



HAL
open science

Référentiel de connaissances pour un numérique éco-responsable

Pierre Boulet, Sylvain Bouveret, Aurélie Bugeau, Frenoux Emmanuelle, Julien Lefevre, Anne-Laure Ligozat, Kevin Marquet, Philippe Marquet, Olivier Michel, Olivier Ridoux

► To cite this version:

Pierre Boulet, Sylvain Bouveret, Aurélie Bugeau, Frenoux Emmanuelle, Julien Lefevre, et al.. Référentiel de connaissances pour un numérique éco-responsable. [Rapport de recherche] EcoInfo. 2020. hal-02954188

HAL Id: hal-02954188

<https://hal.science/hal-02954188>

Submitted on 30 Sep 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Référentiel de connaissances pour un numérique éco-responsable

GDS CNRS EcoInfo

P. Boulet*, S. Bouveret†, A. Bugeau‡, E. Frenoux§, J. Lefevre¶,
A-L. Ligozat||, K. Marquet,**Ph. Marquet,††O. Michel‡‡O. Ridoux§§

30 septembre 2020

Table des matières

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | Introduction | 3 |
| 1.1 | Objectif | 3 |
| 1.2 | Nécessité de développer ces enseignements | 3 |
| 1.3 | Liens avec des référentiels de compétences | 3 |
| 1.4 | Lecture de ce référentiel | 4 |
| 2 | Contexte | 4 |
| 2.1 | Nécessité d'un développement soutenable | 4 |
| 2.1.1 | Enjeux environnementaux | 4 |
| 2.1.2 | Prise de conscience de ces impacts | 4 |
| 2.2 | Ressources | 5 |
| 2.2.1 | Les ressources primaires | 5 |
| 2.2.2 | L'énergie | 5 |
| | Différentes sources d'énergie | 5 |
| | L'électricité | 6 |
| | Transition énergétique | 6 |
| 2.3 | Le système économique et productif mondial | 6 |
| | Découplage économie-impacts environnementaux | 6 |
| | Croissance verte | 7 |
| | Quelques spécificités de l'économie numérique | 7 |
| 2.4 | Le secteur numérique | 7 |
| 2.4.1 | Évolution du secteur du numérique | 7 |
| 2.4.2 | Infrastructure numérique | 8 |
| | Datacentres | 8 |
| | Infrastructures réseaux | 8 |

*Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9189, Laboratoire CRIStAL

†Univ. Grenoble-Alpes, Grenoble-INP, Ensimag, Laboratoire LIG, CNRS, UMR 5217

‡Univ. Bordeaux, Bordeaux INP, CNRS, Laboratoire LaBRI.

§Université Paris-Saclay, CNRS, ENSIIE, Laboratoire LIMSI.

¶Univ. Aix-Marseille, dépt Informatique et Interactions, Institut de Neurosciences de la Timone, CNRS, UMR 7289 ||Univ. Paris-Saclay, CNRS, ENSIIE, LIMSI. **Coordinatrice** **Univ. Lyon, INSA Lyon, Inria, Laboratoire CITI. **Coordinateur** ††Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9189, Laboratoire CRIStAL. ‡‡Univ. Paris-Est Créteil, Laboratoire LACL. §§Univ. Rennes, ISTIC, Laboration IRISA, CNRS.

| | |
|---|-----------|
| Terminaux | 8 |
| 2.4.3 Usages | 8 |
| 3 Comprendre : les impacts environnementaux du numérique | 8 |
| 3.1 Impacts directs | 9 |
| Types d'impact | 9 |
| Impact par étape du cycle de vie | 9 |
| Impact par type de matériel (infrastructure numérique) | 9 |
| Impact par type d'usage | 10 |
| 3.2 Effets socio-environnementaux indirects | 10 |
| Effets positifs | 10 |
| Effets négatifs | 10 |
| Autres effets à prendre en compte | 11 |
| 3.3 Autres types d'impact : sociaux, géopolitiques... | 11 |
| Aspects géopolitiques | 11 |
| Impact sur la santé | 12 |
| 3.4 Évolution des impacts du numérique | 12 |
| Technologies en devenir | 12 |
| 4 Agir : mesurer les impacts | 12 |
| 4.1 Méthodologies | 13 |
| Analyse de cycle de vie attributionnelle (ACV-A) | 13 |
| Analyse de cycle de vie conséquentielle (ACV-C) | 13 |
| Bilan carbone | 13 |
| Autres méthodologies | 13 |
| 4.2 Outils et indicateurs de mesure de consommation électrique | 13 |
| Indicateurs | 14 |
| Outils de mesure de puissance | 14 |
| Outils logiciels | 14 |
| Outils de mesure en ligne | 14 |
| Données sur les supercalculateurs | 14 |
| 5 Agir : vers un numérique éco-responsable | 14 |
| 5.1 Des services numériques moins impactants | 15 |
| Politique numérique durable | 15 |
| Fabriquer des solutions et services numériques durables | 15 |
| 5.2 Normes et labels liés au numérique | 16 |
| Normes ISO | 16 |
| Labels/certifications | 16 |
| Règlementations | 17 |
| 5.3 Le numérique au service de l'écologie | 17 |
| 5.3.1 Des outils pour une meilleure compréhension du monde | 17 |
| 5.3.2 Des outils pour moins se déplacer | 17 |
| 5.3.3 Des outils pour mieux contrôler les ressources | 18 |
| 5.3.4 Des outils pour mieux partager | 18 |
| 5.3.5 Bénéfices socio-environnementaux des dispositifs numériques : éléments de réflexion | 18 |
| 5.4 Pourquoi et comment les organisations peuvent-elles intégrer les impacts du numérique ? | 19 |
| 6 Quelques acteurs du numérique responsable | 19 |
| 6.1 Développement durable, transitions, énergie... | 19 |
| 6.2 Numérique responsable | 19 |
| 6.3 Acteurs étudiants et/ou ingénieurs | 20 |

| | |
|---------------------------|----|
| 7 Exemples de compétences | 20 |
| 8 Conclusion | 20 |

1 Introduction

1.1 Objectif

L'objectif de ce document est de définir un référentiel/socle de connaissances commun pour les enseignements sur le numérique responsable (impacts du numérique et comment les limiter¹), à destination de formations en informatique ou d'autres filières incluant des cours d'informatique.

Nous cherchons à répondre à la question suivante :

Quelles connaissances devrait apporter une formation en informatique à des étudiantes et étudiants pour leur permettre d'apporter des réponses aux enjeux environnementaux et sociétaux dans leur vie professionnelle et citoyenne ?

Ce document est donc focalisé sur les impacts du numérique, mais certains aspects plus généraux (enjeux environnementaux, contexte économique...) sont néanmoins abordés car nécessaires à la compréhension des aspects informatiques.

Ce référentiel vise à fournir des notions et références utiles, mais n'a pas vocation à remplacer un cours.

1.2 Nécessité de développer ces enseignements

Le [Manifeste étudiant pour un enseignement supérieur durable de 2015](#), le [Manifeste étudiant pour un Réveil écologique](#) ou les [Consultations nationales étudiantes](#) du Réseau des Étudiants Français pour le Développement Durable (REFEDD) montrent que les étudiantes et étudiants sont en attente forte d'enseignements prenant en compte les enjeux environnementaux.

Or, selon le [rapport du Shift Project sur l'enseignement supérieur pour le climat de 2018](#), « l'offre est largement insuffisante, avec seulement 11 % des formations qui abordent actuellement les enjeux climat-énergie de manière obligatoire. »

Nous pensons que les ressources pédagogiques concernant les enjeux du numérique spécifiquement sont actuellement trop peu nombreuses, et espérons aider à les développer avec ce référentiel.

1.3 Liens avec des référentiels de compétences

Nous avons choisi d'aborder le problème par l'angle des connaissances, c'est-à-dire des savoirs indispensables dans les formations en informatique, car il nous semble que la difficulté à mettre en œuvre un programme sur cette thématique est un point potentiellement bloquant. Nous considérons en outre que les compétences attendues dans les formations visées dépendent des objectifs de ces formations. Nous donnons néanmoins quelques exemples de compétences pouvant être associées à chaque grand thème abordé. Enfin, il est possible de s'appuyer sur des documents existants pour les compétences. En particulier, le [Guide de compétences DD&RS de la CGE et CPU](#) indique 5 compétences transversales pour les enseignements liés au DD&RS : la prise en compte des changements, l'exercice de sa responsabilité, la vision prospective intégrant les incertitudes, la coopération et l'intégration d'approches systémiques. Le [référentiel de compétence européen e-CF v3.0](#), qui vise à répertorier les compétences mises en œuvre dans les projets liés aux technologies de l'information et de la communication, comprend également une compétence liée spécifiquement au développement durable « Planifier - Développement durable », qui cherche à définir les compétences nécessaires pour mettre en œuvre une politique numérique éco-responsable en entreprise.

1. La notion de «numérique est elle-même discutée plus loin dans ce document

1.4 Lecture de ce référentiel

Aborder la dimension écologique du numérique nécessite de brosser un panorama thématique très large. Ce référentiel n'est qu'une proposition de structuration pour aborder ce large champ d'études, que chacun ou chacune peut adapter selon ses souhaits.

Dans chaque sous-domaine, une introduction replace ce sous-domaine dans le contexte, quelques notions sont détaillées, et quelques pointeurs sont donnés pour creuser le domaine. Ces pointeurs sont normalement tous des sources d'information de bonne qualité sauf quand ils renvoient à une simple page Wikipedia dont nous laissons le soin de l'exploration au lecteur ou à la lectrice. Dans tous les cas, les pointeurs donnés ne sont pas exhaustifs. Le site web d'EcoInfo pourra également fournir de nombreuses informations, en particulier dans les [pages Ressources](#), et sur la page listant les [formations abordant les aspects environnementaux du numérique](#).

2 Contexte

Dans cette partie, sont décrites les connaissances de base à avoir pour appréhender le rôle du numérique vis-à-vis de l'écosystème. La présentation va du plus général (enjeux écologiques) au plus particulier (secteur du numérique).

Ces connaissances peuvent être plus ou moins approfondies et faire l'objet d'éventuels TD/TP en fonction de la formation et de la spécialité du public visé. Il appartient à chacun ou chacune de s'approprier ces thématiques en fonction de ses objectifs.

2.1 Nécessité d'un développement soutenable

Parler des enjeux écologiques de nos sociétés nécessite de définir, dans les grandes lignes, ce que sont leurs impacts environnementaux, et la façon dont ils ont été traités avec une perspective historique.

2.1.1 Enjeux environnementaux

Pour réaliser la nécessité d'aller vers un développement humain soutenable écologiquement, il faut comprendre un minimum de notions autour de l'écologie, et de ce qu'on appelle environnement.

Notions :

- La notion d'impact environnemental
- Indicateurs pour l'air : changement climatique, gaz à effet de serre, acidification, formation d'ozone troposphérique, appauvrissement de la couche d'ozone...
- Indicateurs pour l'eau : écotoxicité, eutrophisation des eaux, consommation d'eau...
- Diminution des ressources : consommation d'énergie primaire, épuisement des ressources non renouvelables...
- Aspects systémiques des enjeux environnementaux

[1] Page wikipédia : Impact environnemental. https://fr.wikipedia.org/wiki/Impact_environnemental.

[2] Page wikipédia : Limite planétaire. https://fr.wikipedia.org/wiki/Limites_planétaires.

[3] Thomas Ansart Benoît Martin Patrice Mitrano Antoine Rio François Gemenne, Aleksandar Rankovic. *Atlas de l'Anthropocène*. Presses de Sciences Po, 2019.

[4] EcoInfo Pierre-Yves Longaretti. Enjeux environnementaux : Changements globaux, limites planétaires et risques d'effondrement. https://ecoinfo.cnrs.fr/wp-content/uploads/2019/10/ANF2019_EnjeuxEnvironnementaux-Autrans-PYL-1.pdf, 2019. URL : https://ecoinfo.cnrs.fr/wp-content/uploads/2019/10/ANF2019_EnjeuxEnvironnementaux-Autrans-PYL-1.pdf.

2.1.2 Prise de conscience de ces impacts

La prise de conscience des impacts environnementaux est ancienne et différentes notions et principes ont été introduits pour la conceptualiser.

- La notion de développement durable/soutenable

- Les notions (controversées) de transitions écologique/énergétique/environnementale
 - éléments historiques
- Les concepts de limite planétaire et d'anthropocène
- Indicateurs principaux : empreinte carbone vs. inventaire national
- Autres indicateurs : empreinte écologique, indicateur de développement humain...

- [1] Université virtuelle environnement et développement durable. <https://www.uved.fr/>.
- [2] Fabrice Flipo. Les trois conceptions du développement durable. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, 5(3), 2014.
- [3] Florence Rodhain. Changer les mots à défaut de soigner les maux? Critique du Développement Durable. *Revue Française de Gestion*, (176) :pp.203-209, 2007. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00834024>, doi:10.3166/RFG.176.203-209.
- [4] Will Steffen, Wendy Broadgate, Lisa Deutsch, Owen Gaffney, and Cornelia Ludwig. The trajectory of the anthropocene : The great acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1) :81-98, 2015. URL : <https://doi.org/10.1177/2053019614564785>, arXiv:<https://doi.org/10.1177/2053019614564785>, doi:10.1177/2053019614564785.

2.2 Ressources

Les infrastructures numériques sont fabriquées à l'aide de matériaux – ou ressources primaires – et alimentées en énergie. Il est donc important d'avoir une compréhension minimale de ces notions pour appréhender les enjeux environnementaux du numérique.

2.2.1 Les ressources primaires

Les ressources primaires utilisées pour bâtir les infrastructures numériques sont très diverses mais les notions importantes à connaître les concernent toutes.

Notions :

- La formation des ressources minières se fait sur le temps long.
- Les notions de réserve et de ressources sont importantes pour appréhender le risque de rupture.
- L'extraction des ressources minières nécessite de l'énergie. Celle-ci évolue au fil des ans en fonction de 1) les progrès techniques 2) la concentration de minerai dans le sol.
- Les procédés d'extraction provoquent divers types de pollution.
- Les ressources primaires proviennent des quatre coins du monde, parfois de zones en conflit.
- Notre capacité de recyclage des ressources minières est limitée.

- [1] Le portail français des ressources minérales non énergétiques. <http://www.mineralinfo.fr/>.
- [2] Page wikipédia : ressource minérale. https://fr.wikipedia.org/wiki/Ressource_minérale.

2.2.2 L'énergie

Il faut de l'énergie pour fabriquer et faire fonctionner les infrastructures numériques. Il est donc nécessaire d'avoir un minimum de connaissances sur sa production pour appréhender les aspects écologiques de ces infrastructures.

Différentes sources d'énergie *Informations sur les différents types d'énergie et sa production dans un pays.*

Notions :

- Énergie primaire, énergie secondaire, énergie finale, mix énergétique, vecteur énergétique.
- Rendement, taux de retour énergétique, pertes énergétiques
- Indépendance énergétique d'un pays (et taux de retour associé)
- L'énergie en France : production, consommation
- L'énergie dans le monde : production, consommation

- [1] Les chiffres clés de l'énergie – Édition 2018. <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/les-chiffres-clés-de-lenergie-edition-2018>.
- [2] Toutes les données de l'électricité en temps réel - éco2mix. <https://www.rte-france.com/eco2mix>.
- [3] Chiffres clés de l'énergie. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-09/datalab-59-chiffres-clés-energie-edition-2019-septembre2019.pdf>, 2019.
- [4] Marc Jedliczka Thierry Salomon and Yves Marignac. *Le Manifeste négaWatt*. Actes Sud / Association négaWatt, 2015.

L'électricité *L'électricité est une source d'énergie secondaire. Sa production peut se faire à partir de diverses énergies primaires et donc engendrer divers niveaux de pollution.*

Notions :

- Les différences de production et de consommation d'électricité en France et dans le monde
- Grandeurs physiques : tension, intensité, puissance, charge et unités associées ; parallèle entre un circuit électrique et un circuit d'eau parallèle
- Mix électrique
- Indicateur : équivalent carbone par kg (kgCO₂e / kWh)

- [1] La production d'électricité. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/production-delectricite>.
- [2] Toutes les données de l'électricité en temps réel - éco2mix. <https://www.rte-france.com/eco2mix>.

Transition énergétique *La transition énergétique est un des outils les plus souvent évoqués pour réduire les émissions de GES.*

Notions importantes :

- Transition énergétique
- Scénarios de transition énergétique
- Limites des scénarios de transition énergétique

- [1] Scénario négaWatt 2017-2050. <https://negawatt.org/ScenarionegaWatt-2017-2050>, 2017.
- [2] Les scénarios Énergie climat 2030-2050. <https://www.ademe.fr/lademe/priorites-strategiques-missions-lademe/scenarios-2030-2050>, 2019.

2.3 Le système économique et productif mondial

Le déploiement et la maintenance des infrastructures numériques se fait dans un système économique et productif mondialisé très complexe. Appréhender les aspects écologiques du numérique et comment les améliorer ne peut se faire qu'en comprenant ce système globalement.

Découplage économie-impacts environnementaux *La possibilité d'avoir une croissance économique mondiale mais une soutenabilité environnementale fait largement débat. Au mieux, on observe dans certains pays un découplage relatif (l'intensité écologique par unité de production économique diminue).*

Notions :

- Découplage absolu, découplage relatif
- Économie de service
- Délocalisation des émissions

- [1] Decoupling debunked : Evidence and arguments against green growth as a sole strategy for sustainability, 2019. URL : <https://eeb.org/library/decoupling-debunked/>.
- [2] Gaël Giraud and Zeynep Kahraman. How Dependent is Growth from Primary Energy ? The Dependency ratio of Energy in 33 Countries (1970-2011), December 2014. Documents de travail du Centre d'Economie de la Sorbonne 2014.97 - ISSN : 1955-611X. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01151590>.
- [3] E. Sanyé-Mengual, M. Secchi, S. Corrado, A. Beylot, and S. Sala. Assessing the decoupling of economic growth from environmental impacts in the european union : A consumption-based approach. *Journal of Cleaner Production*, 236 :117535, 2019. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619323431>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.010>.
- [4] James D. Ward, Paul C. Sutton, Adrian D. Werner, Robert Costanza, Steve H. Mohr, and Craig T. Simmons. Is Decoupling GDP Growth from Environmental Impact Possible? *PLOS ONE*, 11(10) :1–14, 10 2016. URL : <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164733>, doi:[10.1371/journal.pone.0164733](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164733).

Croissance verte *La croissance verte est un concept dénommant une politique économique par laquelle une croissance économique est assurée par des investissements dans des secteurs de l'économie permettant une transition écologique. Le secteur numérique est souvent fortement associé à ce concept dont la pertinence est controversée.*

- [1] Green growth and sustainable development. <https://www.oecd.org/greengrowth/>.
- [2] L. Chancel, D. Demailly, H. Waisman, and C. Guivarch. Une société post-croissance pour le xxie siècle - peut-on prospérer sans attendre le retour de la croissance? 2013. URL : <https://www.iddri.org/fr/publications-et-evenements/study/une-societe-post-croissance-pour-le-xxie-siecle-peut-prosperer>.

Quelques spécificités de l'économie numérique *Dans le système productif mondial, le secteur numérique a quelques spécificités, qui jouent un rôle sur les impacts environnementaux du secteur.*

Notions :

- Économie de l'attention
- Publicité numérique : profilage, tracking, formats ; écrans dans l'espace public
- Enjeux géopolitiques autour du numérique : données, manipulation de l'information
- Contenus open-source vs. propriétaires

- [1] Jérémy Bonvoisin, Jahnvi Krishna Galla, and Sharon Prendeville. Design principles for do-it-yourself production. In Giampaolo Campana, Robert J. Howlett, Rossi Setchi, and Barbara Cimatti, editors, *Sustainable Design and Manufacturing 2017*, pages 77–86, Cham, 2017. Springer International Publishing.
- [2] Yves Citton. *L'économie de l'attention. Nouvel horizon du capitalisme ?* La Découverte, 2014. URL : <https://www.cairn.info/l-economie-de-l-attention--9782707178701.htm>.
- [3] Robert J Gordon. Interpreting the “one big wave” in US long-term productivity growth. In *Productivity, technology and economic growth*, pages 19–65. Springer, 2000.
- [4] Bruno Patino. *La civilisation du poisson rouge*. Grasset, 2019.
- [5] Monique Sonego, Márcia Elisa Soares Echeveste, and Henrique Galvan Debarba. The role of modularity in sustainable design : A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 176 :196 – 209, 2018. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617330561>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.106>.

2.4 Le secteur numérique

Avant d'en aborder les impacts environnementaux, il est utile de connaître la situation du secteur du numérique aujourd'hui.

2.4.1 Évolution du secteur du numérique

Qu'est-ce qu'un appareil numérique ? Comment ces appareils ont-ils évolué depuis les années 1950 ?

Notions :

- Circuits et appareils numériques.
- Évolution des appareils numériques : de l'ENIAC de 1945 aux multiples appareils d'aujourd'hui ; rapports de prospective (rapport Nora-Minc, sommets SMSI), dynamique actuelle du secteur numérique.

- [1] Emmanuel Lazard and Pierre Mounier-Kuhn. *Histoire illustrée de l'informatique*. EDP Sciences, 2016.
- [2] John F. Wakerly. *Digital Design : Principles and Practices (5th Edition)*. Pearson, 2018.

2.4.2 Infrastructure numérique

Le numérique repose aujourd'hui sur une infrastructure matérielle que l'on peut décomposer en trois parties : centres de calcul, réseaux, terminaux.

Datacentres

- Définition d'un datacentre (taille, machines utilisées, services rendus...).
- Localisations et propriétaires des datacentres.

Infrastructures réseaux

- Réseaux filaires : ethernet, ADSL, fibre optique...
- Réseaux sans-fil : 3G, 4G, 5G, LTE, Wi-Fi, satellite, bluetooth...
- Fonctionnement des réseaux : routage, débits, latences...
- Acteurs : fournisseurs d'accès, consortiums de déploiement, régulateurs, associations...

Terminaux

- Information et communication : téléphones, ordinateurs portables, ordinateurs fixes, écrans...
- Divertissement et multimédia : consoles, TV, imprimantes, vidéoprojecteurs...

- [1] Larry Peterson Bruce Davie. *Computer Networks : A Systems Approach (6th edition)*. Morgan Kaufmann, 2020.
- [2] James Kurose and Keith Ross. *Computer Networking : A Top-Down Approach (7th Edition)*. Pearson, 2016.

2.4.3 Usages

L'infrastructure numérique permet une variété d'usages au travers de différents mécanismes : communiquer, (s')informer, calculer, produire des données.

- [1] Stéphane Bortzmeyer. *Cyberstructure : Internet, un espace politique*. C & F Éditions, 2019. URL : <https://cyberstructure.fr/>.
- [2] Dominique Cardon. *Culture numérique*. Presses de Sciences Po, 2019. URL : <https://www.cairn.info/culture-numerique--9782724623659.htm>.

3 Comprendre : les impacts environnementaux du numérique

Il s'agit ici de présenter les différents types d'impacts environnementaux du numérique : quels sont les ressources ou phénomènes sur lesquels le numérique a un impact direct, et quels sont les effets systémiques du numérique, c'est-à-dire en quoi l'utilisation du numérique peut-elle avoir des effets sur les autres secteurs de la société ?

- [1] Frans Berkhout and Julia Hertin. Impacts of information and communication technologies on environmental sustainability : Speculations and evidence. *Report to the OECD, Brighton*, 21, 2001. URL : <http://www.oecd.org/sti/inno/1897156.pdf>.
- [2] Groupe EcoInfo. *Impacts écologiques des technologies de l'information et de la communication*. EDP sciences, 2012.
- [3] Kevin Marquet, Jacques Combaz, and Françoise Berthoud. Introduction aux impacts environnementaux du numérique. In *1024, bulletin de la Société Informatique de France*, pages 85–97. April 2019. URL : <https://hal.inria.fr/hal-02410129>.

3.1 Impacts directs

La fabrication, le transport et l'alimentation d'appareils sont des sources de consommation de ressources et de pollutions diverses. Ces impacts dits directs sont dûs à l'existence physique de ces appareils.

Notions importantes pour toute cette section :

- Périmètre technologique (les différentes études ne tiennent pas compte des mêmes appareils)
- Incertitudes des études (voir aussi les méthodologies de calcul des impacts en section 4.1)

Types d'impact *Comme vu en Section 2.1.1, les impacts environnementaux peuvent être divers. Cette section détaille les différents types d'impact imputables aux appareils numériques.*

Notions :

- Émissions de gaz à effet de serre
- Pollution des sols (phtalates...) et des eaux
- Ressources minérales : concentration dans le sous-sol ; épuisement ; réserves ; énergie d'extraction ; limites thermodynamiques ; évolution dans le temps
- Comparaison de l'impact du numérique avec d'autres secteurs

- [1] Critical raw materials. https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en.
- [2] Le portail français des ressources minérales non énergétiques. <http://www.mineralinfo.fr/>.
- [3] Origine et décomposition par produit de l'empreinte carbone de la France en 2018, 2020. URL : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-02/1-empreinte-carbone-des-francais-2-janvier2020.xls>.
- [4] Carbone 4. Sur les 5 dernières années, l'empreinte carbone des Français a stagné, 2013. URL : <http://www.carbone4.com/sur-les-5-dernieres-annees-lempreinte-carbone-des-francais-a-stagne/>.
- [5] Liliane Dedryve. La consommation de métaux du numérique : un secteur loin d'être dématérialisé, 2020. URL : <https://www.strategie.gouv.fr/publications/consommation-de-metaux-numerique-un-secteur-loin-detre-dematerialise>.
- [6] Shift Project. Lean ICT – pour une sobriété numérique. Technical report, The Shift Project, 2018. URL : <https://theshiftproject.org/article/pour-une-sobriete-numerique-rapport-shift/>.

Impact par étape du cycle de vie *Étudier l'impact par étape du cycle de vie permet, entre autres, de se rendre compte que la production électrique destinée à l'usage des appareils numériques n'est pas du tout le seul facteur important dans les impacts directs.*

Notions :

- Notion de cycle de vie
- Particularité du numérique : l'impact de la fabrication est important
- Gestion de la fin de vie (déchets électroniques) particulière : recyclage limité, filières dédiées

- [1] *Les impacts écologiques des technologies de l'information et de la communication*. EDP Sciences, 2012.
- [2] Ademe. Rapport annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques. données 2018., 2018.
- [3] Cornelis P. Balde, Vanessa Forti, Vanessa Gray, Ruediger Kuehr, and Paul Stegmann. The global e-waste monitor 2017 : Quantities, flows and resources. 2017. URL : <https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Pages/Global-E-waste-Monitor-2017.aspx>.

Impact par type de matériel (infrastructure numérique) *Il existe des études quantifiant les impacts de chaque partie de l'infrastructure numérique (cf. Section 2.4.2).*

Notions :

- Amélioration technologique (évolution dans le temps des impacts)
- Évolution rapide (nouveaux usages, nouveaux appareils, nouvelles technologies)
- Impact et spécificités de chacune des trois grandes parties du numérique (cf. Section 2.4.2) :
 - Terminaux : remplacement rapide des appareils, taux d'équipement personnel en hausse.
 - Datacentres : le refroidissement des bâtiments est un facteur important.
 - Réseaux : attention à l'indicateur eqCO2/GB transféré qui peut laisser penser que l'impact du transfert est proportionnel à la quantité de données transmises.

- [1] La face cachée du numérique, 2019. URL : <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-face-cachee-numerique.pdf>.
- [2] Anders S. G. Andrae and Tomas Edler. On Global Electricity Usage of Communication Technology : Trends to 2030. 6(1) :117–157. URL : <https://www.mdpi.com/2078-1547/6/1/117>, doi:10.3390/challe6010117.
- [3] Cisco. Cisco visual networking index : Forecast and trends, 2017–2022 white paper. Technical report, Cisco, February 2019. Document ID :1551296909190103. URL : <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>.
- [4] Jens Malmudin and Dag Lundén. The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. 10(9) :3027. URL : <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/9/3027>, doi:10.3390/su10093027.
- [5] Shift Project. Lean ICT – pour une sobriété numérique. Technical report, The Shift Project, 2018. URL : <https://theshiftproject.org/article/pour-une-sobriete-numerique-rapport-shift/>.

Impact par type d’usage *Les types d’usage des technologies numériques sont extrêmement variés. Il est nécessaire d’étudier l’impact environnemental de chacun pour espérer construire une soutenabilité.*

Notions :

- Usages finaux (consommateurs) vs. intermédiaires (entreprises)
- Usages « information et communication » vs. « loisirs et multimédia »
- Sous-domaine technologique : IA, 5G, pub internet, vidéo etc.

- [1] EcoInfo. Impact environnemental de l’IA, 2019. URL : <https://ecoinfo.cnrs.fr/2019/10/01/impact-environnemental-de-lia/>.
- [2] Kerry Hinton. https://www.cesc.kth.se/polopoly_fs/1.648200.1550158552!/KTHCESCMay2016.pdf, 2016.
- [3] Jens Malmudin and Dag Lundén. The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. 10(9) :3027. URL : <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/9/3027>, doi:10.3390/su10093027.
- [4] M. Pärssinen, M. Kotila, R. Cuevas, A. Phansalkar, and J. Manner. Environmental impact assessment of online advertising. *Environmental Impact Assessment Review*, 73 :177 – 200, 2018. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925517303505>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.08.004>.
- [5] Shift Project. Lean ICT – pour une sobriété numérique. Technical report, The Shift Project, 2018. URL : <https://theshiftproject.org/article/pour-une-sobriete-numerique-rapport-shift/>.

3.2 Effets socio-environnementaux indirects

Le numérique a un impact sur l’environnement autrement que par les pollutions liées à la fabrication et la consommation électrique des appareils : les usages numériques transforment les secteurs et ces transformations ont des effets positifs et négatifs du point de vue écologique.

Effets positifs

Notions :

- Effets de substitution (exemple : remplacement du papier)
- Effet d’optimisation (exemple : allumage des lampes sur détection de présence)

- [1] Lorenz Hilty and Bernard Aebischer. *ICT Innovations for Sustainability*. Springer, 2015. URL : https://www.researchgate.net/publication/274075759_ICT_Innovations_for_Sustainability, doi:10.1007/978-3-319-09228-7.
- [2] Arman Shehabi, Ben Walker, and Eric Masanet. The energy and greenhouse-gas implications of internet video streaming in the united states. *Environmental Research Letters*, 9(5) :054007, may 2014. URL : <https://doi.org/10.1088/2F1748-9326/2F9/2F5/2F054007>, doi:10.1088/1748-9326/9/5/054007.

Effets négatifs

Notions :

- Effets induits (exemple sur le télétravail : suréquipement, chauffage en hausse, pièces en plus)

- Effets rebonds : lorsque l'amélioration de l'efficacité d'une technologie amène à une consommation accrue. L'effet rebond est une illustration du fameux *paradoxe de Jevons*. Si la quantification précise de cet effet rebond est délicate et sujette à de nombreuses controverses, il a en revanche été observé en pratique dans de nombreux domaines.
- Obsolescences programmées logicielles et matérielles : technique, indirecte, par incompatibilité, psychologique, écologique

- [1] L'obsolescence programmée ou les dérives de la société de consommation, 2013. URL : https://www.europe-consommateurs.eu/fileadmin/user_upload/eu-consommateurs/PDFs/publications/etudes_et_rapports/Etude-Obsolescence-Web.pdf.
- [2] Jacques Combaz. Introduction aux effets indirects et rebond des TIC, 2019. URL : https://ecoinfo.cnrs.fr/wp-content/uploads/2019/10/2019-09-26_ANF.pdf.
- [3] William Stanley Jevons. *The coal question : an inquiry concerning the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal-mines*. Macmillan London, 1866.
- [4] Serge Latouche. *Bon pour la casse*. Les liens qui libèrent, 2012.
- [5] Mathias Rollot. *L'Obsolescence : ouvrir l'impossible*. MétisPresses, 2016. URL : <http://journals.openedition.org/critiquedart/25686>.
- [6] Giles Slade. *Made to break*. Harvard University Press, 2007.
- [7] Steven Sorrell. The rebound effect : an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency. Technical report, UK Energy Research Centre., 2007. URL : <http://www.ukerc.ac.uk/asset/3B43125E-EEBD-4AB3-B06EA914C30F7B3E/>.
- [8] David Font Vivanco. Rethinking climate and energy policies : new perspectives on the rebound phenomenon. *Transport Reviews*, 37(6) :810–813, 2017. URL : <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1307878>, doi:10.1080/01441647.2017.1307878.

Autres effets à prendre en compte *Les usages numériques provoquent des changements civilisationnels complexes, ayant des impacts écologiques difficiles à appréhender.*

- Accélération des flux
- Retard à la décision dû à la surcharge informationnelle
- Complexité grandissante

- [1] Jacques Ellul. *Le bluff technologique (1988)*. Fayard/Pluriel, 2012.
- [2] Hartmut Rosa. *Aliénation et accélération. Vers une théorie critique de la modernité tardive*. La Découverte.
- [3] Hartmut Rosa. *Accélération*. La Découverte, 2010.
- [4] Will Steffen, Wendy Broadgate, Lisa Deutsch, Owen Gaffney, and Cornelia Ludwig. The trajectory of the anthropocene : The great acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1) :81–98, 2015. URL : <https://doi.org/10.1177/2053019614564785>, arXiv:<https://doi.org/10.1177/2053019614564785>, doi:10.1177/2053019614564785.
- [5] Joseph Tainter. *The collapse of complex societies*. Cambridge university press, 1988.

3.3 Autres types d'impact : sociaux, géopolitiques...

Les impacts écologiques sont souvent indissociables de certains autres impacts, par exemple géopolitiques.

Aspects géopolitiques

Aspects géopolitiques sur la dépendance aux métaux rares/terres rares pour l'économie du numérique et l'exploitation restreinte à un petit nombre de pays

- [1] Liliane Dedryve. La consommation de métaux du numérique : un secteur loin d'être dématérialisé, 2020. URL : <https://www.strategie.gouv.fr/publications/consommation-de-metiaux-numerique-un-secteur-loin-detre-dematerialise>.
- [2] Guillaume Pitron. *La guerre des métaux rares, La face cachée de la transition énergétique et numérique*. Les liens qui libèrent, 2018.

Impact sur la santé

Les outils numériques ont un impact sur la santé : sédentarité, addiction, troubles du développement, chronobiologie

- [1] Léo Favier (Arte). Dopamine. <https://www.arte.tv/fr/videos/RC-017841/dopamine/>, 2019.
- [2] Royal Society for Public Health. Social media and young people's mental health and wellbeing. <https://www.rsph.org.uk/static/uploaded/d125b27c-0b62-41c5-a2c0155a8887cd01.pdf>, 2017.

3.4 Évolution des impacts du numérique

Au-delà de l'impact du numérique à un moment donné, il est nécessaire de comprendre la dynamique d'évolution du secteur dans un contexte où une diminution drastique des impacts écologiques est préconisée par le GIEC.

Notions :

- Développement de l'infrastructure numérique : nombre d'équipements, volumes des données...
- Part croissante des émissions de GES mondiale
- Améliorations techniques : efficacité, intensité, loi de Moore et loi de Koomey, PUE, autonomie des batteries, principe de Landauer etc.
- Prédications vs. projections. Les projections effectuées à partir des modèles ne doivent pas être considérées comme des prédictions. Ils ne capturent, loin s'en faut, pas toute la complexité des évolutions socio-techniques.
- Scénarios prospectifs pour le numérique : connaître et critiquer les scénarios prospectifs incluant un volet numérique : SMART 2020 et 2030 du GeSI, BIO Intelligence Service 2008, Shift, Fing, Ademe, etc.

- [1] Cisco. Cisco visual networking index : Forecast and trends, 2017–2022 white paper. Technical report, Cisco, February 2019. Document ID :1551296909190103. URL : <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>.
- [2] Jens Malmudin and Dag Lundén. The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. 10(9) :3027. URL : <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/9/3027>, doi:10.3390/su10093027.
- [3] Shift Project. Lean ICT – pour une sobriété numérique. Technical report, The Shift Project, 2018. URL : <https://theshiftproject.org/article/pour-une-sobriete-numerique-rapport-shift/>.

Technologies en devenir *De nombreuses nouvelles technologies, bâties à l'aide d'infrastructures numériques, sont en cours de mise ou point ou de déploiement. L'impact environnemental n'est aujourd'hui pas pris en compte dans les processus décidant de leur déploiement.*

Notions :

- Nouvelles technologies : IA, 5G, véhicule autonome, Internet des Objets
- Progrès technique

- [1] EcoInfo. Impact environnemental de l'IA. <https://ecoinfo.cnrs.fr/2019/10/01/impact-environnemental-de-lia/>, 2019.
- [2] Hugues Ferreboeuf. Faut-il faire la 5G ? <https://jancovici.com/publications-et-co/articles-de-presse/faut-il-faire-la-5g/>, 2020.
- [3] Gauthier Roussilhe. La controverse de la 5G. <https://gauthierroussilhe.com/fr/projects/controverse-de-la-5g>, 2020.
- [4] Roy Schwartz, Jesse Dodge, Noah A Smith, and Oren Etzioni. Green AI. *arXiv preprint arXiv :1907.10597*, 2019. URL : <https://arxiv.org/abs/1907.10597>.

4 Agir : mesurer les impacts

Il s'agit ici de montrer comment mesurer les impacts du numérique, à différents niveaux (service numérique, établissement...), avec différents critères (émissions de gaz à effet de serre et autres)...

4.1 Méthodologies

Comme pour n'importe quel domaine, de nombreuses méthodologies peuvent être utilisées pour mesurer, au moyen de divers indicateurs (cf. Section 2), l'impact environnemental d'un appareil ou un service numérique, chacune ayant ses avantages et ses limites.

Notions communes :

- Indicateurs écologiques (cf. Section 2)
- Facteur d'impact

Analyse de cycle de vie attributionnelle (ACV-A)

(Ademe) L'ACV recense et quantifie, tout au long de la vie des produits, les flux physiques de matière et d'énergie associés aux activités humaines. Elle en évalue les impacts potentiels puis interprète les résultats obtenus en fonction de ses objectifs initiaux.

- [1] Qu'est-ce que l'acv ? <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv>.

Analyse de cycle de vie conséquentielle (ACV-C)

(Wikipédia) L'ACV-C inclut également les processus affectés indirectement par la mise en place du cycle de vie du produit étudié ou par son changement.

- [1] Consequential lca, why and when ? <https://consequential-lca.org/clca/why-and-when/>.

Bilan carbone Un bilan d'émissions de gaz à effet de serre permet de réaliser un diagnostic des émissions de gaz à effet de serre sur une année d'une personne morale (entreprise, organisation...) en vue d'identifier et de mobiliser les gisements de réduction de ces émissions. Il peut également être réalisé pour un système d'information par exemple. Le terme Bilan Carbone désigne un ensemble « méthode + outil + facteurs d'émission + documentation associée » diffusé par l'ADEME, qui en a fait une marque déposée.

Autres méthodologies

- Coût carbone
- Étude d'impact
- Multi regional input output analysis (MRIO)

- [1] Page wikipedia de : étude d'impact. https://fr.wikipedia.org/wiki/étude_d'impact.
- [2] Méthode pour la réalisation des bilans d'émissions de gaz à effet de serre conformément à l'article l. 229-25 du code de l'environnement. version 4., 2016. URL : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Guide%20m%C3%A9thodologique%20sp%C3%A9cifique%20pour%20les%20collectivités%20locales%20pour%20la%20r%C3%A9alisation%20du%20bilan%20d%E2%80%99%C3%A9missions%20de%20GES.pdf>.
- [3] Pierre André, Georges Lanmafankpotin, Jean-Pierre Revéret, and Samuel Yonkeu. *L'évaluation des impacts sur l'environnement : Processus, acteurs et pratique pour un développement durable*. (4e édition). 2020.
- [4] Decun Wu and Jinping Liu. Multi-regional input-output (mrio) study of the provincial ecological footprints and domestic embodied footprints traded among china's 30 provinces. *Sustainability*, 8(12), 2016. URL : <https://www.mdpi.com/2071-1050/8/12/1345>.

4.2 Outils et indicateurs de mesure de consommation électrique

À partir de mesures de consommation, il est possible d'établir un diagnostic.

Notions :

- un instrument, ou outil, de mesure permet d'observer et plus précisément de mesurer (quantifier une grandeur physique) une grandeur issue d'un capteur

- instruments et outils de mesure peuvent être logiciels ou matériels
- un indicateur : donne une information à partir de mesures. Permet de donner du sens à des mesures, en fonction d'un objectif.
- diagnostic : aspect qualitatif des mesures et indicateurs

Indicateurs

- PUE (*Power Usage Effectiveness*)
- Grandeurs électriques, équivalent carbone (cf. 2.2.2)

Outils de mesure de puissance

- PDU, wattmètres, ampèremètres
- Paramètres de ces outils : fréquence d'échantillonnage, précision, multi-prises, actionnables à distance...

- [1] Amélie Bohas, Françoise Berthoud, and Gabrielle Feltin. Normes numériques et Green IT, 2019. URL : https://ecoinfo.cnrs.fr/wp-content/uploads/2019/10/ANF2019_Normes-num%C3%A9riques_GabrielleFeltin.pdf.
- [2] Laurent Lefevre. Impact du numérique : focus sur les consommations en phase d'usage. https://ecoinfo.cnrs.fr/wp-content/uploads/2019/10/ANF_2019_Autrans_EcoInfo_Laurent_Lefevre_diffuse.pdf, 2019.

Outils logiciels

- PowerAPI
- Intel Power Gadget
- Mac Power Meter, permet la comparaison logiciel/wattmètre (en développement)

- [1] Intel power gadget. <https://software.intel.com/content/www/us/en/develop/articles/intel-power-gadget.html>.
- [2] Mac power meter. <https://gitlab.inria.fr/guenneba/mac-power-meter/-/tree/master>.
- [3] Powerapi. <https://pypi.org/project/powerapi/>.

Outils de mesure en ligne *Plusieurs outils en ligne permettent de mesurer l'impact d'une page web et éventuellement d'effectuer un diagnostic. Attention, la méthodologie de calcul n'est pas toujours la même et certains outils sont critiqués pour leur imprécision.*

- Carbonalyser : une extension au navigateur calculant le carbone émis pendant un temps d'utilisation du navigateur.
- Ecometer : analyse l'impact environnemental d'un site web.
- Ecoindex : analyse l'impact environnemental d'un site web.

- [1] Github de l'extension carbonalyser. <https://github.com/carbonalyser/Carbonalyser>.
- [2] Site web ecoindex. <http://www.ecoindex.fr/>.
- [3] Site web ecometer. <http://www.ecometer.org/>.

Données sur les supercalculateurs Top 500 est un projet d'évaluation des 500 plus gros supercalculateurs en termes de performances sur des benchmarks d'analyse numérique. Depuis 2007 il existe aussi un classement Green 500 qui évalue l'efficacité énergétique. Des données sont disponibles sur [le site Top500.org](http://www.top500.org).

5 Agir : vers un numérique éco-responsable

Dans cette partie sont présentés plusieurs aspects d'un numérique éco-responsable : dans un premier temps, comment appliquer des critères environnementaux au numérique (Green IT) et dans un deuxième temps, comment le numérique peut contribuer au développement durable (IT for Green).

Notions :

- Green IT, IT for Green (et IT for Good), numérique responsable...
- éco-conception (matérielle et logicielle)

[1] Bordage, Frédéric and Chaussat, Jean-Christophe. Du Green IT au numérique responsable, Lexique des termes de référence. Technical report, ClubGreenIT, 2018. URL : https://club.greenit.fr/doc/2018-05-ClubGreenIT-lexique-numerique_responsable-v1.8.3.pdf.

5.1 Des services numériques moins impactants

Dans cette section, nous présentons des méthodes et outils permettant de mettre en place un numérique plus respectueux de l'environnement, de diverses façons (analyse de l'impact, optimisation de solutions, méthodes d'implémentation). Nous abordons également le cadrage de ces bonnes pratiques par diverses normes et labels.

Politique numérique durable *La politique numérique durable se traduit par l'intégration des facteurs environnementaux dans les décisions, en interne et en externe (fournisseurs, sous-traitants...).*

- Stratégie informatique durable par exemple avec association des DSI dans les décisions
- Gestion de la transition
- Formation, sensibilisation et communication
- Engagement avec les partenaires, fournisseurs... vers des solutions et services durables

[1] Transition numérique et pratiques de recherche et d'enseignement supérieur en agronomie, environnement, alimentation, sciences vétérinaires à l'horizon 2040, 2019. URL : https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/prospective-transition-numerique-dans-l-esr-rapport-pdf-1_0.pdf.

[2] Institut du Numérique Responsable. *Le petit livre bleu - Référentiel Green IT*. 2020. URL : <https://institutnr.org/wp-content/uploads/2020/06/2020-v3-65-bonnes-pratiques-greenit.pdf>.

Fabriquer des solutions et services numériques durables *En interne, application d'une démarche d'éco-conception des solutions et services numériques pour lutter contre l'obsolescence programmée.*

Notions :

- infrastructure
 - mise en commun des ressources
 - prolongation de la durée de vie (réparation, réutilisation) et bonne gestion de la fin de vie des équipements (recyclage)
- applications :
 - avant : analyse des besoins réels (numérique ou pas, low tech ? quelles fonctionnalités sont essentielles ?) ; choix des langages, bibliothèques, plateformes, format de données...
 - pendant : analyses de code, mesure de performance...
 - après : systèmes de mise en veille, sensibilisation des utilisateurs et utilisatrices, gestion durable des mises à jour...

[1] CIGREF. Du Green IT au Green by IT, Exemples d'application dans les Grandes Entreprises. <https://www.cigref.fr/wp/wp-content/uploads/2017/01/CIGREF-Du-Green-IT-au-Green-by-IT-2017.pdf>, 2017.

[2] Peter Henderson, Jieru Hu, Joshua Romoff, Emma Brunskill, Dan Jurafsky, and Joelle Pineau. Towards the systematic reporting of the energy and carbon footprints of machine learning, 2020. [arXiv:2002.05651](https://arxiv.org/abs/2002.05651).

Sur le low tech :

[1] Low tech : face au tout-numérique, se réapproprié les technologies. <https://www.ritimo.org/Low-tech-face-au-tout-numerique-se-reappropriier-les-technologies-8264>, 2020.

[2] Gauthier Roussilhe. Guide de conversion numérique au low tech. <http://gauthierroussilhe.com/fr/posts/convert-low-tech>, 2019.

Exemple de comparaison de langages de programmation, à prendre toujours avec des pincettes :

- [1] Rui Pereira, Marco Couto, Francisco Ribeiro, Rui Rua, Jácome Cunha, João Paulo Fernandes, and João Saraiva. Energy efficiency across programming languages : how do energy, time, and memory relate? In *Proceedings of the 10th ACM SIGPLAN International Conference on Software Language Engineering*, pages 256–267, 2017.

5.2 Normes et labels liés au numérique

Il existe très peu de dispositifs contraignants à l'heure actuelle sur l'éco-conception mais la réglementation tend à s'étoffer.

L'article ci-dessous propose une vision thématique avec pour chaque enjeu du Green IT (analyse du cycle de vie, écoconception, labels, déchets d'équipements électriques et électroniques, infrastructures numériques) une revue des normes, législations, règlements, lorsqu'ils existent :

- [1] Amélie Bohas, Françoise Berthoud, Gabrielle Feltin, et al. Norme numérique et green IT. *Normaliser le numérique ?*, page 22, 2019.

Normes ISO *À l'heure actuelle il n'existe pas de normes pour certifier d'un numérique éco-responsable, mais certaines peuvent s'appliquer en partie au numérique.*

Les normes de type 140xy concernent le management environnemental. Elles ne sont donc pas spécifiques au numérique mais celui-ci est mentionné comme champ d'application possible, par exemple via les logiciels. Les normes ISO 14040 et 14044 touchent aux analyses de cycle de vie. Les normes ISO 14006 et ISO 14062 ont traité à l'éco-conception en général. Les ecolabels sont aussi spécifiés par les normes ISO 14020-25, avec différents niveaux d'exigence.

Exemple d'application de la norme ISO 14001 chez IBM, avec des économies d'énergie et le retraitement du matériel en fin de vie :

- [1] ISO. IBM s'appuie sur ISO 14001 pour le développement durable. <https://www.iso.org/fr/news/2015/11/Ref2015.html>, 2015.

Concernant les datacenters on trouve un certain nombre de normes (ISO/IEC 30134-n) sur des indicateurs comme le PUE ou le REF (renewable energy factor).

De manière connexe on peut enfin mentionner la norme ISO 25010 pour la qualité logicielle.¹

Labels/certifications La distinction entre certifications et labels se fait essentiellement sur la base de l'existence d'une tierce partie qui attribue la certification ou non. On distingue :

- Des ecolabels officiels, certifiés par la norme ISO 14024 : Blue Angel (s'applique au matériel informatique, créé en 1978), ecolabel européen, TCO (éco-label suédois qui couvre le matériel), Energy Star, Cygne Blanc (conception durable des produits)
- Des auto-déclarations environnementales qui relèvent de l'ISO 14021 : Les critères sont définis par les groupes d'intérêt qui les conçoivent. Exemples : EPEAT (23 critères obligatoires et des critères optionnels), ECMA.

On peut noter aussi un certain nombre d'initiatives françaises :

- le label Greencode² est dédié à l'écoconception des sites web. Il permet de fournir une certification pour des sites web sur une durée de 2 ans.
- la certification proposée par le collectif Conception Numérique Responsable³ n'est pas attribuée à des sites web, mais à des développeurs, sur la base d'un QCM.
- Le label Numérique Responsable, lancé en juin 2019, s'adresse aux organisations.

Parmi les acteurs qui réalisent des certifications on peut avoir des sociétés très généralistes (Bureau Veritas), d'autres spécialisées dans les enjeux du numérique sobre (Greenspector) ou encore des groupes issus de la recherche publique (EcoInfo pour les datacenters).

1. On peut se référer à la page <https://latavernedutesteur.fr/tag/iso-25010/> pour plus de détails.

2. <https://label.greencodelab.org/> 3. <https://collectif.greenit.fr/certification.html>

Règlementations¹

- La gestion des DEEE s’inscrit en partie dans le cadre international défini par la convention de Bâle (1989) qui vise à réduire plus généralement la circulation de déchets dangereux. Au niveau européen on trouve la directive 2012/19/UE sur le traitement des DEEE et le règlement CE 660/2014 sur le transfert de déchets.
- Pour l’utilisation de substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques, les directives européennes RoHS 1 (2002) et RoHS 2 (2017) permettent le respect du règlement REACH (2006).
- La directive EuP (Energy using Products de 2005 puis 2009), sur la consommation électrique.
- Législation française et européenne en matière d’obsolescence programmée. Directive 2006/66/EC sur l’inamovibilité des batteries.
- En termes d’approvisionnement responsable en minerais de zone de conflit : partie XV de la loi Dodd-Frank aux USA (2010), Règlement UE 2017/821 (Etain, Tantale, Tungstène) contraignant à partir de 2021.

- [1] Amélie Bohas. *Vers une analyse de la relation systèmes d’information, développement durable et responsabilité sociale d’entreprise : l’adoption et l’évaluation du Green IT*. PhD thesis, 2013. Thèse de doctorat dirigée par Bouzidi, Laïd et Chappoz, Yves Sciences de gestion Lyon 3 2013. URL : <http://www.theses.fr/2013LY030076>.
- [2] Amélie Bohas, Françoise Berthoud, and Gabrielle Feltin. Normes numériques et Green IT, 2019. URL : https://ecoinfo.cnrs.fr/wp-content/uploads/2019/10/ANF2019_Normes-num%C3%A9riques_GabrielleFeltin.pdf.
- [3] EcoInfo. Les normes de la communication environnementale. URL : <https://ecoinfo.cnrs.fr/2012/08/09/les-normes-de-la-communication-environnementale/>.
- [4] EcoInfo. Pages sur les aspects législatifs. URL : <https://ecoinfo.cnrs.fr/category/les-thematiques/aspects-legislatifs/>.
- [5] Romuald Priol. Le numérique responsable, Normes, labels, certifications et outils, 2020. URL : https://ecoinfo.cnrs.fr/wp-content/uploads/2020/04/INSA_2020_Le-numerique-responsable_normes.pdf.

5.3 Le numérique au service de l’écologie

Le numérique peut être mis au service de l’écologie, par exemple en simulant le réchauffement planétaire pour le comprendre. Cette partie discute des principes, forces et faiblesses de l’IT for Green.

5.3.1 Des outils pour une meilleure compréhension du monde

Une meilleure compréhension du monde relève de la démarche scientifique classique avec des hypothèses, de la modélisation, des simulations, qui amènent à des prédictions puis d’éventuelles prises de décision, comme dans 5.3.3.

- Différents domaines d’application du numérique permettent des avancées écologiques :
- la modélisation de divers phénomènes environnementaux pour les comprendre.
 - la simulation de ces phénomènes
 - la modélisation et la simulation en vue de faire des prévisions voire des prédictions

- [1] Climate Change AI initiative. URL : <https://www.climatechange.ai>.
- [2] David Rolnick, Priya L Donti, Lynn H Kaack, Kelly Kochanski, Alexandre Lacoste, Kris Sankaran, Andrew Slavlin Ross, Nikola Milojevic-Dupont, Natasha Jaques, Anna Waldman-Brown, et al. Tackling climate change with machine learning. *arXiv preprint arXiv :1906.05433*, 2019.
- [3] Ricardo Vinuesa, Hossein Azizpour, Iolanda Leite, Madeline Balaam, Virginia Dignum, Sami Domisch, Anna Felländer, Simone Daniela Langhans, Max Tegmark, and Francesco Fuso Nerini. The role of artificial intelligence in achieving the sustainable development goals. *Nature communications*, 11(1) :1–10, 2020.

5.3.2 Des outils pour moins se déplacer

Nous donnons une place particulière aux outils numériques permettant de moins se déplacer, étant donné le poids des transports dans les impacts environnementaux.

En particulier, la visioconférence pour les conférences permet d’éviter de nombreux déplacements.

1. Un point rapide sur les actes juridiques et leur priorité dans le cadre européen https://europa.eu/european-union/eu-law/legal-acts_fr.

- [1] Nelson N Gichora, Segun A Fatumo, Mtakai V Ngara, Noura Chelbat, Kavisha Ramdayal, Kenneth B Opap, Geoffrey H Siwo, Marion O Adebisi, Amina El Gonnouni, Denis Zofou, et al. Ten simple rules for organizing a virtual conference—anywhere. *PLoS computational biology*, 6(2), 2010.
- [2] Ken Hiltner. A nearly carbon-neutral conference model, 2016. URL : <http://hiltner.english.ucsb.edu/index.php/ncnc-guide/>.

5.3.3 Des outils pour mieux contrôler les ressources

Le plus souvent, les espoirs placés dans le numérique, concernant une réduction des impacts environnementaux, sont liés à un meilleur contrôle des ressources permis par certains traitements automatiques. Un exemple basique est de n'allumer les lumières que quand quelqu'un passe.

- amélioration des réseaux d'énergie
- amélioration de l'efficacité des véhicules
- bâtiments intelligents, meilleur tri des déchets, optimisation des flux de personnes et de marchandises etc.

Mêmes références que 5.3.1

5.3.4 Des outils pour mieux partager

Il existe toute une partie de l'économie numérique visant à accroître la collaboration et le partage entre les personnes. L'espoir des uns est que cette frange de l'économie permette par effet de bord de favoriser les dispositifs de la transition écologique. La crainte des autres est qu'aucun dispositif numérique ne soit à la hauteur des enjeux environnementaux.

- Economie collaborative (plateformes d'échanges de biens, de services...).
- Dispositifs et applications numériques « encapacitants » (permettant aux gens de communiquer, collaborer, etc., par exemple conférences organisées entièrement à distance¹).
- Économie des blockchains : certaines crypto-monnaies seraient moins impactantes que les monnaies fiduciaires, la transparence apportée dans le domaine de la chaîne d'approvisionnement pourrait conduire à des gains par optimisation.
- Tiers-lieu : fab-lab, maisons de l'inclusion numérique.

5.3.5 Bénéfices socio-environnementaux des dispositifs numériques : éléments de réflexion

Malgré le potentiel souvent mis en avant du numérique pour aller vers un monde soutenable, les effets sont peu ou pas visibles, ce qui donne matière à réflexion.

- La sobriété numérique n'apparaît toutefois pas très clairement et l'apport du numérique n'est pas visible à cause d'effets indirects complexes 3.2.
- On en sait assez, depuis longtemps, sur l'écosystème planétaire. Produire de la connaissance n'est plus une justification suffisante pour inventer, déployer des services et infrastructures sans se demander quel est leur impact environnemental et surtout si les moyens débloqués pour ceux-ci ne seraient pas plus utiles ailleurs.
- Produire des biens et services (numériques) pour le grand public est impactant. On pourrait imaginer que les inventions dans le domaine du numérique ne servent que des causes ayant du sens écologiquement. Mais ce n'est bien sûr pas si simple. Le grand public permet de financer les innovations, et l'innovation sert la compétition économique entre pays. Quel manière d'innover sans vendre au grand public ? Quel impact sur la compétition économique ?

- [1] Matthieu Amiech. Peut-on s'opposer à l'informatisation du monde ?, 2020. URL : <https://www.terrestres.org/2020/06/01/peut-on-sopposer-a-linformatisation-du-monde/>.

1. <http://hiltner.english.ucsb.edu/index.php/ncnc-guide/>

5.4 Pourquoi et comment les organisations peuvent-elles intégrer les impacts du numérique ?

A priori les « organisations » sont incluses dans leur diversité (orga-diversité, Graham & Gibson) : entreprises, associations, collectivités, etc, même si certains points pourront être spécifiques à certains types d'organisations.

Notions :

- Théories d'adoption du Green IT
- Types de pression : coercitives (réglementations, législation, mécanismes incitatifs), mimétiques (pressions des concurrents), normatives (ONG, associations professionnelles), contexte environnemental
- Maturité du Green IT
- Objectifs de durabilité

[1] Amélie Bohas. *Vers une analyse de la relation systèmes d'information, développement durable et responsabilité sociale d'entreprise : l'adoption et l'évaluation du Green IT*. PhD thesis, 2013. Thèse de doctorat dirigée par Bouzidi, Laïd et Chappoz, Yves Sciences de gestion Lyon 3 2013. URL : <http://www.theses.fr/2013LY030076>.

6 Quelques acteurs du numérique responsable

De nombreux acteurs s'intéressent aujourd'hui aux impacts du numérique ou aux domaines connexes. Ils ont des différents points de vue, différentes méthodes, différents types de discours et de façon de travailler.

6.1 Développement durable, transitions, énergie...

Des acteurs ne travaillant pas forcément que sur le domaine numérique

- [Agence de la transition écologique \(ADEME\)](#) : de nombreuses ressources
 - y compris sur le numérique responsable, comme la brochure [La face cachée du numérique](#)
- [Ministère de la transition écologique](#) : informations et chiffres pour la France
- [The Shift Project](#) : association think tank qui œuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone
 - un [axe de travail sur le numérique responsable](#)
- [Institut du Développement Durable et des Relations Internationales](#), think tank, auteur notamment du [Livre blanc numérique et environnement](#)
- [International Energy Agency](#) : organisation internationale dans le cadre de l'OCDE
 - avec notamment des travaux sur [l'énergie et le numérique](#)
- [Greenpeace](#) : organisation non gouvernementale internationale pour protéger l'environnement et promouvoir la paix
 - nombreux articles sur le numérique, comme par exemple les rapports [Clicking Clean](#)
- [World Wildlife Fund \(WWF ou Fonds mondial pour la nature\)](#) : organisation non gouvernementale internationale, vouée à la protection de l'environnement et au développement durable
 - s'associe notamment au Club Green IT pour des études sur le numérique responsable

6.2 Numérique responsable

Plusieurs organismes travaillent spécifiquement sur le numérique.

- [GreenIT.fr](#) : communauté d'acteurs du numérique responsable
- [Institut du Numérique Responsable](#) : think & do tank issu du Club Green IT : lieu de réflexion sur le numérique responsable
- [association pour la Fondation d'un Internet Nouvelle Génération \(Fing\)](#) : think & do tank de référence sur les transformations numériques

- et [EcoInfo](#) évidemment : groupement CNRS de personnel de l'enseignement supérieur et de la recherche pour un numérique responsable
 - en particulier, une [liste de formations abordant les aspects environnementaux de l'informatique](#) a été créée

6.3 Acteurs étudiants et/ou ingénieurs

Les réseaux étudiants et ingénieurs ont également pris connaissance des enjeux.

- [REseau Français Étudiant pour le Développement Durable \(REFEDD\)](#) : réseau des associations étudiantes qui œuvrent pour des campus durables.
 - plusieurs initiatives sur le numérique, par exemple la [fiche « Le numérique responsable sur les campus »](#) en association avec Ecosia
- [Manifeste étudiant pour un réveil écologique](#) : pour « inciter tous les acteurs de la société – les pouvoirs publics, les entreprises, les particuliers et les associations – à jouer leur rôle dans cette grande transformation et à mener les changements nécessaires vers une société enfin soutenable »
 - [Plateforme enseignement](#), avec de nombreuses ressources
- [Ingénieurs engagés](#)
 - groupe [Changer les formations](#), et discussions discord sur le numérique
- [Ingénieurs sans frontières](#)
 - projets « [Transformer les Formations](#) » et « [Former L'Ingénieur Citoyen](#) »

7 Exemples de compétences

Nous listons ci-dessous quelques exemples de compétences qui peuvent être associées aux connaissances présentées. Ces compétences sont évidemment à adapter en fonction de la formation visée.

- Comprendre les impacts du numérique
- Effectuer un calcul de mix énergétique pour différents pays
- Comparer différents scénarios de transition énergétique
- Décrire les forces et faiblesses d'un scénario de transition énergétique et son impact sur le numérique
- Effectuer une analyse de cycle de vie attributionnelle d'un appareil
- Effectuer une analyse de cycle de vie attributionnelle d'un service numérique
- Identifier les facteurs de consommation sur une page web, dans un logiciel...
- Comparer la consommation instantanée de différents appareils numériques
- Comparer la consommation de plusieurs services numériques
- Être capable de déterminer les impacts directs et indirects d'une technologie
- ...

8 Conclusion

Nous espérons que ce document vous a été utile et n'hésitez pas à nous communiquer toute remarque ou tout encouragement, ainsi qu'à nous faire part de votre utilisation de ce document !