va de l'extraction des matières premières jusqu'à la fabrication du bien considéré, en passant par des étapes intermédiaires telles que le traitement des matières premières, la fabrication des composants et leur transport.

Les composants à fort impact environnemental

Un terminal est principalement constitué de métaux, de matières plastiques et de matériaux céramiques (en particulier du verre). Plus d'une cinquantaine de métaux différents sont présents dans un ordinateur ou un smartphone, certains (cuivre, fer, aluminium) pour des fonctions dites structurelles, et d'autres pour des fonctions technologiques. Parmi ces derniers, on trouve des métaux mineurs (selon une classification économique des métaux) comme le tantale, l'indium, le lithium et le cobalt. On trouve également des métaux précieux en faible quantité (argent, or, palladium). On trouvera plus d'informations à ce sujet dans la fiche concept *Quels métaux dans les smartphones ?* *(cf. p.44)*.

Parmi les éléments qui composent un terminal, ceux dont la production est la plus impactante sont les cartes électroniques (en particulier les circuits intégrés qu'elles supportent), les écrans, les disques durs (pour les ordinateurs), et les batteries (ordinateurs portables, tablettes, smartphones), comme illustré par la figure ci-dessous.



Contribution des différents composants d'un ordinateur portable Dell 7300 au potentiel de réchauffement climatique. Les cartes électroniques (PWB, pour Printed Wiring Board) et le disque dur SSD sont responsables de la majorité des émissions de gaz à effet de serre.

Il est à noter que les impacts environnementaux sont quasiment proportionnels à la surface de l'écran, ou encore à la taille du disque dur ou de la batterie. De façon générale, on observe une tendance au transfert de la consommation énergétique de la phase d'usage vers la phase de production : fabriquer des produits plus efficients énergétiquement nécessite des technologies plus avancées, plus énergivores à produire et basées sur un nombre accru de métaux, souvent présents en très petite quantité (*Life Cycle Assessment of Dell Latitude 7300*, synthèse de 2 pages[39]).

La production des métaux

Les différentes phases de la production des métaux sont les suivantes : l'extraction du minerai, son concassage et son broyage en vue de la séparation de ses différents composants, puis la phase de concentration (également appelée enrichissement) du minerai par des moyens physiques et/ou

39. https://corporate.delltechnologies.com/content/dam/digitalassets/active/en/unauth/data-sheets/products/laptops/lca-latitude_7300_25th_anniv_notebook.pdf

chimiques : gravité, magnétisme, électrostatique, flottation, électrolyse, lixiviation (c'est-à-dire utilisation de solvants comme du cyanure ou de l'acide sulfurique pour séparer les métaux désirés), pyrométallurgie... Les impacts et les risques environnementaux associés sont considérables.

Tout d'abord, la **consommation d'énergie** (et donc ses impacts associés) est énorme à toutes les étapes, avec une grande disparité entre les différents métaux (par exemple 54 GJ/t en moyenne pour le cuivre contre 208 000 GJ/t pour l'or) *(Dedryver et Couric, 2020)*[Dedryver et Couric, 2020 p.24]. Cette énergie est nécessaire entre autres pour évacuer la terre et les roches (appelés morts terrains) afin d'accéder au minerai, puis pour extraire les quantités phénoménales de minerai dont on extrait le métal, sachant que la teneur en cuivre d'un minerai de bonne qualité peut être de seulement 0,25 à 0,50 %, (quelques centièmes d'un pour cent pour un minerai d'or de bonne qualité) (Guide pour l'évaluation des EIE de projets miniers[40]). Au total, on estime qu'environ 10 % de l'énergie primaire mondiale est consacrée à extraire, transporter et raffiner les ressources métalliques (tous secteurs confondus) *(Dedryver et Couric, 2020)*[Dedryver et Couric, 2020 p.24].

Une mine de cuivre dans le centre de la Roumanie. La majorité des mines sont exploitées à ciel ouvert, par opposition aux mines sous-terraines (qui bien que minoritaires sont néanmoins nombreuses).

Deuxièmement, l'extraction minière est une activité qui nécessite une **quantité massive d'eau**, principalement pour les phases de broyage et de concentration du minerai. Or, d'après le *Columbia Center on Sustainable Investment*, environ 70 % des exploitations minières des six plus grandes compagnies se situent dans des pays en situation de stress hydrique *(Dedryver et Couric, 2020)*[Dedryver et Couric, 2020 p.24]. Ainsi, les besoins en eau pour la production de cuivre au Pérou et celle de lithium en Argentine, au Chili et en Bolivie entrent en conflit avec les besoins des populations locales.

D'autre part, l'extraction minière peut entraîner des **pollutions graves** des eaux de surface et souterraines, ainsi que de l'air et du sol. Ces pollutions sont dues principalement d'une part aux résidus miniers issus de la concentration du minerai, qui contiennent souvent des substances toxiques (par exemple du mercure ou de l'arsenic) susceptibles de s'écouler sous forme d'acide de mine, et d'autre part aux produits chimiques utilisés pendant la phase de concentration du minerai (ex : lixiviation au cyanure pour l'or, à l'acide sulfurique pour le cuivre).

Impacts humains. Enfin, il est impossible d'aborder la question des impacts environnementaux liés à l'extraction des métaux utilisés dans les appareils numériques sans évoquer les enjeux géopolitiques qui y sont associés et leurs conséquences sur les populations des régions

40. https://www.elaw.org/files/mining-eia-guidebook/Full%20French%20Guidebook.pdf

concernées. Ainsi certains métaux et les minerais à partir desquels ils sont produits (le tantale, qui est principalement obtenu à partir de coltan, l'étain, le tungstène et l'or) font l'objet d'un règlement européen spécifique sur les minerais de conflits à cause du rôle qu'ils jouent dans le financement de conflits armés dans certaines régions instables du globe --- on citera le cas de la République Démocratique du Congo (RDC). Les tensions liées à l'eau, évoquées ci-dessus, sont également sources de nombreux conflits en Amérique latine.

Plus généralement, les réserves et les zones de production de certains métaux sont très inéquitablement réparties (Mineral Commodity Summaries 2021[41]) : en 2019, le Chili et l'Australie représentaient 75% de la production et 66% des réserves mondiales de lithium, la RDC et le Rwanda 50% de la production de tantale (66% en 2017) et la RDC 69% de celle de cobalt (et plus de la moitié des réserves). La Chine assurait en 2010 98 % de la production mondiale de terres rares, contre 60% en 2019.

Une mine de coltan en République Démocratique du Congo. Cette mine, située à Luwowo, respecte la norme CIRGL-RDC qui garantit des minerais sans lien avec les conflits en cours dans la région.

La fabrication des semi-conducteurs

La fabrication des semi-conducteurs (aussi appelés circuits intégrés, ou simplement puces électroniques) est une activité de très haute technologie concentrée entre les mains d'un très petit nombre d'acteurs. Actuellement, seulement deux entreprises (Samsung en Corée du Sud et TSMC à Taïwan) fabriquent les semi-conducteurs de dernière génération (technologie inférieure à 7 nanomètres) utilisés dans les smartphones haut de gamme.

Le processus de fabrication d'une puce électronique peut se résumer ainsi : un *die* est obtenu en imprimant un circuit électronique miniaturisé (des transistors, des condensateurs etc.) sur une tranche de matériau semi-conducteur, en général du silicium, appelée *wafer*. L'**extrême précision** requise pour ces opérations nécessite des matériaux ultra purs. Cela influe sur l'énergie nécessaire à la production de ces matériaux, mais implique également une utilisation massive de produits chimiques et d'eau. L'entreprise taïwanaise TSMC consommait ainsi en 2019 plus de 150 000 tonnes d'eau par jour (TSMC Corporate Social Responsibility Report 2019[42]). Les **besoins en eau** de l'industrie des semi-conducteurs constituent un problème majeur pour Taïwan qui a dû faire face à une sécheresse catastrophique en 2021, conduisant à des restrictions d'eau pour les habitants.

41. https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2021
42. https://esg.tsmc.com/download/csr/2019-csr-report/english/pdf/e-all.pdf

1.3. La phase d'usage

Un terminal en activité ne consomme *généralement pas d'eau* p.21, n'émet (normalement) pas de substances toxiques... Ainsi, pendant sa phase d'usage, son impact environnemental direct se limite aux impacts associés à sa consommation d'électricité. Cette dernière *varie* p.21 en fonction du type d'équipement, de l'utilisation qui en est faite, de la durée de vie du matériel, etc. Dans tous les cas, dans un pays comme la France où l'électricité est peu carbonée (mais au prix d'autres impacts environnementaux liés au fonctionnement des centrales nucléaires, sans parler des risques associés), les émissions de CO2 liées à la phase d'usage sont relativement limitées par rapport à la phase de production.

Il convient néanmoins de mentionner les impacts liés à l'utilisation d'un appareil connecté à un réseau de télécommunications (Internet, 4G...), qui va solliciter des équipements réseaux et des centres de données pour communiquer, télécharger des vidéos, accéder à des sites web etc. Ces infrastructures consomment elles aussi de l'électricité (la phase d'usage représentant une très large part de la consommation énergétique des infrastructures) mais également de l'eau pour le refroidissement, et leur production a des conséquences environnementales similaires à celles des terminaux présentée ci-dessus. Ce sujet est abordé dans la fiche concept *L'analyse du cycle de vie appliquée aux services numérique.* *(cf. p.47)*

1.4. La fin de vie

L'impact environnemental lié à la fin de vie d'un terminal dépend évidemment du sort de cet appareil une fois hors d'usage. De façon générale, il y a beaucoup d'inconnues sur les impacts environnementaux liés à la fin de vie des appareils numériques. Une première raison tient au manque de connaissances scientifiques sur la toxicité et l'écotoxicité de certains matériaux utilisés. Une seconde raison concerne les incertitudes sur le devenir des appareils numériques en fin de vie, aussi bien au sein des filières de traitement dédiées (où ils sont mélangés avec d'autres déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) comme des sèche-cheveux ou des bouilloires) qu'en dehors du cadre réglementaire (trafic illégal etc.).

Les risques de pollutions

Bien que la situation s'améliore (grâce à de nouvelles réglementations et aux efforts des constructeurs), de nombreux matériaux potentiellement toxiques pour les humains et pour les écosystèmes sont présents dans les terminaux : béryllium, cadmium, nickel, mercure, arsenic, argent, antimoine, chrome, plomb, etc. Les retardateurs de flamme bromés contenus dans certains plastiques sont également dangereux pour l'environnement en raison des gaz qu'ils émettent s'ils sont incinérés et des substances organiques qu'ils produisent s'ils se décomposent.

La filière DEEE

Les terminaux numériques font partie des équipements électriques et électroniques (EEE) et deviennent en fin de vie des DEEE (déchets d'EEE), pour lesquels une filière spécialisée de traitement existe afin de les valoriser ou de les éliminer. On trouvera des informations complémentaires dans la fiche concept *Où en est-on du recyclage ?* *(cf. p.53)*.

Les métaux majeurs (cuivre, plomb, fer, aluminium...) et les métaux précieux (or, argent, platine...) sont recyclés à plus de 50%. En revanche, les métaux mineurs (dont les terres rares) ne sont quasiment pas recyclés : moins de 1% par exemple pour l'indium, le néodyme, le tantale, le gallium et le germanium, et aucun recyclage pour d'autres métaux mineurs *(Dedryver et Couric, 2020)*[Dedryver et Couric, 2020 p.24].

Les deux principales difficultés techniques liées au recyclage des métaux du numérique sont d'une part l'identification par les industriels du recyclage de ces métaux qui font partie d'alliages de plus en plus complexes, d'autre part leur séparation des autres métaux. On parle d'ailleurs de décyclage (ou recyclage en boucle ouverte) car le procédé de séparation n'est pas parfait et certains métaux récupérés ne sont pas suffisamment purs pour être réutilisés dans des appareils numériques.

Un tel recyclage nécessite des technologies de pointe et des infrastructures extrêmement coûteuses (un milliard de dollars par exemple pour l'usine d'Umicore en Belgique, dont il n'existe pas d'équivalent en France) et énergivores, ainsi que la mise en place d'une chaîne logistique complexe pour acheminer les DEEE dans les différents centres de tri et de traitement.

Le devenir des DEEE hors filière spécifique

On estime qu'en 2019 environ 17% seulement des DEEE ont été pris en charge par les filières de traitement appropriées dans le monde (54% en France) *(Forti et al., 2020)*[Forti et al., 2020 p.24]. Les autres restent stockés chez les particuliers, sont mis en décharge, brûlés ou font l'objet d'un commerce illégal et d'un traitement non conforme aux normes. Signe de l'ampleur de ce problème, le commerce et le traitement illégal des DEEE est considéré par INTERPOL comme une menace majeure pour l'environnement.

Un exemple tristement célèbre de décharge à ciel ouvert où des DEEE (dont certains en provenance d'Europe) sont “traités” dans des conditions catastrophiques en termes de santé humaine et de respect de l'environnement se trouve à Agbobloshie au Ghana, dans la banlieue d'Accra. Les techniques d'extraction des métaux utilisées (brûlage à l'air libre, chauffage ou lixiviation en utilisant par exemple du sel de cyanure ou du mercure) sont souvent mises en place sans aucune mesure de sécurité. Il en résulte des pollutions similaires à celles que l'on peut trouver dans des mines : pollution de l'air, des sols (par dépôt de poussières), de l'eau (par ruissellement) par des métaux lourds, des dioxines, des composés bromés...

Incinération de câbles électriques pour en récupérer le cuivre à Agbobloshie au Ghana

1.5. Conclusion

On l'aura constaté, les impacts environnementaux d'un appareil numérique personnel (smartphone, ordinateur, tablette...) sont loin d'être négligeables. Ils sont en revanche largement invisibles pour les utilisateurs de ces appareils car la majorité des pollutions concerne les phases de production et la fin de vie et touchent des populations et des écosystèmes géographiquement éloignés des consommateurs.

1.6. Pour aller plus loin

- *Rapport d'information pour le Sénat, 2016*[Rapport d'information pour le Sénat, 2016 p.25]
- *Clément, 2020*[Clément, 2020 p.24]
- *Teehan et Kandlikar, 2012*[Teehan et Kandlikar, 2012 p.25]

Sur l'analyse de cycle de vie

- Fiche concept *L'analyse de cycle de vie* *(cf. p.36)*
- Fiche concept *L'analyse du cycle de vie appliquée aux services numérique* *(cf. p.47)*

Sur la production des métaux

- Fiche concept *Quels métaux dans les smartphones ?* *(cf. p.44)*
- Fiche concept *Pourquoi les projections autour de la durée des réserves minières sont difficiles* *(cf. p.61)*

Sur les DEEE

- Fiche concept *Où en est-on du recyclage ?* *(cf. p.53)*
- Les enfants et les décharges numériques -- Exposition aux déchets d'équipements électriques et électroniques et santé des enfants.[43] Rapport de l'OMS, 15/06/2021. [27/01/2022]

2. L'analyse de cycle de vie

i) Qu'est-ce qu'une analyse de cycle de vie (ACV) ?

Que ce soit au niveau des citoyens, des entreprises ou des États, agir pour réduire nos impacts environnementaux nécessite de comprendre les liens de causes à effets entre nos actions et ces impacts. Dans le cas de biens et de services, il apparaît essentiel de disposer de méthodes fiables et reconnues pour analyser les impacts environnementaux qu'on peut leur associer tout au long de leur cycle de vie.

L'analyse de cycle de vie est une méthode d'**évaluation quantifiée des impacts environnementaux** d'un produit (qui peut être un bien ou un service). Cette méthode est formalisée par les normes internationales ISO 14040:2006 et ISO 14044:2006. Notons qu'une ACV quantifie les impacts environnementaux en fonctionnement normal, c'est-à-dire sans prendre en compte les accidents potentiels.

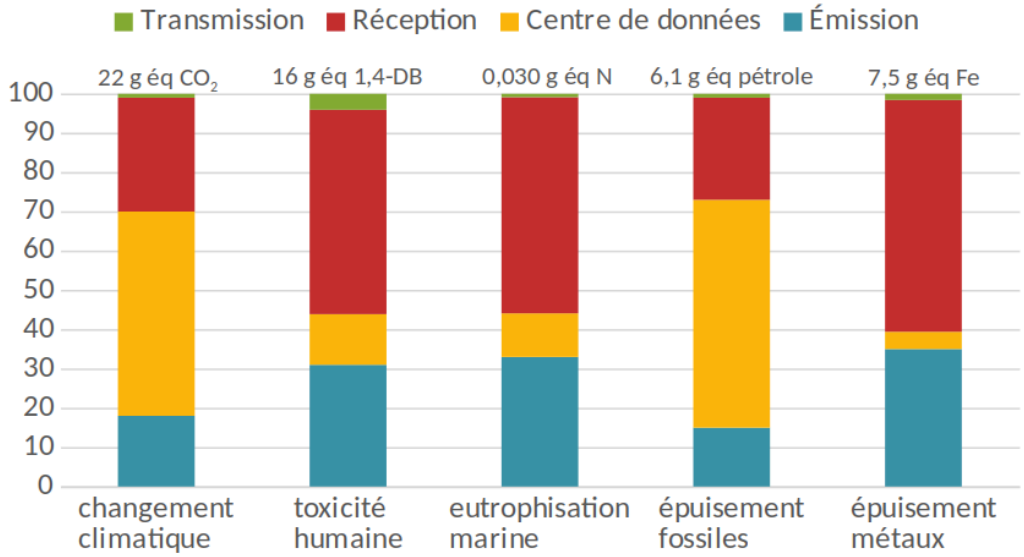
Par rapport à d'autres méthodes (telles que l'empreinte écologique, le bilan carbone...), l'ACV se distingue par son caractère à la fois multicritère et multi-étapes.

- **Multicritère** : différentes catégories d'impacts environnementaux sont étudiées (potentiel de réchauffement climatique, épuisement des ressources abiotiques, création d'ozone photochimique, pollution de l'eau, de l'air, des sols, toxicité humaine, perte de biodiversité...). Ces impacts relèvent de différentes échelles spatiales (du local au global) et temporelles (du court terme au long terme).
- **Multi-étapes** : les différentes phases du cycle de vie sont prises en compte (extraction des matières premières, fabrication, transport, usage, fin de vie).

Ces deux dimensions permettent une compréhension large des impacts environnementaux associés à un produit, afin d'éviter que des démarches de réduction des impacts n'aboutissent *in fine* qu'à des transferts vers d'autres étapes du cycle de vie ou d'autres types d'impacts.

Deux exemples de résultats d'ACV sont illustrés ci-dessous (nous y reviendrons plus loin).

43. https://www.who.int/fr/publications-detail/9789240024557



Synthèse des résultats de l'ACV de l'envoi d'un mail de 1 Mo d'après une étude de l'ADEME

Impact Category	EU Scenario	US Scenario
Abiotic Depletion [MJ]	1,70E+03	2,04E+03
Acidification Potential [kg SO2 eq.]	5,99E-01	6,70E-01
Eutrophication Potential [kg Phosphate eq.]	5,21E-02	5,73E-02
Ozone Layer Depletion Potential [kg R11 eq.]	1,90E-07	1,90E-07
Photochem. Ozone Creation Potential [kg Ethene eq.]	4,44E-02	4,84E-02
Global Warming Potential 100 years incl. biogenic carbon [kg CO2 eq.]	1,47E+02	1,68E+02

Synthèse des résultats de l'ACV du Dell Latitude 7300. Les catégories d'impacts environnementaux prises en compte sont : épuisement des ressources abiotiques, potentiel d'acidification, potentiel d'eutrophisation, potentiel de destruction de la couche d'ozone, potentiel de création d'ozone photochimique, potentiel de réchauffement climatique. L'ACV considère deux scénarios d'usage, l'un en Europe et l'autre aux États-Unis.

ii) Les grands principes de l'ACV

Réaliser une ACV consiste en premier lieu à conduire une étude détaillée des flux de matière et d'énergie (entre différentes activités humaines et avec l'environnement) correspondant aux différentes étapes du cycle de vie d'un produit. Ces flux sont ensuite traduits en indicateurs quantifiant différentes catégories d'impacts.

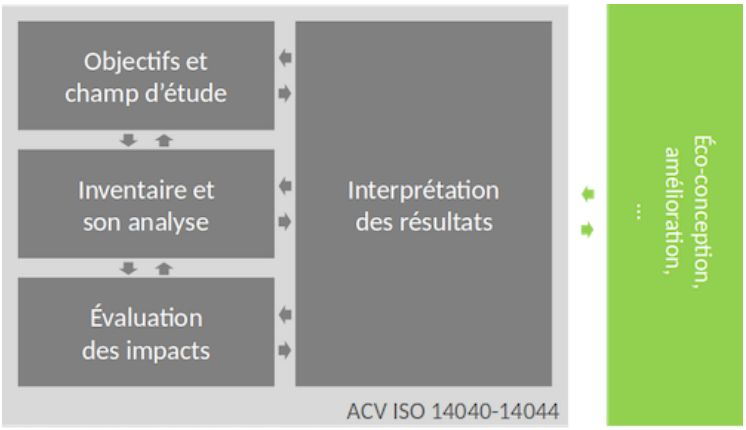
La plupart des résultats d'ACV publiés relèvent de l'**ACV attributionnelle** (ACV-A), dont l'objectif est d'attribuer à un produit sa « juste part » de l'ensemble des impacts environnementaux (dans un système en régime permanent). Si l'on s'intéresse aux conséquences de l'introduction d'un nouveau produit (ou de l'augmentation des quantités produites, ou encore de modifications dans son cycle de vie...), il faut en principe recourir à une **ACV conséquentielle** (ACV-C). Dans la suite, nous détaillons les principales étapes de l'ACV-A.

iii) Les principales étapes de l'ACV-A

Une analyse de cycle de vie est un processus itératif qui se déroule en 4 grandes étapes.

1. Définition des objectifs et du champ de l'étude
2. Inventaire du cycle de vie
3. Évaluation des impacts environnementaux
4. Interprétation des résultats

Concrètement, le résultat d'une analyse de cycle de vie se présente sous forme d'un rapport documentant toutes ces étapes dans un souci de rigueur et de transparence. Ce rapport fait dans certains cas l'objet d'une revue critique par un expert indépendant. *Les études mentionnées dans les figures précédentes*[Rapport de l'ADEME p.22] en sont deux exemples.



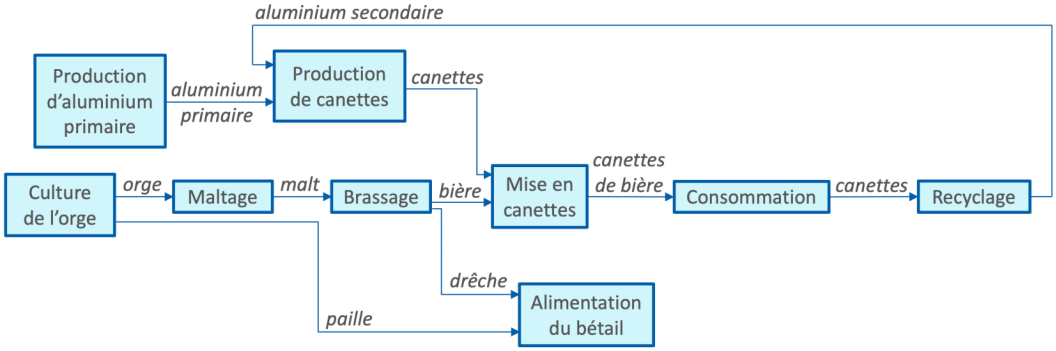
Les principales étapes de l'ACV.

1 Définition des objectifs et du champ de l'étude

Cette étape précise l'objectif de l'étude (par exemple comparer deux produits) et l'utilisation qui sera faite du résultat (par exemple communiquer ou aider à la décision). Elle permet aussi de spécifier l'**unité fonctionnelle**, qui est une caractérisation quantifiée de la ou des fonction(s) principale(s) du produit étudié, afin de permettre des comparaisons « à fonction(s) égale(s) ». Par exemple, dans l'ACV de l'envoi d'un mail (première figure), l'unité fonctionnelle peut s'énoncer ainsi : « *Transmettre un document de 1 Mo à une personne* ». Les frontières du système (ce qui sera pris en compte et ce dont on fera abstraction) et des hypothèses supplémentaires sur le ou les scénario(s) étudié(s) (tels que la durée de vie des équipements, la nature du matériel utilisé, la zone géographique concernée, etc.) sont précisées en complément de l'unité fonctionnelle. S'y ajoute également le **flux de référence**, qui correspond à la quantité de produit nécessaire pour remplir la fonction décrite par l'unité fonctionnelle.

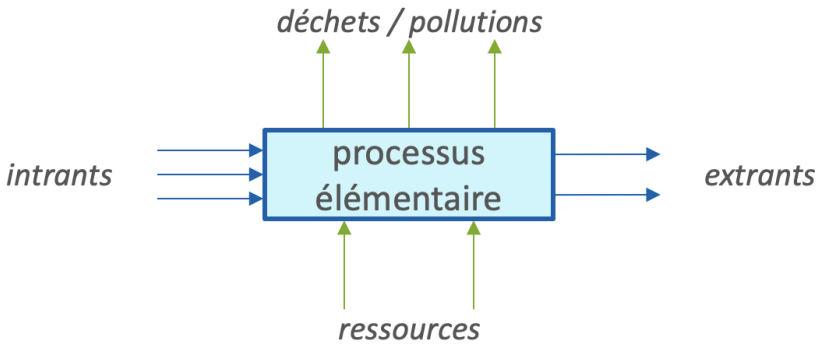
2 Inventaire du cycle de vie

L'inventaire du cycle de vie représente le cœur de l'ACV. Il s'agit de décomposer les étapes de production, de transformation ou de consommation qui interviennent dans le cycle de vie de l'unité fonctionnelle spécifiée. Cette décomposition se poursuit jusqu'à faire apparaître comme briques de base des **processus élémentaires** qui sont suffisamment simples pour être modélisés directement, ou pour lesquels on trouve des informations adéquates dans les bases de données disponibles. Une étape de mise à l'échelle des processus élémentaires est généralement nécessaire pour assurer que les quantités correspondent à l'unité fonctionnelle.



Décomposition du cycle de vie d'une canette de bière en processus élémentaires. Les aspects quantitatifs liés aux flux ne sont pas représentés ici, les échanges avec l'environnement non plus.

Un processus élémentaire est caractérisé à la fois par les flux qu'il échange au sein du système économique (intrants et extrants) et par ceux qu'il échange avec l'environnement (ressources naturelles et pollutions/déchets finaux, omis sur la figure ci-dessus).



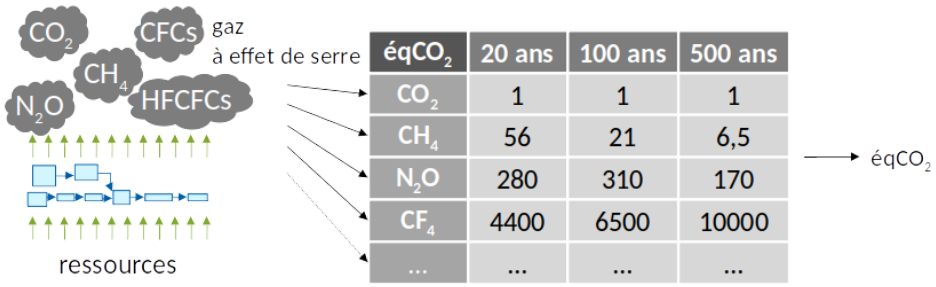
Représentation graphique d'un processus élémentaire. Un processus élémentaire est alimenté par des flux physiques (intrants et ressources naturelles) et en produit d'autres (extrants et déchets finaux/pollution).

Les points délicats de ces deux premières étapes de l'ACV concernent, entres autres :

- les frontières du système, qui définissent les processus à inclure pour satisfaire l'unité fonctionnelle (il est possible d'exclure certains processus, par exemple parce qu'ils sont négligeables) ;
- la qualité de la modélisation et en particulier l'origine des données (difficulté à collecter les données primaires techniques, problème de disponibilité de données représentatives, actuelles et fiables dans les bases de données) ;
- la multifonctionnalité qui fait qu'un même processus élémentaire peut participer à la fois à l'unité fonctionnelle et à d'autres cycles de vie (c'est le cas de la culture de l'orge et du brassage dans l'exemple de la figure 4 : ils interviennent à la fois dans la fabrication de la bière et dans l'alimentation du bétail) ;
- le choix d'un sous-ensemble pertinent de catégories d'impacts pour lesquelles on souhaite produire des indicateurs.

3 Évaluation des impacts environnementaux

L'évaluation des impacts environnementaux consiste à produire, à partir des flux échangés avec l'environnement obtenus à l'étape précédente, des indicateurs environnementaux, qui diffèrent selon la méthode d'évaluation employée. Cette étape nécessite d'agréger des flux de natures différentes, par exemple pour exprimer le potentiel de réchauffement climatique de différents gaz en équivalent CO_2 (cf figure ci-dessous). Ce principe est le même pour toutes les catégories d'impacts, ce qui explique par exemple que l'épuisement des métaux soit exprimé en équivalent fer (éq Fe) dans la figure 1 (bien que la norme soit plutôt l'équivalent antimoine, éq Sb).



Facteurs de caractérisation pour le réchauffement climatique. Ces facteurs permettent par exemple de convertir des émissions de méthane (CH4) en équivalent CO2 (pour un horizon temporel donné car tous les gaz n'ont pas la même persistance dans l'atmosphère), et plus généralement d'agréger les émissions de différents gaz à effet de serre en un indicateur unique.

4 Interprétation et mise en forme des résultats

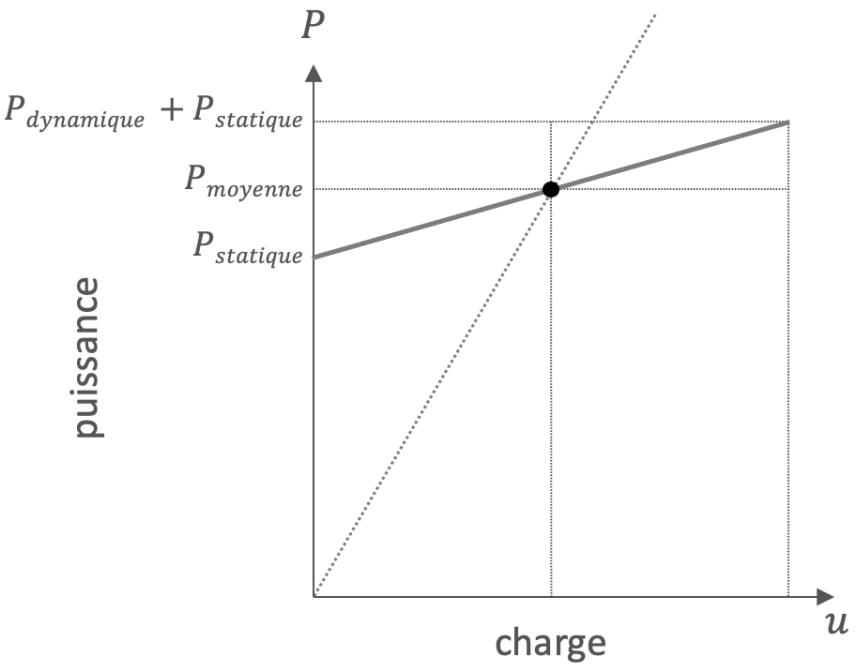
Cette étape est essentielle pour mettre en évidence les points saillants de l'analyse, en pointer les limites (incertitudes, sensibilité aux hypothèses, etc.), et préciser les conclusions qu'il est possible d'en tirer.

iv) Bien comprendre les résultats d'une ACV

Il n'est pas toujours facile de bien comprendre la réalité décrite par le résultat d'une ACV. Voici quelques éléments supplémentaires qui peuvent être utiles.

Champ de l'étude : l'unité fonctionnelle, le scénario d'usage et le flux de référence jouent un rôle essentiel dans les résultats obtenus. Ainsi, dans le cas de l'envoi d'un mail de 1 Mo décrit dans la figure 1, il est indispensable de préciser ce que recouvre cette action : par exemple, l'écriture du mail est-elle prise en compte, et si oui quelle est en la durée estimée ? De façon analogue, la zone géographique d'utilisation de l'ordinateur analysée dans la figure 2 doit être précisée et influence significativement les valeurs obtenues (à cause entre autres des différences dans le mix électrique des pays considérés).

Réalité physique sous-jacente : ayant quantifié les impacts associés à, par exemple, un calcul effectué sur un serveur, on peut être tenté d'en conclure qu'un calcul de moins diminuerait d'autant les impacts observés, ce qui n'est pas forcément le cas. En effet, dans une ACV-A, les impacts dûs à la puissance électrique statique (fixe) du serveur sont répartis entre tous les calculs effectués sur ce serveur (cf figure 7). Or, supprimer un calcul n'a aucun effet sur cette fraction des impacts puisque cela ne réduit pas la consommation statique (à moins d'éteindre le serveur) ! Rappelons que les conséquences d'une variation de la demande sont l'objet de l'ACV-C et non de l'ACV-A.



Puissance électrique typique d'un serveur de calcul en fonction de sa charge processeur (tracé gris).

D'après la figure ci-dessus : La puissance varie relativement peu lorsque la charge augmente car une part importante de la puissance est statique. En d'autres termes, on a en présence d'un cas de non-proportionnalité énergétique (cf fiche concept *Numérique et électricité : mesures, proportionnalité et efficacité énergétique* (cf. p.41)). Dans une ACV-A, on attribue les impacts en fonction de la charge processeur, et les impacts liés à la puissance statique sont répartis sur les calculs (sur la base de la puissance moyenne du serveur), un peu comme si la puissance était linéaire (tracé en pointillés).

Prise en compte de la multifonctionnalité : il existe de nombreuses méthodes pour attribuer les impacts liés à un processus multifonctionnel. Il est important de bien comprendre ces mécanismes d'attribution et les calculs qui les accompagnent si l'on veut efficacement réduire certains impacts. Ainsi, la plupart des métaux utilisés dans le numérique ne sont extraits qu'en tant que sous-produits d'autres métaux, c'est-à-dire que la rentabilité économique des mines dont ils proviennent est assurée par la production d'autres métaux. Réduire la consommation en métaux du

numérique ne réduirait donc pas automatiquement les impacts liés aux mines dont ils proviennent. Cet état de fait est pris en compte dans les conventions d'attribution, mais en général il n'existe pas une seule façon d'*attribuer les impacts* p.21.

v) Conclusion

L'analyse de cycle de vie d'un produit (bien ou service) permet de mettre en évidence et de quantifier sa matérialité et ses externalités environnementales. Elle ne vise pas à fournir une réponse tranchée ou un chiffre d'une très grande précision, mais plutôt à proposer des ordres de grandeur et un profil de solutions. En ce sens, et à condition de bien en comprendre les principes méthodologiques sous-jacents, l'ACV constitue un outil particulièrement utile pour communiquer sur les impacts environnementaux associés à un produit, pour comparer deux produits, pour identifier certains leviers d'amélioration possibles, et plus généralement pour aider dans *les différents processus de décision* p.21 qui visent à réduire nos impacts environnementaux à toutes les échelles.

Pour aller plus loin ⊕ Complément

- Dossier sur l'Analyse de Cycle de Vie[44] par l'ADEME

3. Numérique et électricité : mesures, proportionnalité et efficacité énergétique

1 Métriques électriques

Afin d'analyser la consommation électrique des équipements numériques en phase d'usage, il est nécessaire de manipuler deux métriques différentes : la puissance électrique et l'énergie.

Puissance électrique

Le watt (W) est l'unité de mesure de la puissance électrique. Cette unité correspond au débit de production ou de consommation de l'énergie. Le nom watt est un hommage à l'ingénieur mécanicien et mathématicien écossais James Watt (1736-1819) qui a travaillé sur l'amélioration des machines à vapeur.

Il est calculé avec la formule suivante : P (puissance en watt) = U (tension en volt) x I (courant en ampère) (Des astuces pour convertir les watts en KWh, Engie). Un watt équivaut à un joule par seconde.

Le joule[45] (J) est une unité permettant de mesurer l'énergie, le travail et une quantité de chaleur. Le nom Joule est un hommage au physicien anglais James Prescott Joule (1818-1889) qui a, entre autres, proposé la première loi de thermodynamique.

- Le kilowatt (kW), soit 1 000 watts, est fréquemment utilisé pour les gros serveurs ou les baies de calcul ou de stockage.
- Le mégawatt (MW), soit un million de watts peut être utilisé pour les grands systèmes numériques (de type datacentres ou centres de calcul hautes performances) qui peuvent avoir une puissance de plusieurs dizaines de MW *(Eustache et Ferret, 2014)*[*Eustache et Ferret, 2014* p.24].
- Le gigawatt (GW), soit un milliard de watts est utilisé pour qualifier une production électrique massive. Par exemple, la puissance moyenne de production d'un réacteur nucléaire français est de l'ordre de 1 GW.
- Puis viennent le térawatt (TW, mille milliards de watts), le pétawatt (PW, 10^{15} watts), l'exawatt (EW, 10^{18} watts), le zettawatt (ZW, 10^{21} watts), le yottawatt (YW, 10^{24} watts).

44. https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv
45. https://fr.wikipedia.org/wiki/Joule

Énergie électrique

Le wattheure (Wh) est une unité de mesure énergétique. Elle permet de mesurer une quantité de travail réalisée sur une période donnée. Un Wh c'est la quantité d'énergie produite en une heure par une machine d'un watt ou la quantité d'énergie consommée en une heure par un système avec une puissance d'un watt.

Il est calculé avec la formule suivante : Wh : W * h

- Le kilowattheure (kWh), soit 1 000 wattheures est fréquemment utilisé comme mesure de la consommation des foyers. Votre compteur électrique compte des kWh !
- Le mégawattheure (MWh soit un million de wattheures) peut être utilisé pour quantifier la consommation d'un équipement numérique sur une année. Par exemple, un serveur de calcul alimenté en permanence et qui aurait une puissance constante de 300 watts, utiliserait sur une année 2.628 MWh d'électricité.
- Le gigawattheure (GWh soit un million de kWh) peut être utilisé pour mesurer la consommation de grands systèmes numériques ou la production de centrale électriques. Par exemple, une éolienne de 1 MW de puissance fournirait en moyenne mondiale 2 GWh d'énergie sur une année (2000 heures de vent par an) *(Jancovici, 2014)*[Jancovici, 2014 p.24].
- Le terawattheure (TWh) peut être utilisé pour mesurer la production de centrales électriques massives. Par exemple, un réacteur nucléaire français produit de l'ordre de 8 tWh par an.

Ainsi

- une lampe de 60 W qui reste allumée pendant 1 heure consomme 60 Wh = 60 * 1 soit 0,06 kWh
- un four de 900 W qui fonctionne pendant 5 minutes consomme 75 Wh = 900 * 5/60 soit 0,075 kWh (Des astuces pour convertir les watts en KWh, Engie)[46]

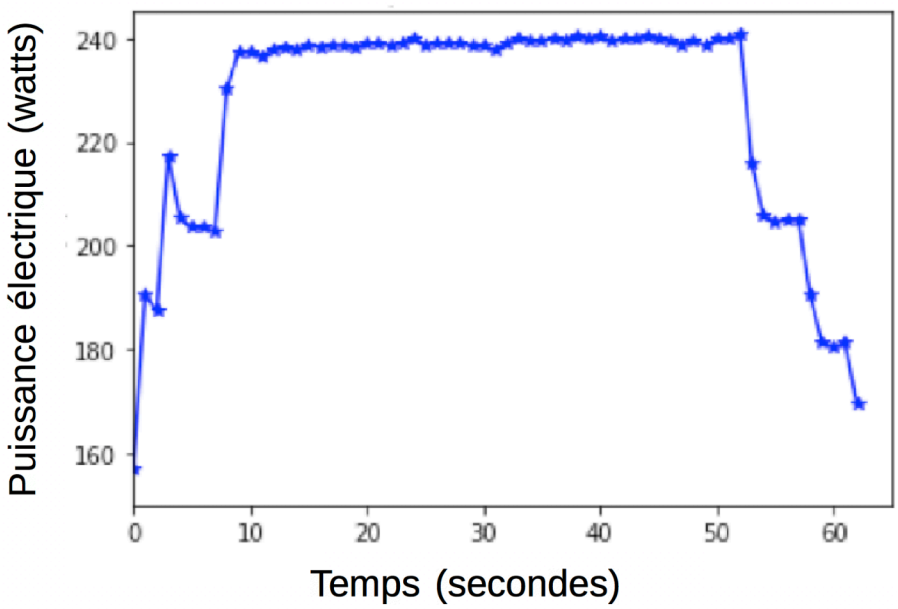
Conclusion, il ne faut pas confondre la puissance électrique (exprimée en watts) avec l'énergie (exprimée en joules ou Wh) (Des astuces pour convertir les watts en KWh, Engie)[47].

2 Mesurer la consommation d'un équipement numérique

Si on désire observer et analyser finement la consommation électrique des équipements informatiques, on ne peut pas se contenter de mesures de type compteur électrique (qui nous donne des kWh). Il faut profiler la consommation électrique pendant une période de temps (dépendant du service rendu). Cette mesure doit être assez fine et précise afin de restituer les variations dues à l'usage de l'équipement.

Ainsi on peut observer la consommation d'un équipement de type ordinateur de bureau lors du lancement d'une application intensive. La figure illustre ce profil énergétique de l'ordinateur en affichant la puissance électrique (watts) et le temps (secondes). On peut observer que cet ordinateur est en attente au début de l'expérience et utilise une puissance électrique de l'ordre 160 watts. Une fois démarrée l'application, sa consommation augmente pendant le temps de chargement et s'établit ensuite aux alentours de 240 watts.

46. https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/conseils-souscription-contrat-electricite/convertir-watts-en-kwh.html
47. https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/conseils-souscription-contrat-electricite/convertir-watts-en-kwh.html



Consommation électrique d'un ordinateur de bureau

Ce profilage peut être réalisé à l'aide de deux types d'outils :

- outils matériels de type wattmètre : qui mesurent la consommation sur la prise électrique
- outils logiciels : qui estiment la consommation électrique d'applications en fonction de l'usage des ressources internes (nombres d'opérations de calcul, nombre d'accès à la mémoire, nombre d'entrées-sorties...) ou à l'aide de capteurs internes.

Proportionnalité énergétique

On a pu observer dans le profilage de consommation du serveur que cette consommation varie entre 160 watts (quand le serveur est alimenté, le système d'exploitation est en activité, mais aucune application n'est exécutée) et 240 watts (quand une application intensive est en train d'être éxécutée sur le serveur). Cette variation réflète une certaine proportionnalité énergétique qui varie en fonction de l'usage de la ressource informatique. Plus on utilise ce serveur plus la puissance électrique utilisée augmente. Malheureusement, lorsque la charge de travail diminue, cette puissance électrique ne tend pas vers zéro watt mais vers une valeur assez haute (160 watts dans notre exemple). *En 2007, Luis André Barroso*[*Barroso et Hölzle, 2007* p.24] a observé la consommation de serveurs dans un datacentre de chez Google et s'est ainsi rendu compte que cette consommation avec une charge de travail proche de 0 tend vers 50% du pic électrique du serveur.

Cette mauvaise proportionnalité énergétique provient des types de consommation qui existent dans une ressource numérique :

- la consommation électrique statique : qui est utilisée par tout ce qui est alimenté de manière fixe dans un équipement numérique : carte mère, ventilateurs, disques durs magnétiques...
- la consommation électrique dynamique : qui dépend de l'usage de l'équipement provoqué par les logiciels éxécutés : système d'exploitation, protocoles, services, applications...

Il existe certains cas où la consommation électrique est quasi-constante quel que soit l'usage de l'équipement informatique (par exemple des équipements réseaux filaires tels que des commutateurs réseaux).

Efficacité énergétique

Observer la consommation énergétique d'un équipement ne suffit pas, il faut mettre cette consommation en rapport avec le service applicatif rendu. C'est ce que l'on nomme l'efficacité énergétique (ou efficience énergétique). L'efficacité énergétique se mesure en usage des ressources (nombre d'entrées sorties par seconde, nombre de calculs par seconde, nombre de requêtes traitées par seconde) par puissance électrique utilisée ou unité d'énergie consommée.

Par exemple dans le monde des centres de calcul haute performance, le volume de calculs effectués sur des nombres réels par seconde (*floating point operation per second : flops*) est le principal indicateur de performance. Plus un système supporte de flops, plus il est rapide et plus théoriquement sa performance est élevée. Ainsi le Top500[48] répertorie tous les 6 mois, les 500 plus grands centres de calcul haute performance. La métrique de comparaison est le nombre de flops. Par exemple, dans le Top500 de juin 2021[49], la plus grosse machine est le superordinateur japonais Fugaku qui utilise 7 millions de cœurs de calcul et qui affiche une performance soutenue de 442 Pétaflops. Cette liste ne reflète pas le service rendu par ces machines face à leur consommation énergétique. Ainsi la liste Green 500[50], propose de trier les 500 plus grands systèmes en fonction d'une métrique d'efficacité énergétique : les flops par watt. Dans la liste de juin 2021[51], la meilleure machine du Green 500 est la machine MN-3. Elle utilise 1664 cœurs de calcul, est en 335 ème position dans le Top 500 et réalise 1.8 Pétaflops de calcul. Cette machine a la meilleure efficacité énergétique. Pour chaque watt d'électricité utilisé par cette machine, 29.7 Gflops de calcul sont réalisés.

4. Quels métaux dans les smartphones ?

La plupart de ces informations sont extraites du site www.frandroid.com[52].

Des métaux dans les smartphones, pour quoi faire ?

En 1950, on dénombrait une douzaine de métaux dans nos bons vieux téléphones fixes. Dans les années 1990, les GSM, loin de rentrer dans nos poches, comportaient une petite trentaine de métaux. Le smartphone d'aujourd'hui, beaucoup plus petit et fin, contient plus de 50 métaux : une condition pour avoir toutes les fonctionnalités de nos équipements !

Quelques exemples :

De l'Indium et de l'étain sont nécessaires à la fabrication de nos écrans pour transformer l'effleurement de notre index en « clic ». En effet ces écrans dits *capacitifs* sont revêtus d'un film qui conduit l'électricité tout en étant transparent et c'est un oxyde d'indium-étain qui permet cette prouesse technologique.

Quant aux LED, elles contiennent de base un composé de gallium (extrait du minerai d'aluminium) et d'au moins un autre atome, qui va déterminer la couleur « de base » de la LED. Ainsi, de l'arsenic combiné à du phosphore va donner une lumière rouge orangé, alors qu'avec de l'azote ou de l'indium, la LED apparaît bleue. Mais les concepteurs de LED ont imaginé pouvoir faire des couleurs plus belles et plus variées, jaune, blanc, rouge, bleu ou vert. Alors sont utilisés différents cocktails de terres rares aux noms mystérieux : grenat d'yttrium et d'aluminium, cérium, yttrium, europium ou terbium. On peut aussi retrouver du lanthane et du gadolinium.

Focus sur les Terres Rares

⊕ Complément

Improprement appelées terres rares, les lanthanides sont en fait aussi abondants que d'autres métaux comme le nickel ou le cuivre et donc plus abondants que l'or et l'argent mais beaucoup plus dispersés : ils s'appellent cérium, europium, gadolinium, lanthane, néodyme, praséodyme, prométhium, samarium et scandium, dysprosium, terbium, holmium, lutécium, terbium, thulium, ytterbium et yttrium.

48. https://www.top500.org/lists/top500/2021/06/
49. https://www.top500.org/lists/top500/2021/06/
50. https://www.top500.org/lists/green500/2021/06/
51. https://www.top500.org/lists/green500/2021/06/
52. https://www.frandroid.com/comment-faire/comment-fonctionne-la-technologie/613459_a-quoi-servent-les-metaux-rares-dans-nos-smartphones

On retrouve ces métaux[53] sous forme de traces dans la plupart des environnements naturels. Leurs propriétés électroniques, magnétiques, optiques ou encore catalytiques, en font des éléments particulièrement recherchés par l'industrie (aéronautique, automobile[54], technologies de personnes en situation de handicap, etc.).

Les méthodes d'extraction et de séparation de ces métaux font appel à des procédés complexes et très polluants : rejets d'acides, de bases, de solvants, de métaux lourds ou de déchets radioactifs *(Latroche, 2019)*[*Latroche, 2019* p.24]. En plus, ces processus requièrent de grandes quantités d'eau.

Les éléments des terres rares (ETR) sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles : l'électronique, l'énergie propre, l'aérospatial, l'automobile et la défense et d'autres.

Par exemple, la fabrication d'aimants représentait en 2019 la plus grande et la plus importante utilisation finale des ETR, soit 38 % de la demande prévue. Les aimants sont utilisés dans les smartphones, les téléviseurs, les ordinateurs, les automobiles, les éoliennes, les avions à réaction *et bien d'autres produits*[*Faits sur les éléments des terres rares* p.22].

On retrouve aussi des terres rares dans les aimants qui sont nécessaires à la production des vibrations de nos smartphones : néodyme, praséodyme, terbium et dysprosium. Quant au tungstène, qui est deux fois plus lourd que l'acier, il sert de poids pour amplifier les vibrations.

L'essentiel du poids en métaux des smartphones n'est pas constitué de terres rares. On trouve par exemple du lithium et du cobalt dans les batteries lithium-ion et une multitude de métaux plus ou moins rares et précieux dans les circuits intégrés et les circuits imprimés. Quelques détails :

- Un circuit intégré est une plaque de matériau semi-conducteur (généralement du silicium, parfois du germanium) à la surface duquel sont reliés des transistors, petits composants à trois pattes contenant également du matériau semi-conducteur. C'est ce qu'on appelle également une puce. Pour rendre le silicium conducteur d'électricité à certains endroits seulement, il faut le « doper » en y rajoutant des impuretés : du phosphore, du bore, de l'arsenic, de l'antimoine, mais aussi de l'indium ou du gallium. Dans les transistors devant opérer à très haute fréquence, comme ceux employés pour le Wi-Fi, le Bluetooth ou la 4G, le silicium est remplacé par de l'arséniure de gallium ou du silicium-germanium.
- Avec le lancement de sa génération de 45 nm en 2007, *Intel a commencé à utiliser*[*Intel* p.22] du hafnium pour isoler les portes de ses transistors. Ces derniers sont reliés entre eux sur les circuits imprimés par des films de titane et de tungstène. La miniaturisation des puces pousserait les fabricants de semi-conducteurs à remplacer le cuivre, de moins en moins pratique à l'échelle nanométrique, par du cobalt ou du ruthénium.
- Quant aux circuits imprimés, ce sont des plaques en résine epoxy, souvent de couleur verte, sur lesquelles on soude des composants grâce à des pistes en cuivre. Excellent conducteur électrique, l'or se retrouve aussi dans les circuits imprimés, constituant notamment les fils de liaison entre le silicium et les broches des différents composants. L'argent, lui, est présent dans la plupart des résistances. On retrouve aussi de très petites quantité de palladium dans les circuits imprimés.
- Enfin, un des composants fréquents que l'on soude sur les circuits imprimés est le condensateur, une petite citerne à énergie électrique. Les condensateurs standard utilisent de l'aluminium, mais ceux-ci sont trop gros pour rentrer dans un smartphone. Pour en fabriquer de très petite taille, on utilise du tantale pour la fabrication de condensateurs dits « gouttes de tantale », ainsi appelés à cause de leur forme aisément reconnaissable. Les propriétés physiques de ce métal (notamment un point de fusion très élevé à 3 016, 85 °C) en font un matériau de choix pour ce type d'application.

53. https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/matiere-metal-3877/
54. https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-automobile-11105/

Quelles quantités ?

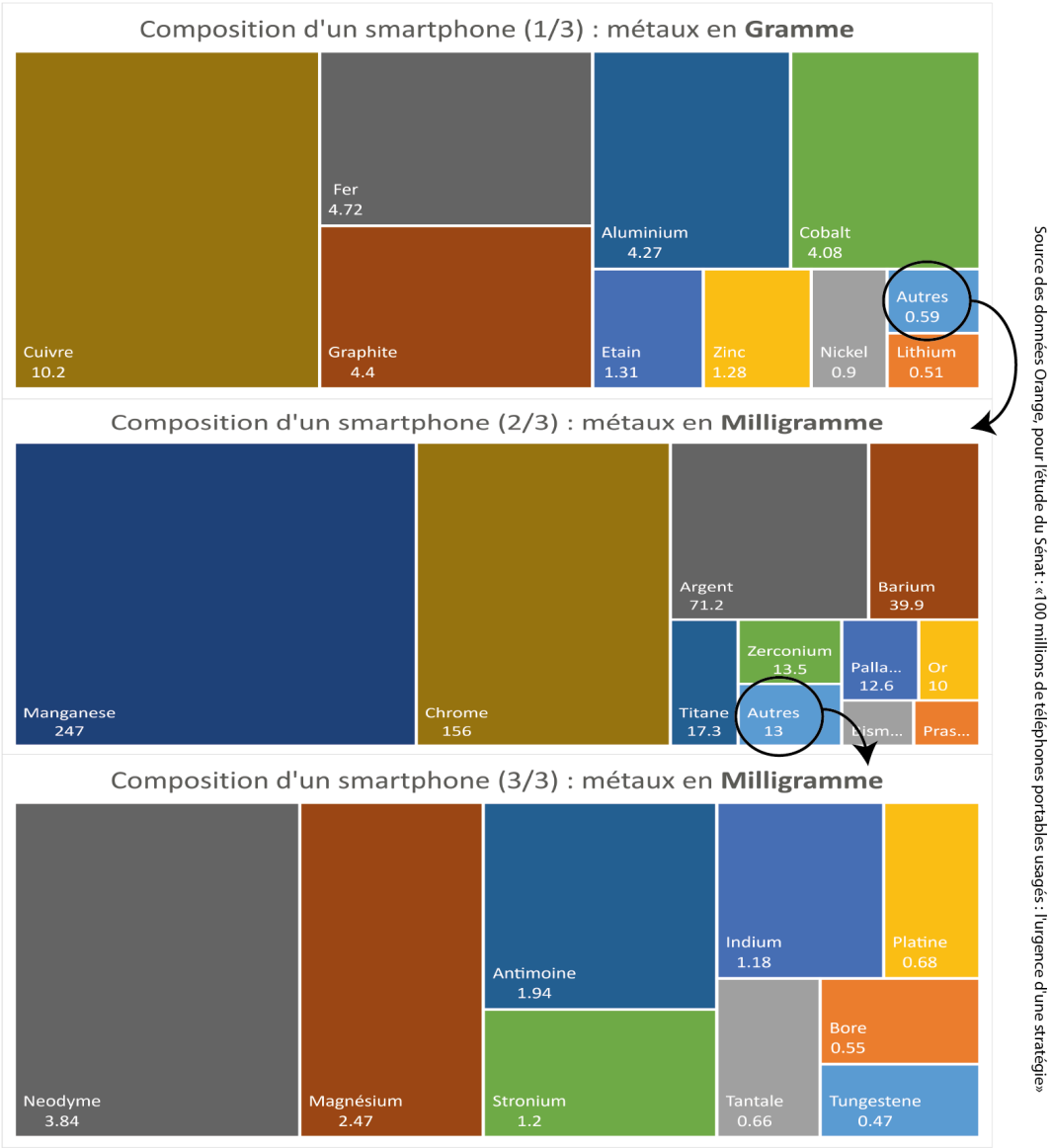
Pour resituer les choses par rapport au poids total d'un smartphone, il faut savoir que, en fonction des modèles :

- les plastiques et les matières synthétiques représentent 30 à 50 % des matériaux ;
- le verre et la céramique représentent 10 à 20 % ;
- les métaux représentent 40 à 60 % des matériaux dans la composition d'un smartphone.

Sur cette quantité de métaux :

- 80 à 85 % sont des matériaux ferreux et non ferreux comme le cuivre, l'aluminium, le zinc, l'étain, le chrome ou le nickel...
- 0,5 % sont des métaux précieux : l'or, l'argent, le platine, le palladium...
- Et 0,1 % de terres rares et métaux spéciaux : europium, yttrium, terbium, gallium, tungstène, indium, etc.

Ce qui représente en pratique pour un smartphone classique :



Composition d'un smartphone classique

Globalement et relativement au volume total de métaux produits pour l'ensemble des secteurs les besoins pour les technologies du numérique ne représentent pas une grande proportion, hormis pour certains métaux dont le volume produit est faible par rapport aux grands métaux stratégiques comme le Tantale, l'Indium, le Germanium, certaines terres rares mais qui sont par contre hautement stratégiques.

Pour aller plus loin ⊕ Complément

- Liliane Dedryver, avec l'aide de Vincent Couric. La consommation de métaux du numérique : un secteur loin d'être dématérialisé [en ligne]. FRANCE STRATÉGIE, Document de travail n°2020-05, 06/2020. Disponible sur le site strategie.gouv[55] [28/01/2022]
- World Mining Data. site[56] [28/01/2022]
- Le smartphone, pas si « smart » pour l'environnement [en ligne]. ADEME, 09/2020, maj 11/2020. Disponible sur le site de l'ADEME[57] [28/01/2022]

5. L'analyse du cycle de vie appliquée aux services numérique

Évaluer l'impact environnemental des services numériques, pourquoi ?

Du domicile au travail, de l'entreprise à la ville et aux services publics, les services numériques sont partie intégrante de notre quotidien et ont bouleversé nos comportements et modes de consommation. L'immatérialité des services proposés est de plus en plus remise en cause par la matérialité sous-jacente des équipements et infrastructures nécessaires au secteur digital. Cependant, les études menées ces dix dernières années sur les impacts d'une telle transformation ont porté sur des thématiques précises, s'intéressant par exemple aux consommations d'énergie des datacentres, à l'obsolescence programmée des terminaux ou encore à la gestion des déchets électroniques, mais n'ont pas proposé d'approche holistique du phénomène.

Depuis 2018, plusieurs publications *(The ShiftProject, 2018*[The ShiftProject, 2018 p.23] ; *GreenIT.fr, 2019)*[GreenIT.fr, 2019 p.23] sont venues éclairer le débat et ont mis en évidence la nécessité d'avoir une approche plus globale qui soit à la fois multi-critères, multi-étapes, multi-composants, afin de pouvoir appréhender ces système complexes que sont les services numériques puisqu'ils sont l'association des terminaux utilisateurs, des datacentres et des réseaux de télécommunications, tous composés d'une multitude d'équipements ayant chacun des cycles de vie propres.

Ainsi, pour répondre à ces problématiques, la méthode de l'Analyse du cycle de vie (ACV) semble la plus appropriée.

L'analyse du cycle de vie, qu'est-ce que c'est ?

L'analyse du cycle de vie est une méthode d'évaluation environnementale au même titre que le Bilan Carbone ou les analyses d'impacts, mais elle dispose de spécificités qui rendent son approche holistique unique. En effet, utilisée depuis la fin des années 90 et normalisée dans la série des ISO 14040 : 2006 et ISO 14044 : 2006, cette méthode propose d'établir le bagage écologique d'un produit ou d'un service selon une approche :

- **multicritères** : plusieurs indicateurs environnementaux sont à considérer de manière systématique en passant par le potentiel de réchauffement climatique, l'épuisement des ressources abiotiques, la création d'ozone photochimique, la pollution de l'eau, de l'air, des sols, l'écotoxicité humaine, la biodiversité. La liste des indicateurs n'est pas fixe mais dépend des secteurs d'activité,
- **cycle de vie** : afin d'intégrer les impacts générés lors de toutes les étapes du cycle de vie des équipements, depuis l'extraction des ressources naturelles souvent peu accessibles jusqu'à la production des déchets en passant par la consommation d'énergie en phase d'usage,

55. https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2020-dt-consommation-metaux-du-numerique-juin.pdf
56. http://www.world-mining-data.info/
57. https://www.mtaterre.fr/dossiers/le-smartphone-pas-si-smart-pour-lenvironnement

- **quantitative** : chaque indicateur est qualifié de manière chiffrée afin de pouvoir mettre sur une même échelle l'ensemble des externalités d'un produit ou d'un service et de prendre des décisions avec objectivité,
- **fonctionnelle** : l'objet d'étude est défini par la fonction qu'il remplit afin de pouvoir comparer différentes solutions techniques,
- **attributionnelle ou conséquentielle** : l'analyse du cycle de vie permet de caractériser de manière traditionnelle les impacts environnementaux directs d'une solution via l'analyse du cycle de vie attributionnelle mais aussi les impacts environnementaux indirects ou systémiques au travers de l'analyse du cycle de vie conséquentielle. A ce jour, les travaux portent pour la plupart sur les impacts directs mais le sujet du numérique appelle à la prise en compte des impacts sur les autres secteurs d'activité et sur nos modes de vie, ainsi l'analyse du cycle de vie conséquentielle doit se développer en parallèle.

Même si l'ACV est initialement plus appliquée sur le champ des produits, son périmètre d'actions a été élargi ces dernières années. Tout d'abord grâce à la norme ETSI 203 199 et aujourd'hui grâce aux nombreux travaux menés par les organisations professionnelles des télécommunications telles que l'ITU, par le consortium NegaOctet pour les services numériques ou encore par le Pôle Ecoconception pour les services en général. Ces travaux permettent aujourd'hui d'alimenter la règlementation française et notamment la mise en application de l'article 13 de la loi anti gaspillage et économie circulaire qui a pour objet de contraindre les opérateurs de réseaux de télécommunications à communiquer au grand public sur les émissions de gaz à effet de serre de la transmission de données.

Passer d'un produit à un service revient à conserver la philosophie multicritères et fonctionnelle mais à passer d'une approche circulaire (du berceau à la tombe) à une approche matricielle intégrant le cycle de vie de l'ensemble des équipements constituant les trois tiers (terminaux, réseaux, datacentres) permettant au service numérique de fonctionner.

Ainsi, un tel diagnostic environnemental permet d'éviter les transferts de pollutions d'une phase à l'autre mais aussi d'un tiers à l'autre du service. Par exemple, lors du passage d'une solution en local (installée sur l'ordinateur tel que Microsoft office 2010) vers une solution SaaS dans le cloud (non installée sur les ordinateurs personnels mais sur un datacentre accessible via un navigateur tel que Windows 360), l'analyse du cycle de vie permettra de s'assurer que les impacts évités au niveau des terminaux utilisateurs ne seront pas compensés par des impacts complémentaires sur le réseau.

L'analyse du cycle de vie, à quoi ça sert ?

De manière générale, réaliser l'analyse du cycle de vie d'un service numérique revient à lui rendre sa matérialité et ses externalités environnementales. Il est pertinent d'appliquer cette méthode pour :

- établir un diagnostic quantitatif des impacts environnementaux directs d'une solution numérique
- identifier les leviers d'amélioration les plus significatifs en vue d'un projet d'écoconception
- comparer des solutions techniques numériques et non numériques et établir des recommandations en fonction de choix techniques et de comportements
- communiquer de manière objective sur des performances et des améliorations de services
- piloter sa stratégie numérique responsable et intégrer l'empreinte des services numériques dans les reportings des entreprises

L'analyse est un puissant outil d'aide à la décision au niveau de la stratégie étatique comme de la stratégie d'entreprise.

L'analyse du cycle de vie, comment faire ?

Par son caractère itératif, la méthode d'analyse du cycle de vie s'adapte à tous les niveaux de niveau de connaissance des acteurs. On peut uniquement décider d'en appliquer la philosophie, faire une évaluation cadrage rapide ou chercher l'exhaustivité par l'élaboration d'une analyse du cycle de vie conforme à l'ISO 14040.

L'important est de respecter les 4 étapes du processus : 1. définition des objectifs, de l'unité fonctionnelle et du champ de l'étude, 2. inventaire du cycle de vie – collecte des données, 3. évaluation des impacts environnementaux, 4. interprétation et s'assurer de la transparence des hypothèses et des choix effectués.

Le processus de réflexion à l'origine de la production des résultats est lui-même vecteur de sensibilisation des commanditaires et producteurs de services numériques qui leur permet de prendre conscience de leurs impacts et de leurs dépendances vis à vis d'autres acteurs.

L'analyse du cycle de vie, conclusion et limites

Les principaux atouts de l'analyse du cycle de vie sont :

- proposer une vue globale des impacts environnementaux du produit ou service étudié,
- consolider des données techniques et environnementales disséminées tout au long d'une chaîne de valeur complexe, diffuse (les acteurs sont aux 4 coins du monde) et mêlant ressources matérielles et humaines.

Cette démarche présente aussi des limites de plusieurs types :

- limites systémiques : lorsque l'exercice de quantification est fait, la tendance est souvent de s'arrêter à la quantification des impacts directs d'une solution. Or il est nécessaire de réintégrer les résultats de l'analyse du cycle de vie dans un écosystème plus global et d'intégrer les effets indirects (voir la fiche concept *L'effet rebond* *(cf. p.50)*) d'une solution. Ainsi l'analyse du cycle de vie conséquentielle devra se développer dans les années à venir pour répondre à ce besoin
- limites scientifiques : certains indicateurs environnementaux manquent de maturité et reflètent mal la réalité des problématiques environnementales associées au numérique. En effet, des indicateurs comme la perte de biodiversité, la toxicité, l'occupation des sols... sont perçus comme préoccupant mais les méthodes doivent être complétées afin de nous assurer que nos choix sont pertinents au regard de l'ampleur des phénomènes
- limites techniques : les informations à rassembler pour évaluer l'impact environnemental d'un service numérique sont multiples et s'appuient sur un nombre important d'acteurs aux intérêts parfois divergeants. Il est donc indispensable de disposer de données permettant de quantifier les impacts de l'ensemble du système de manière fiable, homogène et juste. Dans ce cadre, les bases de données disponibles à ce jour pour le secteur du numérique sont incomplètes et nécessitent un travail de consolidation et de recherche important. Actuellement, différentes initiatives sont menées pour réduire ce manque au niveau français et international.

Pour finir, l'analyse du cycle de vie n'est qu'une petite partie de la pensée cycle de vie et peut être complétée par l'analyse sociale du cycle de vie (ASCV) et l'analyse des coûts du cycle de vie (ACCV). Deux disciplines qu'il serait bon de développer dans le cadre du secteur du numérique.

Sources

- *ADEME, 2011*[*ADEME, 2011* p.24]
- Évaluation et amélioration de la performance environnementale des services numériques[58]
- Maîtrisez l'eco-conception numérique[59]

58. http://negaoctet.org/
59. http://www.greenconcept-innovation.fr/

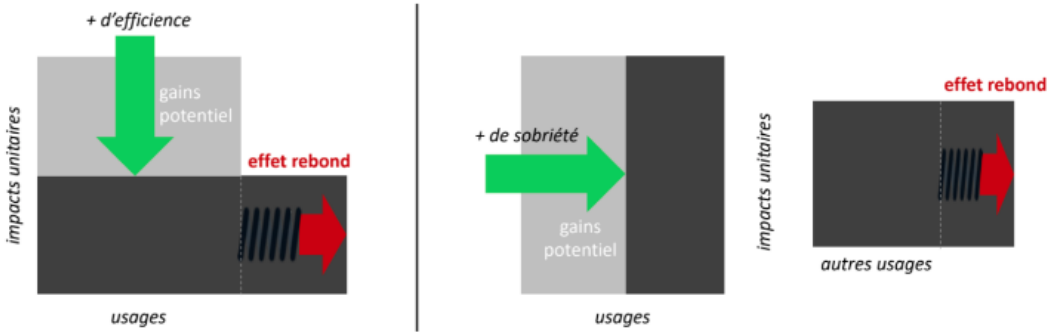
6. L'effet rebond

1 Introduction

Les solutions visant à réduire nos impacts environnementaux peuvent s'appuyer sur deux dimensions :

- la dimension technologique dans les démarches d'amélioration de l'efficacité (suivant le contexte on parle aussi d'*efficience*) qui rend les usages plus économes en ressources et moins émissifs en pollution, sans les remettre en cause. Il s'agit de « faire la même chose, voire plus, avec moins », c'est-à-dire de réduire la consommation « unitaire » de nos usages.
- la dimension des usages dans les démarches de *sobriété* dans lesquelles il s'agit de « faire moins avec moins ».

Par exemple, la réduction de la consommation de carburant aux 100 km d'une automobile relève de la première dimension, alors que la réduction du kilométrage annuel relève de la seconde. L'**effet rebond** annule une partie voire la totalité des bénéfices environnementaux obtenus sur une des dimensions du fait d'effets « secondaires » sur l'autre dimension : améliorer les performances en terme de consommation d'un véhicule peut conduire à une « intensification » de son usage (augmentation du kilométrage annuel, de la vitesse moyenne, etc.).



2 Qu'est-ce que l'effet rebond ?

Une technologie plus efficace a tendance à être plus utilisée, par exemple à cause de la baisse des coûts d'utilisation. C'était déjà le constat que faisait W.S. Jevons pendant la révolution industrielle en Angleterre au XIX^{e} siècle à propos des progrès d'efficacité énergétique de la machine à vapeur : ceux-ci avaient en effet conduit à une augmentation de la demande en charbon et non à l'inverse. Cette situation est appelée effet rebond (plus exactement effet rebond direct), ou paradoxe de Jevons en référence à cet exemple historique du charbon. Un exemple typique d'effet rebond est le trafic induit[60] : une infrastructure de transport plus efficace peut causer une augmentation de la demande, c'est-à-dire du trafic routier. Ce phénomène empêche de résoudre les problèmes de congestion par simple augmentation des capacités routières.

60. https://fr.wikipedia.org/wiki/Trafic_induit

L'exemple de la Katy Freeway à Houston : malgré ses 26 voies elle n'a pas permis de résoudre les problèmes de congestion à cause du trafic induit

Les exemples d'effet rebond dans le secteur du numérique sont nombreux *(Flipo et Gossart, 2009)*[Flipo et Gossart, 2009 p.24] : depuis Eniac (le premier ordinateur entièrement électronique) la miniaturisation a rendu possible l'explosion du nombre d'objets électroniques *(Gossart, 2014)*[Gossart, 2014 p.24] (ordinateurs personnels, *smartphones*, objets connectés, etc.), les améliorations d'efficacité énergétique des réseaux de transmission combinées à celles des débits et des capacités de stockage ont permis l'explosion du trafic de données *(Bol et al., 2021)*[Bol et al., 2021 p.24], etc.

Les effets rebond indirects

On parle d'effet rebond *indirect* lorsque des économies réalisées dans un domaine génèrent de la consommation dans un autre *(Gossart, 2014)*[Gossart, 2014 p.24]. Ainsi une démarche de sobriété peut aussi être source d'effets rebond, du fait des économies réalisées qui sont réinvesties (qu'elles soient monétaires ou temporelles), ou du fait de leur effet déculpabilisant sur la consommation d'autres produits *(Schneider, 2009)*[Schneider, 2009 p.25]. Par exemple remplacer la voiture par le vélo dans les déplacements quotidiens permet de faire des économies qui peuvent être utilisées pour réaliser des voyages lointains en avion pendant les vacances, ce qui annule les bénéfices environnementaux liés à l'usage du vélo.

Les causes de l'effet rebond

L'effet rebond peut se produire lorsqu'une ou plusieurs limites à l'usage et/ou à la production sont repoussées *(Schneider, 2009)*[Schneider, 2009 p.25]. Ces limites peuvent être économiques, physiques, techniques, psychologiques, sociologiques, réglementaires, etc. À l'échelle macro-économique, l'effet rebond se traduit par une augmentation de l'activité économique, si bien qu'il empêche le découplage (absolu) entre croissance et impacts environnementaux *(Brockway et al., 2021)*[Brockway et al., 2021 p.24]. L'effet rebond ne s'explique pas uniquement comme résultant de la somme des comportement individuels, il a aussi des origines plus structurelles dans les politiques de croissance *(Schneider, 2009)*[Schneider, 2009 p.25], les stratégies commerciales, l'effet des marchés et de la financiarisation, les normes sociales, techniques, et réglementaires *(Wallenborn, 2018)*[Wallenborn, 2018 p.25].

Mesurer et prévoir l'effet rebond

L'ampleur de l'effet rebond est définie comme la part des gains potentiels qui est annulée par l'augmentation de l'usage, et on parle de *backfire* lorsque celle-ci excède 100% c'est-à-dire lorsque les gains potentiels sont plus que contrebalancés par les effets négatifs. Prévoir cette ampleur est utile pour anticiper la réalité des gains qu'on peut espérer d'une solution, mais cela reste (très) difficile. L'approche courante pour y parvenir fait appel à des modélisations économiques qui ne sont pas conçues pour rendre compte de changements sociétaux profonds *(Briens , 2015)*[Briens , 2015 p.24] (or ce sont d'eux dont nous avons probablement besoin, par exemple pour décarboner nos économies).

Pour comprendre et prévoir l'effet rebond, étudier les tendances historiques se révèle aussi très utile. Elles nous montrent par exemple que l'optimisation continue des infrastructures et des équipements numériques ne permet pas de compenser l'accroissement des usages, si bien que l'empreinte carbone globale de nos réseaux, de nos centres de données, et de nos équipements terminaux tend à augmenter *(Bol et al., 2021)*[Bol et al., 2021 p.24]. Plus généralement l'histoire des techniques nous montre comment les usages s'empilent et se complémentent plus qu'ils ne se substituent *(Fressoz, 2021)*[Fressoz, 2021 p.24].

3 Quand peut-on s'attendre à un effet rebond ?

L'effet rebond risque de se manifester dans les solutions de type « gagnant-gagnant », plus particulièrement celles qui :

- conduisent à des gains d'argent, de temps (effets d'accélération), d'espace (miniaturisation)
- apportent de nouvelles fonctionnalités (génératrices de nouveaux usages)
- incitent à plus d'usage par des performances ou un confort d'utilisation accrus.

4 Comment limiter l'effet rebond ?

- sensibiliser à l'effet rebond, inciter à conscientiser les intentions (sont-elles écologiques ? économiques ?)
- penser de façon systémique et à des échelles larges (donc à l'échelle collective plutôt qu'individuelle)
- favoriser les solutions « low-tech » (car elles évitent en général de générer de nouveaux besoins)

- flécher les budgets économisés (en argent ou en temps) vers d'autres améliorations environnementales pour lutter contre les effets rebond indirects.

7. Où en est-on du recyclage ?

1 DEEE - une définition

Un **déchet** est, légalement, un objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire. Cela peut donc être un objet encore fonctionnel.

Les ***DEEE*** p.21 correspondent aux déchets d'équipements électriques et électroniques. Ils regroupent tous les déchets d'équipements fonctionnant avec une prise électrique, une pile ou un accumulateur, ainsi que tous leurs composants et les consommables qui leur sont associés. Ils sont marqués du symbole de la poubelle barrée :

Cela comprend par exemple les produits d'électroménager, les ordinateurs, les congélateurs de votre supermarché, le fauteuil électrique de votre dentiste, ou les équipements réseau de votre fournisseur d'accès à internet. Parmi les DEEE se trouvent donc des déchets d'équipements numériques.

La gestion des DEEE suit théoriquement deux étapes principales :

- la **collecte**, c'est-à-dire la récupération des équipements qui ne sont plus utilisés par les collectivités locales (déchetteries par exemple), les distributeurs (reprise en magasin), les acteurs de l'économie sociale et solidaire ou les *éco-organismes* p.21 (collecte directe dans les entreprises et organisations, collectes solidaires dans certaines villes...). Tous les DEEE produits dans un pays ne sont pas collectés : en France le taux de collecte était d'environ 50% en 2019 (source : Registre *ADEME* p.21), et au niveau mondial de 17% (source : Global e-waste monitor[61])...
- le **traitement** des DEEE, en essayant de favoriser la réutilisation ou la récupération de tout ou partie des équipements. Les types de traitement possibles sont, par ordre de priorité (en théorie) : la préparation et/ou la réutilisation de l'équipement entier ou de sous-ensembles de l'équipement ; le recyclage matière (environ 75% des DEEE traités en tonnage) ; la valorisation énergétique (incinération avec récupération de chaleur) ; l'élimination (mise en décharge, enfouissement ou incinération sans récupération d'énergie).

En réalité, ces deux étapes n'ont pas toujours lieu comme indiqué précédemment pour la collecte. Une faible portion des DEEE collectés n'est également pas traitée en France.

2 La collecte

Principe et taux de collecte

Au niveau mondial, un consortium d'instituts a travaillé à établir une méthodologie d'estimation de la quantité de DEEE à partir des quantités d'objets mis sur le marché. Leurs conclusions sont disponibles et mises à jour régulièrement dans le *global E-waste monitor*[62]. Le taux de collecte dans chaque pays est ensuite calculé en utilisant le volume de DEEE collectés par rapport à cette estimation de la quantité de DEEE.

Comme indiqué précédemment, en France le taux de collecte était d'environ 50% en 2019, et au niveau mondial de 17%. Malgré des incitations récurrentes à rapporter ses DEEE dans l'objectif d'augmenter le taux de collecte français, une grande partie des DEEE ne sont donc toujours pas

61. https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Pages/Spotlight/Global-Ewaste-Monitor-2020.aspx
62. https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Pages/Spotlight/Global-Ewaste-Monitor-2020.aspx

collectés mais résident dans des placards, partent aux ordures ménagères, dans la ferraille, ou encore en décharges sauvages ou dans des circuits informels, à l'export (souvent sous couvert de don).

Qui est responsable et effectue la collecte ?

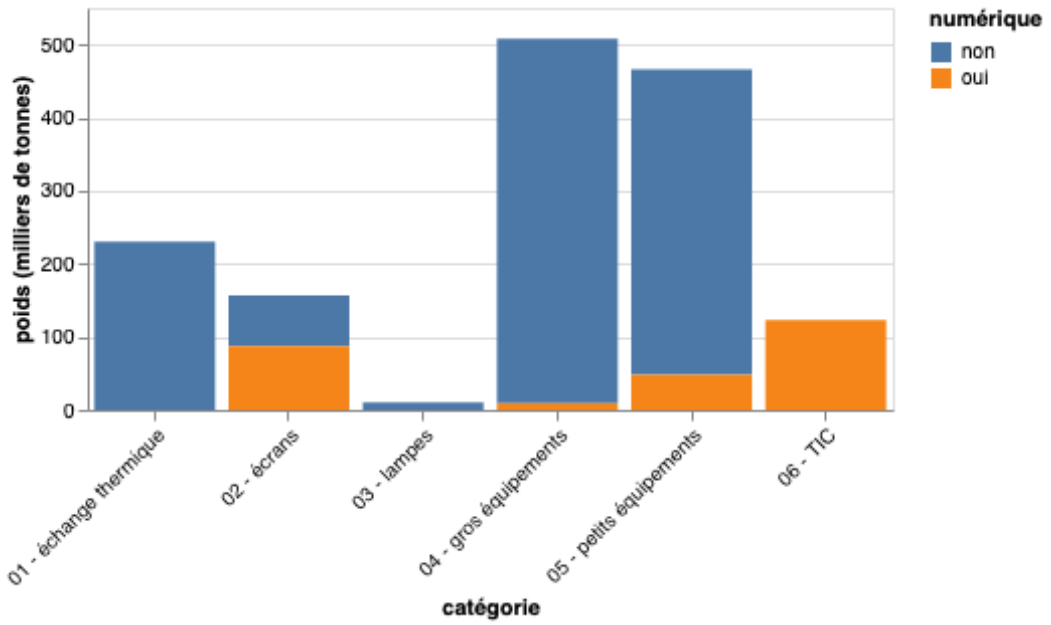
Le principe de Responsabilité Élargie du Producteur implique la mise en place par les producteurs de la filière de collecte et de traitement des équipements. Ces filières sont en partie financées par une éco-taxe lors de l'achat de matériel électroménager neuf. Les équipements collectés (en magasin ou bien *via* une filière spécifique au fabricant ou encore en déchetterie) sont remis aux éco-organismes agréés pour traitement (réemploi, réparation, préparation au recyclage...).

Les producteurs français sont en outre tenus de déclarer annuellement au Registre de l'ADEME les quantités d'équipements électriques et électroniques mis sur le marché, collectés et traités. À partir de l'analyse de ces données, l'ADEME publie un rapport annuel permettant le suivi de la filière des équipements électriques et électroniques en France et le calcul des taux de collecte et de recyclage.

Quelle quantité d'équipements numériques dans les DEEE ?

Depuis 2018 en France, les EEE sont classés en 7 catégories d'équipements (échanges thermiques, écrans, lampes, gros électroménager, petit électroménager, informatique) avec un objectif de traçage et de suivi. En revanche, sur les sites de collecte, les flux sont plutôt organisés selon 6 grandes catégories, le numérique n'étant pas différentié des autres équipements.

On peut toutefois estimer la proportion d'équipements numériques dans chaque catégorie. En 2018, environ 18% de la masse des DEEE peuvent être considérés comme numériques (voir figure ci-dessous).



Tonnage de DEEE par catégorie en France en 2018 (en milliers de tonnes)

La pollution engendrée (voir partie suivante) dépend plutôt de la composition des équipements et de leur complexité structurelle que de la masse totale. La pollution engendrée par les DEEE numériques représente donc certainement une proportion supérieure à leur 18% en masse : les composants des équipements numériques sont souvent miniaturisés et entremêlés à tel point qu'il est compliqué de séparer les matières pour les recycler, et cette séparation et ce recyclage se font au prix d'une pollution non négligeable (émission de gaz toxiques, utilisation d'acides, de grandes quantités d'eau, chauffage à très haute température, etc.).

Paradoxe de l'incitation à la collecte

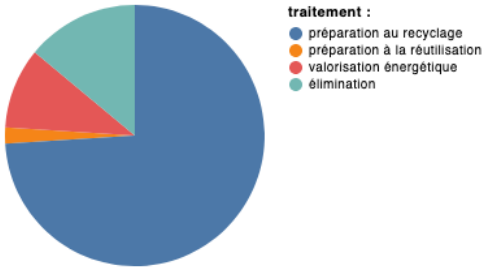
Actuellement, le système de collecte et de recyclage est face à un paradoxe qu'on ne peut plus négliger : l'agrément des éco-organismes se fait exclusivement en fonction du poids de DEEE collectés, sans tenir compte du taux de réemploi atteint. Cette politique peut avoir plusieurs conséquences néfastes :

- incitation des dits éco-organismes à intégrer au poids de DEEE tout le matériel collecté, sans mettre en place de réemploi, puisque ce dernier, bien qu'étant le choix le plus écologique, n'est pas pris en compte,
- mise à disposition de bennes pour faciliter et "automatiser" la collecte : dans des bennes, le matériel est écrasé, ce qui le rend ensuite impropre au réemploi.

3 Le traitement

La chaîne de traitement

La prise en charge des équipements collectés mène à plusieurs voies possibles : la préparation à la réutilisation (environ 2% en France en 2019) ; le recyclage (environ 75%) ; la valorisation énergétique (environ 10%) ; l'élimination c'est-à-dire mise en décharge et enfouissement, ou incinération sans récupération d'énergie (environ 14%).



Types de traitement des DEEE en France en 2019

En réalité, seuls 75% en poids des DEEE collectés sont donc injectés dans un véritable système de recyclage des DEEE (et ce chiffre est assez variable selon les types d'équipements). Compte tenu du taux de collecte en France (50%), cela ne représente finalement que 38% de la masse des DEEE générés (au mieux).

La préparation au recyclage se déroule généralement en six étapes (source : registre ADEME) :

- le démantèlement (séparation de différents composants) et la dépollution (extraction des substances polluantes) ;
- le broyage des équipements en morceaux de faible taille ;
- une séparation électromagnétique des éléments ferreux à l'aide d'aimants ;
- un tri optique qui permet de séparer les cartes électroniques, qui sont valorisées ultérieurement via un autre procédé de recyclage pour récupérer les métaux stratégiques contenus dans ces fractions ;
- une séparation des éléments métalliques non ferreux (dont le cuivre) grâce à des courants de Foucault ;
- une séparation des plastiques par flottaison ou tri optique.

Ces procédés conduisent à une récupération de 11% de la masse des matières en moyenne (chiffre 2019 pour l'ensemble des DEEE). A la sortie de ces centres de traitement de DEEE, les fractions de cartes électroniques, de plastiques, etc. sont acheminées vers des usines spécialisées qui à leur tour vont tenter de récupérer le plus de matières secondaires possible qui seront réinjectées dans des usines de production de biens. A savoir qu'il existe très peu d'usines capables de recycler une grande diversité de métaux d'une carte électronique. UMICORE (en Belgique) et BOLIDEN (en Suède) sont les plus performantes en Europe ; il n'y a pas d'équivalent en France.

Les limites du traitement

En général, le traitement pour recyclage des DEEE a un impact environnemental moindre que la production des matériaux récupérés, et a donc un intérêt d'un point de vue environnemental : c'est le cas pour le cuivre, l'aluminium, les métaux précieux en général (or, palladium, argent) mais ce n'est pas le cas pour le tantale par exemple.

Cependant, son impact est loin d'être négligeable.

Les procédés industriels mis en jeu utilisent énormément d'énergie (dualité matière/énergie) afin de chauffer les matières à recycler à haute température.

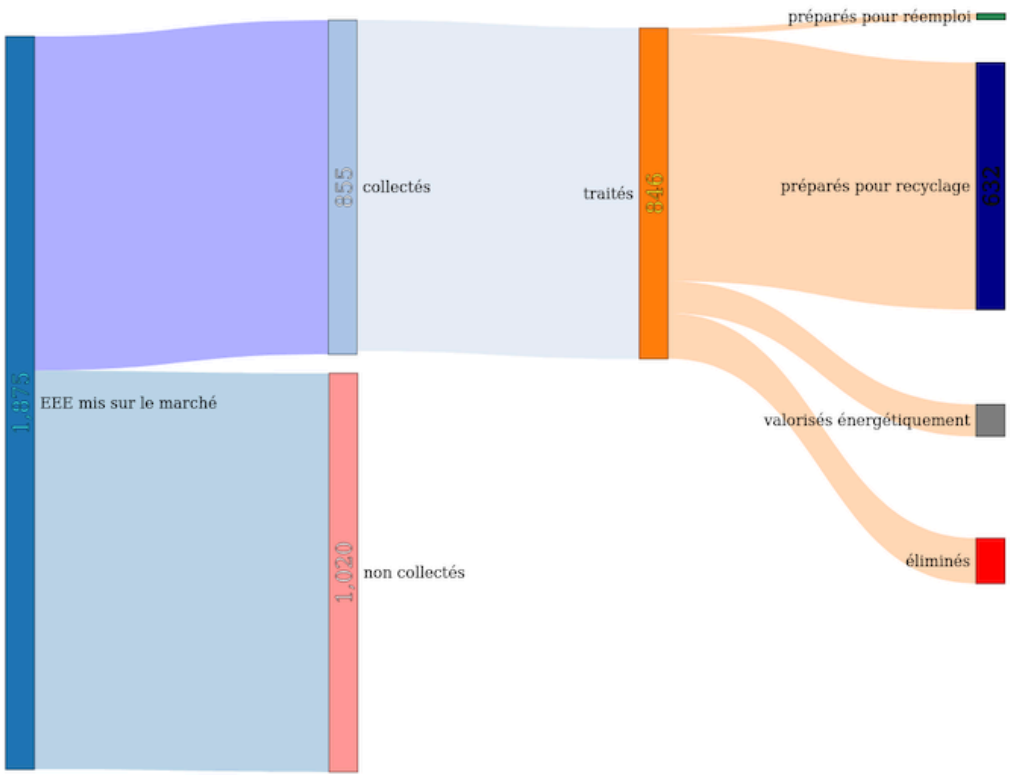
En outre, pour dés-allier les métaux rares et les terres rares il est nécessaire d'utiliser des acides, des sels, et de chauffer à très haute température (énergie).

Une des raisons de ces difficultés d'extraction des métaux est qu'ils sont intimement mêlés dans les terminaux miniaturisés, et tenter d'en extraire les éléments constitutifs (au sens chimique du terme) revient à tenter d'extraire les ingrédients initiaux comme la tomate et la courgette d'une cuillerée à café de ratatouille (allégorie librement inspirée de Philippe Bihouix).

Au final, le taux de recyclage des métaux des TIC est bas voire extrêmement bas (inférieur à 50% pour plus de la moitié d'entre eux, pour certains inférieur à 1%) et ne permet donc pas de couvrir 100% de nos besoins en matières premières, sans compter la perte à la fonte. La couverture à 100% de nos besoins n'est de toute façon pas possible dans un contexte où la demande de matériaux pour la fabrication de nos équipements ne cesse de croître (cf fiche concept *Quelles sont les limites de l'économie circulaire ?* *(cf. p.57)*).

En outre, le prix de certains métaux recyclés sur le marché peut être plus élevé que les métaux primaires, n'incitant donc pas au développement des filières de recyclage (référence : Les minerais dans l'économie circulaire : l'économie des métaux. Florian Fizaine. voir https://www.youtube.com/watch?v=FLq9bb3Befg).

4 Résumé graphique de la gestion des DEEE en France



Flux de traitement des DEEE en France en 2019 en milliers de tonnes

5 Sources utilisées pour ce document

- Directive européenne 2006/12/CE de 2006[63] pour la définition d'un déchet
- Décret définissant les DEEE[64]
- The Global E-waste Monitor, url[65]
- ADEME, Erwann FANGEAT. In Extenso Innovation Croissance, Alice DEPROUW, Marion JOVER, Mathilde BORIE, Océane TONSART. 2020. Rapport annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques, url[66].
- Recycling Rates of Metals, A Status Report[67]. UNEP (United Nation Environment Programme), 2011
- *Hischier et al., 2005*[*Hischier et al., 2005* p.24]
- *Berlingen, 2020*[*Berlingen, 2020* p.23]
- *Vidal et al., 2013*[*Vidal et al., 2013* p.25]

8. Quelles sont les limites de l'économie circulaire ?

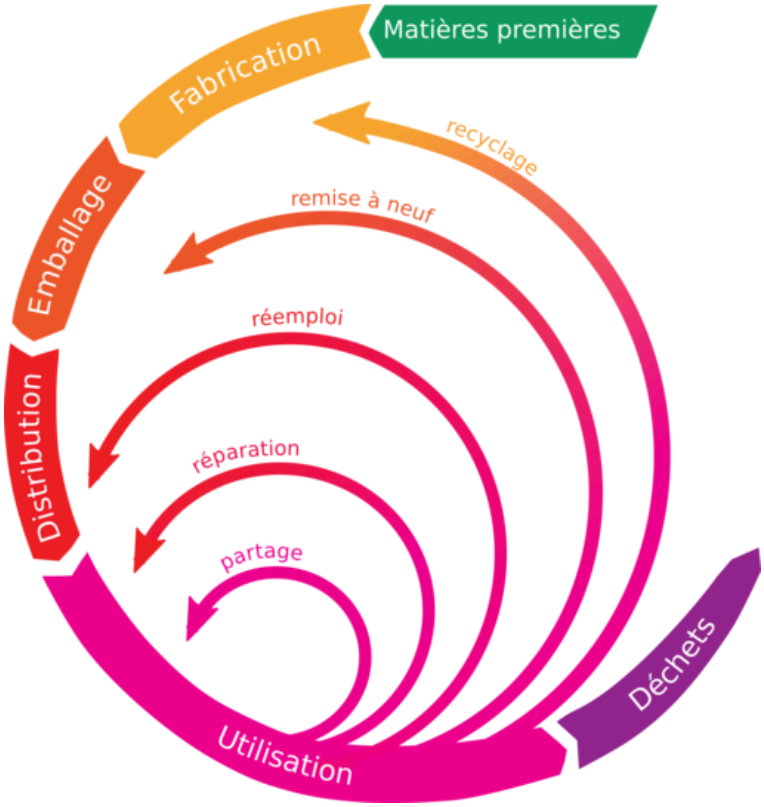
Qu'est-ce que l'économie circulaire ?

Selon Wikipedia : « L'**économie circulaire** est un nouveau modèle économique à vision systémique. Les notions d'économie verte[68], d'économie de l'usage ou économie de la fonctionnalité[69], de l'économie de la performance et de l'écologie industrielle[70] font partie de l'économie circulaire.

Une telle économie fonctionne en boucle (voir Figure ci-dessous), se passant ainsi de la notion de «déchet». Son objectif est de produire des biens et services tout en limitant fortement la consommation et le gaspillage des matières premières, et des sources d'énergies non renouvelables.

Comme le montre la figure ci-après, les principales stratégies de mise en œuvre de l'économie circulaire sont, le partage, la réparation, le réemploi, le remise à neuf et le recyclage. Des exemples de mise en oeuvre de ces stratégies sont décrites dans la fiche concept *Les 5R du numérique.* *(cf. p.59)*

63. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2006.114.01.0009.01.FRA&toc=OJ%3AL%3A2006%3A114%3AFULL
64. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000029387124
65. http://ewastemonitor.info/
66. https://www.ademe.fr/mediatheque
67. http://www.resourcepanel.org/file/381/download?token=he_rldvr
68. https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89conomie_verte
69. https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89conomie_de_l%27usage
70. https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89cologie_industrielle



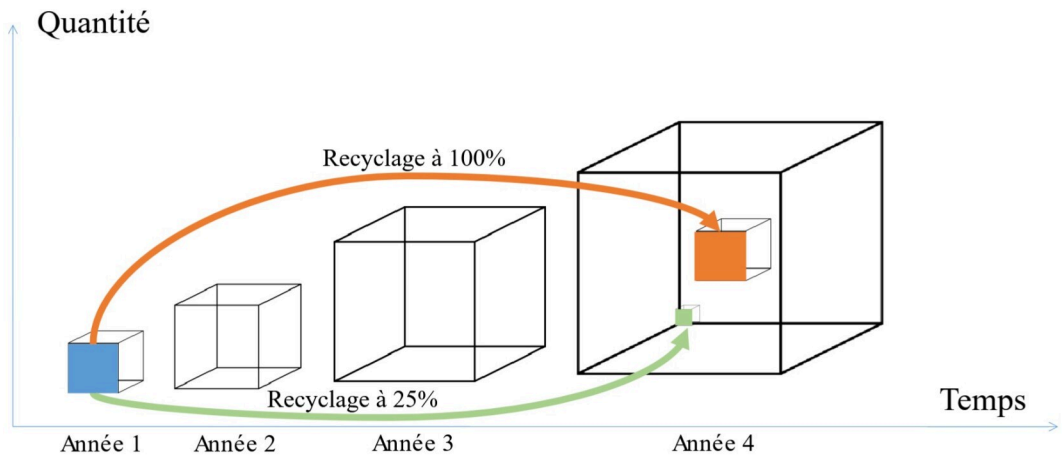
Économie circulaire

Ce concept est souvent présenté, à juste titre, comme une stratégie permettant de réduire les impacts environnementaux. En effet, à production et consommation de biens constante dans l'économie, plus celle-ci est circulaire, moins il est nécessaire d'extraire de matières premières vierges ou de rejeter des déchets. Selon la définition des impacts environnementaux ces derniers sont générés par des prélèvements ou des rejets dans l'environnement.

Les limites de l'écologie circulaire

Néanmoins, cette stratégie présente des limites.

D'une part, dans une économie en croissance, même une économie 100 % circulaire n'est pas capable de fournir la totalité de la demande en ressources de l'économie *(Grosse, 2014)*[Grosse, 2014 p.23] car cette demande croit pendant que les ressources sont en utilisation dans un cycle économique (voir Figure ci-dessous). Pour fournir l'accroissement de cette demande, il est donc toujours nécessaire de se fournir en ressources primaires vierges. La prochaine figure donne l'exemple d'une ressource dont la durée de vie dans l'économie est de 4 ans et dont la demande est croissante. La flèche orange montre la quantité de cette ressource qui serait issue du recyclage si ce dernier avait une efficacité de 100%. La flèche verte montre la quantité produite par un recyclage de 25%. On constate ici que le recyclage n'est pas suffisant pour assurer la production permettant de couvrir la totalité de la demande de cette ressource. Ce cas de figure concerne en particulier les métaux nécessaires pour fabriquer les infrastructures du numérique dont les taux de recyclages sont pour la plupart inférieurs à 40% (hors fer/acier dont le taux de recyclage est généralement supérieur à 80%).



Les limites du recyclage dans un contexte de demande croissante

D'autre part, il n'est pas à exclure que la mise en œuvre d'une stratégie d'économie circulaire soit génératrice d'un effet rebond (voir la fiche concept *L'effet rebond* (cf. p.50)). En effet, l'économie circulaire est une stratégie visant à améliorer l'efficacité de l'usage des ressources vierges par les cycles économiques. Gains d'efficacité qui sont la cause principale de génération d'un effet rebond.

Pour les 2 raisons ci-dessus, il est donc important de garder à l'esprit que faire augmenter le taux de circularité de l'économie n'est pas une stratégie qui garantit une réduction des impacts environnementaux. Toutefois, si l'on arrive à limiter la croissance et les effets rebonds, l'économie circulaire peut être une stratégie intéressante.

9. Les 5R du numérique

Toutes les actions numériques, contrairement à leur qualificatif "dématérialisées", sont responsables d'**impacts environnementaux** variés qui vont de la consommation électrique à la déplétion des ressources minérales en passant par la pollution des eaux, des sols et des airs, l'émission de gaz à effet de serre, et d'autres encore qui ne sont pas bien quantifiés. Une grande partie de ces impacts a lieu loin des yeux des utilisateurs, lors de la fabrication et de l'élimination des équipements. La consommation électrique des appareils pendant leur phase d'usage est responsable d'un des impacts les plus faibles.

En général, les outils numériques répandus et faciles d'utilisation ne sont pas ceux qui minimisent tous ces impacts. Ils correspondent plutôt au modèle économique dominant dans lequel ces impacts sont "**externalisés**" : ce ne sont pas les fabricants qui réparent les dommages causés. Le consommateur est donc en position de choisir, par ses actions quotidiennes, des outils et des pratiques qui diminuent tous ces impacts, y compris ceux ayant lieu lors de la phase de fabrication et d'élimination. L'**allongement de la durée de vie des équipements** constitue la priorité numéro 1 pour réduire l'impact environnemental du numérique.

Issus de la communauté du "zéro déchet", convaincue que "Le meilleur déchet est celui qu'on ne génère pas", les 5 "R" décrivent des stratégies de sobriété à tous les niveaux d'action accessibles aux utilisateurs d'appareils numériques.

1) Comme **Refuser**

- D'acheter un équipement supplémentaire, surtout sans écolabel et peu réparable
- D'acheter un équipement de remplacement (garder l'ancien ou diminuer le nombre d'équipements)
- D'adhérer à un service (abonnement de streaming, inscription à un réseau social, etc)
- De cliquer (sur une vidéo, un lien de téléchargement, etc)
- Un don (goodies, cadeaux publicitaires, etc)

- La pub, les cookies, les mouchards web, les infolettres inutiles, les applications néfastes (pourriciels, obésiciels), les vidéos déclenchées automatiquement, etc.

2) Comme **Réduire**

- La fréquence de renouvellement des appareils (prolonger la durée de garantie à l'achat, acheter en fonction de l'usage, prendre soin)
- Le visionnage de vidéos (VOD, streaming, pornographie, Tubes, réseaux sociaux, etc)
- La quantité de données (baisser la résolution des vidéos et des images, bannir les pièces jointes à beaucoup de destinataires, supprimer les fichiers une fois utilisés)
- L'éparpillement des données (enregistrer les données sur un disque plutôt que sur le cloud)
- Le nombre d'applis sur téléphone, tablette ; de comptes sur des sites marchands ou réseaux sociaux
- Le nombre de recherches web (enregistrer les sites habituels en favoris)
- Le temps passé devant des écrans (faire autre chose)
- La consommation électrique de mes équipements (diminuer la luminosité des écrans, éteindre les box et les appareils, mettre en veille)

3) Comme **Réutiliser** ou **Réparer**

- En achetant d'occasion ou reconditionné, en donnant ou revendant à des acteurs de l'économie circulaire
- En détournant l'usage
- En mutualisant les ressources avec les proches, les collègues, les voisins
- En organisant les données pour ne les télécharger qu'une fois

4) Comme **Rendre à la terre**

- Composter tous les déchets organiques (notamment certains emballages)

5) Comme **Recycler**

- En amenant le matériel irréparable dans des points de collecte agréés DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques)

Pour aller plus loin

⊕ Complément

- Les 5R de la sobriété numérique, Profs en transition. 2019. Disponible sur profsentransition.com[71] [28/01/2022]
- La pollution numérique, Profs en transition. 2020. Disponible sur profsentransition.com[72] [28/01/2022]
- Raphaël Lemaire. La règle des 5R [en ligne]. 2021. Disponible sur blog.zenika.com[73] [28/01/2022]

71. https://profsentransition.com/sobriete-numerique/
72. https://profsentransition.com/pollution-numerique-etat-des-lieux/
73. https://blog.zenika.com/2021/02/09/la-regle-des-5r/

10. Pourquoi les projections autour de la durée des réserves minières sont difficiles ?

Introduction

Nos sens nous permettent de connaître rapidement les éléments matériels de notre environnement direct : le bois des forêts, le béton des villes, la roche des montagnes, l'eau des rivières, le sable du désert, etc. En revanche, ils sont très peu adaptés pour nous informer sur les éléments matériels souterrains. Il faut alors déterminer des relations possibles entre ce qui est observé à la surface de la Terre et ce qui pourrait se trouver en-dessous.

La géologie et toutes ses spécialités permettent de mieux comprendre et caractériser l'histoire, l'état et l'évolution des formations géologiques. Trouver des ressources minérales demande une capacité d'observation de la surface et de compréhension des phénomènes géologiques à l'œuvre, notamment ceux qui concentrent les éléments chimiques et forment des gisements.

Des ressources aux réserves

Lors de la phase d'exploration, les entreprises minières cherchent des indices ou “anomalies” révélant la présence d'une concentration extraordinaire d'un minéral ou d'un métal. Elles entreprennent alors des forages et des caractérisations afin d'estimer grossièrement les ressources disponibles. Lorsque la localisation d'un gisement potentiel est déterminée, les compagnies minières poursuivent les forages selon un maillage donné pour formuler une estimation des ressources.

Afin de démontrer la faisabilité d'un projet minier, les compagnies doivent transformer les ressources en réserves, c'est-à-dire prouver que les ressources identifiées peuvent être correctement extraites, traitées puis vendues en respectant tous les cadres légaux et en assurant la rentabilité du projet. C'est à cette étape que de nombreux paramètres variables interviennent, ce qui demande des études de faisabilité longues et coûteuses. C'est en annonçant des réserves probables ou prouvées qu'un futur opérateur minier va attirer à lui les investissements nécessaires pour lui permettre d'ouvrir le projet.

Illustration de la caractérisation des ressources et réserves minières

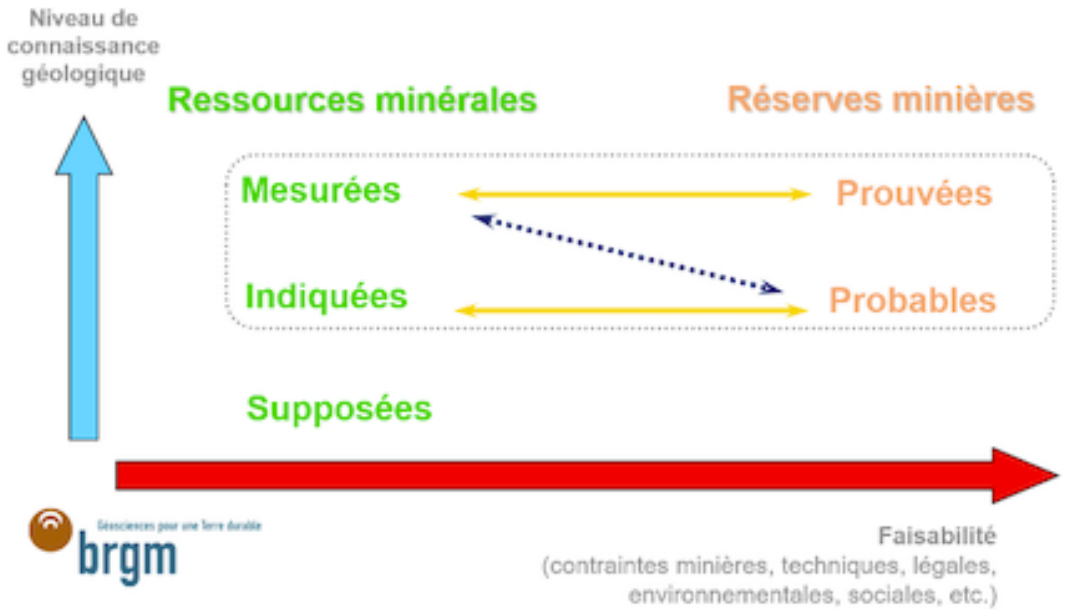
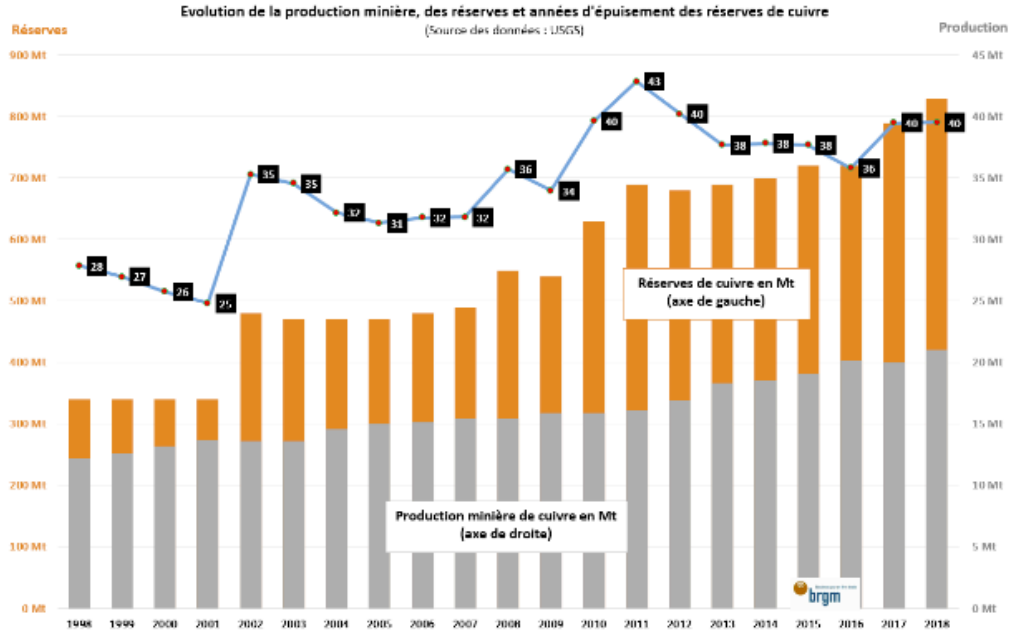


Illustration de la caractérisation des ressources et réserves minières

Lorsque le projet est en opération, d'autres campagnes de mesures peuvent être réalisées pour étendre les réserves du site d'extraction. Mais il serait inutile pour un opérateur minier de rechercher des gisements voisins tant que le gisement en cours lui permet de garantir plusieurs années de production. Il n'est donc pas possible de considérer les réserves minières comme un stock fixe. Il est également difficile de prédire l'évolution des réserves car celles-ci dépendront non seulement des futures découvertes mais également de l'évolution des paramètres de faisabilité, eux-mêmes dépendant du prix de la substance recherchée.

Un exemple : le cuivre

Si on prend l'exemple du cuivre à l'année 2000, les réserves minières étaient estimées à 25 ans au rythme de la production de cette année-là. Depuis, la production minière a augmenté de plus de 2%/an, mais les réserves ont elles-aussi augmenté, ce qui portait les réserves 2018 à 40 ans au rythme de la production 2018. Il est par contre reconnu que la croissance de production du cuivre ne pourra pas éternellement se maintenir et qu'il y aura une stabilisation voire une réduction de la production primaire dans les années à venir, au profit des ressources secondaires.



Évolution de la production minière, des réserves et de la durée fictive d'épuisement des réserves pour le cuivre.