Impacts sociaux et environnementaux du numérique

Table des matières

I - La technique n'est ni bonne, ni mauvaise, ni neutre (avec Jacques Ellul) 4

II - Du soin dans la technique (avec Xavier Guchet) 7

1. Non neutralité de la technique 7
2. Solutionnisme et neutralité de la technique 9
3. Le carré du soin 10

III - Exercice : Exercice : impacts sociaux du numérique 12

IV - Exercice : impacts environnementaux 16

1. Exercice : Consommation du numérique 16
2. Exercice : Cycle de vie 16
3. Exercice : Impacts de la fabrication 16
4. Exercice : Métaux 16
5. Exercice : Extractivisme 17
6. Exercice : Bloqueur de pub 17
7. Exercice : Impacts du télétravail 17

V - Ouverture : soutenabilité, responsabilité et convivialité versus croissance, consumérisme et progrès 19

VI - Compléments 20

1. Impacts sociétaux du numérique 20
   - 1.1. Impacts du numérique sur la santé mentale 20
   - 1.2. Impacts du numérique sur la citoyenneté 20
   - 1.3. Impacts du numérique sur l'éducation 21
   - 1.4. Impacts du numérique sur la médecine 21
   - 1.5. Impact du numérique sur l'agriculture 21
   - 1.6. Impacts du numérique sur les organisations professionnelles 22
   - 1.7. Impact du numérique sur les adolescents 22
   - 1.8. Impacts du numérique sur la bureaucratie 23
   - 1.9. Impacts du numérique sur la science et la créativité 24
2. Impacts environnementaux du numérique (élements d'introduction) 25
   - 2.1. Soutenabilité et responsabilité dans le cadre du numérique 25
   - 2.2. Introduction à l'ACV 26
   - 2.3. Facteurs d'impacts environnementaux 27
   - 2.4. Numérique : niveaux et phases de vie 28
   - 2.5. Synthèse des ACV du numérique en France et en Europe (2021) 28

Solutions des exercices 30

Glossaire 36

Références 37

Bibliographie 38

Webographie 40

Crédits des ressources 42

Contenus annexes 45

I La technique n'est ni bonne, ni mauvaise, ni neutre (avec Jacques Ellul)

Ce contenu à été réalisé à partir d'un court — mais dense — extrait d'un texte de Jacques Ellul (*1965*[Ellul, 1965 p.38]).

La technique n'est ni bonne, ni mauvaise, ni neutre. Fondamental

> « J'entends par là que le développement de la technique n'est ni bon, ni mauvais, ni neutre — mais qu'il est fait d'un mélange complexe d'éléments positifs et négatifs [...].
>
> *Ellul, 1965*[Ellul, 1965 p.38] »

Ça ne dépend pas

Les objets techniques ne sont pas neutres au sens où nous pourrions décider de systématiquement les utiliser à bon escient. On peut caresser avec un marteau, mais si on dispose du marteau, on frappera à un moment ou à un autre avec (un clou ici, un crâne là).

> « J'entends encore par là qu'il est impossible de dissocier ces facteurs, de façon à obtenir une technique purement bonne et qu'il ne dépend absolument pas de l'usage que nous faisons de l'outillage technique d'avoir des résultats exclusivement bons.
>
> *Ellul, 1965*[Ellul, 1965 p.38] »

Exemple

> « Le fusil nous fait pénétrer dans un monde où, indépendamment de la volonté de son utilisation, la guerre des tranchées devient possible.
>
> *Biagini and Carnino, 2006*[Biagini and Carnino, 2006 p.38] »

La technique transforme l'humain

L'humain équipé de telle ou telle technique est transformé corporellement et psychologiquement, il est un humain différent de celui qui est équipé autrement.

> « En effet, dans cet usage même nous sommes à notre tour modifiés. Dans l'ensemble du phénomène technique, nous ne restons pas intacts, nous sommes non seulement orientés indirectement par cet appareillage lui-même, mais en outre adaptés en vue d'une meilleure utilisation de la technique grâce aux moyens psychologiques d'adaptation.
>
> *Ellul, 1965*[Ellul, 1965 p.38] »

La technique augmente la dépendance à la technique

La technique peut augmenter l'autonomie de l'humain, par rapport à sa dépendance aux activités d'autres humains ou aux contraintes du milieu naturel dans lequel il évolue, mais elle diminue toujours son indépendance en ce sens que la solution technique se substitue à une solution — ou une non-solution — non technique.

> « Ainsi nous cessons d'être indépendants : nous ne sommes pas un sujet au milieu d'objets sur lesquels nous pourrions avoir une influence autonome, à l'égard desquels nous pourrions librement décider de notre conduite : nous sommes étroitement impliqués par cet univers technique, conditionnés par lui.
>
> *Ellul, 1965*[Ellul, 1965 p.38] »

La technique détermine l'évaluation de la technique

Il n'est pas possible d'évaluer le caractère bon ou mauvais d'une technique sans technique, donc l'évaluation éthique de la technique est elle-même techniquement conditionnée.

> « Autrement dit l'usage fait de cet appareillage n'est pas décidé par un homme spirituel, éthique et autonome, mais par cet homme là — et par conséquent, cet usage est tout autant le résultat d'une option de l'homme que d'une détermination technique : cet univers technicien comporte aussi des déterminations qui ne dépendent pas de nous et qui dictent un certain usage.
>
> *Ellul, 1965*[Ellul, 1965 p.38] »

Le progrès technique complexifie le monde et limite les possibilités de choisir

L'extension du domaine de la technique, en nombre d'objets, en évolution de chaque objet, en intrications des objets entre eux, complexifie le monde dans lequel les humains évoluent et obère leurs possibilités de choix.

> « Ce qui nous reste, c'est d'être situé dans un univers ambigu, dans lequel chaque progrès technique accentue la complexité du mélange des éléments positifs et négatifs. Plus il y a de progrès dans ce domaine, plus la relation du « bon » et du « mauvais » est inextricable — plus le choix devient impossible — et plus la situation est tendue, c'est à dire moins nous pouvons échapper aux effets ambivalents du système.
>
> *Ellul, 1965*[Ellul, 1965 p.38] »

Technocritique ⊕ Complément

- *« Tout progrès technique se paie. »*
- *« Le progrès technique soulève plus de problèmes qu'il n'en résout. »*
- *« Les effets néfastes du progrès technique sont inséparables des effets favorables. »*
- *« Tout progrès technique comporte un grand nombre d'effets imprévisibles. »*

Ellul, 1965[Ellul, 1965 p.38]

Jacques Ellul est porteur d'une pensée que l'on qualifie de technocritique au sens où elle reconnaît la prépondérance de la technique dans l'ontologie humaine sans lui conférer pour autant un caractère sacré ou bon a priori.

Complément

« Technology is neither good nor bad; nor is it neutral.

Kranzberg, 1986[*Kranzberg, 1986* p.38] »

Complément

Thèse TAC : Technologie Anthropologiquement Constitutive (cf. p.45)

II Du soin dans la technique (avec Xavier Guchet)

Introduction

Cette partie de cours a été réalisée à partir du livre « Du soin dans la technique » *(Guchet, 2022)*[Guchet, 2022 p.38] et à partir des trois interviews de l'auteur réalisée sur la radio Graf'hit.

1. Du soin dans la technique, volet 1 : des concepts que l'on croise dans l'ouvrage. https://aperi.tube/w/7qrVSV8L3n3GABYfaooRKh
2. Du soin dans la technique, volet 2 : des liens avec les métiers et la formation de l'ingénieur. https://aperi.tube/w/mCJhsfg7BxP1cPt9HctcPD
3. Du soin dans la technique, volet 3 : des liens avec la soutenabilité et la lowtechisation. https://aperi.tube/w/jN3huRSMHYs73z9tUTsyNC

1. Non neutralité de la technique

Rappel

Réalisé à partir du livre « Du soin dans la technique » *(Guchet, 2022)*[Guchet, 2022 p.38] (pp.54-59).

Un préalable à la façon de s'intéresser à la technique d'un point de vue philosophique ou sociétal c'est d'acter que la technique n'est pas neutre, quelle *« embarque »* ou *« incorpore »* des valeurs.

- Ces valeurs viennent en partie d'un travail **intentionnel** et **a priori** des concepteurs ;
- mais la non neutralité de la technique relève également d'aspects **implicites** et **a posteriori**, qui transcendent ou excèdent les intentions conscientes des concepteurs.

Choix de conception intentionnels a priori

- Des choix politiques (volontaires mais non formalisés) sont matérialisés par les choix de conceptions techniques.
- La technique oblige à un usage qui embarque des considérations morales.

Exemple

- Permettre ou pas, ou mettre en avant ou pas, certaines actions dans les applications informatiques.
- Le gendarme couché, l'avertisseur sonore pour la ceinture...

La clef de Berlin oblige à refermer la porte derrière soi

Choix de conception implicites a priori

- Une technique en vertu de son design exige une organisation politique associée.
- Les modes de construction des objets techniques ne sont pas neutres (principe au cœur des questions environnementales).

Exemple

- Lien entre machinisme industriel et capitalisme mondialisé.
- Lien entre nucléaire et l'état fort (l'argument du lien entre totalitarisme et nucléaire est pris par les opposants au déploiement des EPR, *Lindgaard, 2022*[Lindgaard, 2022 p.38]).
- Dépendance du numérique aux terres rares.

Reconfiguration du monde a posteriori

- La technique ouvre un champ de perception du réel qui reconfigure la morale en vigueur dans une société avec des conséquences imprévisibles.
- Les représentations sous-jacentes aux techniques influent sur les représentations du monde, orientent les interprétations du monde.

Exemple

- L'échographie reconfigure le rapport à l'embryon, aux maladies fœtales...
- La génétique est modélisée par un code, donc quelque chose de manipulable par le calcul de façon pensée comme prévisible (bien que le modèle est simplificateur, donc faux).
- Le numérique est présenté comme immatériel, on parle de processus de *« dématérialisation »* dans les entreprises (alors qu'il ne fait que remplacer une réalité matérielle par une autre).

Complément

2. Solutionnisme et neutralité de la technique

Rappel

Réalisé à partir du livre « Du soin dans la technique » *(Guchet, 2022)*[Guchet, 2022 p.38] (pp.54-59 et p.223 notamment).

Attention

La thèse de la neutralité de la technique légitime le techno-solutionnisme.

La technique matérialise un ordre social en masquant les problèmes que revêt cet ordre social, en faisant apparaître ces problèmes comme purement techniques (ce qui permet de ne pas avoir de débat politique).

Exemple

- Adapter le poste de travail au travail des enfants permet de ne pas poser la question du travail des enfants.
- La voiture électrique permet de ne pas poser la question des modes de transport ou de l'aménagement du territoire.

Un foi tolérant au gin

Exemple

« Ainsi, au milieu des années 1960, le physicien Robert C. W. Ettinger [...] suggérait [...] d'ajouter aux organes de nouvelles fonctionnalités jugées intéressantes, comme rendre un foie tolérant au gin. [...] Soit, toutefois nous savons bien qu'un alcoolique n'est pas seulement un individu dont le foie dysfonctionne : il souffre de désordres métaboliques plus globaux et, au-delà des aspects proprement médicaux de sa situation, il connaît aussi très souvent de grandes difficultés dans sa vie sociale et personnelle. [...] Nul doute en revanche que ce foie tolérant au gin servirait grandement les intérêts des industriels qui produisent des spiritueux, en élargissant considérablement leur marché.

Guchet, 2022[Guchet, 2022 p.38] »

Remarque

On peut ajouter que cela sert également les intérêts du chercheur spécialiste de ce domaine.

3. Le carré du soin

Le carré du soin Fondamental

Une démarche exigeante de la raison :

- Rechercher la connaissance (littératie technique)
- Expliquer rationnellement (ce qui est construit) et susciter le débat

Une sensibilité aux milieux au sein desquels les dispositifs construits produiront leurs effets :

- S'insérer dans la nature (et incorporer sa complexité)
- Considérer les utilisateurs (insérer les humains)

(Guchet, 2022)[Guchet, 2022 p.38]

Le carré du soin

L'impératif de connaissance

« Rechercher la connaissance aussi systématiquement et aussi loin que possible apparaît en effet comme une exigence absolue en contrepoint de l'ignorance qui accompagne un nombre grandissant de dispositifs et d'activités techniques [...].

(Guchet, 2022)[Guchet, 2022 p.38] »

Exemple

Géo-ingénierie, manipulation génétique...

Complément

« Dans un contexte de recherche finalisée, les scientifiques sont aujourd'hui sommés par leurs financeurs de justifier l'utilité « économique et sociétale » de leurs travaux. À quelles applications conduisent les recherches menées ? Il convient peut-être de renverser la question et de demander : l'agir technique est-il suffisamment étayé sur des connaissances scientifiques ?

(Guchet, 2022)[Guchet, 2022 p.38] »

Expliquer rationnellement et susciter le débat conflictuel pluraliste

« [S'assurer que les techniques font l'objet d'une explication rationnelle aux usagers met] les ingénieurs dans l'obligation de considérer leur activité et leurs choix de conception comme des sujets qui doivent pouvoir être discutés par toutes celles et ceux que cette activité et ces choix sont susceptibles d'affecter – ce qui implique, de la part des ingénieurs, un effort de justification mais aussi d'évaluation des développements techniques au regard des fins visées.

(Guchet, 2022)[Guchet, 2022 p.38] »

S'insérer dans la nature

« Laisser faire les processus de la nature plutôt que chercher systématiquement à les maîtriser.

(Guchet, 2022)[Guchet, 2022 p.38] »

« Laisser faire ne signifie [donc] pas ne rien faire. C'est même tout le contraire : laisser faire est beaucoup plus complexe et exigeant, en termes de pensée opératoire, que d'imposer partout la même règle générale, selon une démarche simplificatrice qui consiste à rapporter la diversité du réel à un dénominateur commun.

(Guchet, 2022)[Guchet, 2022 p.38] »

Exemple

« L'agro-écologie consiste à d'abord chercher comment fonctionne la nature pour s'y insérer au mieux.

(Guchet, 2022)[Guchet, 2022 p.38] »

Accepter la complexité

Complément

« Prendre soin, c'est d'abord savoir accueillir la complexité du réel, et non chercher à la réduire dans le but de forcer le réel à correspondre à des catégories prédonnées.

(Guchet, 2022)[Guchet, 2022 p.38] »

Penser l'insertion des dispositifs dans les milieux humains

« Il serait sans doute également souhaitable que, de façon aussi systématique que possible, les ingénieurs qui conçoivent les dispositifs techniques aient une très bonne appréhension des univers professionnels, ou plus généralement d'usage, dans lesquels ces dispositifs seront mis en œuvre.

(Guchet, 2022)[Guchet, 2022 p.38] »

Complément

III Exercice : Exercice : impacts sociaux du numérique

Discutez pour chacun des domaines suivants les impacts positifs et/ou négatifs que le numérique a selon votre expérience ; illustrez avec des exemples.

Question 1

[solution n°1 p. 30]

Quels sont les impacts positifs et/ou négatifs que le numérique a sur l'éducation ?

Indice :

- *Shtepura, 2018*[*Shtepura, 2018* p.39] (*PDF (cf. The Impact of Digital Technology on Digital Natives' Learning)*)
- Benedetto-Meyer, Marie, Anca Boboc, et Jean-Luc Metzger. « Se former avec le numérique : entre exigence d'autonomie et quête de régulation ». Communication Organisation 56, nº 2 (2019): 47-61. https://www.cairn.info/revue-communication-et-organisation-2019-2-page-47.htm.
- Barber, Michael, Katelyn Donnelly, Saad Rizvi, and Lawrence Summers. 2013. "An Avalanche Is Coming: Higher Education and the Revolution Ahead." Institute for Public Policy Research, London, UK. [Texte et notes de lecture : http://aswemay.fr/co/ndlBarber2013.html]

Question 2

[solution n°2 p. 30]

Quels sont les impacts positifs et/ou négatifs que le numérique a sur les adolescents ?

Indice :

- *Boyd, 2016, p59*[*Boyd, 2016* p.38] (*C'est compliqué (extrait) (cf. C'est compliqué (extrait))*)
- *Dienlin and Johannes, 2020*[*Dienlin and Johannes, 2020* p.38]
- *Haddock et al., 2022*[*Haddock et al., 2022* p.38]

Question 3

[solution n°3 p. 30]

Quels sont les impacts positifs et/ou négatifs que le numérique a sur la santé mentale ?

Indice :

- *Small et al., 2020*[*Small et al., 2020* p.39]
- Areàn, Patricia A., Kien Hoa Ly, et Gerhard Andersson. « Mobile technology for mental health assessment ». Dialogues in Clinical Neuroscience 18, nº 2 (30 juin 2016): 163-69. https://doi.org/10.31887/DCNS.2016.18.2/parean.
- Firth, Joseph, John Torous, Brendon Stubbs, Josh A. Firth, Genevieve Z. Steiner, Lee Smith, Mario Alvarez-Jimenez, et al. « The "Online Brain": How the Internet May Be Changing Our Cognition ». World Psychiatry 18, nº 2 (2019): 119-29. https://doi.org/10.1002/wps.20617.

- Manach, Jean-Marc. « Confinement : la santé mentale s'est détériorée chez les jeunes anglais qui n'avaient pas accès à un ordinateur ». NextInpact, 2022. https://www.nextinpact.com/article/70389/confinement-sante-mentale-sest-deterioree-chez-jeunes-anglais-qui-navaient-pas-acces-a-ordinateur.

Question 4

[solution n°4 p. 30]

Quels sont les impacts positifs et/ou négatifs que le numérique a sur la médecine ?

Indice :

- *Slomian, 2017*[*Slomian, 2017* p.39]
- Saliou, Mathilde. « Apprentissage fédéré et usage des mégadonnées : ce que l'IA peut pour la santé ». Next Inpact, 2023. https://www.nextinpact.com/article/71015/apprentissage-federe-et-usage-megadonnees-ce-que-lia-peut-pour-sante.
- Braun, Matthias. « Represent Me: Please! Towards an Ethics of Digital Twins in Medicine ». Journal of Medical Ethics 47, nº 6 (1 juin 2021): 394-400. https://doi.org/10.1136/medethics-2020-106134.

Question 5

[solution n°5 p. 30]

Quels sont les impacts positifs et/ou négatifs que le numérique a sur l'agriculture ?

Indice :

- *Mazaud, 2017*[*Mazaud, 2017* p.39]
- Traversari, Silvia, Sonia Cacini, Angelica Galieni, Beatrice Nesi, Nicola Nicastro, et Catello Pane. « Precision Agriculture Digital Technologies for Sustainable Fungal Disease Management of Ornamental Plants ». Sustainability 13, nº 7 (janvier 2021): 3707. https://doi.org/10.3390/su13073707.
- Clapp, Jennifer, et Sarah-Louise Ruder. « Precision Technologies for Agriculture: Digital Farming, Gene-Edited Crops, and the Politics of Sustainability ». Global Environmental Politics 20, nº 3 (1 août 2020): 49-69. https://doi.org/10.1162/glep_a_00566.

Question 6

[solution n°6 p. 31]

Quels sont les impacts positifs et/ou négatifs que le numérique a sur la citoyenneté ?

Indice :

- *Luangsay-Catelin, 2018*[*Luangsay-Catelin, 2018* p.39]
- *Reporterre, 2022*[*Reporterre, 2022* p.39] (*Pitron, 2018*[*Pitron, 2018* p.39])
- *North, 2019*[*North, 2019* p.39]

Question 7

[solution n°7 p. 31]

Quels sont les impacts positifs et/ou négatifs que le numérique a sur les organisations professionnelles ?

Indice :

- *Pagani and Pardo, 2017*[*Pagani and Pardo, 2017* p.39]
- Frimousse, Soufyane, et Jean-Marie Peretti. « Travail et organisation hybrides en question(s) ». Question(s) de management 40, nº 3 (23 septembre 2022): 121-52. https://www.cairn.info/revue-questions-de-management-2022-3-page-121.htm.
- Charbonnier-Voirin, Audrey, Laura Marret, et Carolina Paulo. « Les perceptions de la marque employeur au cours du processus de candidature ». Management Avenir 94, nº 4 (11 septembre 2017): 33-55. https://www.cairn.info/revue-management-et-avenir-2017-4-page-33.htm.

Question 8

[solution n°8 p. 31]

Quels sont les impacts positifs et/ou négatifs que le numérique a sur la bureaucratie ?

Indice :

- *Graeber, 2015*[*Graeber, 2015* p.38] ; *Caillosse, 2016*[*Caillosse, 2016* p.38]
- Abdou, Ahmed Mohammad. « Good Governance and COVID-19: The Digital Bureaucracy to Response the Pandemic (Singapore as a Model) ». Journal of Public Affairs 21, nº 4 (1 novembre 2021): e2656. https://doi.org/10.1002/pa.2656.
- Bretesché, Sophie. « Transformation numérique : chronique d'une bureaucratisation annoncée ». Communication Organisation 56, nº 2 (2019): 19-31. https://www.cairn.info/revue-communication-et-organisation-2019-2-page-19.htm.
- Albouy, Xavier, et Gilles Jeannot. « Ce que le numérique fait à la bureaucratie ». Action publique. Recherche et pratiques, nº 15 (2022): 6-14. https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-03938247.
- Tréguer, Félix. « Face à l'automatisation des bureaucraties d'État, l'accommodement ou le refus ? », 1 septembre 2022, 337. https://shs.hal.science/halshs-03412142.

Bureaucratie, David Graeber
pages 166 à 174
Les Liens qui Libèrent, 2015

Synthèse

Sur le mouvement des technologies poétiques aux technologies bureaucratiques.

> Il est douteux que toutes les inventions mécaniques faites jusqu'à ce jour aient diminué la fatigue quotidienne d'un seul être humain.
>
> JOHN STUART MILL[43].

La prémisse de ce livre est que nous vivons dans une société profondément bureaucratique. Si nous ne le remarquons pas, c'est parce que les pratiques et exigences bureaucratiques sont devenues omniprésentes au point que nous pouvons à peine les voir – ou pire : que nous ne pouvons plus imaginer de faire les choses autrement.

Les ordinateurs ont joué un rôle crucial dans tout cela. De même que l'invention de nouvelles formes d'automatisation industrielle aux XVIIIe et XIXe siècles a eu l'effet paradoxal de transformer une proportion toujours plus grande des habitants de la planète en ouvriers d'industrie à plein-temps, de même tous les logiciels conçus, ces dernières décennies, pour nous épargner du travail administratif ont fini par nous transformer tous en administratifs à temps partiel ou à temps plein. Les professeurs d'université semblent juger inévitable de passer de plus en plus de temps à s'occuper des subventions, les parents admettent sans mot dire qu'ils consacreront des semaines chaque année à remplir des formulaires en ligne de quarante

pages pour inscrire leurs enfants dans des écoles acceptables, les employés de magasin savent qu'ils vont passer une part croissante de leur vie éveillée à entrer des mots de passe sur leur téléphone pour accéder à leurs divers comptes bancaires et de crédit et les gérer, et pratiquement tout le monde comprend qu'il faut apprendre à effectuer soi-même les tâches autrefois déléguées aux agents de voyages, aux courtiers et aux comptables.

Un jour, quelqu'un a calculé qu'au total, l'Américain moyen passait six mois de sa vie à attendre que le feu passe au vert. Je ne sais pas s'il existe un chiffre comparable pour la durée probable du remplissage de formulaires, mais il doit être au moins du même niveau. Je pense qu'on peut dire sans risque d'erreur qu'aucune population dans l'histoire du monde n'a consacré autant de temps à la paperasse.

Pourtant, tout cela s'est produit, nous dit-on, après le renversement du socialisme bureaucratique, ringard, horrible, et le triomphe de la liberté et du marché. C'est sûrement l'un des grands paradoxes de la vie contemporaine, même si – comme pour les promesses non tenues de la technologie – nous semblons avoir développé une profonde réticence à le regarder en face.

Il est clair que tous ces problèmes sont liés. Je dirais qu'à bien des égards ils constituent, en définitive, le même problème. Et il ne se réduit pas au fait qu'une sensibilité bureaucratique, ou plus précisément managériale, a étouffé toute forme de vision et de créativité techniques. Après tout, comme on ne cesse de nous le rappeler, Internet a déchaîné toutes sortes de visions créatrices et d'ingéniosités collaboratives. En fait, son apport réel est une sorte d'inversion bizarre des fins et des moyens, où la créativité est mise au service de l'administration, pas le contraire.

Je le dirai ainsi : en cet âge final et abêtissant du capitalisme, nous passons des technologies poétiques aux technologies bureaucratiques.

Par technologies poétiques, je désigne l'utilisation de moyens rationnels, techniques, bureaucratiques, pour donner vie à des rêves impossibles et fous. En ce sens, les technologies poétiques sont aussi vieilles que la civilisation. On pourrait même dire qu'elles sont antérieures aux machineries élaborées. Lewis Mumford soutenait que les premières machines complexes ont été constituées de personnes. Les pharaons égyptiens n'ont eu la capacité de construire les pyramides que parce qu'ils maîtrisaient des procédures administratives : elles leur ont permis de développer des techniques de chaînes de production, en divisant des tâches complexes en dizaines d'opérations simples et en assignant chacune d'elles à une équipe de travailleurs – même s'ils ne disposaient pas de mécanique plus complexe que le levier et le plan incliné. La surveillance bureaucratique a transformé des armées de paysans en rouages d'une immense machine. Même beaucoup plus tard, après l'invention des vrais rouages, la conception des mécanismes complexes a toujours été, jusqu'à un certain point, une adaptation de principes initialement conçus pour organiser des personnes[44].

Pourtant, à de multiples reprises, nous voyons ces machines – que leurs éléments mobiles soient des bras et des torses ou des pistons, des roues et des ressorts – mises au travail pour réaliser des rêves impossibles sans elles : les cathédrales, les lancements de fusées lunaires, les chemins de fer transcontinentaux, etc. Il est sûr que les technologies poétiques ont en elles, presque invariablement, quelque chose de terrible; la poésie peut tour aussi facilement évoquer les fabriques sombres et sataniques que la grâce ou la libération. Mais, avec elles, les techniques rationnelles, bureaucratiques, sont toujours au service d'une fin imaginative.

De ce point de vue, tous ces plans fous des Soviétiques – même s'ils ne se sont jamais concrétisés – ont marqué l'apogée des technologies poétiques. Ce que nous avons aujourd'hui,

c'est l'inverse. Non que la vision, la créativité et les rêves fous ne soient plus encouragés. Mais nos rêves restent éthérés : nous ne faisons même plus semblant qu'ils pourraient un jour prendre forme concrète ou charnelle. En même temps, dans les rares domaines où la créativité libre et imaginative est vraiment stimulée, comme le développement de logiciels en source ouverte sur Internet, elle est canalisée, au bout du compte, vers la création de plateformes encore plus nombreuses et efficaces pour remplir des formulaires. C'est ce que j'entends par « technologies bureaucratiques » : les impératifs administratifs sont devenus non les moyens mais la fin du développement technologique. Simultanément, la nation la plus grande et la plus puissante qui ait jamais existé sur terre a passé les dernières décennies à expliquer à ses citoyens que nous ne pouvons plus envisager d'entreprises grandioses, tout simplement, même si – comme le suggère la crise environnementale actuelle – le sort de la Terre en dépend.

Donc, quelles sont les conséquences politiques?

Avant tout, il me semble que nous devons repenser radicalement certains de nos postulats les plus fondamentaux sur la nature du capitalisme. Le premier pose que le capitalisme est, en un sens, identique au marché, et que l'un et l'autre sont donc hostiles à la bureaucratie, qui est une créature de l'État. Le second pose que le capitalisme est, par nature, progressiste technologiquement. Il apparaît que Marx et Engels, dans leur enthousiasme inconsidéré pour les révolutions industrielles de leur temps, se sont simplement trompés sur ce point. Ou, plus précisément : ils ont eu raison de souligner que la mécanisation de la production industrielle allait finir par détruire le capitalisme; ils ont eu tort de prédire que la concurrence sur le marché allait obliger les industriels à poursuivre la mécanisation malgré tout. Si cela ne s'est pas produit, il n'y a qu'une seule

explication possible : en réalité, la concurrence sur le marché n'est pas aussi inhérente à la nature du capitalisme que Marx et Engels l'avaient supposé. La forme actuelle du capitalisme, où une large part de la concurrence prend apparemment la forme d'un commerce interne aux structures bureaucratiques des grandes entreprises semi-monopolistes, aurait probablement été pour eux une surprise totale[45].

Les défenseurs du capitalisme avancent en général trois grandes thèses historiques : premièrement, il a stimulé un développement scientifique et technique rapide; deuxièmement, même s'il enrichit énormément une petite minorité, il le fait de telle façon qu'il accroît la prospérité de tous; troisièmement, ce faisant, il crée un monde plus sûr et plus démocratique. Il est parfaitement clair qu'au XXIe siècle, le capitalisme ne fait absolument rien de tout cela. De fait, même ses partisans cessent de plus en plus de prétendre que c'est un système particulièrement bénéfique, et se replient sur une autre thèse : c'est le seul système possible, ou du moins le seul possible pour une société complexe, technologiquement raffinée, comme la nôtre.

En tant qu'anthropologue, je me trouve constamment confronté à ce dernier argument.

> LE SCEPTIQUE : Vous pouvez rêver vos utopies à votre guise, moi je parle d'un système politique ou économique qui puisse vraiment fonctionner. Et sur ce plan-là, l'expérience nous a montré que celui que nous avons est réellement la seule option.
>
> MOI : Vous dites que notre forme particulière actuelle de gouvernement représentatif limité – ou de capitalisme des grandes entreprises – est le seul système politique ou économique possible? L'expérience ne nous montre rien de tel. Si l'on regarde l'histoire de l'humanité, on trouve des centaines et même des milliers de systèmes politiques et économiques différents. Et

beaucoup ne ressemblent absolument pas à celui que nous avons maintenant.

LE SCEPTIQUE : Certes, mais vous parlez de sociétés plus simples, à petite échelle, ou à la base technologique bien plus rudimentaire. Je parle de sociétés modernes, complexes, technologiquement avancées. Donc vos contre-exemples sont hors sujet.

MOI : Attendez, vous dites qu'en pratique le progrès technique a limité nos possibilités sociales? Je croyais qu'il était censé avoir l'effet inverse?

Mais même si l'on accepte l'argument, si l'on admet que, quelle qu'en soit la raison, alors que de nombreux systèmes économiques pouvaient autrefois être également viables, la technologie industrielle moderne a créé un monde où ce n'est plus le cas, quelqu'un peut-il sérieusement soutenir que les mécanismes économiques actuels sont aussi les seuls qui seront viables, à jamais, dans tout *futur* régime technologique possible? Cette assertion est évidemment absurde. Et d'abord, comment pourrions-nous le savoir?

Je vous l'accorde : certains adoptent tout de même cette position – aux deux extrémités de l'éventail politique. En tant qu'anthropologue et anarchiste, je me retrouve assez régulièrement confronté au profil « anti-civilisation », qui affirme vigoureusement non seulement que la technologie industrielle actuelle ne peut conduire qu'à une oppression de style capitaliste, mais aussi que cela est nécessairement vrai de toute technologie future; et que, par conséquent, la libération humaine n'est réalisable que par un retour à l'âge de pierre. Nous ne sommes pas, pour la plupart, des déterministes technologiques de ce genre. Mais, en dernière analyse, on ne peut affirmer l'inévitabilité du capitalisme aujourd'hui que sur la base d'une forme quelconque de déterminisme technologique. Et c'est bien pourquoi, si l'objectif ultime du capitalisme néolibéral

est de créer un monde où personne ne croit qu'un autre système économique, quel qu'il soit, pourrait vraiment fonctionner, il lui faut réprimer non seulement toute idée d'avenir rédempteur inévitable, mais aussi, concrètement, tout avenir technologique radicalement différent. Il y a ici une sorte de contradiction. Il ne peut s'agir de nous convaincre que le changement technologique a pris fin, car cela signifierait que le capitalisme n'est pas vraiment une force de progrès. Il s'agit de nous persuader que la technologie continue à progresser, que nous vivons bel et bien dans un monde de merveilles, mais en veillant à ce que ces merveilles pennent surtout la forme de modestes améliorations (le dernier iPhone!), de rumeurs sur des inventions imminentes (« Il paraît qu'ils vont vraiment sortir des voitures volantes très bientôt[46] »), de moyens encore plus élaborés pour jongler avec l'information et l'image, et de plateformes toujours plus complexes pour remplir les formulaires.

Je n'entends nullement suggérer que le capitalisme néolibéral – ou tout autre système – puisse remporter un succès permanent à cet égard. D'abord, il est compliqué d'essayer de convaincre le monde qu'on est à la pointe du progrès technique alors qu'on réalisé on le freine. Sur ce point, les États-Unis font vraiment du mauvais travail en ce moment, avec leurs infrastructures décrépites et leur paralysie face au réchauffement de la planète (pour ne rien dire de leur décision, symboliquement dévastatrice, d'abandonner le programme des vols habités dans l'espace au moment précis où la Chine renforce le sien). Deuxièmement, il est certain que le rythme du changement ne pourra pas être freiné éternellement. Au mieux, on peut le ralentir. Il y aura des percées; les découvertes gênantes ne pourront pas être étouffées en permanence. D'autres régions du monde, moins bureaucratisées – ou du moins des régions du monde dont les bureaucraties ne sont pas aussi hostiles à la

pensée créatrice –, vont, lentement, inéluctablement, accumuler les ressources nécessaires pour reprendre le mouvement là où les États-Unis et leurs alliés l'ont laissé. Internet offre réellement des possibilités de collaboration et de dissémination qui pourraient, finalement, nous aider aussi à trouver la brèche. D'où viendra la percée? Impossible de le savoir. Dans les deux dernières années, depuis l'impression de la première version de cet essai, il y a eu toute une série de possibilités nouvelles : l'impression 3 D, des progrès dans la technologie des matériaux, des voitures sans chauffeur, une nouvelle génération de robots et, par conséquent, une nouvelle floraison des débats sur les usines robotisées et la fin du travail. Il y a également des indices de percées conceptuelles imminentes en physique, en biologie et dans d'autres sciences; elles sont rendues encore plus difficiles par le verrouillage institutionnel absolu des orthodoxies en vigueur, mais elles pourraient bien avoir aussi de vastes conséquences technologiques.

Au stade où nous en sommes, il n'y a qu'un point dont nous pouvons, à mon sens, être à peu près sûrs : l'invention et la véritable innovation ne se produiront pas dans le cadre du capitalisme actuel de grande entreprise; ni, très probablement, dans aucune forme de capitalisme. Il apparaît de plus en plus clairement que, pour commencer réellement à installer des dômes sur Mars, sans parler de se donner les moyens de découvrir s'il existe réellement dans l'espace des civilisations ailleurs à contacter – ou ce qui se passerait vraiment si nous lancions quelque chose à travers un trou de ver[47] –, il nous faudra élaborer un système économique entièrement différent. Est-il vraiment inéluctable qu'il prenne la forme d'une nouvelle bureaucratie massive? Pourquoi postulons-nous que c'est une obligation absolue? Peut-être est-ce seulement en brisant les structures bureaucratiques existantes que nous serons un jour capables d'atteindre ces objectifs. Et si nous inventons vraiment des

robots qui lavent le linge ou nettoient la cuisine, il faudra nous assurer que le système qui remplacera le capitalisme, quel qu'il soit, repose sur une répartition beaucoup plus égalitaire de la fortune et du pouvoir, une répartition ne comprenant plus ni les super-riches, ni les désespérément pauvres prêts à faire leur ménage. Alors seulement, la technologie commencera à être canalisée vers les besoins humains. Et c'est notre meilleure raison de briser là, de nous affranchir de l'emprise paralysante des gestionnaires de fonds spéculatifs et des PDG, de libérer nos rêves des écrans où ils les ont emprisonnés et de laisser nos imaginations redevenir une force matérielle dans l'histoire de l'humanité.

Bureaucratie, David Graeber, Les Liens qui Libèrent, 2015 (extrait, pages 166 à 174)

(cf. Bureaucratie, David Graeber, Les Liens qui Libèrent, 2015 (extrait, pages 166 à 174))

IV Exercice : impacts environnementaux

1. Exercice : Consommation du numérique

[solution n°9 p. 31]

Quelle est la consommation électrique mondiale liée aux usages numériques ?

- **A** Moins de 1 %
- **B** Autour de 10 %
- **C** Plus de 30 %

2. Exercice : Cycle de vie

[solution n°10 p. 32]

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

3. Exercice : Impacts de la fabrication

[solution n°11 p. 33]

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

4. Exercice : Métaux

[solution n°12 p. 33]

Quels sont les métaux présents dans nos smartphones ?

- **A** Des métaux courant comme le cuivre et l'aluminium

B Des métaux précieux comme l'or ou l'argent

C Des métaux rares comme le tantale

5. Exercice : Extractivisme

[solution n°13 p. 33]

Quels sont les principaux problèmes liés à l'extraction des terres rares ?

A Elles sont peu répandues sur Terre

B La demande pose des problèmes géopolitiques

C Leur extraction consomme beaucoup d'eau

D Leur extraction produit des déchets toxiques

6. Exercice : Bloqueur de pub

[solution n°14 p. 34]

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

7. Exercice : Impacts du télétravail

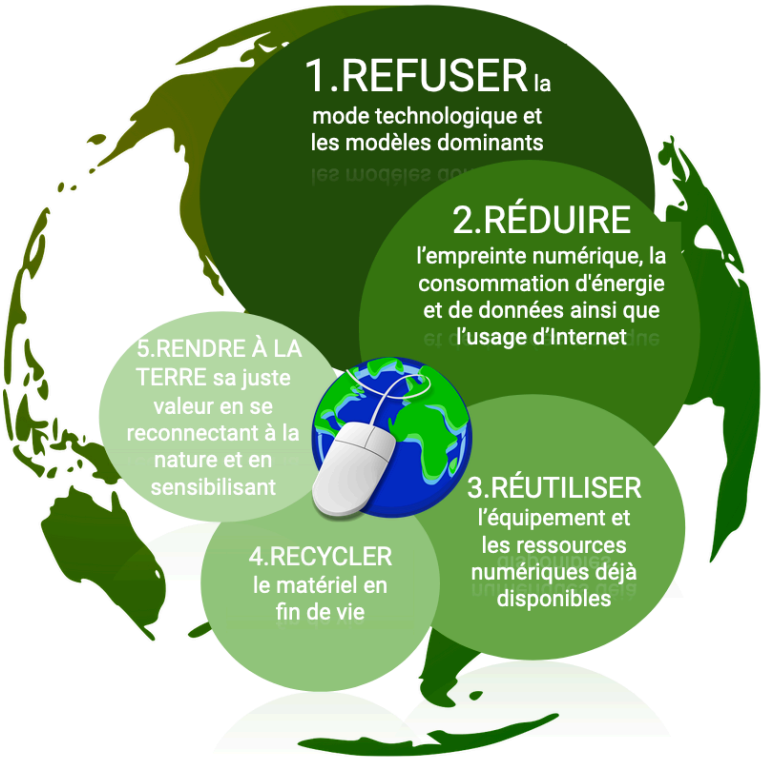
[solution n°15 p. 34]

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

A Vrai

B Faux

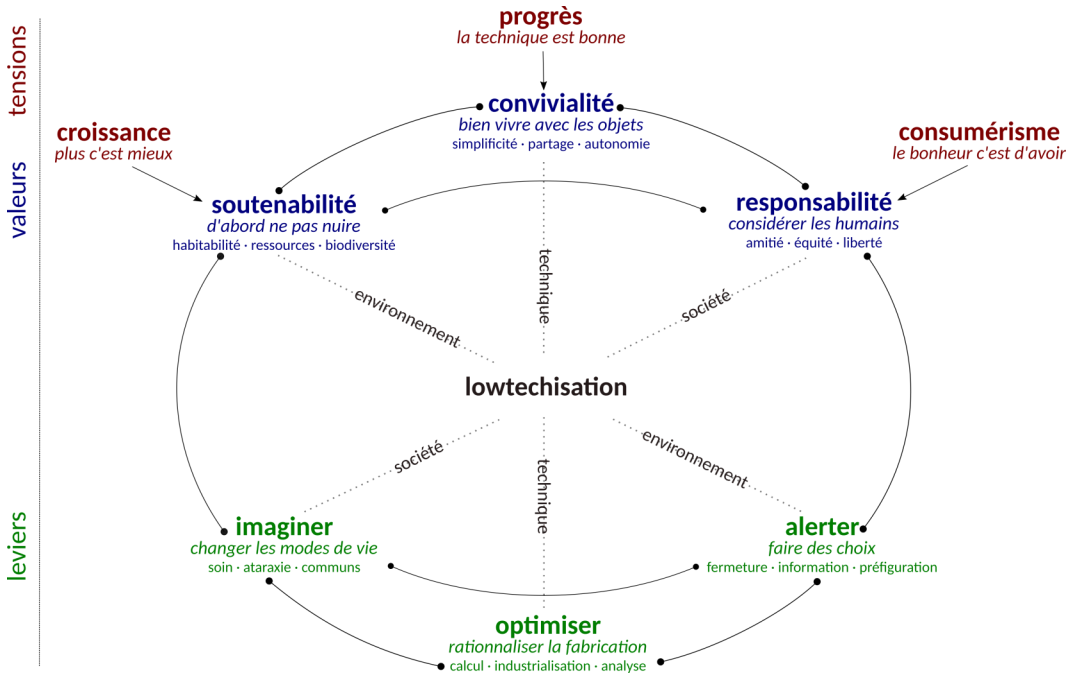
Conclusion



Deux axes d'amélioration assez faciles en théorie :

- ralentir drastiquement le renouvellement des terminaux (un ordinateur peut durer 20 ans)
- stopper l'accroissement des réseaux et centres de données (il existe assez de débit et de stockage pour nos usages)

V Ouverture : soutenabilité, responsabilité et convivialité versus croissance, consumérisme et progrès



VI Compléments

1. Impacts sociétaux du numérique

1.1. Impacts du numérique sur la santé mentale

Conséquences négatives et positives sur la santé cérébrale de l'usage des technologies numériques

Exemple

Conséquences négatives sur le comportement et le fonctionnement cérébral

- déficit d'attention
- baisse de intelligence émotionnelle
- dépendance à la technologie
- isolation sociale
- développement cérébral dégradé
- troubles du sommeil

Conséquences positives sur le comportement et le fonctionnement cérébral :

- Activité neuronale augmentée (chez les personnes âgées notamment)
- Développement de capacités cognitives (mémoire, multitâches, agilité de l'intelligence...)
- Dans le domaine de la santé mentale : développement de l'autonomie, amélioration du suivi, acquisition de compétences...

Small et al., 2020[*Small et al., 2020* p.39]

1.2. Impacts du numérique sur la citoyenneté

Citoyenneté et mobilisation humanitaire

Exemple

- développement de la diplomatie humanitaire non gouvernementale
- perturbation des modes d'action et de communication des acteurs historiques

Luangsay-Catelin, 2018[*Luangsay-Catelin, 2018* p.39]

Impacts humains à distance

Exemple

L'usage d'objets numériques dépend aujourd'hui de l'asservissement d'autres humains dans d'autres pays, notamment pour l'extraction des matériaux nécessaire à la fabrication des appareils.

Pitron, 2018[*Pitron, 2018* p.39], *Reporterre, 2022*[*Reporterre, 2022* p.39]

#metoo

Exemple

Le numérique a facilité dans certains cas l'expression de minorités ou la promotion de luttes sociétales.

North, 2019[North, 2019 p.39]

1.3. Impacts du numérique sur l'éducation

Impacts négatifs du numérique sur l'apprentissage

Exemple

- *« texting and instant messaging may weaken human creativity »*
- *« multitasking leads to more superficial learning and less efficient processing of information. »*
- *« it is extremely difficult for them to attend lessons and they prefer to be active and to work autonomously. »*

Shtepura, 2018[Shtepura, 2018 p.39] *(PDF (cf. The Impact of Digital Technology on Digital Natives' Learning))*

1.4. Impacts du numérique sur la médecine

Numérique et médecine générale

Exemple

- Problème de l'usage des outils pendant la consultation
- Ne communiquent pas davantage entre eux

Slomian, 2017[Slomian, 2017 p.39]

1.5. Impact du numérique sur l'agriculture

Exemple

- *« Internet favorise l'élargissement du nombre d'interlocuteurs de certains agriculteurs qui mobilisent ces sources d'informations [...] pour transformer leurs pratiques culturales ou encore pour acheter ou vendre du matériel sur le marché de l'occasion. »*
- *« Des agriculteurs bien informés et solidement formés refusent d'intégrer du matériel numérique dans leur exploitation parce qu'il sera jugé inutile, peu efficace ou pas rentable. »*

Mazaud, 2017[Mazaud, 2017 p.39]

1.6. Impacts du numérique sur les organisations professionnelles

Exemple

- activity-links-centred digitalization : *« digital resource is used to optimize already existing activities »*
- resource-ties-centred digitalization : *« digital resource supporting the creation of new activities carried out by already existing actors »*
- actor-bonds-centred digitalization : *« digital resource supports new bonds between actors »*

Pagani and Pardo, 2017[Pagani and Pardo, 2017 p.39]

1.7. Impact du numérique sur les adolescents

Exemple

« La spécificité des pratiques qui émergent de l'usage de ces outils par les adolescents donne l'impression que la sociabilité des adolescents est radicalement différente, pourtant les motivations profondes et les processus sociaux n'ont, au fond, pas énormément changé.

Boyd, 2016, p59[Boyd, 2016 p.38] *(C'est compliqué (extrait) (cf. C'est compliqué (extrait))*) »

L'autrice pose qu'il y a amplification de phénomènes anciens plus que de la transformation ; pourtant à partir d'un certain changement de degré n'assiste-t-on pas à un changement de nature ?

Les exemples d'études suivants vont plutôt dans son sens.

Impacts du numérique chez les adolescents : recherche de médiété

Exemple

- En général l'impact de l'usage des technologies numériques sur le bien être est faible et à court terme.
- L'usage excessif comme l'usage trop faible ont un effet négatifs sur le bien être.
- *« The general effects of digital technology use on well-being are likely in the negative spectrum, but very small—potentially **too small to matter**. »*
- *« Digital technology use is more likely to affect **short-term positive or negative affect** than long-term life satisfaction. »*
- *« No screen time is created equal; **different uses will lead to different effects**. »*
- *« **Both low and excessive use are related to decreased well-being**, whereas moderate use is related to increased well-being. »*

Dienlin and Johannes, 2020[Dienlin and Johannes, 2020 p.38]

Impacts positifs du numérique chez les adolescents Exemple

- *« Video game training augments gray matter in areas of the brain that relate to cognitive abilities related to spatial navigation, strategic planning, and working memory. »*
- *« Internet use contributes to task completion and skill competencies. »*
- *« Online peer communication via social media enhances friendship quality, perception of social support, connectedness »*

Haddock et al., 2022[Haddock et al., 2022 p.38]

1.8. Impacts du numérique sur la bureaucratie

"Effet rebond" du numérique sur la bureaucratie Exemple

« Tous les logiciels conçus ces dernières décennies pour nous épargner du travail administratif ont fini par nous transformer tous en administratifs à temps partiel ou à temps plein. »

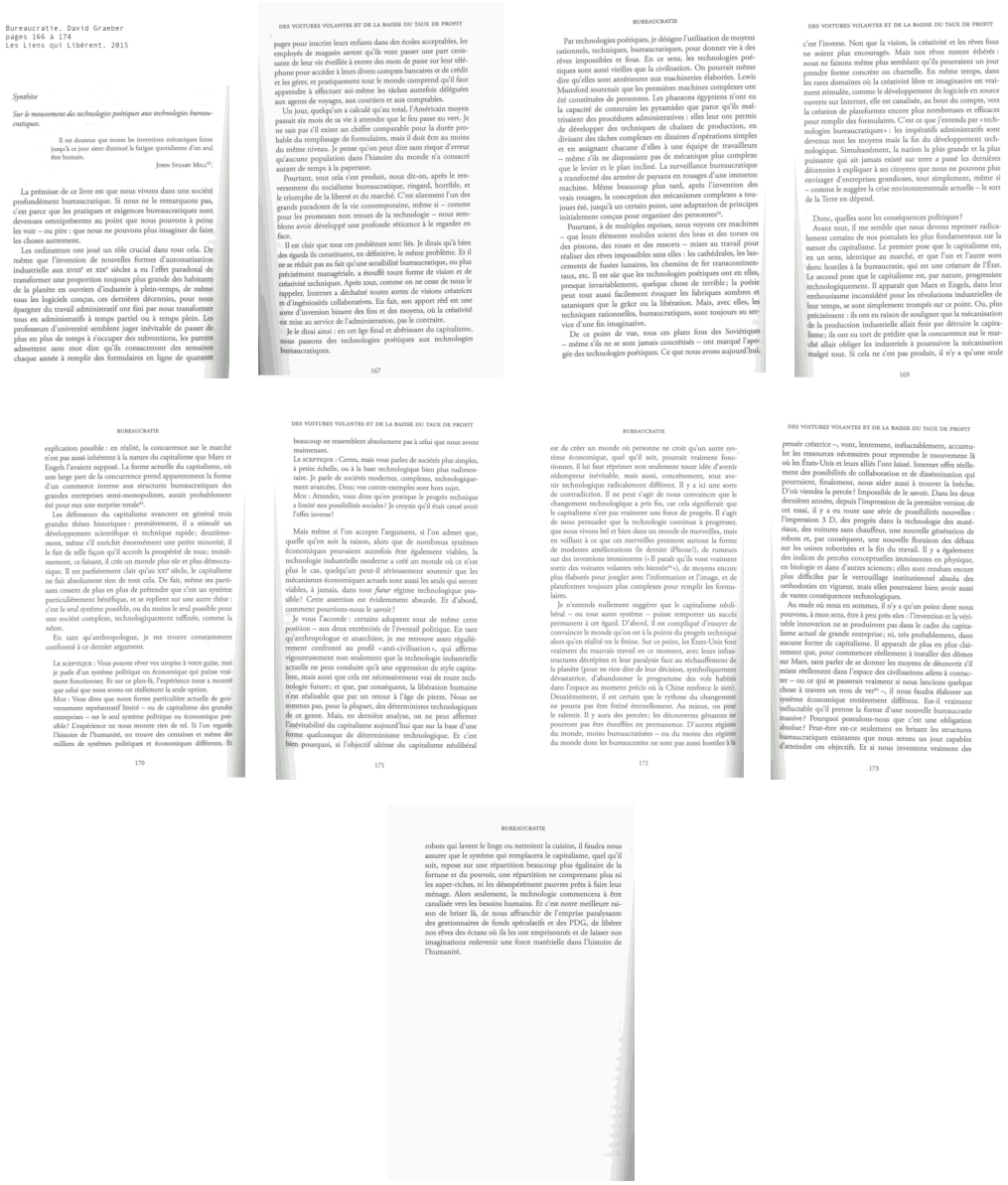
Graeber, 2015[Graeber, 2015 p.38]

Exemple

« À partir des années 1970, un grand virage a eu lieu dans l'investissement : il est passé de technologies associées à la possibilité d'avenirs différents à des technologies qui ont renforcé la discipline du travail et le contrôle social. »

Graeber, 2015, p143[Graeber, 2015 p.38]

Complément



Bureaucratie, David Graeber
pages 166 à 174
Les Liens qui Libèrent, 2015

Synthèse

Sur le mouvement des technologies poétiques aux technologies bureaucratiques.

Il est douteux que toutes les inventions mécaniques faites jusqu'à ce jour aient diminué le fatigue quotidienne d'un seul être humain.

JOHN STUART MILL[41].

La prémisse de ce livre est que nous vivons dans une société profondément bureaucratique. Si nous ne le remarquons pas, c'est parce que les pratiques et exigences bureaucratiques sont devenues omniprésentes au point que nous pouvons à peine les voir – ou pire : que nous ne pouvons plus imaginer de faire les choses autrement.

Les ordinateurs ont joué un rôle crucial dans tout cela. De même que l'invention de nouvelles formes d'automatisation industrielle aux XVIIIe et XIXe siècles a eu l'effet paradoxal de transformer une proportion toujours plus grande des habitants de la planète en ouvriers d'industrie à plein-temps, de même tous les logiciels conçus, ces dernières décennies, pour nous épargner du travail administratif ont fini par nous transformer tous en administratifs à temps partiel ou à temps plein. Les professeurs d'université semblent juger inévitable de passer de plus en plus de temps à s'occuper des subventions, les parents admettent sans mot dire qu'ils consacreront des semaines chaque année à remplir des formulaires en ligne de quarante

DES VOITURES VOLANTES ET DE LA BAISSE DU TAUX DE PROFIT

pages pour inscrire leurs enfants dans des écoles acceptables, les employés de magasin savent qu'ils vont passer une part croissante de leur vie éveillée à entrer des mots de passe sur leur téléphone pour accéder à leurs divers comptes bancaires et de crédit et les gérer, et pratiquement tout le monde comprend qu'il faut apprendre à effectuer soi-même les tâches autrefois déléguées aux agents de voyages, aux courtiers et aux comptables.

Un jour, quelqu'un a calculé qu'au total, l'Américain moyen passait six mois de sa vie à attendre que le feu passe au vert. Je ne sais pas s'il existe un chiffre comparable pour la durée probable du remplissage de formulaires, mais il doit être au moins du même niveau. Je pense qu'on peut dire sans risque d'erreur qu'aucune population dans l'histoire du monde n'a consacré autant de temps à la paperasse.

Pourtant, tout cela s'est produit, nous dit-on, après le renversement du socialisme bureaucratique, ringard, horrible, et le triomphe de la liberté et du marché. C'est sûrement l'un des grands paradoxes de la vie contemporaine, même si – comme pour les promesses non tenues de la technologie – nous semblons avoir développé une profonde réticence à le regarder en face.

Il est clair que tous ces problèmes sont liés. Je dirais qu'à bien des égards ils constituent, en définitive, le même problème. Et il ne se réduit pas au fait qu'une sensibilité bureaucratique, ou plus précisément managériale, a étouffé toute forme de vision et de créativité techniques. Après tout, comme on ne cesse de nous le rappeler, Internet a déclaré toutes sortes de visions créatrices et d'ingéniosités collaboratives. En fait, son apport réel est une sorte d'inversion bizarre des fins et des moyens, où la créativité est mise au service de l'administration, pas le contraire.

Je le dirai ainsi : en cet âge final et abétissant du capitalisme, nous passons des technologies poétiques aux technologies bureaucratiques.

167

BUREAUCRATIE

Par technologies poétiques, je désigne l'utilisation de moyens rationnels, techniques, bureaucratiques, pour donner vie à des rêves impossibles et fous. En ce sens, les technologies poétiques sont aussi vieilles que la civilisation. On pourrait même dire qu'elles sont antérieures aux machineries élaborées. Lewis Mumford soutenait que les premières machines complexes ont été constituées de personnes. Les pharaons égyptiens n'ont eu la capacité de construire les pyramides que parce qu'ils maîtrisaient des procédures administratives : elles leur ont permis de développer des techniques de chaînes de production, en divisant des tâches complexes en dizaines d'opérations simples et en assignant chacune d'elles à une équipe de travailleurs – même s'ils ne disposaient pas de mécanique plus complexe que le levier et le plan incliné. La surveillance bureaucratique a transformé des armées de paysans en rouages d'une immense machine. Même beaucoup plus tard, après l'invention des vrais rouages, la conception des mécanismes complexes a toujours été, jusqu'à un certain point, une adaptation de principes initialement conçus pour organiser des personnes[42].

Pourtant, à de multiples reprises, nous voyons ces machines – que leurs éléments mobiles soient des bras et des torses ou des pistons, des roues et des ressorts – mises au travail pour réaliser des rêves impossibles sans elles : les cathédrales, les lancements de fusées lunaires, les chemins de fer transcontinentaux, etc. Il est sûr que les technologies poétiques ont en elles, presque invariablement, quelque chose de terrible; la poésie peut tout aussi facilement évoquer les fabriques sombres et sataniques que la grâce ou la libération. Mais, avec elles, les techniques rationnelles, bureaucratiques, sont toujours au service d'une fin imaginative.

De ce point de vue, tous ces plans fous des Soviétiques – même s'ils ne se sont jamais concrétisés – ont marqué l'apogée des technologies poétiques. Ce que nous avons aujourd'hui,

DES VOITURES VOLANTES ET DE LA BAISSE DU TAUX DE PROFIT

c'est l'inverse. Non que la vision, la créativité et les rêves fous ne soient plus encouragés. Mais nos rêves restent éthérés : nous ne faisons même plus semblant qu'ils pourraient un jour prendre forme concrète ou charnelle. En même temps, dans les rares domaines où la créativité libre et imaginative est vraiment stimulée, comme le développement de logiciels en source ouverte sur Internet, elle est canalisée, au bout du compte, vers la création de plateformes encore plus nombreuses et efficaces pour remplir des formulaires. C'est ce que j'entends par « technologies bureaucratiques » : les impératifs administratifs sont devenus non les moyens mais la fin du développement technologique. Simultanément, la nation la plus grande et la plus puissante qui ait jamais existé sur terre a passé les dernières décennies à expliquer à ses citoyens que nous ne pouvons plus envisager d'entreprises grandioses, tout simplement, même si – comme le suggère la crise environnementale actuelle – le sort de la Terre en dépend.

Donc, quelles sont les conséquences politiques?

Avant tout, il me semble que nous devons repenser radicalement certains de nos postulats les plus fondamentaux sur la nature du capitalisme. Le premier pose que le capitalisme est, en un sens, identique au marché, et que l'un et l'autre sont donc hostiles à la bureaucratie, qui est une créature de l'État. Le second pose que le capitalisme est, par nature, progressiste technologiquement. Il apparaît que Marx et Engels, dans leur enthousiasme inconsidéré pour les révolutions industrielles de leur temps, se sont simplement trompés sur ce point. Ou, plus précisément : ils ont eu raison de souligner que la mécanisation de la production industrielle allait finir par détruire le capitalisme; ils ont eu tort de prédire que la concurrence sur le marché allait obliger les industriels à poursuivre la mécanisation malgré tout. Si cela ne s'est pas produit, il n'y a qu'une seule

169

BUREAUCRATIE

explication possible : en réalité, la concurrence sur le marché n'est pas aussi inhérente à la nature du capitalisme que Marx et Engels l'avaient supposé. La forme actuelle du capitalisme, où une large part de la concurrence prend apparemment la forme d'un commerce interne aux structures bureaucratiques des grandes entreprises semi-monopolistes, aurait probablement été pour eux une surprise totale[43].

Les défenseurs du capitalisme avancent en général trois grandes thèses historiques : premièrement, il a stimulé un développement scientifique et technique rapide; deuxièmement, même s'il enrichit énormément une petite minorité, il le fait de telle façon qu'il accroît la prospérité de tous; troisièmement, ce faisant, il crée un monde plus sûr et plus démocratique. Il est parfaitement clair qu'au XXIe siècle, le capitalisme ne fait absolument rien de tout cela. De fait, même ses partisans cessent de plus en plus de prétendre que c'est un système particulièrement bénéfique, et se replient sur une autre thèse : c'est le seul système possible, ou du moins le seul possible pour une société complexe, technologiquement raffinée, comme la nôtre.

En tant qu'anthropologue, je me trouve constamment confronté à ce dernier argument.

LE SCEPTIQUE : Vous pouvez rêver vos utopies à votre guise, moi je parle d'un système politique ou économique qui puisse vraiment fonctionner. Et sur ce plan-là, l'expérience nous a montré que celui que nous avons est réellement la seule option.

MOI : Vous dites que notre forme particulière actuelle de gouvernement représentatif limité – ou de capitalisme des grandes entreprises – est le seul système politique ou économique possible? L'expérience ne nous montre rien de tel. Si l'on regarde l'histoire de l'humanité, on trouve des centaines et même des milliers de systèmes politiques et économiques différents. Et

170

DES VOITURES VOLANTES ET DE LA BAISSE DU TAUX DE PROFIT

beaucoup ne ressemblent absolument pas à celui que nous avons maintenant.

LE SCEPTIQUE : Certes, mais vous parlez de sociétés plus simples, à petite échelle, ou à la base technologique bien plus rudimentaire. Je parle de sociétés modernes, complexes, technologiquement avancées. Donc vos contre-exemples sont hors sujet.

MOI : Attendez, vous dites qu'en pratique le progrès technique a limité nos possibilités sociales? Je croyais qu'il était censé avoir l'effet inverse!

Mais même si l'on accepte l'argument, si l'on admet que, quelle qu'en soit la raison, alors que de nombreux systèmes économiques pouvaient autrefois être également viables, la technologie industrielle moderne a créé un monde où ce n'est plus le cas, quelqu'un peut-il sérieusement soumettre que les mécanismes économiques actuels sont aussi les seuls qui seront viables, à jamais, dans tout *futur* régime technologique possible? Cette assertion est évidemment absurde. Et d'abord, comment pourrions-nous le savoir?

Je vous l'accorde : certains adoptent tout de même cette position – aux deux extrémités de l'éventail politique. En tant qu'anthropologue et anarchiste, je me retrouve assez régulièrement confronté au profil « anti-civilisation », qui affirme vigoureusement non seulement que la technologie industrielle actuelle ne peut conduire qu'à une oppression de style capitaliste, mais aussi que cela est nécessairement vrai de toute technologie future; et que, par conséquent, la libération humaine n'est réalisable que par un retour à l'âge de pierre. Nous ne sommes pas, pour la plupart, des déterministes technologiques de ce genre. Mais, en dernière analyse, on ne peut affirmer l'inévitabilité du capitalisme aujourd'hui que sur la base d'une forme quelconque de déterminisme technologique. Et c'est bien pourquoi, si l'objectif ultime du capitalisme néolibéral

171

BUREAUCRATIE

est de créer un monde où personne ne croit qu'un autre système économique, quel qu'il soit, pourrait vraiment fonctionner, il lui faut réprimer non seulement toute idée d'avenir rédempteur inévitable, mais aussi, concrètement, tout avenir technologique radicalement différent. Il y a ici une sorte de contradiction. Il ne peut s'agir de nous convaincre que le changement technologique a pris fin, car cela signifierait que le capitalisme n'est pas vraiment une force de progrès. Il s'agit de nous persuader que la technologie continue à progresser, que nous vivons bel et bien dans un monde de merveilles, mais en veillant à ce que ces merveilles prennent surtout la forme de modestes améliorations (le dernier iPhone!), de rumeurs sur des inventions imminentes (« Il paraît qu'ils vont vraiment sortir des voitures volantes très bientôt[44] »), de moyens encore plus élaborés pour jongler avec l'information et l'image, et de plateformes toujours plus complexes pour remplir les formulaires.

Je n'entends nullement suggérer que le capitalisme néolibéral – ou tout autre système – puisse remporter un succès permanent à cet égard. D'abord, il est compliqué d'essayer de convaincre le monde qu'on est à la pointe du progrès technique alors qu'on réalisé on le freine. Sur ce point, les États-Unis font vraiment du mauvais travail en ce moment, avec leurs infrastructures décrépites et leur paralysie face au réchauffement de la planète (pour ne rien dire de leur décision, symboliquement dévastatrice, d'abandonner le programme des vols habités dans l'espace au moment précis où la Chine renforce le sien). Deuxièmement, il est certain que le rythme du changement ne pourra pas être freiné éternellement. Au mieux, on peut le ralentir. Il y aura des percées; les découvertes gênantes ne pourront pas être étouffées en permanence. D'autres régions du monde, moins bureaucratisées – ou du moins des régions du monde dont les bureaucraties ne sont pas aussi hostiles à la

172

DES VOITURES VOLANTES ET DE LA BAISSE DU TAUX DE PROFIT

pensée créatrice –, vont, lentement, inéluctablement, accumuler les ressources nécessaires pour reprendre le mouvement là où les États-Unis et leurs alliés l'ont laissé. Internet offre réellement des possibilités de collaboration et de dissémination qui pourraient, finalement, nous aider aussi à trouver la brèche. D'où viendra la percée? Impossible de le savoir. Dans les deux dernières années, depuis l'impression de la première version de cet essai, il y a eu toute une série de possibilités nouvelles : l'impression 3 D, des progrès dans la technologie des matériaux, des voitures sans chauffeur, une nouvelle génération de robots et, par conséquent, une nouvelle floraison des débats sur les usines robotisées et la fin du travail. Il y a également des indices de percées conceptuelles imminentes en physique, en biologie et dans d'autres sciences; elles sont rendues encore plus difficiles par le verrouillage institutionnel absolu des orthodoxies en vigueur, mais elles pourraient bien avoir aussi de vastes conséquences technologiques.

Au stade où nous en sommes, il n'y a qu'un point dont nous pouvons, à mon sens, être à peu près sûrs : l'invention et la véritable innovation ne se produiront pas dans le cadre du capitalisme actuel de grande entreprise; ni, très probablement, dans aucune forme de capitalisme. Il apparaît de plus en plus clairement que, pour commencer réellement à inventer des dômes sur Mars, sans parler de se donner les moyens de découvrir s'il existe réellement dans l'espace des civilisations ailleurs à connecter – où ce qui se passerait vraiment si nous lancions quelque chose à travers un trou de ver[45] –, il nous faudra élaborer un système économique entièrement différent. Est-il vraiment inéluctable qu'il prenne la forme d'une nouvelle bureaucratie massive? Pourquoi postulons-nous que c'est une obligation absolue? Peut-être est-ce seulement en brisant les structures bureaucratiques existantes que nous serons un jour capables d'atteindre ces objectifs. Et si nous inventons vraiment des

173

BUREAUCRATIE

robots qui lavent le linge ou nettoient la cuisine, il faudra nous assurer que le système qui remplacera le capitalisme, quel qu'il soit, repose sur une répartition beaucoup plus égalitaire de la fortune et du pouvoir, une répartition ne comprenant plus ni les super-riches, ni les désespérément pauvres prêts à faire leur ménage. Alors seulement, la technologie commencera à être canalisée vers les besoins humains. Et c'est notre meilleure raison de briser là, de nous affranchir de l'emprise paralysante des gestionnaires de fonds spéculatifs et des PDG, de libérer nos rêves des écrans où ils les ont emprisonnés et de laisser nos imaginations redevenir une force matérielle dans l'histoire de l'humanité.

Bureaucratie, David Graeber, Les Liens qui Libèrent, 2015 (extrait, pages 166 à 174)

(cf. Bureaucratie, David Graeber, Les Liens qui Libèrent, 2015 (extrait, pages 166 à 174))

Complément

Caillosse, 2016[Caillosse, 2016 p.38]

1.9. Impacts du numérique sur la science et la créativité

Pas d'objectivation de la crise écologique sans numérique

Exemple

Depuis les calculs du premier rapport Meadows jusqu'aux derniers rapports du GIEC, le numérique joue un rôle déterminant dans l'objectivation du changements climatique.

2. Impacts environnementaux du numérique (élements d'introduction)

2.1. Soutenabilité et responsabilité dans le cadre du numérique

- réduire l'empreinte écologique, économique et sociale
  - **pour** le numérique ou
  - **par** le numérique
- inventer un nouveau modèle de société : prenant en compte les limites de l'écosystème, et en utilisant intelligemment les technologies numériques existantes.

Approche d'ingénierie classique : optimiser

- efficience : techniques plus performantes
- sobriété :ressources utilisées avec parcimonie)
  - sobriété des ressources (espace, mémoire, temps de calcul)
  - sobriété fonctionnelle
- utilisation des énergies renouvelables

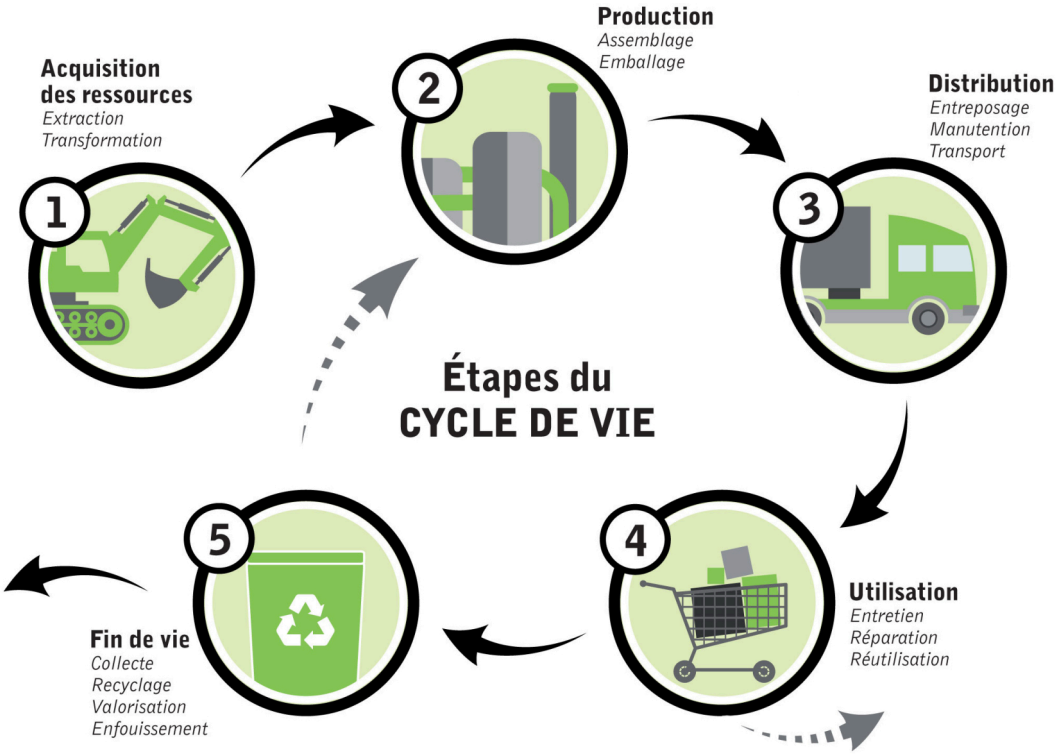
Approche additionnelle : low-tech — Complément

- imaginer : de nouvelles solutions, de nouvelles façons de partager la technologie
- alerter : faire connaître des alternatives, informer le client ou ses collègues de problèmes en connaissance de cause

GreenIT — Exemple

Green IT (cf. p.79)

2.2. Introduction à l'ACV



Analyse de cycle de vie

Objectif — Fondamental

Identifier l'impact environnemental d'un produit **tout au long de son cycle de vie**.

Définition — Az Définition

L'ACV (Analyse Cycle de Vie) consiste à inventorier les flux de matières et d'énergies entrants et sortants à chaque étape du cycle de vie d'un produit pour ensuite évaluer ses impacts environnementaux.

Principales phases de l'ACV — Méthode

- Extraction des matières premières et fabrication
- Transport et distribution
- Usage
- Fin de vie

Remarque

Nécessité de bien fixer les frontières du système à étudier : limites, entrées, sorties, nombre d'unité et d'utilisation considérées, etc.

Attention

Ne pas oublier les aspects économiques et sociaux qui ne sont pas traités par l'ACV : respect des principes équitables dans sa phase de production et commercialisation, discrimination ou manque d'accessibilité, viabilité économique, impacts sociaux.

Complément

Normalisé en 1997 dans les normes ISO 14040.

2.3. Facteurs d'impacts environnementaux

Comment évaluer la durabilité d'un produit ou d'un processus ?

- Quels impacts va-t-on à évaluer ?
  - C'est quoi les impacts d'un produit sur l'égalité ou la paix ?
  - impacts environnementaux : modifications (positives ou négatives) sur l'environnement :
    - est-ce facile d'identifier ces modifications ? est-on sûr de n'avoir rien oublié ?
- Quelles mesures utiliser ?
  - quoi mesurer ?
  - quelles unités ? comment comparer les résultats de différentes modifications entre eux ?
  - comment obtenir les données ?

Même pour les impacts environnementaux les plus simples à manipuler, il n'y a pas de réponses complètement satisfaisantes à ces questions !

Quelques critères (issus du PEF et des limites planétaires)

Exemple

- impact sur le changement climatique
- impact sur la couche d'ozone
- impact sur les humains (cancers, particules fines, radiations...)
- impact sur les sols (acidification, disponibilité des terres, excédent d'azote et de phosphore)
- impact sur les eaux douces et marines (excédent d'azote, acidification...)
- impact sur les éco-systèmes
- impact sur la diminution des ressources (eau, minéraux, métaux, ressources fossiles)

Complément

Product Environmental Footprint v3.1 (cf. p.80)

Limites planétaires (cf. p.81)

Consommation en énergie et impacts Remarque

- Elle n'est pas un impact environnemental direct
- Elle a des conséquences sur les PEF : resource use (fossils), climate change, ionising radiation (et autres)
- Ces conséquence dépendent des sources d'énergie : hautement dépendant des pays !

Normalisation et factorisation Complément

Les processus de normalisation et de factorisation permettent :

- d'homogénéiser les mesure d'impacts,
- et de les pondérer entre elles.

Mesure des facteurs environnementaux : normalisation et factorisation (cf. p.82)

2.4. Numérique : niveaux et phases de vie

3 niveaux de composants habituellement identifiés

- niveau 1 : terminaux utilisateurs. PC de bureau, PC portables, téléphones mobiles, téléphones, téléviseurs, écrans, imprimantes, boîtes internet, etc.
- niveau 2 : réseau. Antennes, répétiteurs, switchs, hubs, bornes wifi, câblage, etc.
- niveau 3 : datacenter. Serveurs, refroidissement, stockage

4 phases de vie

- phase de fabrication : extraction des minerais, fabrication des composants, acheminement des composants, assemblage
- phase de distribution : transport du produit jusqu'à l'usager, packaging, manuels d'utilisation
- phase d'usage : utilisation du produit, consommables compris, reconditionnement total
- phase de fin de vie : recyclage, reconditionnement partiel, mise aux déchets

2.5. Synthèse des ACV du numérique en France et en Europe (2021)

Trois facteurs d'impact nettement au-dessus des autres Fondamental

- utilisation des minéraux et des terres rares (23%),
- utilisation des matières fossiles (17%),
- changement climatique (16%)

Impact majoritaire de la phase de fabrication Fondamental

- 83% GES,
- 88% eau,
- 100% matières premières.

Impact majoritaire des terminaux utilisateurs Fondamental

- 20x plus pour l'utilisation des terres rares,
- 2 à 5x pour les matières fossiles et le changement climatiques.

Remarque

Les terminaux utilisateurs sont bien plus nombreux.

Répartition fabrication / utilisation en terme d'utilisation de l'énergie

- 41% fabrication,
- 59% utilisation

Répartition de l'utilisation de l'énergie

- 45% terminaux,
- 40% réseau,
- 25% centres de données

Le changement climatique dû au numérique représente environ 4% de tout le changement climatique.

Complément

Études existantes *(cf. p.84)*

Solutions des exercices

Solution n°1

[exercice p. 12]

Exemple

Impacts du numérique sur l'éducation (cf. p.21)

Solution n°2

[exercice p. 12]

Exemple

Impact du numérique sur les adolescents (cf. p.22)

Solution n°3

[exercice p. 12]

Exemple

Impacts du numérique sur la santé mentale (cf. p.20)

Solution n°4

[exercice p. 13]

Exemple

Impacts du numérique sur la médecine (cf. p.21)

Solution n°5

[exercice p. 13]

Exemple

Impact du numérique sur l'agriculture (cf. p.21)

Solution n°6

[exercice p. 13]

Exemple

Impacts du numérique sur la citoyenneté *(cf. p.20)*

Solution n°7

[exercice p. 14]

Exemple

Impacts du numérique sur les organisations professionnelles *(cf. p.22)*

Solution n°8

[exercice p. 14]

Exemple

Impacts du numérique sur la bureaucratie *(cf. p.23)*

Solution n°9

[exercice p. 16]

Quelle est la consommation électrique mondiale liée aux usages numériques ?

- **A** Moins de 1 %
- **B** Autour de 10 %
- **C** Plus de 30 %

Le secteur des nouvelles technologies représente à lui seul entre 6 à 10 % de la consommation mondiale d'électricité selon les estimations.

Si on s'intéresse maintenant à toute l'énergie (et pas seulement l'électricité) nécessaire à tout le cycle de vie des équipements du numérique, on est plutôt autour de 4 %. Cette empreinte énergétique augmente **chaque année de 6 %** ce qui veut dire un **doublement tous les 12 ans** (Cf. Règle des 72, Wikipédia[1] pour comprendre le temps de doublement). À ce rythme elle aura dépassé l'empreinte carbone de la voiture d'ici peu.

1. https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A8gle_des_72

Source : Impact environnemental du numérique : tendance à 5 ans et gouvernance de 5G, The ShiftProject, 2021[2] *[14/02/2022]*

Solution n°10

[exercice p. 16]

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.46)*

2. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiMw7SQ1__1AhXCzYUKHR9BBfwQFnoECAIQAQ&url=https%3A%2F%2Ftheshiftproject.org%2Fwp-content%2Fuploads%2F2021%2F03%2FNote-danalyse_Numerique-et-5G_30-mars-2021.pdf&usg=AOvVaw0hPYXDjLAZBfdvhpPEHtbM

Solution n°11

[exercice 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

Solution n°12

[exercice p. 16]

Quels sont les métaux présents dans nos smartphones ?

- **A** Des métaux courant comme le cuivre et l'aluminium
- **B** Des métaux précieux comme l'or ou l'argent
- **C** Des métaux rares comme le tantale

Nos smartphones sont composés de près de plus de 50 métaux différents. Des métaux parfois communs (zinc, cuivre, aluminium) mais aussi précieux (or, argent), voire rares (tantale, indium,...). Il y a aussi des “terres rares” dont on parle beaucoup en raison de leurs propriétés exceptionnelles.

Solution n°13

[exercice p. 17]

Quels sont les principaux problèmes liés à l'extraction des terres rares ?

- **A** Elles sont peu répandues sur Terre
- **B** La demande pose des problèmes géopolitiques
- **C** Leur extraction consomme beaucoup d'eau
- **D** Leur extraction produit des déchets toxiques

Les terres rares sont un groupe de métaux aux propriétés voisines comprenant le scandium 21Sc, l'yttrium 39Y et les quinze lanthanides.

Ces métaux sont, contrairement à ce que suggère leur appellation, assez répandus dans la croûte terrestre, à l'égal de certains métaux usuels." *(source : Wikipédia[3] [11/02/2022])*.

On parle de rareté car leur extraction est laborieuse, nécessite de grands espaces, une grande quantité d'eau et d'énergie, et peut avoir des conséquences dramatiques pour les régions productrices. Pour extraire les terres rares, on injecte des produits chimiques extrêmement nocifs dans le sol. Et il y a une telle demande pour ces métaux que cela peut engendrer des tensions économiques ou entre états.

Solution n°14

[exercice p. 17]

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).

- Bloqueurs de pub : uBlock Origin (Firefox[4] / Chrome)[5], Adguard Adblocker[6], Poper blocker (Firefox[7] / Chrome)[8].
- Gestionnaire de cookies : Adequa (Firefox[9] / Chrome)[10].
- Les paramètres avancés des navigateurs permettent de bloquer les cookies et les données de sites tiers.

Solution n°15

[exercice p. 17]

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

A Vrai

B Faux

3. https://fr.wikipedia.org/wiki/Terre_rare#Gisements_et_production
4. https://addons.mozilla.org/en-US/firefox/addon/ublock-origin/
5. https://chrome.google.com/webstore/detail/ublock-origin/cjpalhdlnbpafiamejdnhcphjbkeiagm?hl=fr
6. https://adguard.com/fr/download.html
7. https://poperblocker.com/fr/installer-2/
8. https://chrome.google.com/webstore/detail/pop-up-blocker-for-chrome/bkkbcggnhapdmkeljlodobbkopceichhe?hl=fr
9. https://addons.mozilla.org/fr/firefox/addon/adequa-mozilla/
10. https://chrome.google.com/webstore/detail/adequa/icceppfappmmehbceklpljipmpgehalo?hl=fr

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[11] sur la Caractérisation des effets rebond induits par le télétravail, Septembre 2020.

11. 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[12] : les conventions diffèrent entre les cimentiers et les sidérurgistes (voir cet article des Échos[13]) 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.

12. https://fr.wikipedia.org/wiki/Laitier_(m%C3%A9tallurgie)
13. 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[14]. 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[15]

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.

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

Bibliographie

[Andrae et Edler 2015] Andrae A.S.G., Edler T., On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030, Challenges, 2015; 6(1):117-157. https://doi.org/10.3390/challe6010117

[Belkhir et Elmeligi 2018] Lotfi Belkhir, Ahmed Elmeligi, Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations, Journal of Cleaner Production, Volume 177, 2018, Pages 448-463, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.239.

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

[Biagini and Carnino, 2006] Biagini Cédric, Carnino Guillaume. 2006. *La tyrannie technologique*. in La tyrannie technologique : critique de la société numérique. Éditions L'échappée.

[Boyd, 2016] Boyd Danah. 2016. *C'est compliqué : Les vies numériques des adolescents*. C&F Éditions.

[Caillosse, 2016] Caillosse Jacques. 2016. *Pourquoi et comment la bureaucratie fait loi*. in Droit et societe. vol.94 n°3 pp677-690. https://www.cairn.info/revue-droit-et-societe-2016-3-page-677.htm.

[Dienlin and Johannes, 2020] Dienlin Tobias, Johannes Niklas. 2020. *The impact of digital technology use on adolescent well-being*. in Dialogues in Clinical Neuroscience. vol.22 n°2 pp135-142. https://doi.org/10.31887/DCNS.2020.22.2/tdienlin.

[Ellul, 1965] Ellul Jacques. 1965. *Réflexions sur l'ambivalence du progrès technique*. in La Revue administrative. vol.18 n°106 pp380-391. https://www.jstor.org/stable/40777750.

[Graeber, 2015] Graeber David. 2015. *Bureaucratie*. Les liens qui libèrent.

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

[GreenIT Europe 2021] Bordage, F., de Montenay, L., Benqassem, S., Delmas-Orgelet, J., Domon, F., Prunel, D., Vateau, C. et Lees Perasso, E., Digital technologies in Europe: an environmental life cycle approach (Le numérique en Europe : une approche des impacts environnementaux par l'analyse du cycle de vie), GreenIT.fr, 2021,

[GreenIT France 2021] Bordage F., de Montenay L., Vergeynst O., Impacts environnementaux du numérique en France, GreenIT, 2021.

[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

[Guchet, 2022] Guchet Xavier. 2022. *Du soin dans la technique : Question philosophiqueDu soin dans la technique*. ISTE Group.

[Haddock et al., 2022] Haddock Aaron, Ward Nadia, Yu Rondy, O'Dea Nicole. 2022. *Positive Effects of Digital Technology Use by Adolescents: A Scoping Review of the LiteraturePositive Effects of Digital Technology Use by Adolescents*. in International Journal of Environmental Research and Public Health. vol.19 n°21 pp14009. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9658971/

[JRC Weighting] Sala S., Cerutti A.K., Pant R., Development of a weighting approach for the Environmental Footprint, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-68042-7, EUR 28562, doi 10.2760/945290

[Kranzberg, 1986] Kranzberg Melvin. 1986. *Technology and History: "Kranzberg's Laws"Technology and History*. in Technology and Culture. vol.27 n°3 pp544-560. https://www.jstor.org/stable/3105385.

[Lindgaard, 2022] Lindgaard Jade. 2022. *Le débat public sur le nucléaire suscite de vifs débats et des questions sans réponses*. in Mediapart. https://www.mediapart.fr/journal/ecologie/231122/le-debat-public-sur-le-nucleaire-suscite-de-vifs-debats-et-des-questions-sans-reponses.

[Luangsay-Catelin, 2018] Luangsay-Catelin Carine. 2018. *La diplomatie humanitaire ou l'impact du numérique sur la mobilisation (cyber)citoyenne*. in Hermès, La Revue. vol.81 n°2 pp115-121. https://www.cairn.info/revue-hermes-la-revue-2018-2-page-115.htm.

[Malmodin et Lundén 2018] Malmodin J., Lundén D., The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015, Sustainability, 2018, 10(9):3027. https://doi.org/10.3390/su10093027

[Mazaud, 2017] Mazaud Caroline. 2017. *« À chacun son métier », les agriculteurs face à l'offre numérique*. in Sociologies pratiques. vol.34 n°1 pp39-47. https://www.cairn.info/revue-sociologies-pratiques-2017-1-page-39.htm.

[North, 2019] North Anna. 2019. *7 positive changes that have come from the MeToo movement*. in Vox. https://www.vox.com/identities/2019/10/4/20852639/me-too-movement-sexual-harassment-law-2019.

[Pagani and Pardo, 2017] Pagani Margherita, Pardo Catherine. 2017. *The impact of digital technology on relationships in a business network*. in Industrial Marketing Management. vol.67 pp185-192. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019850117306338.

[PEF2021] Commission Recommendation (EU) 2021/2279 of 15 December 2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations, OJ L 471, 30.12.2021

[PEFCR2017] PEFCR Guidance document, - Guidance for the development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs), version 6.3, December 14 2017.

[Pitron, 2018] Pitron Guillaume. 2018. *La guerre des métaux rares*. LLL.

[Reporterre, 2022] Reporterre. 2022. *Les métaux rares, le visage sale des technologies « vertes »*. in Reporterre, le média de l'écologie. https://reporterre.net/Les-metaux-rares-le-visage-sale-des-technologies-vertes.

[Shift Project 2018] Pour une sobriété Numérique, Rapport final du Lean ICT, dirigé par Hugues Ferreboeuf, The Shift Project, 2018.

[Shift Project 2021] Ferreboeuf H., Efoui-Hess M., Verne X., Note d'analyse – Impact environnemental du numérique : tendances à 5 ans et gouvernance de la 5G, The Shift Project, 2021.

[Shtepura, 2018] Shtepura Alla. 2018. *The Impact of Digital Technology on Digital Natives' Learning: American Outlook*. in Comparative Professional Pedagogy. vol.8 n°2 pp128-133. http://archive.sciendo.com/RPP/rpp.2018.8.issue-2/rpp-2018-0029/rpp-2018-0029.pdf.

[Slomian, 2017] Slomian Cynthia. 2017. *Le numérique au coeur des soins de santé : des médecins généralistes 2.0 ?Le numérique au coeur des soins de santé*. in Sociologies pratiques. vol.34 n°1 pp73-82. https://www.cairn.info/revue-sociologies-pratiques-2017-1-page-73.htm.

[Small et al., 2020] Small Gary W., Lee Jooyeon, Kaufman Aaron, Jalil Jason, Siddarth Prabha, Gaddipati Himaja, Moody Teena D., Bookheimer Susan Y.. 2020. *Brain health consequences of digital technology use*. in Dialogues in Clinical Neuroscience. vol.22 n°2 pp179-187. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.31887/DCNS.2020.22.2/gsmall.

[Steiner, 2010] Steiner Pierre. 2010. *Philosophie, technologie et cognition : état des lieux et perspectives*. in Intellectica. vol.53 n°54 pp7–40. https://aswemay.fr/res/Intro_Intellectica_Phiteco_Pierre_Steiner_Final_corrections.pdf.

[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]

[Min. Trans. Ecol. - Energie 2021] https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2021/11-international

[Nextinpact - Mesures 2023] https://www.nextinpact.com/article/71228/mesurer-empreinte-environnementale-numerique-vrai-casse-tete

[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

La clef de Berlin oblige à refermer la porte derrière soi p. 8
Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions - Clemensfranz

Synthèse des résultats de l'ACV de l'envoi d'un mail de 1 Mo d'après une étude de l'ADEME p. 54,
Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique, ADEME 2011 (page 7)[16]

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. 54,
Life Cycle Assessment of Dell Latitude 7300[17]

Consommation électrique d'un ordinateur de bureau p. 60,
Zoom[18]

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. 47
Source : Life Cycle Assessment of Dell Latitude 7300, rapport détaillé de 67 pages[19] *; synthèse de 2 pages*[20]

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. 47
Source : Product Environmental Report iPhone 12[21]

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. 47
Source : Nokia Lumia 820 Eco profile[22]

---

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

Composition d'un smartphone classique p. 63,
source données Orange pour une étude du Sénat[23]

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. 48
Source : Life Cycle Assessment of Dell Latitude 7300, rapport détaillé de 67 pages[24] *; synthèse de 2 pages*[25]

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. 49
Source : Cristian Bortes[26]*, CC BY 2.0*[27]*, 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. 50
Source : MONUSCO Photos[28]*, CC BY-SA 2.0*[29]*, 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. 68, , ,
Source: Aliciak3yz[30]*, CC BY-SA 4.0*[31]*, via Wikimedia Commons*

Tonnage de DEEE par catégorie en France en 2018 (en milliers de tonnes) p. 71,
Données extraites de Implementation of the WEEE Directive[32]

Types de traitement des DEEE en France en 2019 p. 72,
Données extraites du registre Ademe 2020 (chiffres 2019)

Économie circulaire p. 75,
Source : G.Mannaerts, CC BY-SA 4.0, Wikimedia Commons[33]

Les limites du recyclage dans un contexte de demande croissante p. 76,
Adaptée d'une figure de Françoise Berthoud

Flux de traitement des DEEE en France en 2019 en milliers de tonnes p. 73,
Données extraites du registre Ademe 2020 (chiffres 2019)

---

23. https://www.senat.fr/rap/r15-850/r15-8501.html
24. https://www.delltechnologies.com/asset/en-us/products/laptops-and-2-in-1s/technical-support/full-lca-latitude7300-anniversary-edition.pdf
25. https://corporate.delltechnologies.com/content/dam/digitalassets/active/en/unauth/data-sheets/products/laptops/lca-latitude_7300_25th_anniv_notebook.pdf
26. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ro%C8%99ia_Poieni_open-pit_copper_mine.jpg
27. https://creativecommons.org/licenses/by/2.0
28. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SRSG_visits_coltan_mine_in_Rubaya_(13406579753).jpg
29. https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0
30. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Katy-Freeway.jpg
31. https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0
32. https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee/implementation-weee_en
33. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Economie_circulaire.png

Incinération de câbles électriques pour en récupérer le cuivre à Agbobloshie au Ghana p. 52
source : Muntaka Chasant[34], CC BY-SA 4.0[35], via Wikimedia Commons

Illustration de la caractérisation des ressources et réserves minières p. 78
Source : A. Boubault, BRGM

Évolution de la production minière, des réserves et de la durée fictive d'épuisement des réserves pour le cuivre. p. 79
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[36]

p. 18
Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions - Profs en transition — https://profsentransition.com/sobriete-numerique/

Analyse de cycle de vie p. 26
Polytechnique Montréal, 2023. https://www.polymtl.ca/

34. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=81933169
35. https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0
36. http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-69037-FR.pdf

Contenus annexes

1. La thèse TAC ou « l'école de Compiègne » (avec Pierre Steiner)

- La thèse « TAC » est développée à l'UTC.
- Elle trouve ses sources dans les travaux d'André Leroi-Gourhan, de Gilbert Simondon, de Jacques Derrida et de Bernard Stiegler.
- Elle s'articule avec la théorie du support qui fait l'hypothèse que toute connaissance ne peut procéder que d'une inscription sur un support matériel.
- Elle est développée en particulier autour du cas du support numérique.

Thèse TAC 1 : Il n'y a pas d'humain sans technique — Az Définition

La technique est ce qui définit l'avènement de l'humain (il n'y a pas d'humain avant la technique).

Thèse TAC 2 : L'intelligence humaine a toujours un substrat technique — Az Définition

La technique est ce qui permet le rapport de l'humain au monde (la conscience et la connaissance sont techniquement constituées).

Co-constitutivité — Remarque

La technique façonne l'humain autant que l'humain façonne la technique.

Théorie du support — Remarque

La technique n'est pas que le produit de l'intelligence humaine, c'est elle qui rend possible l'intelligence humaine.

En conséquence : la science est un produit de la technique.

Non neutralité de la technique — Remarque

Le couplage entre humains et objets différents produit des rapports au monde différents qui dépendent des propriétés techniques des objets.

On ne peut pas donc pas décider de contrôler les usages que l'on fait des objets indépendamment des objets.

Autonomie de la technique

Remarque

Les objets techniques sont le produit d'une évolution qui échappe en partie au moins à l'intention humaine (puisque celle-ci est elle-même dynamiquement constituée par cette évolution).

Technologie Anthropologiquement Constitutive et Constituante

Complément

Nous avons simplifié ici, mais la formulation de la thèse TAC mobilise en général les deux termes de constitutif et constituant.

1. Constitutif : qui fonde l'avènement de l'humain
2. Constituant : qui permet le rapport de l'humain au monde

Complément

- https://aswemay.fr/co/these-tac.html
- *Steiner, 2010*[Steiner, 2010 p.39]

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

a) Introduction

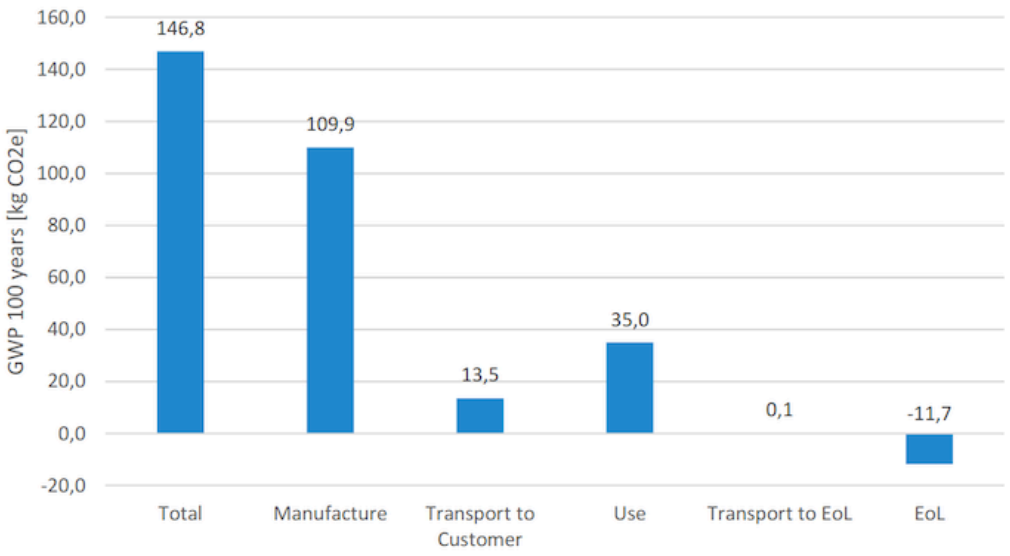
Les impacts environnementaux associés au matériel informatique ne se limitent pas aux effets de leur consommation d'électricité lorsqu'on les utilise, loin de là ! Évaluer ces impacts nécessite de prendre en compte l'ensemble du **cycle de vie** de l'appareil : sa production, sa distribution, son usage 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.53).

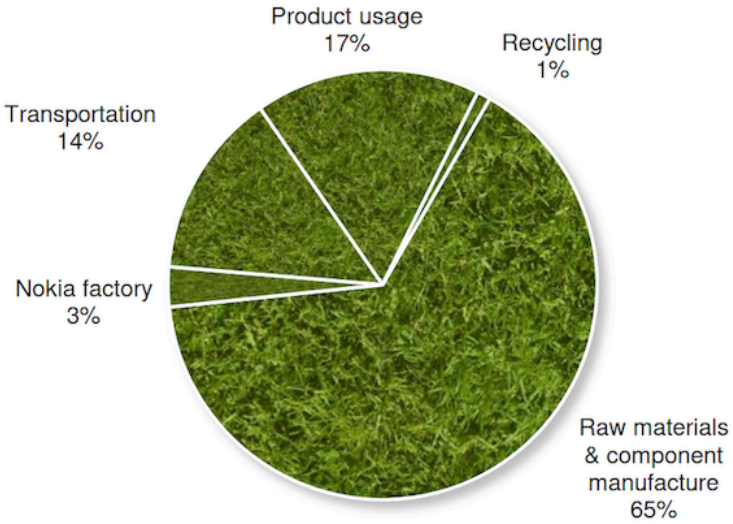


Contribution au potentiel de réchauffement climatique (GWP: Global Warming Potential), exprimé en Kg éq CO2 à 100 ans, des différentes phases du cycle de vie d'un ordinateur portable Dell 7300 utilisé en Europe. Cette catégorie d'impact est directement liée aux aspects énergétiques, d'où l'importance 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.

iPhone 12 life cycle carbon emissions

83%	Production
2%	Transport
14%	Use
<1%	End-of-life processing

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).

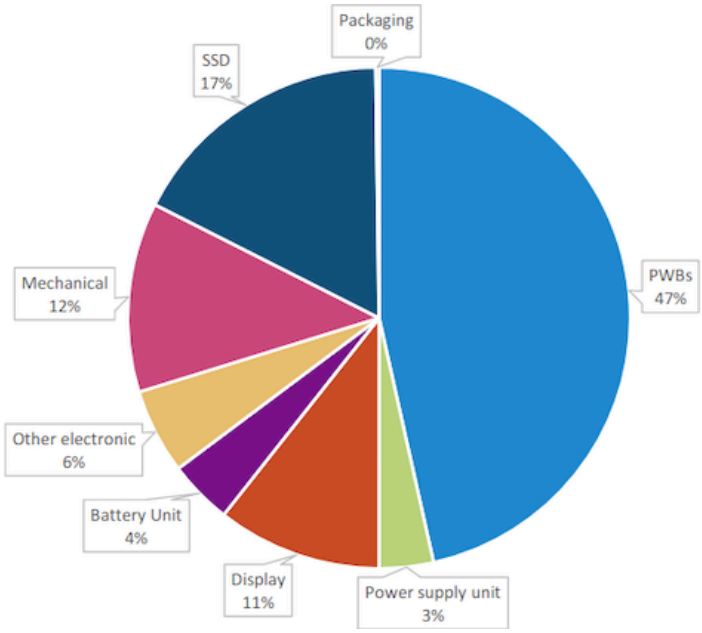
b) La phase de production

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.61).

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[37]).

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 chimiques : gravité, magnétisme, électrostatique, flottation, électrolyse, lixiviation (c'est-à-dire

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

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.40]. 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[38]). 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.40].

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.40]. 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 concernées. Ainsi certains métaux et les minerais à partir desquels ils sont produits (le tantale, qui

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

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[39]) : 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[40]). 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.

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

c) La phase d'usage

Un terminal en activité ne consomme *généralement pas d'eau* p.36, 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.36 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.64)*

d) 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.70)*.

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.40].

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.40]. 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

e) 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.

f) Pour aller plus loin

- *Rapport d'information pour le Sénat, 2016*[*Rapport d'information pour le Sénat, 2016* p.41]
- *Clément, 2020*[*Clément, 2020* p.40]
- *Teehan et Kandlikar, 2012*[*Teehan et Kandlikar, 2012* p.41]

Sur l'analyse de cycle de vie

- Fiche concept *L'analyse de cycle de vie* (cf. p.53)
- Fiche concept *L'analyse du cycle de vie appliquée aux services numérique* (cf. p.64)

Sur la production des métaux

- Fiche concept *Quels métaux dans les smartphones ?* (cf. p.61)
- Fiche concept *Pourquoi les projections autour de la durée des réserves minières sont difficiles* (cf. p.78)

Sur les DEEE

- Fiche concept *Où en est-on du recyclage ?* (cf. p.70)
- Les enfants et les décharges numériques -- Exposition aux déchets d'équipements électriques et électroniques et santé des enfants.[41] Rapport de l'OMS, 15/06/2021. [27/01/2022]

3. L'analyse de cycle de vie

1 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.

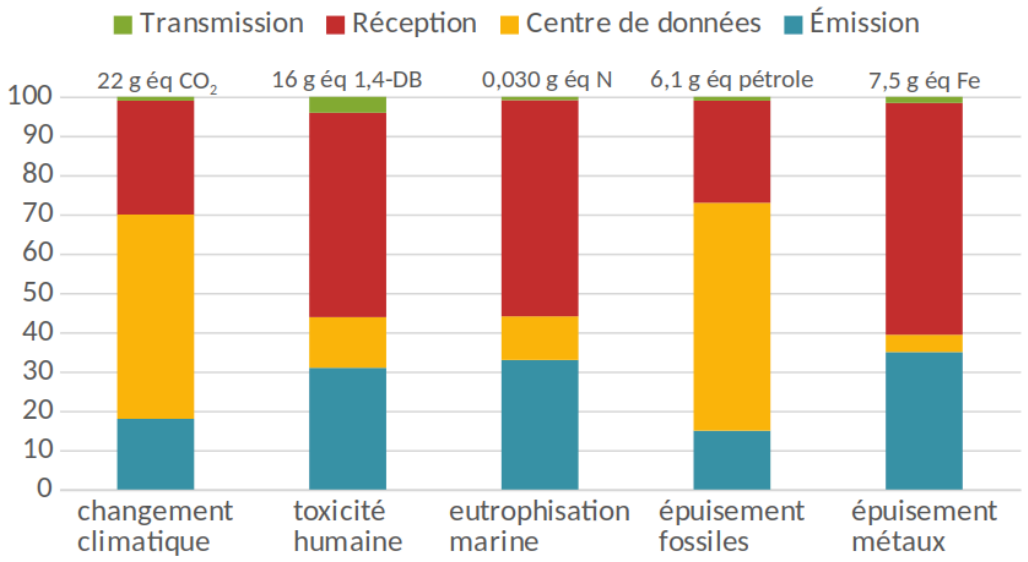
Par rapport à d'autres méthodes (telles que l'empreinte écologique, le bilan carbone...), l'ACV se distingue par son caractère à la fois multicritère et multi-étapes.

- **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).

41. 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.

2 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.

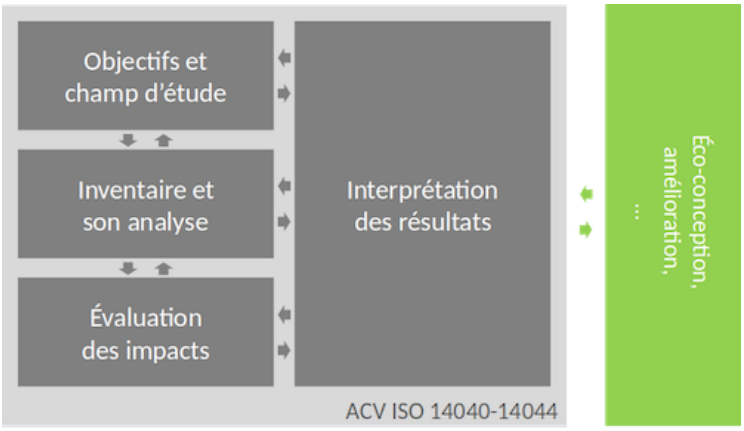
La plupart des résultats d'ACV publiés relèvent de l'**ACV attributionnelle** (ACV-A), dont l'objectif est d'attribuer à un produit sa « juste part » de l'ensemble des impacts environnementaux (dans un système en régime permanent). Si l'on s'intéresse aux conséquences de l'introduction d'un nouveau produit (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.

3 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.37] en sont deux exemples.



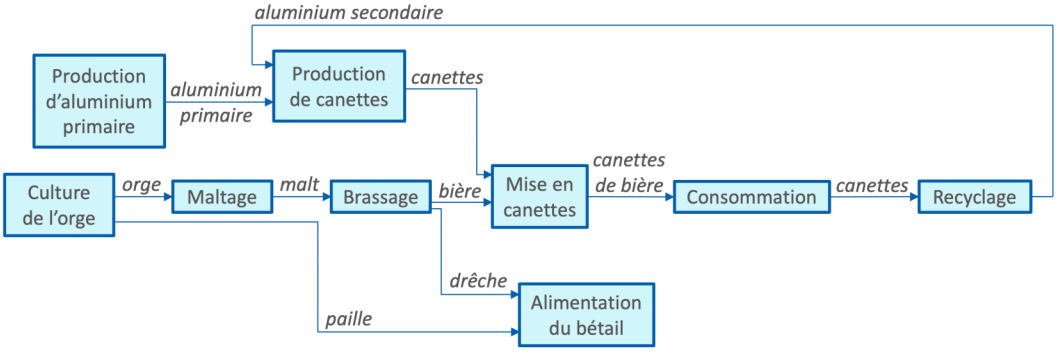
Les principales étapes de l'ACV.

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.

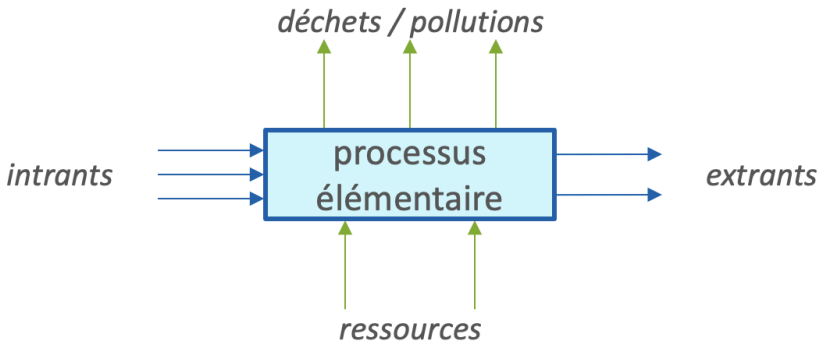
2 Inventaire du cycle de vie

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).



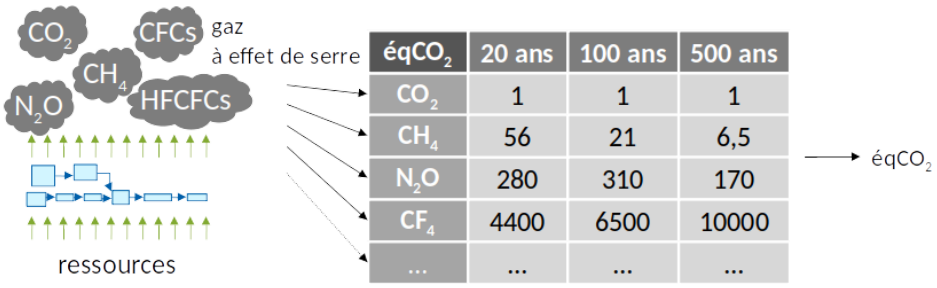
Représentation graphique d'un processus élémentaire. Un processus élémentaire est alimenté par des flux physiques (intrants et ressources naturelles) et en produit d'autres (extrants et déchets finaux/pollution).

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).



éqCO$_2$	20 ans	100 ans	500 ans
CO_2	1	1	1
CH_4	56	21	6,5
N_2O	280	310	170
CF_4	4400	6500	10000
...	...	...	...

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

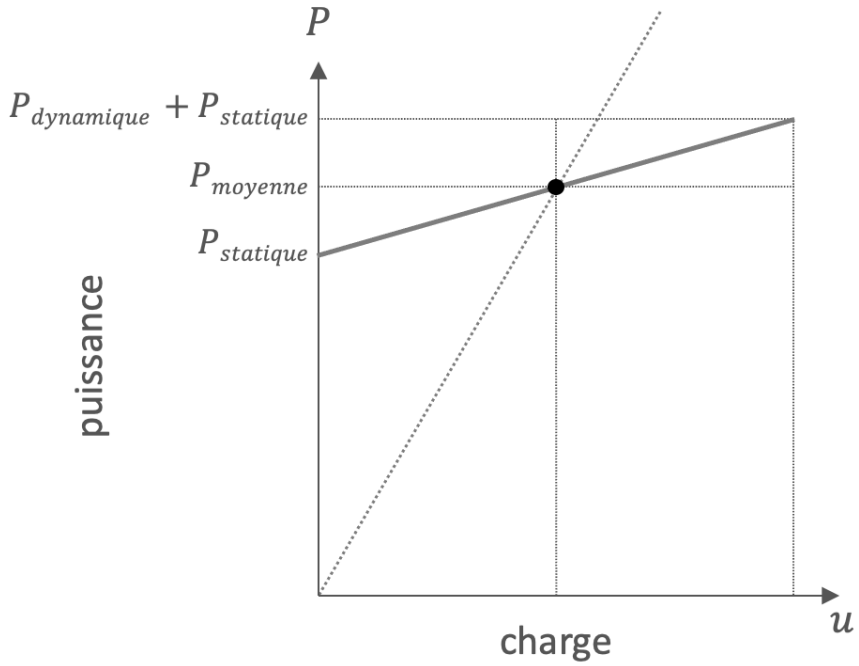
Cette étape est essentielle pour mettre en évidence les points saillants de l'analyse, en pointer les limites (incertitudes, sensibilité aux hypothèses, etc.), et préciser les conclusions qu'il est possible d'en tirer.

4 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.58)). 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.36.

5 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.36 qui visent à réduire nos impacts environnementaux à toutes les échelles.

Pour aller plus loin — Complément

- Dossier sur l'Analyse de Cycle de Vie[42] par l'ADEME

4. 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[43] (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.40].
- 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).

42. https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv
43. 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.40].
- 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)[44]

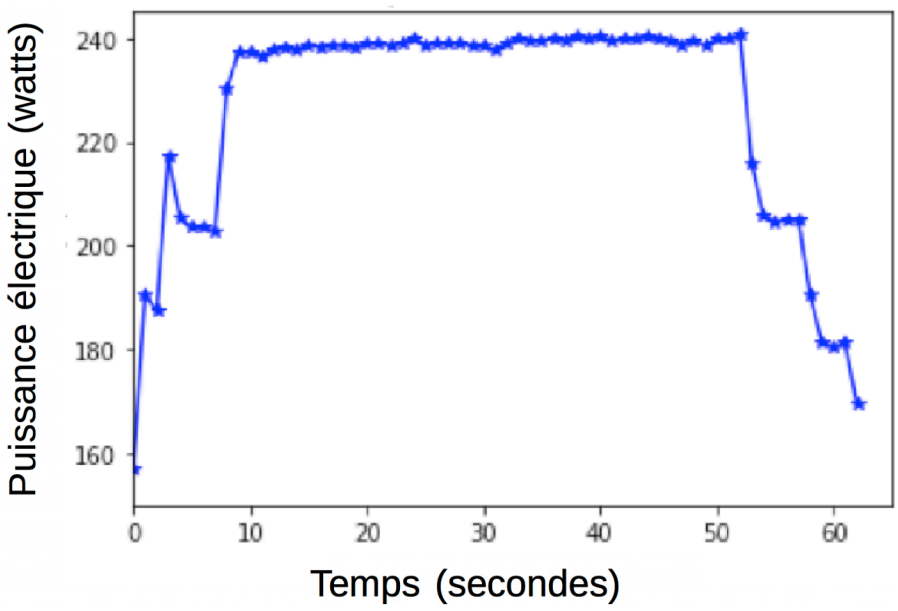
Conclusion, il ne faut pas confondre la puissance électrique (exprimée en watts) avec l'énergie (exprimée en joules ou Wh) (Des astuces pour convertir les watts en KWh, Engie)[45].

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.

44. https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/conseils-souscription-contrat-electricite/convertir-watts-en-kwh.html
45. 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 exécutée 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.40] 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[46] 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[47], 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[48], 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[49], 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.

5. Quels métaux dans les smartphones ?

La plupart de ces informations sont extraites du site www.frandroid.com[50].

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.

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

On retrouve ces métaux[51] 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[52], 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.40]. 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.37].

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.37] 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.

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

Quelles quantités ?

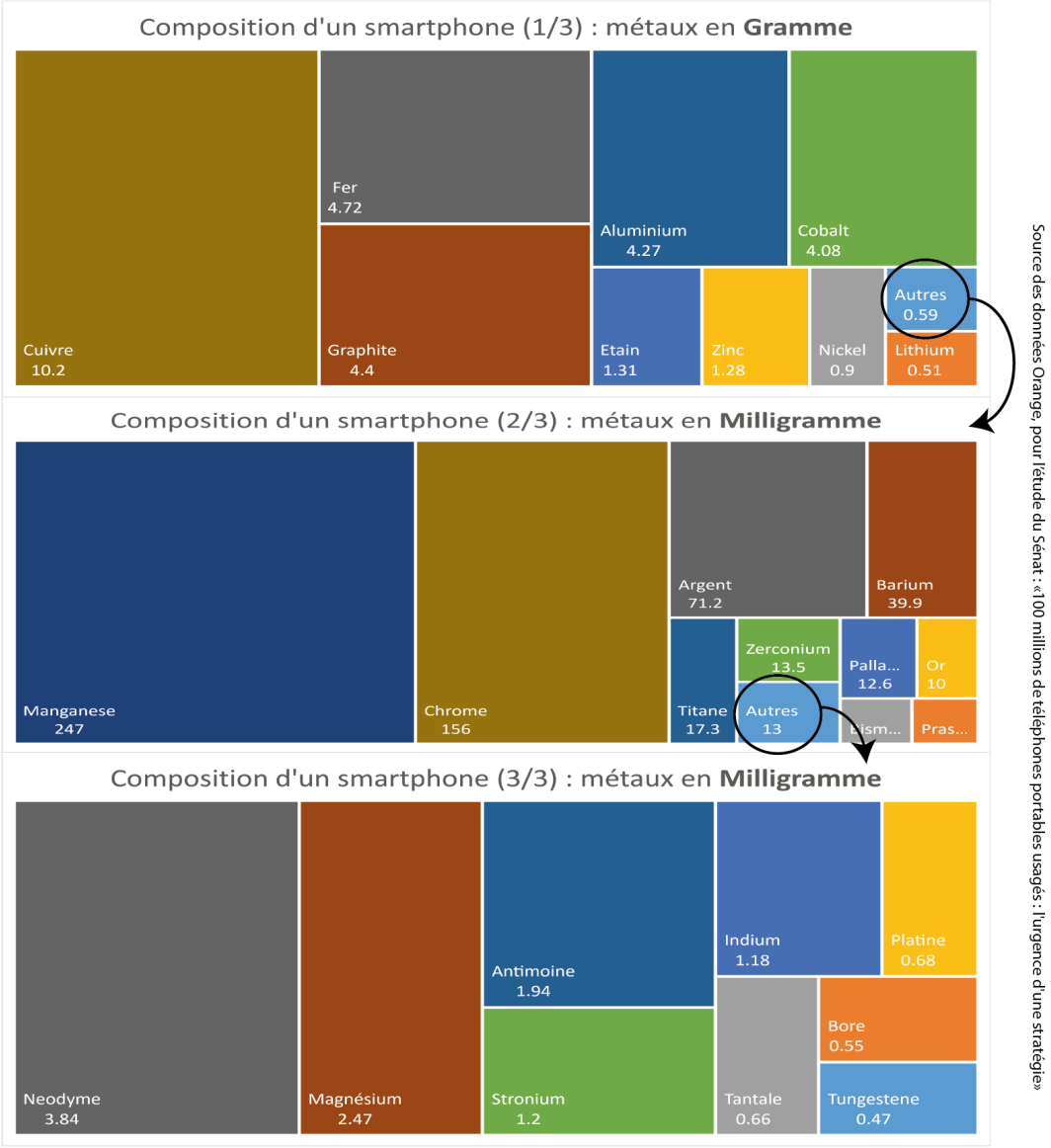
Pour resituer les choses par rapport au poids total d'un smartphone, il faut savoir que, en fonction des modèles :

- 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 :



Source des données Orange, pour l'étude du Sénat : «100 millions de téléphones portables usagés : l'urgence d'une stratégie»

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[53] [28/01/2022]
- World Mining Data. site[54] [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[55] [28/01/2022]

6. 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.39] ; *GreenIT.fr, 2019)*[GreenIT.fr, 2019 p.38] 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,
- **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,

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

- **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.67)*) 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.40]
- Évaluation et amélioration de la performance environnementale des services numériques[56]
- Maîtrisez l'eco-conception numérique[57]

56. http://negaoctet.org/
57. http://www.greenconcept-innovation.fr/

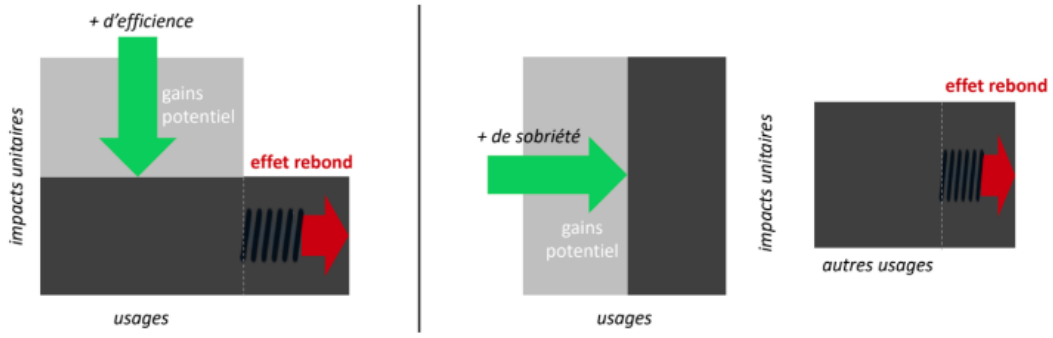
7. L'effet rebond

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 XIXe 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[58] : 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.

58. 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.40] : depuis Eniac (le premier ordinateur entièrement électronique) la miniaturisation a rendu possible l'explosion du nombre d'objets électroniques *(Gossart, 2014)*[Gossart, 2014 p.40] (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.40], 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.40]. 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.41]. 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.41]. 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.40]. 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.41], les stratégies commerciales, l'effet des marchés et de la financiarisation, les normes sociales, techniques, et réglementaires *(Wallenborn, 2018)*[Wallenborn, 2018 p.41].

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.40] (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.40]. 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.40].

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.

8. 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.36 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.36 (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.36), et au niveau mondial de 17% (source : Global e-waste monitor[59])...
- 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*[60]. 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

59. https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Pages/Spotlight/Global-Ewaste-Monitor-2020.aspx
60. 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 ?

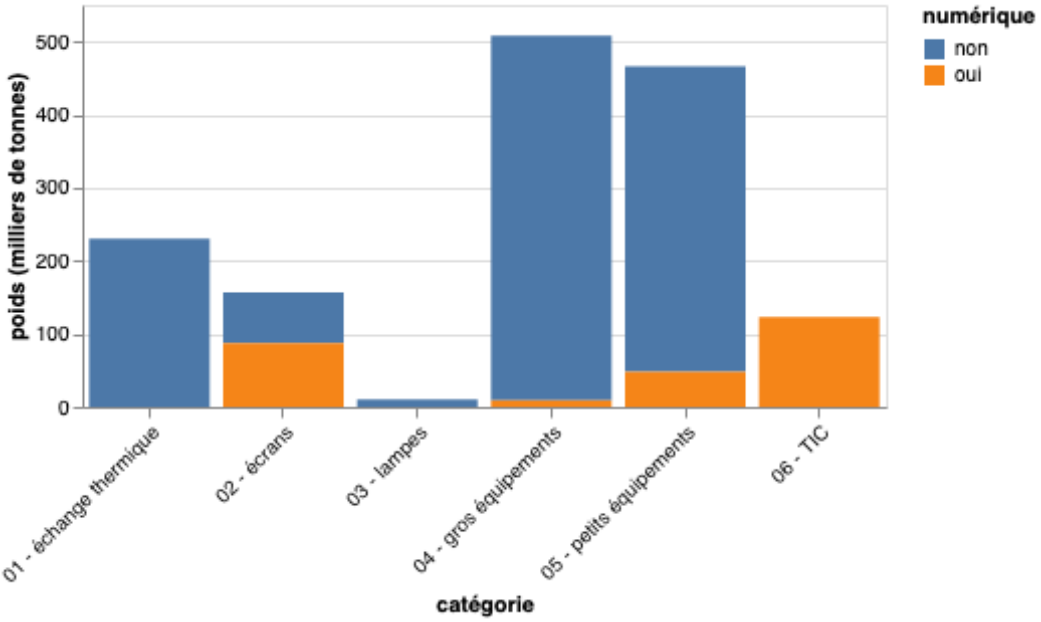
Le principe de Responsabilité Élargie du Producteur implique la mise en place par les producteurs de la filière de collecte et de traitement des équipements. Ces filières sont en partie financées par une éco-taxe lors de l'achat de matériel électroménager neuf. Les équipements collectés (en magasin ou 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

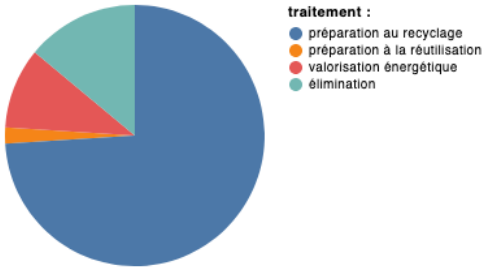
Actuellement, le système de collecte et de recyclage est face à un paradoxe qu'on ne peut plus négliger : l'agrément des éco-organismes se fait exclusivement en fonction du poids de DEEE collectés, sans tenir compte du taux de réemploi atteint. Cette politique peut avoir plusieurs conséquences néfastes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

- 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.

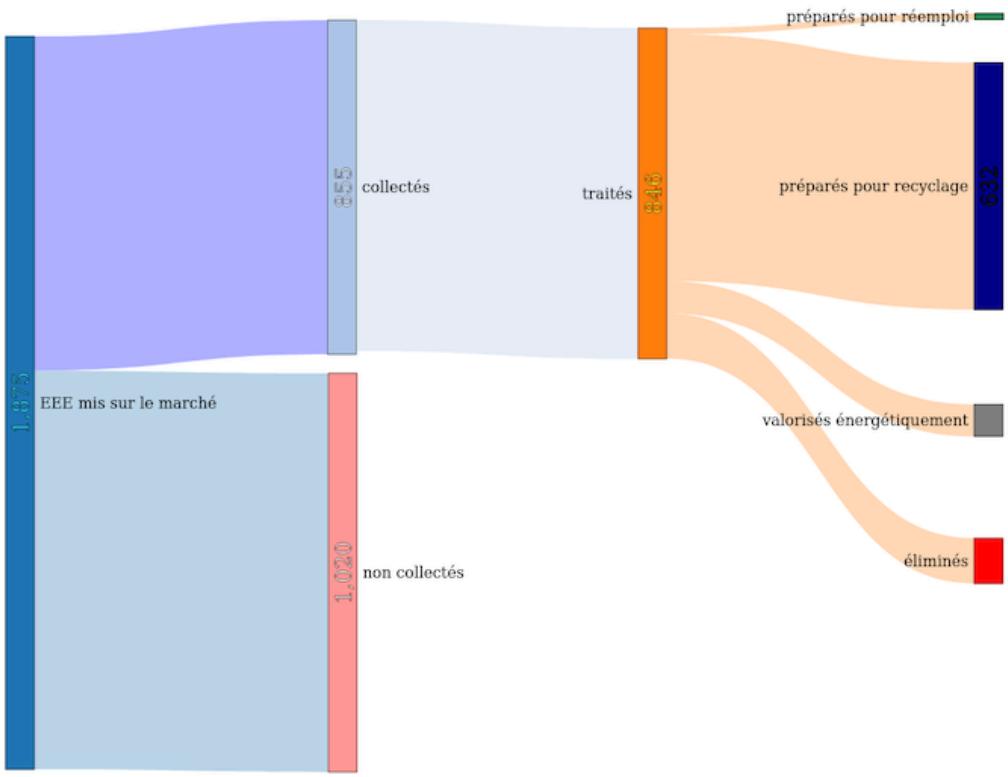
En outre, pour dés-allier les métaux rares et les terres rares il est nécessaire d'utiliser des acides, des sels, et de chauffer à très haute température (énergie).

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.74)).

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[61] pour la définition d'un déchet
- Décret définissant les DEEE[62]
- The Global E-waste Monitor, url[63]
- 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[64].
- Recycling Rates of Metals, A Status Report[65]. UNEP (United Nation Environment Programme), 2011
- *Hischier et al., 2005*[*Hischier et al., 2005* p.40]
- *Berlingen, 2020*[*Berlingen, 2020* p.38]
- *Vidal et al., 2013*[*Vidal et al., 2013* p.41]

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

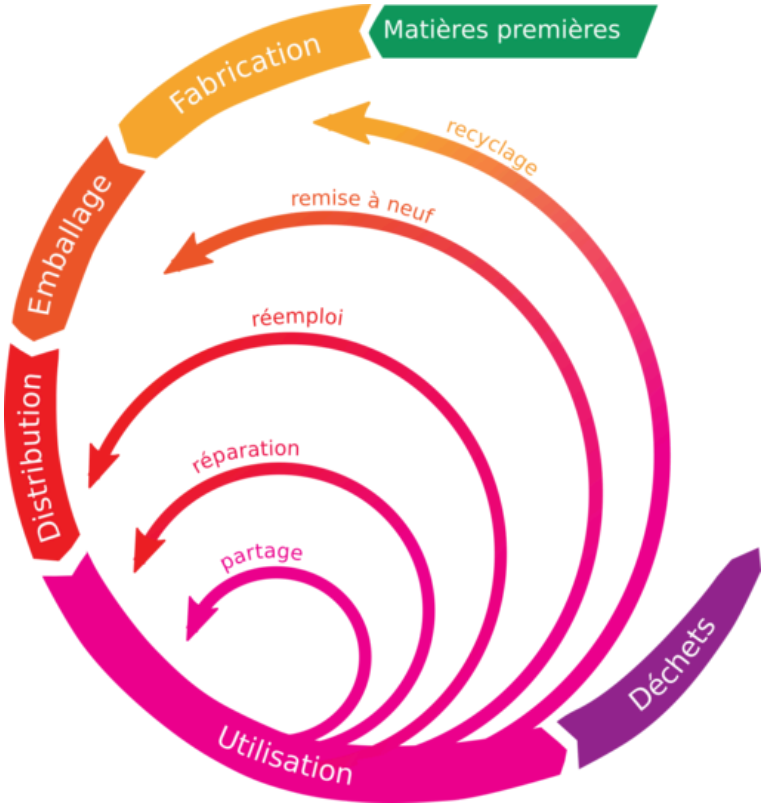
Qu'est-ce que l'économie circulaire ?

Selon Wikipedia : « L'**économie circulaire** est un nouveau modèle économique à vision systémique. Les notions d'économie verte[66], d'économie de l'usage ou économie de la fonctionnalité[67], de l'économie de la performance et de l'écologie industrielle[68] 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.76)*

61. 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
62. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000029387124
63. http://ewastemonitor.info/
64. https://www.ademe.fr/mediatheque
65. http://www.resourcepanel.org/file/381/download?token=he_rldvr
66. https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89conomie_verte
67. https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89conomie_de_l%27usage
68. https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89cologie_industrielle



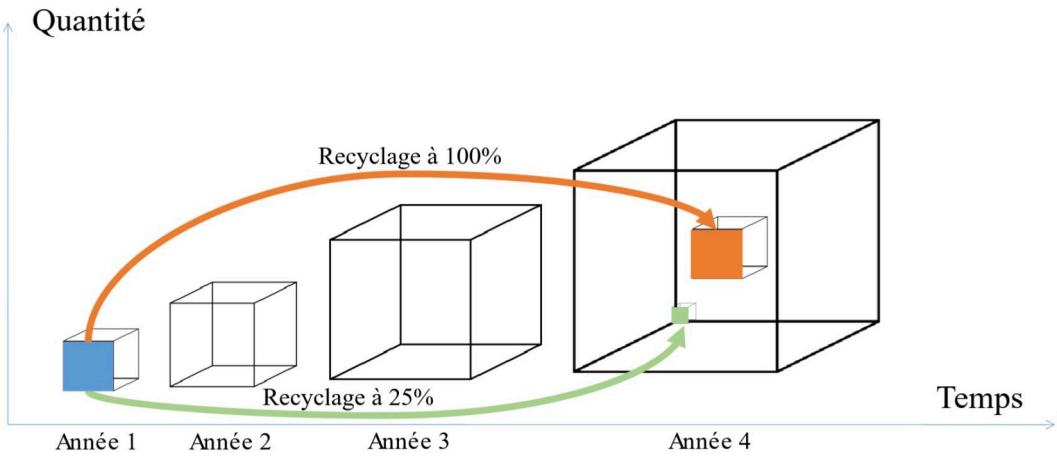
Économie circulaire

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.38] 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.67)). 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.

10. 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[69] [28/01/2022]
- La pollution numérique, Profs en transition. 2020. Disponible sur profsentransition.com[70] [28/01/2022]
- Raphaël Lemaire. La règle des 5R [en ligne]. 2021. Disponible sur blog.zenika.com[71] [28/01/2022]

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

11. 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

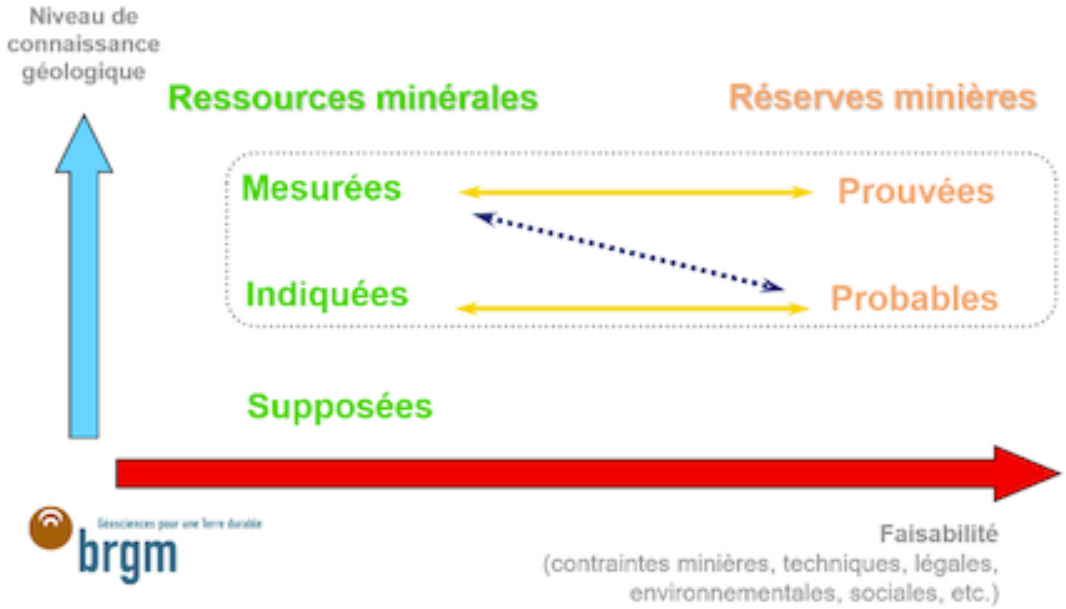
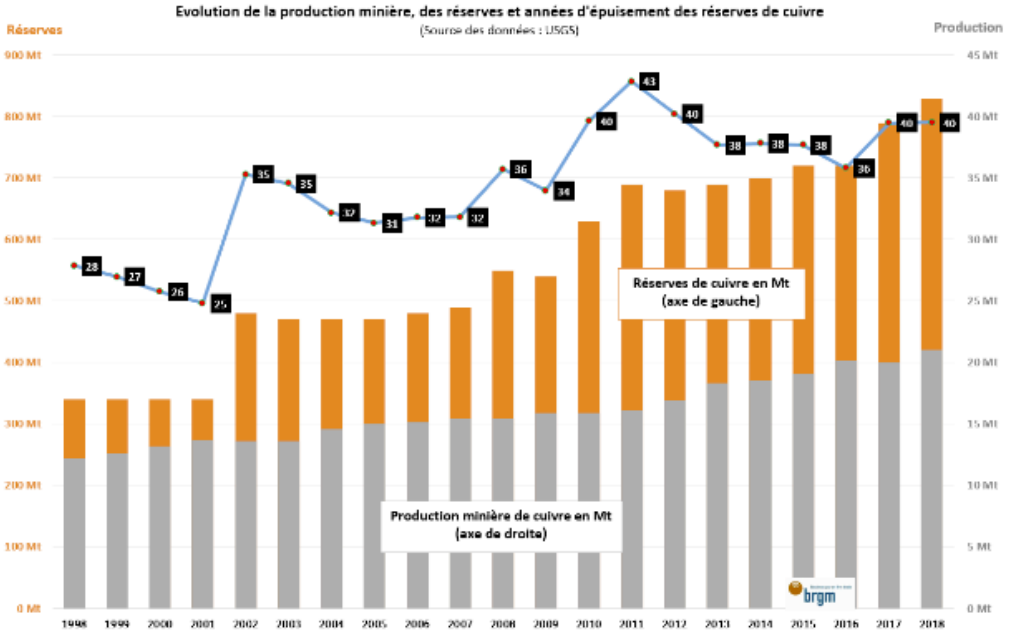


Illustration de la caractérisation des ressources et réserves minières

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.

12. Conception numérique responsable (Green IT)

Green IT 1.0

Az Définition

Réduire l'empreinte du numérique (pour)

Exemple

- Augmenter la durée de vie et la réparabilité des composants
- Réduire la consommation énergétique des appareils

Green IT 1.5

Az Définition

Réduire l'empreinte des organisations à l'aide du numérique (par)

Green IT 1.5 Exemple

- Télétravail : permet de réduire l'impact des citoyens car cela entraîne une diminution de l'utilisation des moyens de transports.
- Mails : envoyer un mail a un impact plus faible qu'une lettre papier.
- Téléconsultation : mise en place de rendez-vous à distance pour éviter les déplacements qui généreraient pollution, embouteillages...

Green IT 2.0 Az Définition

Inventer de nouveaux produits ou services plus durables grâce au numérique (par)

Green IT 2.0 Exemple

- Utilisation de pommeaux de douche intelligents : reliés à une application, ils permettent de connaître et réduire sa consommation d'eau.
- Application Too Good To Go (commerce de paniers anti gaspi) : permet de diminuer le gaspillage et encourage la solidarité.
- Application Yuka : permet de connaître l'impact environnemental des produits que l'on achète.

Complément

https://www.greenit.fr/definition/

https://www.greenit.fr/ressources/

13. *Product Environmental Footprint* v3.1

Facteurs d'impacts du PEF (Product Environmental Footprint)

- 16 facteurs (*PEF2021*[PEF2021 p.39])
- développés en 2013 par la commission européenne, actuellement en version 3.1 (2022) ;
- présentés dans le PEFCR (PEF Category Rules) : norme européenne visant à homogénéiser les analyses de cycle de vie environnementales au niveau européen en proposant des critères communs, notamment une catégorisation des facteurs d'impact environnementaux ;
- amalgames de facteurs mesurables provenant de plusieurs travaux scientifiques.

Les 16 facteurs d'impact du PEF

1. climate change (kg $CO_{2\ eq}$) : impact sur le changement climatique
2. ozone depletion (kf CFC-11_{eq}) : impact sur la couche d'ozone
3. human toxicity, cancer (CTU_h) : impact toxique cancérigène sur les humains
4. human toxicity, non-cancer (CTU_h) : impact toxique non-cancérigène sur les humains

5. particulate matter (incidence de maladie) : impact de l'émission de particules fines sur les humains
6. ionising radiation (kBq U^{235}_{eq}) : impact de l'exposition aux radiation sur les humains
7. photochemical ozone formation (kg $NMVOC_{eq}$) : impact de la formation de smog sur les humains
8. acidification (mol H^{+}_{eq}) : impact de l'acidification des sols et des océans
9. eutrophication, terrestrial (mol N_{eq}) : impact de l'excédent d'azote dans les terres
10. eutrophication, freshwater (kg P_{eq}) : impact de l'excédent de phosphore dans les eaux douces
11. eutrophication, marine (kg N_{eq}) : impact de l'excédent d'azote dans les eaux marines
12. ecotoxicity, freshwater (CTU_e) : impact toxique sur les éco-systèmes des eaux douces
13. land use (plusieurs métriques) : impact sur la condition des terres (qualité du sol, production biotique, résistance à l'érosion, reaaprovisionnement des nappes phréatiques, capacité de filtrage)
14. water use (m^3 $world_{eq}$) : impact sur la diminution d'eau
15. resource use, mineral and metal (kg Sb_{eq}) : impact sur la diminution des ressources en minéraux et métaux (Sb = antimoine)
16. resource use, fossils (MJ) : impact sur la diminution des ressources fossiles

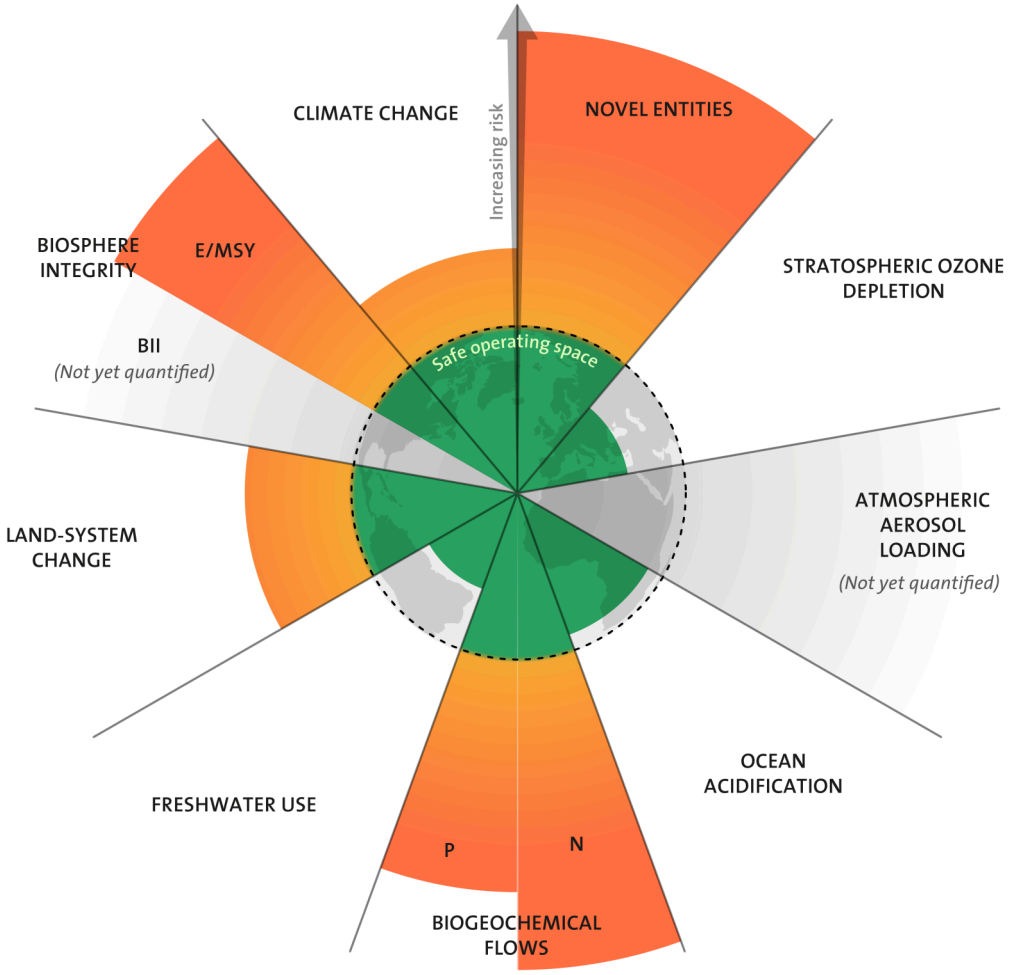
Remarque

CTU = Comparative Toxic Unit for human/ecosystems

14. Limites planétaires

Limites planétaires (*planetary boundaries*) :

- 9 facteurs ;
- proposées par un groupe de scientifiques experts du climat de Suède et d'Australie en 2009 et mises à jour en 2015 ;
- définitions de limites aux modifications environnementales causées par l'homme au-delà desquelles des changements environnementaux abrupts et non-linéaires peuvent survenir au niveau planétaire, amenant des conséquences potentiellement catastrophiques.



Liens limites planétaires <=> PEF ⊕ Complément

- climate change <=> climate change
- stratospheric ozone depletion <=> ozone depletion
- atmospheric aerosol loading <=> photochemical ozone formation
- ocean acidification <=> acidification
- biogeochemical flows (P,N) <=> eutrophication (terrestrial/freshwater/marine)
- freshwater use <=> water use
- land system change <=> land use
- biosphere integrity <=> ecotoxicity(freshwater), **null**
- novel entities <=> human toxicity (cancer/non-cancer), particule matter, ionising radiation
- **null** <=> resource use (mineral/metal/fossils)

15. Mesure des facteurs environnementaux : normalisation et factorisation

Il y a un besoin de comparer les différents impacts environnementaux pour identifier sur lesquels porter ses efforts. On utilise pour cela deux processus le normalisation et la factorisation.

Normalisation

- Elle a pour objectif de transformer les mesures de chaque facteur dans des indices de même grandeurs.
- Pour les PEF, on ramène la mesure d'un facteur à l'impact moyen d'un être humain sur le facteur pendant une année (soit l'impact sur le facteur de l'espèce humaine pendant une année, divisée par la population mondiale).

  Des valeurs moyennes sont données par la commission européenne (*PEFCR2017*[PEFCR2017 p.39]).
- Pour les limites planétaires, on calcule un quotient de la mesure de chaque facteur par rapport à sa limite.

Factorisation

- Elle a pour objectif de pondérer les facteurs en fonction de leur importance relative (*JRC Weighting*[JRC Weighting p.38])
- Pour les PEF, ce poids a été déterminé à la fois par des experts et le grand public, par un processus de questionnaire (expert/grand public) et de discussions (expert seulement), en tenant compte de la confiance (ou du manque de confiance) des experts sur cette importance.
- Pour les limites planétaires, des poids ont été proposés en 2015 par Bjorn et Hauschild.

Facteur d'impact	Poids PEF	Poids limites planétaires (Bjorn et Hausschild, 2015)
Climate change	21.06%	25.51%
Ozone depletion	6.31%	1.02%
Human toxicity (cancer)	2.13%	na
Human toxicity (non-cancer)	1.94%	na
Particulate matter	8.96%	na
Ionizing radiation (human health)	5.01%	na
Photochemical ozone formation (human health)	4.78%	34.69%
Acidification	6.2%	1.02%
Eutrophication (terrestrial)	3.71%	1.02%
Eutrophication (freshwater)	2.8%	9.18%

Facteur d'impact	Poids PEF	Poids limites planétaires (Bjorn et Hausschild, 2015)
Eutrophication (marine)	2.96%	1.02%
Ecotoxicity (freshwater)	1.92%	na
Land use	7.94%	25.51%
Water use	8.51%	1.02%
Resource use (minerals and metals)	7.55%	na
Resource use (fossils)	8.32%	na

16. État de l'art de l'impact du numérique : Études existantes

Six études sur les impacts environnementaux du numérique

- On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030 *Andrae et Edler 2015*[*Andrae et Edler 2015* p.38]
- Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations *Belkhir et Elmeligi 2018*[*Belkhir et Elmeligi 2018* p.38]
- The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015 *Malmodin et Lundén 2018*[*Malmodin et Lundén 2018* p.39]
- Pour une sobriété numérique *Shift Project 2018*[*Shift Project 2018* p.39]
- Impacts environnementaux du numérique en France *GreenIT France 2021*[*GreenIT France 2021* p.38]
- Le numérique en Europe : une approche des impacts environnementaux par l'analyse du cycle de vie *GreenIT Europe 2021*[*GreenIT Europe 2021* p.38]

Des méthodes et des résultats tous approximatifs

- On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030 *Andrae et Edler 2015*[*Andrae et Edler 2015* p.38]
    - facteurs d'impact : consommation d'énergie (usage et production, monde)
    - méthode : estimations futures par interpollation linéaire
    - données : approximations dérivées de travaux scientifiques précédents
    - objets concernés : niveau 1 : PC, téléphones mobiles, TV ; niveau 2 : stations, switchs ; niveau 3 : servers
- Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations *Belkhir et Elmeligi 2018*[*Belkhir et Elmeligi 2018* p.38]
    - facteurs d'impact : réchauffement climatique (production et usage, monde)
    - méthode : LAF (Lifecycle Analysis footprint) basée sur l'énergie de production et d'usage ; estimations futures par interpollation linéaire et exponentielle

  - données : approximations dérivées de travaux scientifiques précédents
  - objets concernés : niveau 1 : PC, smart phones, écrans d'ordinateur, tablettes ; niveau 2 : équipements des opérateurs téléphoniques, réseaux d'entreprise, équipements clients ; niveau 3 : serveur, stockage, refroidissement
- The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015 *Malmodin et Lundén 2018*[*Malmodin et Lundén 2018* p.39]
  - facteurs d'impact : réchauffement climatique (Suède)
  - méthode : ACL
  - données : chiffres nationaux, données de partenaires industriels, approximations, peu de données sur la fin de vie
  - objets concernés : niveau 1 : PC, routeurs, téléphones, téléphones mobiles, téléviseurs, boîtes internet ; niveau 2 : activités des opératuers, équipements des opérateurs ;niveau 3 : serveurs ; plus activité du secteur des médias et du divertissement
- Pour une sobriété numérique *Shift Project 2018*[*Shift Project 2018* p.39]
  - facteurs d'impact : énergie (usage et production, monde), réchauffement climatique (usage et production, monde), utilisation des métaux et minéraux
  - méthode : *Andrae et Edler 2015*[*Andrae et Edler 2015* p.38]
  - données : approximations dérivées de travaux scientifiques précédents
  - objets concernés : niveau 1 : PC, téléphones mobiles, tablettes, boxes internet, téléviseurs connectés, capteurs IoT ; niveau 2 : réseaux de communication (wifi et cable, transport et accés) ; niveau 3 : datacenters
- Impacts environnementaux du numérique en France *GreenIT France 2021*[*GreenIT France 2021* p.38]
  - facteurs d'impact : énergie (usage et production, France), réchauffement climatique (usage et production, France), utilisation des métaux et minéraux (usage et production, France), consommation en eau (usage et production, France)
  - méthode : ACV
  - données : base de données negaoctet (aujourd'hui incluse dans la Base Impacts de l'ADEME), estimations
  - objets concernés : niveau 1 : ordinateurs, téléphones, téléviseurs, tablettes, consoles de jeu, imprimantes, objets connectés ; niveau 2 : boxes, passerelles réseaux, routeurs, bornes wifi, réseau opérateur (core network) ; niveau 3 : serveurs, équipements, refroidissement, générateurs, batteries
- Le numérique en Europe : une approche des impacts environnementaux par l'analyse du cycle de vie *GreenIT Europe 2021*[*GreenIT Europe 2021* p.38]
  - facteurs d'impact : PEF (Europe)
  - méthode : ACV
  - données : base de données negaoctet (aujourd'hui incluse dans la Base Impacts de l'ADEME), estimations
  - objets concernés : niveau 1 : PC, téléphones mobiles, téléphones fixes, tablettes, téléviseurs, consoles de jeux, box TV, imprimantes, objets connectés ; niveau 2 : boxes, passerelles réseaux, routeurs, bornes wifi, réseau opérateur (core network) ; niveau 3 : serveurs, équipements, refroidissement, générateurs, batteries

Complément

Dans le meilleur des cas, ces méthodes ne donnent que des approximations à manipuler avec précaution, à cause du manque de données et des approximations et incertitudes dans les méthodes. Exemple : différence de 16% entre les estimations du ShiftProject et de GreenIT sur la consommation d'électricité finale mondiale annuelle par le numérique en 2019 (ShiftProject : 4181 TWh d'énergie finale ; GreenIT : 6800 TWh d'énergie primaire, soit 4850 TWh d'énergie finale en utilisant un taux de conversion moyen de 2018 de 1,4 *Min. Trans. Ecol. - Energie 2021*[*Min. Trans. Ecol. - Energie 2021* p.41]). *Nextinpact - Mesures 2023*[*Nextinpact - Mesures 2023* p.41] ;*Shift Project 2021*[*Shift Project 2021* p.39]