

Calculs de l'impact environnemental net de l'utilisation des TIC pour l'optimisation ou la substitution d'un processus

Mémoire présenté par

David Ekchajzer

Pour l'obtention du Master 1 MIAGE

De l'Université

Paris 1 Panthéon - Sorbonne

Année universitaire : **2020 - 2021**

Date de soutenance : **3 septembre 2021**

Directeur de mémoire : **Nicolas Herbaut**

Membre du jury : **Rebecca Deneckere**

Table des matières

Remerciements	5
Abstract	6
1. Introduction.....	7
1.1 Contexte	7
1.2 Enjeux	8
1.3 Objectifs.....	9
1.4 Définitions	10
2. Méthodologie	11
2.1 Travaux similaires.....	11
2.2 Processus.....	11
2.3 Planning	14
2.3.1 Définir l'utilité et les motivations pour une telle étude	14
2.3.2 Définir le but de la MLR	15
2.3.3 Etablir la question de recherche	15
2.4 Conducting.....	16
2.4.1 Etablir les sources de données	16
2.4.2 Etablir les mots clefs.....	16
2.4.3 Effectuer la recherche dans les sources de données	17
2.4.4 Etablir les critères d'inclusion et d'exclusion	17
2.4.5 Etablir les critères d'évaluation de qualité.....	18
2.4.6 Biais potentiels et limites	20
3. Résultats	20
3.1 Typologies d'impacts	22
3.1.1 Impacts négatifs et positifs.....	23
3.1.2 Impacts directs et indirects	24
3.2 Impacts négatifs directs.....	26
3.2.1 L'analyse de cycle de vie.....	26
3.2.2 Surcouches méthodologiques	27
3.2.3 Stratégies d'inventaire	29
3.2.4 Limites énoncées	30
3.3 Effets d'abattement directs.....	32
3.3.1 Typologies d'impact d'abattement directs.....	32
3.3.3 Mesure naïve.....	33

3.3.3 Cas de l'optimisation et de la substitution partielle.....	34
3.3.4 Vue statique vs vue temporelle.....	36
3.4 Effets rebonds	38
3.4.1 Enjeux	38
3.4.2 Définitions et classifications	39
3.4.3 Intégration de la modélisation dynamique à l'ACV.....	40
3.4.4 Utilisation d'outils transdisciplinaires	41
3.5 Utilisation de la mesure.....	42
3.5.1 Dans le cadre d'une éco-conception	42
3.5.2 Autres utilisations.....	43
4. Conclusion	46
5. Limites et futurs développements	48
Sources	49

Table des figures

Figure 1 - Répartition par type de sources	22
Figure 2 - Classification des impacts de la littérature étudiée	25
Figure 3 - Classification des impacts retenus	25
Figure 4 - Etapes du cycle de vie d'un produit	26
Figure 5 - Relation entre les équipements, les réseaux et les services informatiques, ETSI/ITU	28
Figure 6 – Mesure naïve de l'impact de l'envoi d'une information de 10 Mo	34
Figure 7 - Mesure de l'impact de la livraison de 19 t de produits du Havre à Paris en camion	35
Figure 8 - Mesure de l'impact de la lecture d'un article	35
Figure 9 - Différence entre vue statique et vue temporelle	37
Figure 10 - Framework d'éco-conception, Jeremy Bonvoisin & al.....	43
Figure 11 - Framework d'intégration de la mesure dans un système holistique, Anand Raju & al.	44
Figure 12 - Affichage environnemental de la page d'accueil du site www.livingpackets.com, septembre 2020	44
Figure 13 - Framework de classification des méthodes de mesure des impacts environnementaux de systèmes informatiques visant à réduire l'impact environnemental de processus polluants	47

Table des équations

Équation 1	33
Équation 2	34
Équation 3	35
Équation 4	37
Équation 5	38

Table des tableaux

Tableau 1 - Guidelines from Garousi & Al.	13
Tableau 2 - Questions to decide whether to include the GL in software engineering reviews from Garousi & Al.....	15
Tableau 3 - Critères d'inclusion et d'exclusion.....	18
Tableau 4 - Littérature étudiée	22
Tableau 5 - Classification des effets rebond dans le cadre des TIC de Börjesson Rivera et al. appliqué aux processus	40

Remerciements

Je tiens à remercier mon tuteur, Nicolas Herbaut, qui m'a poussé à fournir un travail ambitieux, ainsi que toute l'équipe pédagogique de l'UFR27 pour son engagement auprès de ses étudiants.

Je remercie chaleureusement Stéphanie Le Brusq, Olivier Marechal, ainsi que toute l'équipe d'OM conseil, qui me permettent d'effectuer mes travaux de recherche dans un environnement optimal.

Je tiens également à remercier les organisateurs de la conférence des doctorants de la SIF et les organisateurs de l'Université d'été du GreenIT, qui m'ont permis de présenter mon projet de recherche à d'autres acteurs académiques et professionnels.

Abstract

La mise en place de TIC pour réduire l'impact environnemental de processus ne peut pas être évaluée par la simple économie d'impact permise par les technologies mises en œuvre. Il existe aujourd'hui un standard développé par l'ETSI et l'ITU, qui tente de donner un cadre méthodologique pour évaluer l'impact environnemental net (négatif et positif) des équipements et des services informatiques. Cependant, plusieurs travaux ont permis de mettre en lumière d'autres types d'impacts ou de préciser l'évaluation des impacts connus. À notre connaissance, ces différents cadres méthodologiques n'ont pas été compilés à ce jour. Cette recherche se propose de comparer les différents cadres méthodologiques existant dans la littérature académique, ainsi que dans la littérature grise par le biais d'une Multivocal Literature Review (MLR). L'objectif est de donner des clefs de compréhension pour le développement de futures méthodologies communes aux mondes académique et professionnel, et de permettre un choix plus éclairé des méthodologies utilisées.

Using ICTs to reduce environmental impacts of processes cannot be evaluated by simply calculating the positive effects enabled by the use of the technology. A standard was published by ETSI and ITU in 2014 trying to present a framework for the evaluation of the positive and negative environmental impacts induced using digital solutions. However, other publications have suggested other types of impacts and other strategies to evaluate them. As far as we know, no publication has compiled those methodologies. This research uses Multivocal Literature Review (MLR) to compile and compare those different frameworks from grey and academic literature. We hope it can give more knowledge to develop better methodologies shared by academics and industries.

1. Introduction

1.1 Contexte

L'Accord de Paris impose aux Etats signataires de contenir « *l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels* » [1]. Un tel engagement nécessite un changement profond des modes de production et de consommation. Les technologies de l'information et de la communication (TIC) sont souvent présentées comme vectrices de réduction de l'impact environnemental de processus (métier ou utilisateur) [2] : par la dématérialisation, comme dans le cas du passage de la musique physique au streaming [3] ou encore par l'optimisation, comme dans le domaine du smart transport [4]. Pourtant, l'impact du numérique est important. Il représentait en 2015 6,6% de la consommation électrique mondiale (sur l'ensemble du cycle de vie) [5]. Plus préoccupant, le modèle du Shift Project, créé à partir des données publiées par Andrae & Edler en 2015 [6], prévoit une augmentation de cette consommation, qui devrait atteindre 13,7% de la consommation mondiale en 2025 [5]. La majorité de l'énergie utilisée dans le monde étant carbonée, ils estimaient à 3,7% les émissions de gaz à effet de serre induits en 2018 [5], avec une croissance de 9% par an [5]. Il existe bien d'autres impacts, dont l'ampleur est difficilement estimable. Parmi eux, les impacts environnementaux locaux dus à l'extraction des métaux ou à la fabrication des terminaux et des infrastructures (pollution des cours d'eau, déplacement de masse, pollution locale de l'air...) [7]. On peut également citer les problématiques sociales induites, comme l'esclavage sur les chaînes de production [33].

Au-delà des impacts environnementaux directs des TIC, l'évolution de leurs usages est une source d'impacts non négligeable. L'optimisation d'un processus par l'utilisation de TIC peut mener à une augmentation des usages, et donc à une augmentation des impacts. C'est ce qu'on appelle l'effet rebond [8]. Un mail, par exemple, a un impact plus faible qu'une lettre. Mais l'optimisation du processus de courrier par l'utilisation des TIC a entraîné une augmentation de l'utilisation du processus. En prenant en compte l'évolution des usages (et donc l'effet rebond) dans le cas du courriel, on ne peut plus affirmer que la numérisation du courrier a eu un impact environnemental positif [9].

1.2 Enjeux

L'utilisation des TIC comme leviers de réduction des impacts environnementaux se retrouve dans les projets dits « IT for Green ». Ces projets visent à utiliser les capacités de substitution, d'optimisation ou de transmission d'information des TIC pour réduire l'impact environnemental négatif d'un processus, d'un secteur d'activité ou d'un territoire. Ce projet de recherche s'intéresse exclusivement à l'IT for Green dans le cadre de processus métier ou plus généralement de processus utilisateur.

Les projets « IT for green » affichent de façons systématique des bénéfices environnementaux positifs. Cependant, la complexité des impacts induits par l'utilisation du numérique pour réduire l'impact environnemental de processus ne peut pas être évaluée par la simple économie d'impact permise par les technologies mises en œuvre. Il n'est pas non plus possible de dire de manière générale si l'utilisation des TIC est bénéfique pour l'optimisation ou la numérisation d'un processus. Ses bénéfices potentiels dépendent de nombreux facteurs (empreinte carbone de l'énergie utilisée, matériaux utilisés, TIC utilisées, effets rebonds...). Des méthodologies plus complexes doivent être appliquées pour connaître l'impact net de l'utilisation des TIC dans un contexte spécifique.

De telles méthodologies sont nécessaires à plusieurs échelles.

À l'échelle de la recherche, elles permettent de tester des scénarios à moyen terme sur des orientations prises par les TIC, comme des nouveaux modes d'utilisation. Il est par exemple envisageable de déterminer l'intérêt environnemental du déploiement des livres électroniques (ebook) pour remplacer les livres physiques [10]. Il peut également s'agir de scénarii plus globaux, par exemple tester l'intérêt environnemental de l'utilisation des objets connectés reliés par blockchain pour suivre les impacts environnementaux des chaînes de production [11].

C'est grâce à ces recherches que la sphère politique pourra mettre en œuvre un développement planifié des TIC. Ces outils sont également un moyen d'évaluer les politiques publiques ayant pour objectif primaire ou secondaire la réduction des impacts environnementaux de la société par le biais des TIC. Cette évaluation des politiques publiques est obligatoire depuis la loi organique de 2009 [12]. L'intérêt des institutions publiques françaises concernant les impacts du numérique est croissant, à l'image de la récente proposition de loi « Réduire l'empreinte environnementale du numérique » [13] visant à

réduire l’empreinte environnementale du numérique en France. Elle crée notamment un observatoire des impacts positifs et négatifs du numérique qui pourrait mener à la création de méthodologies normalisées pour évaluer ces impacts. A l’échelle plus locale, dans le cadre des collectivités territoriales, ces méthodologies sont également nécessaires pour évaluer l’intérêt des projets de villes connectées qui ont très souvent un bénéfice environnemental affiché [14].

Enfin, à l’échelle des organisations, de telles méthodologies permettent d’évaluer les décisions stratégiques impliquant les TIC s’inscrivant dans la démarche de responsabilité sociétale des entreprises (RSE). Cela peut se décliner dans les projets informatiques ayant pour objectif primaire ou secondaire la réduction des impacts environnementaux d’un processus métier. Une évaluation est en effet nécessaire pour connaître les impacts attendus et déterminer le GO/NOGO [15][16].

1.3 Objectifs

L’objectif de cette recherche est triple.

Référencer de la manière la plus exhaustive possible les méthodologies ayant été formulées dans la littérature scientifique et la littérature grise pour calculer les impacts nets (positifs et négatifs) des projets ayant un bénéfice environnemental potentiel.

Comparer ces méthodologies pour identifier leurs limites et les futurs développements nécessaires à la création de méthodes plus fiables.

Aider au choix méthodologique dans le cadre de calculs d’impacts de systèmes ou de projets informatiques ayant pour but partiel ou total la réduction d’impact environnemental d’un processus polluant.

1.4 Définitions

Processus : Suite continue d'opérations, d'actions constituant la manière de faire, de fabriquer quelque chose [34]. Utilisé dans le présent mémoire dans le sens de procédé.

Abiotique : Se dit d'un milieu impropre à la vie. Qui ne concerne pas, ne conditionne pas la vie [35].

TIC : Technologies de l'Information et de la Communication

Processus de référence : Processus avant l'introduction d'un système utilisant les TIC pour l'optimiser ou le substituer

Processus informatique : Processus après l'introduction d'un système utilisant les TIC pour l'optimiser ou le substituer

Eco-conception : Prise en compte des critères environnementaux dans la phase de conception d'un produit [36].

2. Méthodologie

Le caractère holistique de la recherche de publications existantes implique l'utilisation de méthodologies de revue de la littérature. L'intégration de la littérature et académique et grise a mené au choix de la *Multivocal Literature Review (MLR)* pour adresser la problématique de cette recherche.

La méthode utilisée sera celle proposée par *Garousi & al.* [17] à travers les bonnes pratiques qu'ils présentent.

Comme stipulé dans la « Guideline 1 », cette MLR suit le processus d'une *Systematic Literature Review (SLR)*. Chacune des guidelines proposées seront suivies dans les étapes concernées.

Le protocole suivis est détaillé ci-après.

2.1 Travaux similaires

Bieser & al. [20] ont déjà effectué un travail similaire limité aux publications académiques. Leur SLR couvre l'ensemble des publications ayant étudié l'impact environnemental d'un processus ou d'un projet informatique. La publication s'intéresse principalement aux objets étudiés et peu aux méthodologies. En effet, seul le nom de la méthodologie est identifié pour chacune des études, ce qui ne permet pas une comparaison fine.

2.2 Processus

Comme pour une *SLR*, le processus de la *MLR* se décline en trois parties qui sont détaillées ci-après : *planning*, *conducting*, *reporting*. Dans chaque sous-étape sont rappelées les « *guidelines* » de *Garousi & al.* qui seront suivies.

Etape d'une SLR	Guideline de Garousi & Al. pour une MLR
	<p style="text-align: center;">Planning</p> <p>« <i>Guideline 2: Identify any existing reviews and plan/execute the MLR to explicitly provide usefulness for its intended audience (researchers and/or practitioners).</i> »</p> <p>« <i>Guideline 2 : Identifiez les revues de la littérature existantes et</i></p>

Définir l'utilité et les motivations pour une telle étude	planifier/exécuter la MLR dans le but explicite d'éveiller l'intérêt de l'audience cible (chercheurs et industriels) »
	<p>« <u>Guideline 3</u>: The decision whether to include the Grey Literature in a review study and to conduct an MLR study (instead of a conventional SLR) should be made systematically using a well-defined set of criteria/questions (e.g., using the criteria in "Questions to decide whether to include the Grey Literature in software engineering reviews"). »</p> <p>« <u>Guideline 3</u> : La décision d'inclure ou non la littérature grise à l'étude et de conduire une MLR (au lieu d'une SLR classique) doit être systématiquement prise sur la base de critères/questions bien définis (e.g. utiliser les critères du tableau "Questions to decide whether to include the Grey Literature in software engineering reviews"). »</p>
Définir le but de la MLR	
Etablir la question de recherche	« <u>Guideline 4</u> : Based on your research goal and target audience, define the research (or "review") questions (RQs) in a way to (1) clearly relate to and systematically address the review goal, (2) match specific needs of the target audience, and (3) be as objective and measurable as possible. »
	« <u>Guideline 4</u> : Sur la base de votre objectif et de votre audience cible, définissez les questions de recherches (QRs) de manière à (1) répondre à votre objectif de recherche, (2) répondre aux besoins spécifiques de votre audience cible tout en étant le plus objectif et mesurable possible. »
	<p>« <u>Guideline 5</u>: Try adopting various RQ types (e.g., see those in the table "A classification scheme for RQs as proposed by Steve Easterbrook & al. and examples RQs from a tertiary study") but be aware that primary studies may not allow all question types to be answered. »</p> <p>« <u>Guideline 5</u> : Essayez d'adopter différents types de QR (e.g., voir celle du tableau "A classification scheme for RQs as proposed by Steve Easterbrook & al. and examples RQs from a tertiary study") mais soyez conscient que toutes les études primaires ne permettent pas de répondre à tous les types de question.</p>
Conducting	
Etablir les sources de données	« <u>Guideline 6</u> : Identify the relevant Grey Literature types and/or Grey Literature producers (data sources) for your review study early on. »
	« <u>Guideline 6</u> : Identifier les types de littérature grise et/ou les producteurs de littérature grise (sources de données) pour l'utiliser ensuite dans votre revue de la littérature »
Etablir les mots clefs	« <u>Guideline 7</u> : General web search engines, specialized databases and websites, backlinks, and contacting individuals directly are ways to search for grey literature. »
	« <u>Guideline 7</u> : Les moteurs de recherches classiques, les bases de données et sites web spécialisés, les hyperliens ou les contacts directs de personnes individuelles sont des moyens de rechercher de la littérature grise »
Etablir les mots clefs	
Effectuer la recherche dans les sources de données	« <u>Guideline 8</u> : When searching for Grey Literature on software engineering topics, three possible stopping criteria for Grey Literature searches are : (1) Theoretical saturation, i.e., when no new concepts emerge from the search results; (2) Effort bounded, i.e., only include the top N search engine hits, and (3) Evidence exhaustion, i.e., extract all the evidence »
	« <u>Guideline 8</u> : Quand on effectue une recherche de la littérature grise en ingénierie logicielle, trois critères d'arrêts sont possibles : (1) Saturation théorique i.e., quand aucuns nouveaux concepts n'émergent des résultats (2) Limites d'effort i.e. on inclut que le top N des résultats d'un moteur de

	recherche, et (3) épuisement des preuves i.e. toutes les preuves ont été extraites »
Etablir les critères d'inclusion et d'exclusion	<p>« <u>Guideline 9:</u> Combine inclusion and exclusion criteria for grey literature with quality assessment criteria (see table "Quality assessment checklist of grey literature for software engineering"). »</p> <p>« <u>Guideline 9 :</u> Combiner l'évaluation de la qualité avec les critères d'inclusion et d'exclusion (voir table "Quality assessment checklist of grey literature for software engineering"). »</p> <p>« <u>Guideline 10:</u> In the source selection process of an MLR, one should ensure a coordinated integration of the source selection processes for grey literature and formal literature. »</p> <p>« <u>Guideline 10 :</u> Lors du processus de sélection des sources de la MLR, il est nécessaire d'assurer la compatibilité entre l'intégration de la littérature grise et de la littérature formel. »</p>
Appliquer les critères d'inclusion et d'exclusion	
Etablir les critères d'évaluation de qualité	<p>« <u>Guideline 11:</u> Apply and adapt the criteria authority of the producer, methodology, objectivity, date, novelty, impact, as well as outlet control (e.g., see Table 7), for study quality assessment of grey literature.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Consider which criteria can already be applied for source selection. • There is no one-size-fits-all quality model for all types of Grey Literature. Thus, one should make suitable adjustments to the quality criteria checklist and consider reductions or extensions if focusing on particular studies such as survey, case study or experiment. » <p>« <u>Guideline 11 :</u> Appliquer et adapté les critères d'autorité des producteurs, de méthodologie, d'objectivité, de date, de nouveauté, d'impact ainsi que le processus de contrôle à l'étude de qualité de la littérature grise.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Considérer les critères pouvant être déjà appliqué à l'étape de sélection des sources • Il n'existe pas un unique modèle d'évaluation de la qualité de la littérature grise. Il est donc nécessaire d'ajuster la checklist proposée et considérer de la réduire ou l'étendre dans le cas où l'étude s'intéresse à une typologie précise de recherche tel que les enquêtes, les cas d'usage ou les expériences. »
Evaluer la qualité des sources	
Etablir le formulaire d'extraction des données	
Extraire les données des articles sélectionnés	<p>« <u>Guideline 12:</u> During the data extraction, systematic procedures and logistics, e.g., explicit "traceability" links between the extracted data and primary sources, should be utilized. Also, researchers should extract, and record as much quantitative/qualitative data as needed to sufficiently address each RQ, to be used in the synthesis phase. »</p> <p>« <u>Guideline 12 :</u> Durant la phase d'extraction des données des procédés logistiques systématiques (e.g. liens de traçabilité entre les données extraites et la sources primaires) devrait être mis en place. Les chercheurs devraient extraire le maximum de données qualitatives et quantitatives nécessaires pour répondre de manière appropriée à chacune des QR lors de la phase de synthèse. »</p>

Tableau 1 - Guidelines from Garousi & Al.

2.3 Planning

2.3.1 Définir l'utilité et les motivations pour une telle étude

L'utilité des méthodologies auxquelles nous nous intéressons ici a été discutée en introduction.

Il existe aujourd'hui un standard développé par l'ETSI [18] et l'ITU [19], qui tente de donner un cadre méthodologique pour évaluer l'impact environnemental des équipements et des services informatiques. Cependant, plusieurs travaux ont permis de mettre en lumière de nouveaux types d'impacts ou de préciser l'évaluation des impacts connus. A notre connaissance, ces différents cadres méthodologiques n'ont aujourd'hui pas été compilés. Il est nécessaire de le faire pour que de futures méthodologies puissent capitaliser sur ces avancées.

Le choix d'intégrer la littérature grise est motivé par le fait que la question des impacts induits par le numérique est couvert autant par la littérature académique que par la littérature grise. Le standard ETSI/ITU est une référence largement citée dans les publications académiques. Les organisations gouvernementales, en particulier l'Union Européenne, s'intéressent de près à ces sujets et produisent également des publications rentrant dans le cadre de cette MLR. Nous avons répondu aux questions proposées par *Garousi & al.*, ce qui nous a permis de valider le principe d'inclusion de la littérature grise.

Question	Answer
<p><i>Is the subject “complex” and not solvable by considering only the formal literature?</i></p> <p><i>Le sujet est-il « complexe » et ne peut pas être résolu en ne considérant que la littérature formelle ?</i></p>	NO
<p><i>Is there a lack of volume or quality of evidence, or a lack of consensus of outcome measurement in the formal literature?</i></p> <p><i>Existe-t-il un manque de preuve en termes de quantité ou de qualité ou un manque de consensus sur les résultats mesurés dans la littérature formelle ?</i></p>	NO
<p><i>Is the contextual information important to the subject under study?</i></p> <p><i>Le contexte d'extraction de l'information est-il important dans le sujet traité ?</i></p>	YES
<p><i>Is it the goal to validate or corroborate scientific outcomes with practical experiences?</i></p> <p><i>L'objectif de la recherche est-il de valider ou de corroborer des théories scientifiques par l'expérience pratique ?</i></p>	NO
<p><i>Is it the goal to challenge assumptions or falsify results from practice using academic research or vice versa?</i></p> <p><i>L'objectif est-il de confronter des hypothèses résultantes de la pratique en utilisant la recherche académique ou vice versa ?</i></p>	NO
<p><i>Would a synthesis of insights and evidence from the industrial and academic community be useful to one or even both communities?</i></p> <p><i>La synthèse des perspectives et des preuves extraites de la communauté académique et industrielle serait-elle utile à l'une ou aux deux communautés ?</i></p>	YES
<p><i>Is there a large volume of practitioner sources indicating high practitioner interest in a topic?</i></p> <p><i>Y a-t-il un nombre important de sources industrielles qui indiqueraient un grand intérêt de leur part pour le sujet ?</i></p>	YES

Tableau 2 - Questions to decide whether to include the Grey Literature in software engineering reviews from Garousi & Al.

2.3.2 Définir le but de la MLR

Voir 1.3 Objectifs

2.3.3 Etablir la question de recherche

Pour une question de temps et de facilité, une seule question a été retenue. Sa formulation entre dans le cadre des *questions of design* proposé par Garousi & al. Elle est de la forme « What's an effective way to achieve X ».

**Quelle(s) méthode(s) pour calculer l'impact environnemental net de
l'utilisation des technologies de l'information et de la communication (TIC)
pour l'optimisation d'un processus ?**

2.4 Conducting

2.4.1 Etablir les sources de données

Pour garantir un haut niveau de qualité, les types de littérature suivants ont été retenus :

- La littérature académique
- Premier tiers de la littérature grise :
 - ✓ rapports d'organisations professionnelles reconnues,
 - ✓ rapports de think tanks indépendants,
 - ✓ rapports d'institutions publiques.

Deux sources de données ont été sélectionnées :

- La littérature académique via Scopus
- La littérature grise via Google.

2.4.2 Etablir les mots clefs

La recherche s'est effectuée seulement avec des mots clefs anglais

- *Impact*
- *Assessment*
- *Environmental*
- Enabling effect
- *ICT OR Information and Communication Technology*

Pour Scopus: (TITLE-ABS-KEY("Impact-Assessment") OR TITLE-ABS-KEY("assessing the environmental")) OR TITLE-ABS-KEY("ICT's enabling effect")) AND (TITLE-ABS-KEY("ICT") OR TITLE-ABS-KEY("Information and Communication Technology"))

Pour Google: (Impact-Assessment) AND (ICT) AND (environment)

2.4.3 Effectuer la recherche dans les sources de données

La stratégie d'arrêt de la recherche dépend de la source de données

- Pour la littérature académique, le traitement de l'ensemble des publications remontées via mots clefs (*Evidence exhaustion*)
- Pour la littérature grise, nous nous limitons aux 5 premières pages de recherche par limite de temps (*Effort bounded*)

Après avoir conduit les deux stratégies de recherche, le nombre de résultats pour chacune des sources est le suivant :

Pour Scopus : 188 résultats

Pour Google : 5 pages sélectionnées sur 15 pages de résultats

2.4.4 Etablir les critères d'inclusion et d'exclusion

N'ont été retenues que les publications concernant explicitement des méthodologies permettant d'évaluer l'impact induit par les TIC dans le cadre d'un processus ou d'un projet. Toutes publications traitant des impacts des TIC sur un secteur, une organisation, un territoire ou au niveau global ont été exclues. Ci-dessous, le détail des critères d'inclusion et d'exclusion. Deux types d'exclusions ont été déterminés : des critères d'exclusion, pour écarter les publications en dehors du périmètre de la recherche et des critères d'exclusion de qualité (proposé par *Garousi & al.*), pour traiter le moins de publications possibles lors de la phase d'évaluation de la qualité.

Critères d'exclusion	Critères d'exclusion de qualité	Critères d'inclusion
Evaluation de l'impact global des TIC	Publication de plus de 20 ans	Discussion sur une/des méthodologie(s)
Evaluation d'une politique et non d'un processus	Publication en dehors des sources considérées (sont utilisées les sources suivantes : publications académiques, d'organisations professionnelles reconnues, de think tanks indépendants et d'institutions publiques)	Framework
Evaluation d'un matériel et non d'un processus		Méthodologie
Publication ne mentionnant pas de méthodologies		Proposition d'amendement d'une méthodologie
Publication ne mentionnant pas de méthodologies de mesure		Standard ou norme
Publication ne traitant pas de l'impact environnemental des TIC		
Publication ne traitant pas des TIC		
Publication ni en anglais ni en français		
Publication traitant exclusivement des impacts sociaux		
Source secondaire		
Cas d'usage		

Tableau 3 - Critères d'inclusion et d'exclusion

2.4.5 Etablir les critères d'évaluation de qualité

Plusieurs critères de qualités ont été retenus :

Critères d'autorité du producteur :

- L'organisme n'a pas été épinglé pour son manque de rigueur scientifique ?
- Un auteur individuel est-il associé à l'organisation ?
- L'auteur a-t-il publié d'autres travaux dans ce domaine ?
- L'auteur a-t-il des compétences dans ce domaine ?

Critères méthodologiques :

- La source a-t-elle un objectif clairement défini ?
- La source a-t-elle défini précisément sa méthodologie ?
- La source est-elle étayée par des documents officiels, contemporains et de référence ?
- Y a-t-il des limites clairement énoncées ?
- Les pistes d'amélioration sont-elles clairement spécifiées ?
- Le travail porte-t-il sur une question spécifique ?
- Le scope d'application de la méthodologie proposé est-il clairement établi ?
- Un cas d'utilisation est-il présent dans la recherche ?
- Les éventuelles équations sont-elles détaillées ?
- Les éventuelles constantes sont-elles disponibles ?

Critères d'objectivité :

- Le travail semble-t-il être équilibré dans sa présentation ?
- La déclaration dans les sources est-elle aussi objective que possible ?
- Y a-t-il des intérêts particuliers ?
- Les conclusions sont-elles étayées par les données ?

Critères de date :

- La publication a-t-elle une date clairement indiquée ?

Critères de position par rapport aux autres sources :

- Les principales littératures grises ou sources formelles connexes ont-elles été discutées ?
- Renforce-t-elle ou réfute-t-elle une position actuelle ?

Critère de nouveauté :

- Cela enrichit-il ou ajoute-t-il quelque chose d'unique à la recherche ?

Le type de notation choisi est le suivant :

- 1, si la réponse est positive
- 0.5, si la réponse est partiellement positive
- 0, si la réponse est négative

2.4.6 Biais potentiels et limites

Le fait de limiter mes recherches aux publications en anglais et en français est également un biais, ne serait-ce que parce qu'elle exclut une partie non connue des publications. Cependant, la France est le pays le plus en avance sur les problématiques de Green IT, comme le montre le baromètre 2020 de l'AGIT [21] et l'anglais est la langue de référence pour les publications scientifiques — d'autant plus dans le milieu des TIC.

Un autre biais conséquent du critère de langue existe. En effet, les deux langues sont principalement utilisées dans des pays consommateurs de TIC plus que producteurs. Ainsi, il est possible que les méthodologies étudiées aient tendance à négliger les impacts locaux.

3. Résultats

Titre	Auteurs	Date	Description	Type de littérature
An integrated method for environmental assessment and ecodesign of ICT-based optimization services	Jeremy Bonvoison & al.	2014	A partir du cas d'usage d'un système de ramassage intelligents des déchets dans la ville de Grenoble, Bonvoisin & al. détaillent un framework itératif utilisant la mesure d'impact environnemental pour l'éco-conception de systèmes informatiques	Académique
Methodology for environmental life cycle assessments of information and communication technology goods, networks, and services	ITU & ETSI	2014	Ce standard développé conjointement par l'ETSI et l'ITU tente de donner un cadre méthodologique à l'analyse de cycle de vie dans le cadre de produits, réseaux et services informatiques.	Institution publique
LCA of ICT solutions: environmental impacts and challenges of assessment	Yevgeniya Arushanyan	2013	Ce mémoire de master 2 s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche de l'université KTH sur la mesure de l'impact environnemental des TIC dans le cadre d'une substitution. Le cas d'usage développé est la substitution de l'article papier par l'article en ligne. La publication revient sur la méthodologie employée et ses limites.	Master thesis
Evaluating the carbon reducing impacts of ICT An assessment methodology	GeSI	2010	Impulsé par plusieurs acteurs privés majeurs du numérique, le GeSI propose une méthodologie pour classifier puis évaluer les impacts d'un système numérique optimisant un système existant.	Institution privée
Exploring the Effects of ICT on Environmental Sustainability: From Life Cycle Assessment to Complex Systems Modeling	Mohammad Ahmadi Achachlouei	2015	Cette thèse doctorale s'inscrit dans le projet de KTH détaillé plus haut. A travers le cas d'usage de la presse en ligne, Mohammad Ahmadi Achachlouei, défend l'idée de l'utilisation combinée des modélisations dynamiques	Doctoral thesis
Including second order effects in environmental assessments of ICT	Miriam Börjesson Rivera & al.	2014	Cette publication identifie les différents effets rebonds induits par l'introduction d'un système numérique à travers le cas d'usage du e-commerce. Différentes pistes sont décrites pour mesurer ces effets.	Académique
A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services. Part I: Single Services	Vlad C. Coroamă & al.	2020	Cette publication reprend le travail de l'ETSI et de l'ITU en précisant certaines des recommandations. Les cas de la substitution partielle et de l'optimisation sont détaillés. Une vision temporelle est proposée. Les limites du standard de l'ETSI et l'ITU sont également discutées.	Académique
Assessing ICT's enabling effect through case study extrapolation — The example of smart metering	Jens Malmodin & al.	2016	Jens Malmodin & al. détaillent les stratégies mises en œuvre pour estimer les impacts induits par l'introduction de compteurs électriques intelligents à partir d'une étude de cas sur un nombre limité de personnes. Ils détaillent également les biais conséquents de cette extrapolation.	Académique
A Holistic Impact-Assessment Framework for Green ICT	Anand Raju & al.	2013	Le framework proposé dans cette publication donne une vue systémique des impacts induits par l'introduction d'un système informatique.	Académique

Tableau 4 - Littérature étudiée

La répartition des sources sélectionnées est également répartie entre la littérature grise et la littérature académique ce qui laisse penser à un intérêt partagé entre le monde académique et industriel.

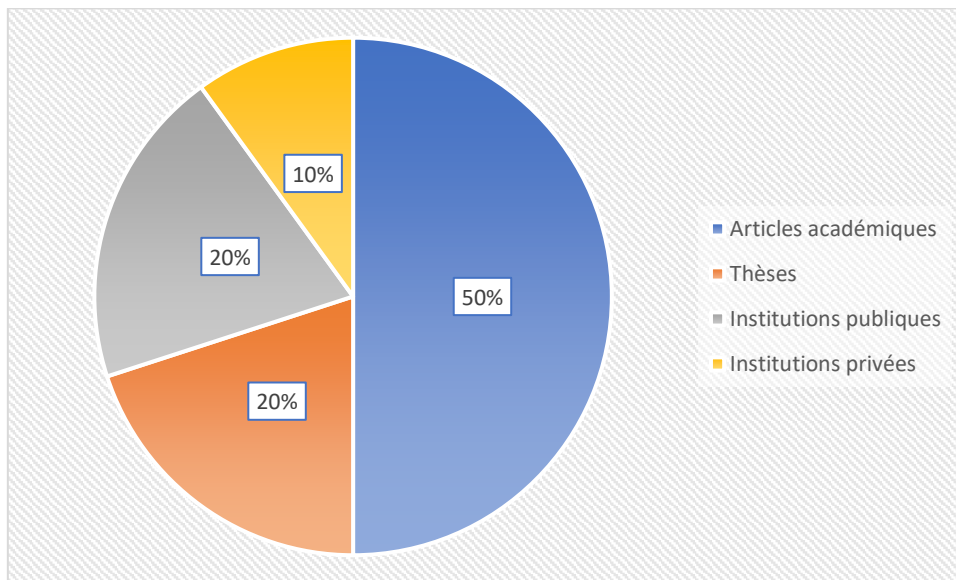


Figure 1 - Répartition par type de sources

3.1 Typologies d'impacts

Un impact est considéré dans la littérature étudiée comme un changement sur l'environnement induit par la mise en place d'un système informatique. Les impacts induits par l'informatique étant de différentes natures, cette définition large demande une classification plus précise. La notion de catégorie d'impacts diffère de celle d'indicateurs d'impact ou de critères d'impact. Ces derniers décrivent et quantifient ces impacts. Les indicateurs d'impacts décrivent une réalité physique (acidification des océans, contribution à l'effet de serre, occupation des sols...). Chaque catégorie d'impact peut être décrite par différents indicateurs d'impacts.

La littérature étudiée propose plusieurs types d'impacts induits par l'utilisation d'un système informatique. Il n'existe pas de consensus sur la nomenclature, ni sur la manière dont sont classifiés ces impacts. Presque tous les impacts rencontrés lors de la phase de recherche peuvent s'intégrer dans chacune des répartitions proposées. La divergence est due à une absence de norme plutôt qu'à un débat de fond entre les différentes publications. Nous verrons cependant que certains de ces découpages comportent un biais de nomenclature. La différenciation entre impacts se fait majoritairement sur deux axes : l'axe positif/négatif et l'axe direct/indirect. Nous détaillons les différentes classifications d'impacts à travers ces deux axes.

3.1.1 Impacts négatifs et positifs

Les catégories d'impacts proposées dans la littérature étudiée sont soit positives, soit négatives, soit positives et négatives. Un impact négatif correspond à un changement dommageable sur notre environnement ; par exemple, l'émission de gaz à effet de serre. N'importe quel processus informatique a un impact négatif, car il mobilise obligatoirement de l'énergie et des ressources abiotiques.

Comme précisé par *Vlad C. Coroamă & al.* [22], la nomenclature « impacts positifs » comporte un biais important pour plusieurs raisons. En premier lieu, parce qu'il n'existe pas d'impact positif induit par l'utilisation d'un système informatique. On considérera les impacts positifs du système relativement à un autre système impactant. En d'autres termes, l'impact positif d'un système informatique correspond à une économie d'impact sur le système de référence. Ce biais est encore plus fort lorsque des termes positifs sont utilisés pour décrire l'ensemble des impacts d'un système informatique. *ICTem du GeSI* [16] utilise le terme

« *enablement* », qui sous-entend un impact positif du système, *Vlad C. Coroamă & al.* [22] propose l'utilisation du terme plus neutre « *induced effects* ». On utilisera ici le terme « *positif* » quand on voudra rendre compte de la terminologie majoritairement adoptée par la littérature étudiée. On préférera employer le terme « *abattement* » qui rend mieux compte des effets bénéfiques de la numérisation sur un système existant. L'autre biais réside dans le fait qu'une partie des impacts dits positifs sont des impacts potentiels. Le système n'ayant pas d'impact positif sur l'environnement en lui-même, ces impacts positifs dépendent des conséquences qu'il aura sur les modes d'utilisation attendus.

3.1.2 Impacts directs et indirects

On retrouve, dans la quasi-totalité des publications étudiées, la notion d'impacts directs et indirects. Cette répartition est parfois nommée primaire et secondaire, voire tertiaire.

Les impacts directs correspondent aux impacts induits dès l'introduction du processus informatique. Négatif, il s'agit de l'impact des éléments mis en œuvre pour faire fonctionner le processus informatique sur la durée de leur cycle de vie (composants hardware, transports...). « Positif », il s'agit des impacts directement évités à l'introduction du processus informatique par la réduction ou l'optimisation du système de référence. Les impacts directs sont toujours étudiés. Cependant, certaines publications industrielles (non retenues dans cette étude) ne considèrent que les impacts directs positifs, entraînant une surestimation des effets positifs du système, comme le rappellent *Vlad C. Coroamă & al.* [22].

La définition des impacts indirects est moins homogène. On retrouve deux définitions qui se complètent. La première correspond à l'effet de l'évolution des comportements induits par l'introduction du processus informatique. La seconde peut être définie comme l'effet d'une adoption généralisée du processus informatique. Les usages et le taux d'adoption évoluant au cours du temps, les deux définitions sous-entendent la notion de temps présente dans une grande partie des définitions des impacts indirects. La classification de ces effets est sujette à discussion. Ils sont identifiés comme effets indirects par l'ESTI et l'ITU [18][19], effets secondaires voire tertiaire chez *Mohammad Ahmadi Achachlouei* [23] ou encore effets rebonds chez *ICTem du Gesi* [16].

Il existe 3 stratégies de découpage dans la littérature étudiée (voir figure 2). Un découpage exclusivement sur l'axe positif/négatif utilisé par *Jeremy Bonvoisin & al.* [24]. Un découpage exclusivement sur l'axe direct/indirect, chez *Börjesson Rivera & al.* [25]. Enfin, un découpage complet sur l'axe positif/négatif et direct/indirect, utilisé notamment par le *GeSI* dans leur méthode *ICTem* [16].

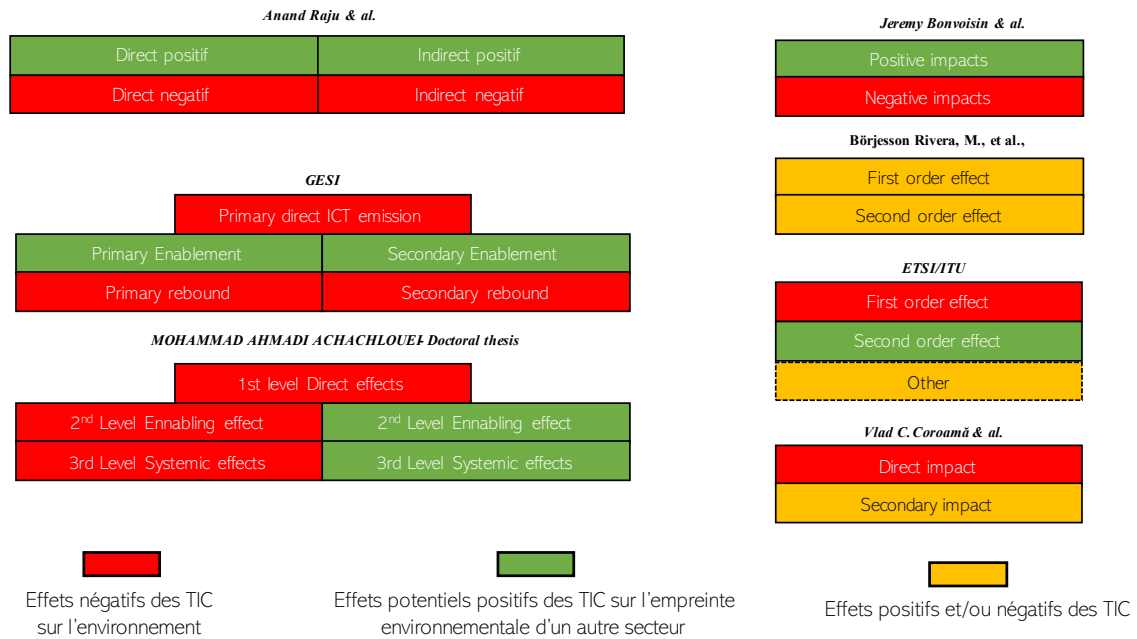


Figure 2 - Classification des impacts de la littérature étudiée

Nous détaillons par la suite les méthodes mises en œuvre pour mesurer les différentes catégories d'impacts. La classification choisie ici se compose de 3 parties (voir figure 3). Les impacts négatifs directs, les abattements directs et enfin les impacts indirects qui regroupent des impacts positifs et négatifs. On appelle ces derniers les effets rebond. Ce terme sera justifié dans la partie correspondante. Ce découpage est justifié par l'homogénéité des méthodes mises en œuvre pour mesurer les impacts appartenant aux différentes catégories.

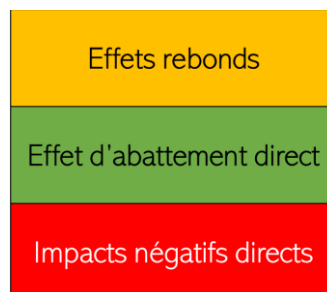


Figure 3 - Classification des impacts retenus

3.2 Impacts négatifs directs

3.2.1 L'analyse de cycle de vie

100% des publications étudiées recommandent l'utilisation de l'analyse de cycle de vie pour mesurer les impacts primaires directs du processus étudié.

L'analyse de cycle de vie (ACV) ou life cycle assessment (LCA) est une méthodologie définie par l'ISO 14044 [26], utilisée en étude d'impact environnemental. L'objectif d'une ACV est d'obtenir l'impact environnemental d'un produit ou d'un service sur l'ensemble de son cycle de vie. La méthodologie définit 5 étapes impactantes dans la vie d'un produit : l'extraction des matières premières, la fabrication des composants et l'assemblage du produit, le transport du produit de son lieu de fabrication à son lieu de distribution, l'utilisation du produit et sa fin de vie (incluant le recyclage et la valorisation).

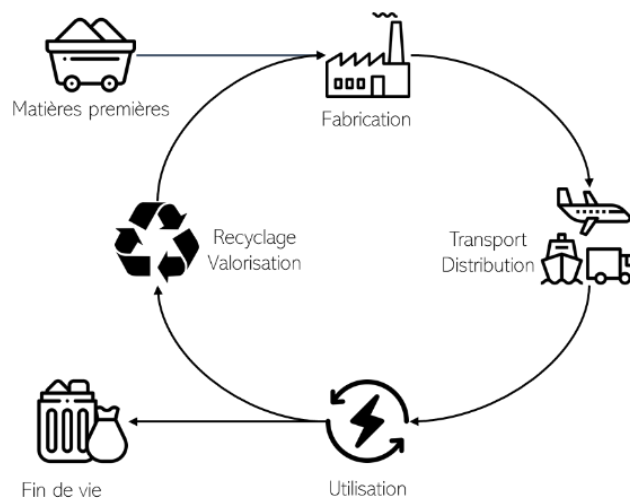


Figure 4 - Etapes du cycle de vie d'un produit

L'ACV propose de mesurer les impacts de l'élément étudié de manière multicritères. En effet, les critères d'impacts sur l'environnement induits par un produit ou un service sont multiples. On compte parmi ces critères d'impacts l'utilisation d'eau claire, l'utilisation de ressources abiotiques, l'acidification des océans... Le dégagement de gaz à effet de serre est, de loin, le plus utilisé. Puisqu'il existe plusieurs gaz à effet de serre, on exprime l'ensemble de ces gaz en équivalent carbone.

L'analyse du cycle de vie étudie l'impact d'un produit ou d'un service en considérant sa fonction. On définit la fonction par l'unité fonctionnelle. Cette stratégie permet d'éviter des biais de comparaison de produits apparemment équivalents. Par exemple, pour comparer deux

ordinateurs, un notebook et un ordinateur haute performance, on préférera utiliser une unité fonctionnelle précise comme « exécuter un programme type la tour d'Hanoï » plutôt que de comparer leurs impacts globaux, leurs fonctions globales étant différentes.

Les éléments étudiés dans le cadre de cette recherche sont des processus. Les processus sont également définis par une unité fonctionnelle. On considère que l'impact d'un processus correspond à l'impact des équipements et services mobilisés pour son exécution. Si le produit n'est pas consommé lors d'un processus (ce qui est le cas majoritaire dans les processus informatiques), on n'affectera qu'une partie de l'impact du produit sur l'impact du processus. On appelle cela le taux d'affectation. Par exemple, le processus « lire un livre de 100 pages sur une liseuse » ne consomme pas la liseuse. On doit donc déterminer le taux d'affectation de la lecture d'un livre de 100 pages sur une liseuse. Plusieurs stratégies existent pour le calculer. La plus simple consiste à diviser l'impact du produit par le nombre de processus qui peuvent être effectués durant sa vie. Dans le cas d'un équipement ayant un seul usage, cette méthode est facilement applicable. Cependant, les équipements informatiques servant souvent plusieurs processus, il est difficile de déterminer la part à affecter à un processus spécifique.

L'ACV est définie en 4 étapes. La première phase consiste à définir des objectifs, des frontières et l'unité fonctionnelle. La deuxième étape d'inventaire sert à déterminer l'ensemble des éléments ayant un impact sur le cycle de vie du produit ou du service, ainsi que leur taux d'affectation. La troisième étape d'évaluation des impacts met en relation les éléments impactants présents dans l'inventaire avec leurs impacts. La dernière phase permet d'interpréter les résultats obtenus.

3.2.2 Surcouches méthodologiques

L'ACV est une méthodologie des sciences de l'environnement. Sa définition est la plus large possible, afin d'inclure l'ensemble des domaines d'application. Cela nécessite des redéfinitions ou des précisions spécifiques au domaine étudié.

La méthodologie proposée par l'ESTI et l'ITU [18][19] parue en 2014 présente un certain nombre de recommandations qui précisent l'ISO 14044 dans le cadre de produits et de services informatiques. Elle apporte notamment un découpage en strates (voir *figure 5*) pour l'analyse d'impact des produits et des services informatiques. A la base, on trouve les

matériaux informatiques (ordinateurs, switch, routeurs, serveurs...) qui portent l'ensemble des impacts puisqu'ils sont les seuls à exister dans le monde physique. Au-dessus, on trouve le concept de réseau. Son impact est porté par les éléments hardware qui le composent. Puis, au sommet, on trouve les services dont l'impact est composé de l'impact du réseau et des équipements informatiques qu'il utilise. Ce découpage permet de faire le lien entre le monde physique, qui porte réellement les impacts, et le monde logiciel, auquel on attribue les impacts des équipements employés. Nous nous intéressons dans ce mémoire exclusivement à la partie services.

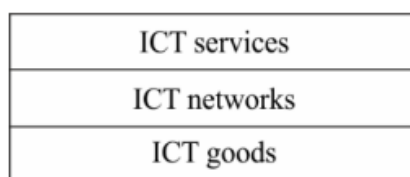


Figure 5 - Relation entre les équipements, les réseaux et les services informatiques, ETSI/ITU

L'ETSI et l'ITU [18][19] proposent également une liste des éléments impactants pouvant entrer dans l'inventaire du cycle de vie d'un service. Cette définition permet de donner une frontière aux services, concept virtuel difficilement transposable en composant physique. Elle se veut la plus large possible. On retrouve de manière exhaustive : les composants et équipements informatiques, les logiciels, les consommables et produits de support, les infrastructures accueillant les composants du service, les environnements de travail des utilisateurs, le transport des biens et des personnes nécessaires au fonctionnement du service et enfin le stockage nécessaire au fonctionnement du service. A noter que certains de ces éléments se recoupent et nécessitent donc une attention toute particulière pour éviter une double comptabilité. Par exemple, un logiciel est hébergé par un équipement informatique.

Le standard propose également des recommandations pour comparer l'impact d'un système informatique avec un autre système, informatique ou non. Ces recommandations seront détaillées dans la partie 3.4

Bien que l'ISO 14044 [26] soit toujours utilisée, aucune des méthodologies analysées ne propose de surcouches méthodologiques aussi précises que celle de l'ETSI/ITU. *ICTem du GeSI* [16] reconnaît l'intérêt de cette surcouche méthodologique, mais il ne l'utilise pas car elle n'était pas encore officiellement publiée à l'époque de leur publication. *Vlad C. Coroamă*

& al. [22], dans leur article paru en 2020, se basent sur ce standard et précisent quelques-unes de ces recommandations. Une partie des précisions concerne les stratégies de modélisation qui sont peu, voire pas traitées dans le standard.

3.2.3 Stratégies d'inventaire

La phase d'inventaire est cruciale dans une ACV. Différentes stratégies ont été employées, souvent de manière combinée, permettant de répertorier les éléments impactants d'un processus. *ICTem du GeSI* [16] les classe en 4 catégories, du plus au moins qualitatif. On retrouve ces 4 stratégies partiellement ou totalement dans les autres méthodologies étudiées. Il est nécessaire de dissocier les données d'inventaire des données d'impacts. Nous traitons ici des données d'inventaires qui sont associées dans un second temps à des données d'impacts pour obtenir l'impact général du processus.

Les données de premier ordre correspondent à une observation holistique du système étudié i.e. de l'ensemble des agents, des éléments du système et des relations entre eux. Bien que cette méthode soit celle qui comporte le moins de biais méthodologiques, il est presque impossible d'atteindre cet objectif. Les méthodologies étudiées modélisent les systèmes avec d'autres méthodes.

La deuxième stratégie consiste à utiliser des données de premier ordre obtenues par expérience sur une portion d'utilisateurs, et d'extrapoler à l'ensemble du système. Cette stratégie est également proposée par l'ETSI et l'ITU [18][19]. Elle est notamment adoptée par Jeremy Bonvoisin & al. [24] dans le cadre de l'analyse d'impact d'un système de ramassage d'ordures intelligent. Au lieu de mettre en place le système sur l'ensemble de la ville de Grenoble, puis de l'étudier de manière holistique, il est mis en place sur une portion de la ville et son impact est extrapolé sur l'ensemble de la ville. Cette méthode comporte cependant plusieurs biais méthodologiques. *Jens Malmodin & Vlad Coroama* [27] dans une analyse comparative d'étude sur l'impact net des compteurs électriques intelligents, remontent plusieurs biais conséquents de l'utilisation de l'extrapolation. Ils mettent en lumière une corrélation entre le nombre de participants à l'expérience et le gain d'énergie obtenu. Plus l'étude est grande, plus faible est le gain énergétique. Cela peut s'expliquer, selon eux, par le volontarisme des participants qui ne sont pas représentatifs de la population totale. Le biais d'observation s'applique également. Sachant qu'ils sont observés, les participants peuvent

avoir tendance à réduire leur consommation de manière plus importante. L'extrapolation comporte également un biais spatial. La consommation calculée dans une région ou un pays n'est pas extrapolable à l'ensemble du monde. Cela est dû notamment aux divergences culturelles et environnementales. Pour corriger ces biais, *Vlad C. Coroamă & al.* [22] proposent d'utiliser un coefficient d'extrapolation, qui permet d'ajouter un poids à l'impact global. Ce poids doit être déterminé en fonction de la nature de l'expérience, du caractère volontariste des individus observés, de leur sensibilité aux questions écologiques, du temps de l'expérience et du nombre de participants.

La troisième stratégie consiste à utiliser des données dites secondaires. Celles-ci peuvent provenir d'autres ACV. Le risque est d'avoir une approche méthodologique trop différente entre la donnée secondaire et la méthodologie appliquée. Les hypothèses de travail doivent être les plus proches possibles (zone géographique, date ...).

Dans l'immense majorité des publications, les données d'impacts sont récupérées à l'aide de sources secondaires disponibles dans des bases de données dédiées. Les analyses de processus informatiques étant de plus haut niveau que les analyses d'impacts d'équipements informatiques, elles utilisent des ACV d'équipements déjà existantes.

La dernière stratégie, de plus mauvaise qualité, est une stratégie de modélisation. On suppose par hypothèse le comportement des utilisateurs. Bien que cette méthode entraîne de nombreux biais et est souvent présentée dans la littérature comme à utiliser en dernier recours, elle reste employée de manière importante pour sa facilité.

Les différentes stratégies sont toujours utilisées de manière concurrente, compte tenu de la complexité d'obtention des données (temps, coût, disponibilité).

3.2.4 Limites énoncées

Il existe un consensus dans les publications étudiées sur les difficultés d'appliquer les recommandations de l'ACV.

La première difficulté, remontée par l'ensemble de la littérature, réside dans le manque de données relatives aux impacts des équipements et services informatiques. Comme expliqué plus haut, la mesure des impacts directs négatifs d'un processus informatique nécessite de connaître les données d'impact des équipements utilisés. Il est difficile, voire impossible, pour

les individus voulant mesurer les impacts directs négatifs d'un processus, d'effectuer l'ACV de chacun des équipements mobilisés lors de ce processus - par manque de temps, de données et de compétences en ACV de matériels.

Bien que des méthodologies existent, il est presque impossible de suivre leurs recommandations. L'ETSI et l'ITU [18][19] par exemple, qui proposent une méthodologie pour l'ACV des équipements informatiques, reconnaît l'impossibilité d'appliquer une partie de ses recommandations. Plusieurs raisons sont avancées de manière informelle par les industriels et les chercheurs. D'abord, le changement extrêmement régulier des technologies utilisées périmé très vite les mesures disponibles. Concernant la mesure de la phase de fabrication, la composition précise de ces équipements et les conditions de fabrication sont difficiles à identifier par les industriels et complètement inaccessibles pour le monde académique. Concernant la phase d'utilisation, la diversité dans les usages contraint à formuler des hypothèses d'utilisation, ce qui accentue les potentielles erreurs. Même quand des données sont publiées, tous ces éléments entraînent des marges d'erreurs importantes (autour de 20% constaté pour des ordinateurs de marque Lenovo par exemple).

Un second problème réside dans l'effet boule de neige ou effet de cascade, qu'implique l'utilisation d'ACV existantes. Les marges d'erreur étant importantes, la réutilisation d'ACV utilisant potentiellement elles-mêmes des ACV existantes rend les résultats très incertains. Il est encore plus important quand les marges d'erreurs sont grandes, comme dans le cas des TIC.

Enfin, il existe un manque important de données multicritères. En effet, la majorité des données d'impact disponibles ne s'intéressent qu'au gaz à effet de serre (exprimé en équivalent carbone). Les autres critères d'impact sont rarement disponibles. Pourtant, il est nécessaire de connaître l'impact de l'ensemble des équipements mobilisés pour chacun des critères d'impact retenus, car le manque d'une ou plusieurs données d'impacts d'équipement devra être comblé par une hypothèse d'impact. Cette stratégie est très mauvaise. Quand le nombre d'impacts manquant augmente, l'utilisation d'hypothèses n'est plus pertinente.

Ce manque de données multicritères peut impliquer des reports de pollution. En effet, lors de l'éco-conception d'un processus dont l'impact a été mesuré, les concepteurs tentent de réduire les impacts connus (dans l'immense majorité des cas, l'impact carbone). Cela peut entraîner un report ou un transfert des impacts d'un critère vers un autre critère non mesuré. Par exemple, la voiture électrique réduit l'émission des particules fines par rapport à une voiture

thermique. Selon ce critère unique, la voiture électrique est meilleure d'un point de vue environnemental. Cependant, si l'on prend en compte la pollution des cours d'eau due aux batteries utilisées, cette affirmation perd en véracité. Le changement du parc automobile de la voiture thermique vers la voiture électrique entraînerait un report de pollution [32].

Les cadres méthodologiques sont donc difficilement applicables au regard du manque de données et de leur qualité sur les équipements informatiques.

3.3 Effets d'abattement directs

3.3.1 Typologies d'impact d'abattement directs

Les TIC ont la capacité de réduire l'impact environnemental d'un processus polluant. On parle régulièrement, dans la littérature académique ou grise, d'« *impact positif* ». La réduction de l'impact d'un processus polluant ne représente pourtant pas un impact positif. En effet, un impact environnemental positif devrait, non pas réduire l'impact d'un processus humain, mais réduire l'impact d'un processus physique en agissant négativement sur un critère environnemental. Par exemple, la plantation d'arbres réduit la quantité de carbone dans l'air ; cette action a un impact positif. L'utilisation de l'informatique dans le cadre de projets IT for green doit être vue, non pas comme un effet positif sur l'environnement, mais comme un effet d'abattement relativement à un processus polluant. L'effet « positif » n'existe que si le processus polluant existe.

Il existe 3 effets permettant la réduction d'impact d'un processus polluant permis par les TIC. Ces effets peuvent être complémentaires.

Le premier est le mécanisme d'optimisation. Dans ce cadre, on garde le même processus de référence mais on réduit son impact par l'introduction d'un système informatique. Par exemple, le GPS peut optimiser un trajet pour réduire sa distance et son temps, et donc sa consommation de carburant. De ce fait, l'optimisation entraîne une diminution de l'impact du trajet.

On trouve ensuite l'effet de substitution, qui consiste dans le remplacement d'un processus polluant par un processus informatique. Cela annule l'impact du processus de référence, comme dans le cas de la substitution d'un livre par une liseuse.

On trouve enfin l'effet d'information, considéré différemment dans les publications étudiées. Jeremy Bonvoisin & al. [24] considèrent cet effet comme étant le vecteur de l'optimisation. Ils ne dissocient donc pas ces deux effets. C'est l'information qui permet l'optimisation. Leur cas d'usage consiste en un système de ramassage des déchets intelligent informant les services généraux de la ville qu'une benne est pleine. Cette définition permet de considérer l'information comme un vecteur d'abattement direct. Cependant, l'effet d'information permet également une évolution des usages et participe à l'effet rebond d'abattement. Dans le cadre des compteurs intelligents traité par *Jens Malmodin & Vlad Coroama* [27], l'information est un des principaux effets d'abattement. Les différentes études traitées dans cette méta-étude montre que l'information donnée à des ménages sur leur consommation électrique permet de la réduire. Nous ne traiterons pas l'information dans la partie des effets directs, puisqu'elle recoupe l'effet d'optimisation quand elle est considérée comme un impact direct. Cet effet sera cependant traité dans les effets rebond.

3.3.3 Mesure naïve

Il n'y pas de méthodologie faisant consensus pour mesurer les effets d'abattement comme l'ACV peut l'être pour les impacts directs. La mesure des effets d'abattement étant relative aux impacts négatifs directs, ceux-ci correspondent à la différence entre les impacts négatifs directs du processus de référence et les impacts négatifs direct du processus informatique.

$$Abatement = P_{ref} - P_{TIC}$$

Équation 1

Il est donc nécessaire de connaître au préalable les impacts négatifs directs du processus informatique, ainsi que ceux du processus de référence. La littérature étudiée ne s'étend pas sur la mesure des impacts de ce dernier. *ICTem du GeSI* [16] recommande l'inventorisation des composants du système, mais ne définit pas de méthodologie pour les calculer. L'ETSI et l'ITU [18][19] recommandent l'utilisation d'une approche méthodologique la plus proche possible du calcul de l'impact du processus informatique. Il doit donc s'agir d'une ACV ISO 14044 [26]. L'unité fonctionnelle et les hypothèses de travail doivent être les mêmes. L'unité fonctionnelle doit être assez précise pour rendre compte des mêmes hypothèses de travail entre les deux ACV des processus. On tente ainsi de réduire les biais de comparaison. Dans les faits, les biais de comparaison existent toujours. Un processus informatique, même s'il

permet d'effectuer la même unité fonctionnelle, diffère d'un processus de référence par sa nature.

Prenons comme exemple le processus d'envoi d'une lettre, substitué par le processus informatique d'envoi d'un mail (*figure 6*). L'unité fonctionnelle doit rendre compte de la similarité fonctionnelle entre ces deux processus. On choisit par exemple : « Envoyer une information de 10 Mo ». La mesure naïve correspondrait à la différence entre l'impact d'une lettre et celui d'un mail pour envoyer une information de 10 Mo. Cette mesure donnera l'effet d'abattement de la substitution d'un mail par une lettre pour l'envoi d'une information de 10 Mo. On peut cependant argumenter que ces deux processus diffèrent. Bien qu'ils puissent être comparés sur une même unité fonctionnelle de transmission de quantité d'information, on omet qu'il existe une différence de fonction entre ces deux processus.

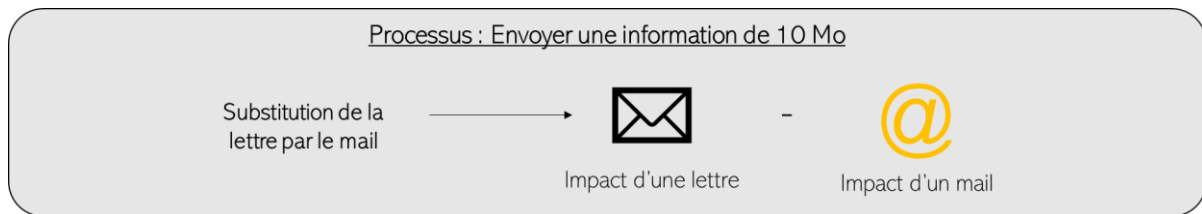


Figure 6 – Mesure naïve de l'impact de l'envoi d'une information de 10 Mo

3.3.3 Cas de l'optimisation et de la substitution partielle

Vlad C. Coroamă & al. [22] apportent dans leur publication des précisions sur le framework de comparaison proposée par L'ETSI et l'ITU [18][19]. Ils distinguent les deux cas d'abattement vus plus haut : l'optimisation et la substitution. En effet, l'équation 1 ne fonctionne telle quelle que dans le cas d'une substitution totale, où le processus de référence est complètement remplacé par le processus informatique.

Dans le cas de l'optimisation, le processus de référence existe toujours. Il n'est pas remplacé par le processus informatique, mais est optimisé par celui-ci. La différence ne réside plus entre les impacts des deux processus, mais entre les impacts directs du processus de référence et l'impact direct du processus optimisé, à laquelle on ajoute l'impact du système informatique nécessaire à son fonctionnement.

$$\text{Abattement} = P_{ref} - P_{opti} + \text{Impact}_{TIC}$$

Équation 2

Prenons l'exemple de la livraison par camion de 19 tonnes de produits du Havre à Paris, optimisée par l'utilisation d'un GPS (*figure 7*). Par hypothèse, on définit une optimisation de 30 km permise par le GPS. L'effet d'abattement correspond à la différence entre l'impact du trajet avant optimisation et l'impact du trajet optimisé de 30 km, à laquelle on ajoute l'impact du GPS sur le trajet (i.e. l'impact de sa consommation électrique et la part de la fabrication imputée au trajet).



Figure 7 - Mesure de l'impact de la livraison de 19 t de produits du Havre à Paris en camion

Dans la majorité des cas d'usage de substitution étudiés, la substitution n'est pas totale. Les deux processus continuent de coexister. Il est nécessaire de considérer uniquement la partie substituée du processus de référence dans le calcul de l'abattement. On dissocie les impacts du processus de référence en deux. D'une part, les impacts de la partie non substituée ; d'autre part, les impacts de la partie substituée.

$$\begin{aligned} \text{Abattement} &= (P_{ref\ substitu\acute{e}} + P_{ref\ non\ substitu\acute{e}}) - (P_{TIC} + P_{ref\ non\ substitu\acute{e}}) \\ &= P_{ref\ substitu\acute{e}} - P_{TIC} \end{aligned}$$

Équation 3

Prenons l'exemple d'un article papier substitué par un article en ligne. Bien que la quantité d'articles papier ait diminué au profit d'articles en ligne, les deux processus continuent de coexister. On doit donc considérer exclusivement l'impact de la partie substituée (*figure 8*). Il est cependant difficile de déterminer quelle part de la diminution du nombre d'articles papier est imputable à l'introduction des articles en ligne. On retrouve, là encore, un cadre méthodologique difficilement applicable dû à la complexité des évolutions d'usages, qui seront traitées dans les effets indirects.



Figure 8 - Mesure de l'impact de la lecture d'un article

3.3.4 Vue statique vs vue temporelle

L'intégration de la notion de temps à la méthodologie de calcul ne fait pas consensus dans la littérature étudiée. Quand il n'est pas pris en compte, on considérera que la modélisation est une « vue statique ». C'est ce qui est proposé non explicitement par L'ETSI et l'ITU [18][19] ou *ICTem du GeSI* [16]. Dans ce cadre, l'impact du processus de référence et celui du processus informatique n'évoluent pas en fonction du temps. Les effets d'abattement correspondant à la différence entre ceux-ci n'évoluent pas non plus en fonction du temps ; ce qui pose plusieurs problèmes méthodologiques.

La mesure dépend d'un certain nombre d'hypothèses, qui évoluent au cours du temps. L'usage du processus évolue également au cours du temps, ainsi que les impacts négatifs directs des équipements du système informatique. Par exemple, la consommation électrique et, plus largement, les impacts des équipements informatiques tendent à être optimisés au cours du temps à puissance équivalente. Il est donc nécessaire d'en rendre compte dans une vue dynamique temporelle.

D'autre part, l'impact du processus de référence, une fois remplacé par le processus informatique, n'est pas considéré dans une vue statique. Il est cependant possible que cet impact ait été optimisé d'une autre manière que par les TIC et qu'il ait diminué au cours du temps. Ne pas considérer l'évolution de l'impact potentiel du processus de référence après son décommissionnement tend à surestimer l'impact du processus informatique (*voir figure 9*).

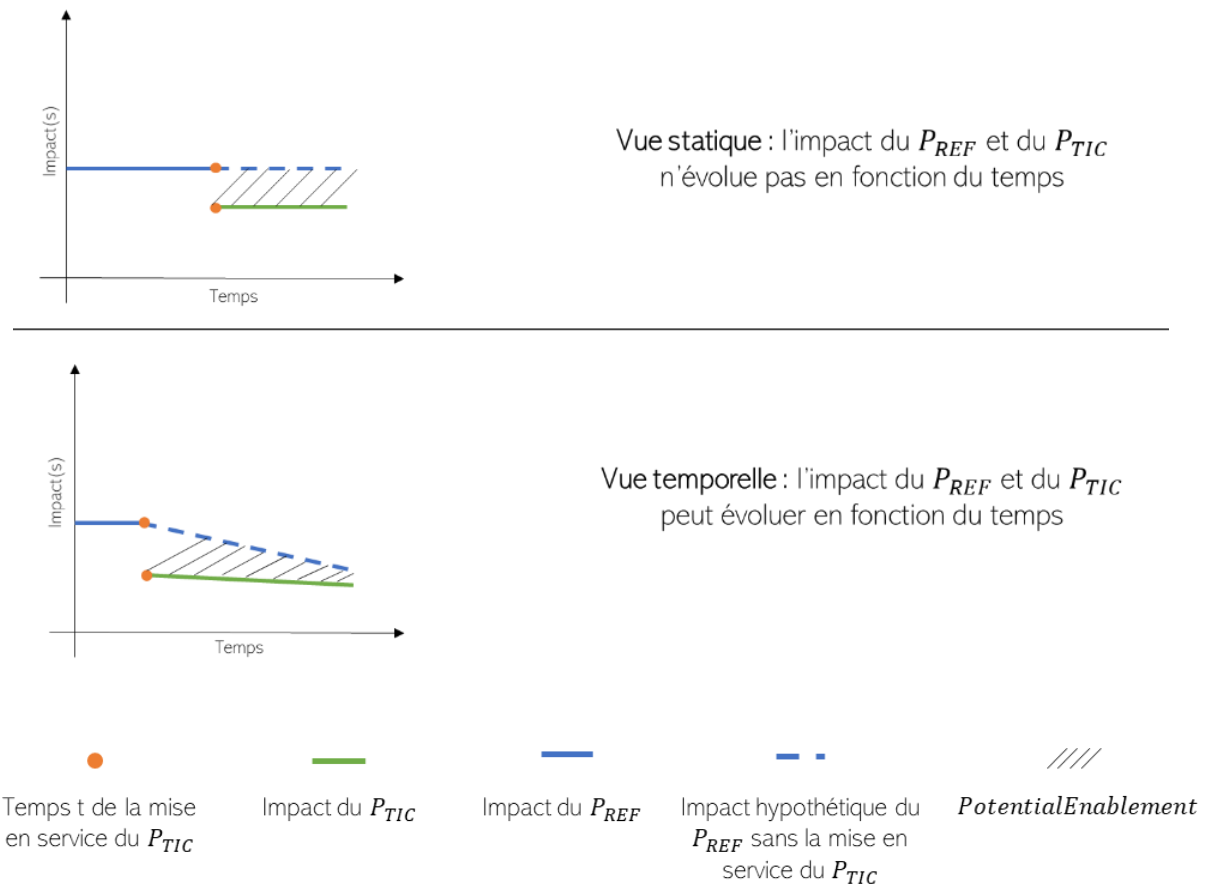


Figure 9 - Différence entre vue statique et vue temporelle

Pour intégrer la temporalité à la mesure, *Vlad C. Coroamă & al.* [22] proposent un découpage discontinu des impacts en 3 parties : présent, présent potentiel, futur potentiel. Le présent correspond à la situation initiale ; le présent potentiel est un présent hypothétique dans lequel le processus informatique est implémenté ; le futur potentiel correspond quant à lui à la situations hypothétique un certain temps après le présent potentiel. La méthode STERM du Shift Project [14] recommande, elle, l'utilisation de fonctions continues variant au cours du temps pour mesurer l'impact du processus de référence et du processus informatique. Certaines des hypothèses utilisées pour mesurer les impacts du processus de référence et du processus informatique seront définies en fonction du temps, pour que l'ensemble des mesures adopte une vue temporelle (exemple *Equation 4*).

$$Abatement(t) = P_{ref}(t) - P_{TIC}(t)$$

Équation 4

3.4 Effets rebonds

3.4.1 Enjeux

Jusqu'à présent, les impacts environnementaux ont été considérés à l'échelle d'un processus. On comparait sur une unité fonctionnelle (i.e. sur une instance d'un processus) un processus de référence à un processus utilisant les TIC. Il existe cependant un biais dans cette comparaison 1 à 1 par l'unité fonctionnelle : on ne considère pas l'évolution en nombre et en qualité des usages consécutive de l'implémentation du système informatique. L'évolution des usages ne peut pas être observée au niveau d'une instance de processus, mais nécessite une vue systémique.

Prenons l'exemple de l'article en ligne. Jusqu'à maintenant, si l'on comparait l'impact du processus « lire un article sur papier » et « lire un article en ligne », on comparait l'impact de la lecture d'un unique article sur papier à l'impact de la lecture d'un unique article en ligne. Cette comparaison ne tient pas compte du fait que l'introduction du processus informatique (i.e. l'article en ligne) entraîne potentiellement une évolution dans la manière dont le processus est réalisé. Dans le cas des articles en ligne, on peut supposer que la facilité d'accès à ce dernier entraîne une augmentation du nombre d'articles lus en ligne - c'est ce qui est observé par Mohammad Ahmadi Achachlouei [23] dans le cadre de la version en ligne des journaux finlandais du groupe Alma. Ne pas considérer cette évolution d'usage reviendrait à sous-estimer dans ce cas l'impact du système informatique. On nomme ici ces effets : « effets rebonds ».

Pour les raisons invoquées, *Vlad C. Coroamă & al.* [22] recommandent de mesurer ces effets rebonds en intégrant une variable R à l'Equation 3, qui porte les impacts des effets rebonds (Equation 5).

$$Abatement(t) = P_{ref} - P_{TIC} + R$$

Equation 5

La méthodologie *ICTem du GeSI* [16] propose également de les mesurer. Cependant, ces publications ne proposent pas de méthode pour le faire.

3.4.2 Définitions et classifications

L'effet rebond ou paradoxe de Jevons est un effet constaté dans la recherche en économie et en énergie. Il correspond à une augmentation de la consommation d'une technologie due à une meilleure efficacité (coût, impact et consommation en ressources moindres). Ce paradoxe réduit l'effet d'abattement d'une technologie en compensant l'abattement par l'augmentation de l'utilisation qui en est faite. On peut parler de compensation des effets d'abattement.

Le premier exemple constaté par Jevons [28] en 1865 concerne la machine à vapeur. Il remarque que l'optimisation de la machine à vapeur de Watt par rapport à celle de Newcomen n'a pas menée comme on pourrait s'y attendre à une diminution de la consommation globale de charbon, mais à son augmentation. Une optimisation de la consommation de charbon pour une unité d'énergie a induit une augmentation globale de la consommation de charbon. D'autres effets rebond ont été identifiés et classifiés depuis lors dans le monde de la recherche économique et énergétique.

La capacité des TIC à transformer les modes de production et de consommation est responsable de plusieurs effets rebonds. Miriam Börjesson Rivera & al. [25], dans une publication sur les stratégies de mesure de ces effets, en identifie dix, explicités par le cas d'usage du e-commerce. Une partie de ces effets peut avoir des impacts négatifs ou « positifs ». Ils sont définis (*Tableau 4*) dans le cadre des processus. Cette classification ne fait pas consensus, mais elle est la plus complète de la littérature étudiée. Certaines de ces définitions peuvent se recouper dans des cas d'usages précis.

Nom	Description
<i>Effet rebond direct</i>	<i>La technologie numérique crée une réduction du prix d'un processus qui entraîne une augmentation de son utilisation</i>
<i>Effet rebond indirect</i>	<i>La technologie numérique crée une réduction du prix d'un processus qui entraîne une augmentation de l'utilisation d'autres processus. Par exemple, l'économie financière faite sur un processus moins cher est réinvestie dans d'autres processus.</i>
<i>Effet d'induction</i>	<i>La facilité d'utilisation d'un processus numérique entraîne une intensification de son utilisation.</i>
<i>Effet rebond à l'échelle de l'économie</i>	<i>La généralisation d'un processus permise par les TIC entraîne un ajustement de son prix, qui peut entraîner des effets rebond directs et indirects.</i>
<i>Effet de temps</i>	<i>La modification du temps d'exécution d'un processus permis par les TIC entraîne une modification dans l'usage d'autres processus.</i>
<i>Effet d'espace</i>	<i>La modification de l'espace mobilisé par un processus permis par les TIC entraîne une modification dans l'usage des espaces.</i>
<i>Effet d'information individuel</i>	<i>L'information donnée aux consommateurs par les TIC sur la nature du processus (impact sociaux, environnementaux...) entraîne une modification de l'usage du processus.</i>
<i>Effet d'information sectoriel</i>	<i>L'information donnée aux producteurs ou aux régulateurs permis par les TIC entraîne une modification dans la conception du processus</i>
<i>Changement des pratiques</i>	<i>L'introduction de processus numériques entraîne une modification du comportement et de la consommation des utilisateurs.</i>
<i>Effet rebond de transformation</i>	<i>L'introduction de processus numériques entraîne un changement dans les préférences et les structures sociales.</i>

Tableau 5 - Classification des effets rebond dans le cadre des TIC de Börjesson Rivera et al. appliquée aux processus

Vlad C. Coroamă & al. [22] rappellent la difficulté d'identifier ces effets rebonds. Par exemple, comment déterminer la part d'utilisation qui substitue un processus polluant à celle créé par l'effet rebond ? Plusieurs méthodologies sont proposées et détaillées ci-après.

3.4.3 Intégration de la modélisation dynamique à l'ACV

Il serait possible d'utiliser l'ACV pour mesurer les effets rebond de la même manière que pour les effets directs. Cependant l'ACV ISO 14044 présente plusieurs limitations.

Les effets indirects sont parfois nommés « ripple effects » (effets d'ondulation) dans la littérature. Cette terminologie décrit le caractère dynamique des effets étudiés. En effet, comme discuté par Miriam Börjesson Rivera & al. [25], les effets rebonds évoluent au cours du temps, en fonction de multiples paramètres difficilement estimables et non linéaires. La principale limitation de l'ACV ISO 14044, dans le cadre de la mesure des effets rebonds, réside dans son caractère statique, qui rend difficile voire impossible l'évaluation d'effets aussi dynamiques et incertains que les effets rebonds. Comme vu précédemment (voir 3.4.5), l'ACV délivre une photographie des impacts à un instant T et non une vue dynamique.

Miriam Börjesson Rivera & al. [25] et Mohammad Ahmadi Achachlouei [23] proposent d'associer des méthodologies de modélisation dynamique à l'ACV. Ils proposent tous deux l'utilisation d'*Agent Base Modeling* (ABM). Ces méthodologies permettent de modéliser les acteurs d'un système, leurs relations entre eux, ainsi que leurs relations avec leur environnement. Les règles qui régissent chacun de ces items constituent le modèle. La variation sur ces règles entraîne une variation sur les résultats du modèle. Contrairement à la stratégie vue en 3.4.5, les impacts ne sont plus seulement fonction du temps, mais de nombreux autres paramètres, eux-mêmes fonction des relations définies dans le modèle. Mohammad Ahmadi Achachlouei [23] propose également l'utilisation de *System Dynamics* (SD). Contrairement à l'ABM, qui modélise le comportement des acteurs, les SD modélisent les flux et les stocks. Ces méthodes sont communément utilisées en étude environnementale, notamment par le GIEC [29]. Mohammad Ahmadi Achachlouei [23] recommande l'utilisation combinée de ces deux approches associées aux méthodologies de l'ACV pour mesurer les effets rebonds induits par l'utilisation de TIC.

3.4.4 Utilisation d'outils transdisciplinaires

Miriam Börjesson Rivera & al. [25] défendent l'utilisation d'outils transdisciplinaires pour identifier, modéliser et mesurer au mieux les effets rebonds induits par l'utilisation des TIC.

Les outils quantitatifs peuvent être utilisés pour fournir des mesures qui préciseront les mesures vues auparavant. L'économie ou les statistiques peuvent fournir des méthodologies de mesure pour quantifier ces effets rebonds. Cependant, comme rappelé par [25], la modélisation quantitative sera toujours une vision imparfaite de la réalité.

A défaut de pouvoir être mesurés avec exactitude par des outils quantitatifs, les effets rebond peuvent être identifiés et leurs proportions évaluées grâce à des outils transdisciplinaires qualitatifs empruntés aux sciences humaines. C'est ce que défend Mohammad Ahmadi Achachlouei [23] dans le cadre des méthodologies de type *Qualitative System Dynamics* et Miriam Börjesson Rivera & al. [25] dans un cadre plus général.

Les outils sociologiques et ethnographiques, comme l'interview collective ou encore l'observation participante, permettent d'identifier les dynamiques sociales et culturelles à l'œuvre lors de l'introduction d'un processus numérique. L'ADEME, dans son rapport sur les

effets rebond induits par le télétravail [30], utilise l'interview collective de salariés volontaires pour identifier et catégoriser les effets rebonds. Elle a ensuite recours à des techniques de revue de la littérature ou à des modélisations quantitatives pour estimer leurs proportions.

D'autres stratégies peuvent être employées en fonction des cas d'usage considérés. Par exemple, l'utilisation d'outils d'urbanisme ou de géographie dans le cadre d'évaluation de projets de Smart City, ou plus généralement pour adresser certains critères d'impacts environnementaux comme les impacts du développement des TIC sur le territoire [31].

3.5 Utilisation de la mesure

Une mesure n'est porteuse de sens que considérée dans la perspective d'un usage précis. La majorité des publications étudiées proposent le cadre de l'ACV. En effet, l'ISO 14044 [26] donne des recommandations quant à la présentation et l'utilisation de la mesure. D'autres publications traitent plus précisément de cette question.

3.5.1 Dans le cadre d'une éco-conception

Dans le cadre d'une éco-conception, il est nécessaire de pouvoir mesurer les impacts du système considéré. C'est par la mesure qu'il sera possible de faire des choix éclairés sur la conception du système.

Jeremy Bonvoisin & al. [24] proposent un Framework itératif d'éco-conception (*figure 10*). La mesure devient une étape du Framework. A partir d'une unité fonctionnelle donnée, l'objectif est d'obtenir un système informatique moins impactant que le système de référence. On conçoit un système informatique, puis on compare l'impact des deux systèmes. Tant que le système informatique est plus impactant que le système de référence, on applique des règles d'éco-conception pour concevoir un système informatique moins impactant.

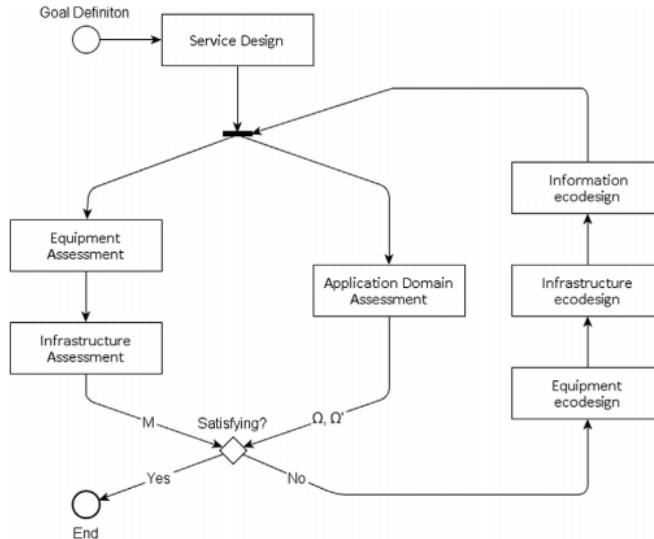


Figure 10 - Framework d'éco-conception, Jeremy Bonvoisin & al.

Cette stratégie comporte cependant une limite importante. Elle favorise, non le système le moins impactant, mais le système informatique ayant l'impact le plus proche du système de référence. En effet, la condition d'arrêt étant relative à l'impact du système de référence, chaque itération rapproche le système informatique de cet impact jusqu'à le dépasser. Une fois celui-ci dépassé, l'éco-conception s'arrête.

3.5.2 Autres utilisations

Anand Raju & al. [10] proposent d'intégrer la mesure à un framework qui lie les impacts du système informatique à un niveau systémique (figure 11). Ils considèrent que l'introduction d'un système informatique a des effets sur tous les niveaux de la société. Le framework offre une vue globale des impacts aux différentes échelles de la société et pointe les contraintes qui s'exercent sur ce système. On trouve en premier lieu les contraintes politico-sociales s'exerçant sur le projet : les normes, les lois et les stratégies sectorielles. Le projet est défini en fonction de ces contraintes. Il engendre des impacts négatifs directement sur l'environnement, ainsi que des effets positifs sur le système ou le secteur existant. Ces effets entraînent eux-mêmes des variations dans les impacts induits sur l'environnement. Ce framework présente les impacts environnementaux d'un système informatique d'une manière holistique. Cela peut permettre une meilleure compréhension de la mesure d'impact, tout en rendant compte de sa complexité. Ce mode d'affichage s'oppose à d'autres, plus simplistes,

comme celui qui consiste à avancer un nombre unique supposé rendre compte de l'impact d'un système informatique. C'est le choix fait par *livingpackets* qui présente l'impact carbone positif de leur boîte intelligente substituant du carton (*figure 12*). Leur méthodologie n'est pas publique. Le framework proposé peut s'appliquer pour des impacts environnementaux comme pour des impacts sociaux, économiques ou politiques.

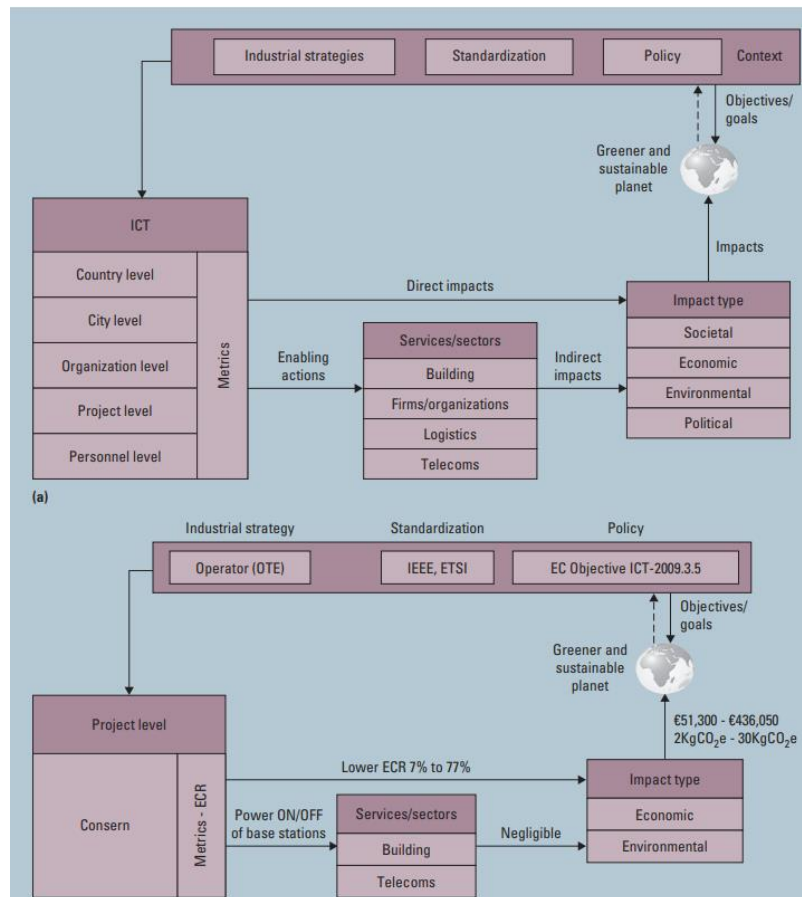


Figure 11 - Framework d'intégration de la mesure dans un système holistique, Anand Raju & al.

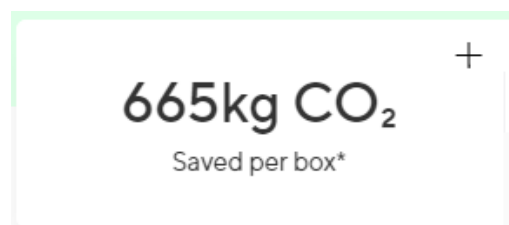


Figure 12 - Affichage environnemental de la page d'accueil du site www.livingpackets.com, septembre 2020

On ne trouve pas dans la littérature étudiée l'utilisation de la mesure dans le cadre d'un comité de pilotage projet. On pourrait cependant conditionner le lancement d'un projet « IT for Green » au résultat de la mesure. Un impact positif entraînera un lancement du projet, alors qu'un impact négatif induira sa redéfinition ou son annulation.

On peut également imaginer utiliser la mesure dans le cadre d'un suivi temporel. Nous avons vu que les impacts d'un système informatique évoluent en fonction du temps (*voir 3.4.5*) et des hypothèses d'utilisation. On peut donc régulièrement mesurer les impacts pour corriger les hypothèses et préciser la modélisation. Ce suivi temporel est un moyen d'intégrer l'éco-conception à l'amélioration continue du système. L'impact du système ne devant pas augmenter en fonction du temps.

4. Conclusion

Au cours de ce travail de recherche, nous avons étudié les différentes publications traitant des méthodologies mises en œuvre dans la littérature scientifique et dans la littérature grise pour mesurer l'impact environnemental des projets IT for Green. L'intérêt pour ce thème de recherche est partagé entre ces deux littératures. La littérature scientifique apporte généralement des critiques et des précisions sur les méthodes mises en œuvre dans la littérature grise. Nous avons observé des consensus, notamment dans les impacts négatifs directs. Nous avons également constaté de nombreuses disparités dans les approches de classification et dans les mesures des impacts indirects et des impacts positifs. Cependant, ces différences sont très rarement contradictoires, ce qui a motivé le travail de compilation des stratégies mises en œuvre pour calculer les impacts identifiés.

La structure de la partie « résultats » de ce mémoire suit les différentes typologies d'impact, ainsi que les stratégies qui ont été mises en œuvre pour les mesurer. Elle peut être matérialisée par un framework, qui compile de manière structurée les différentes typologies de méthodes utilisées dans la littérature académique et industrielle. Ce framework est résumé dans la *figure 13*.

Nous avons montré que les impacts environnementaux d'un système informatique visant à réduire l'impact d'un processus polluant ne peuvent pas être mesurés précisément à l'aide d'une méthodologie unique. La complexité des effets induits par l'introduction d'un système informatique nécessite une succession de méthodes empruntées à différents champs de la recherche. A la base, on trouve l'ACV ISO 14044, qui fait consensus pour mesurer les impacts négatifs directs. Celui-ci alimente un framework de comparaison fournissant des règles précises pour mesurer les effets d'abattement sur le système de référence. Ce framework n'est jamais présenté en tant que tel dans la littérature, mais sous forme d'équations. Les différents biais induits par cette comparaison et les règles additionnelles développées pour des cas précis nécessitent une définition plus précise de la méthodologie du calcul de l'abattement. Enfin, les effets rebonds doivent être considérés, malgré leur complexité d'identification et de mesure. L'utilisation de méthodologies empruntées aux sciences humaines est une stratégie à développer. Même si elle ne mène pas à un résultat numérique, elle peut préciser nos connaissances sur les effets du système considéré. La

transdisciplinarité est une clef pour connaître avec fiabilité les effets d'un système numérique sur l'environnement.

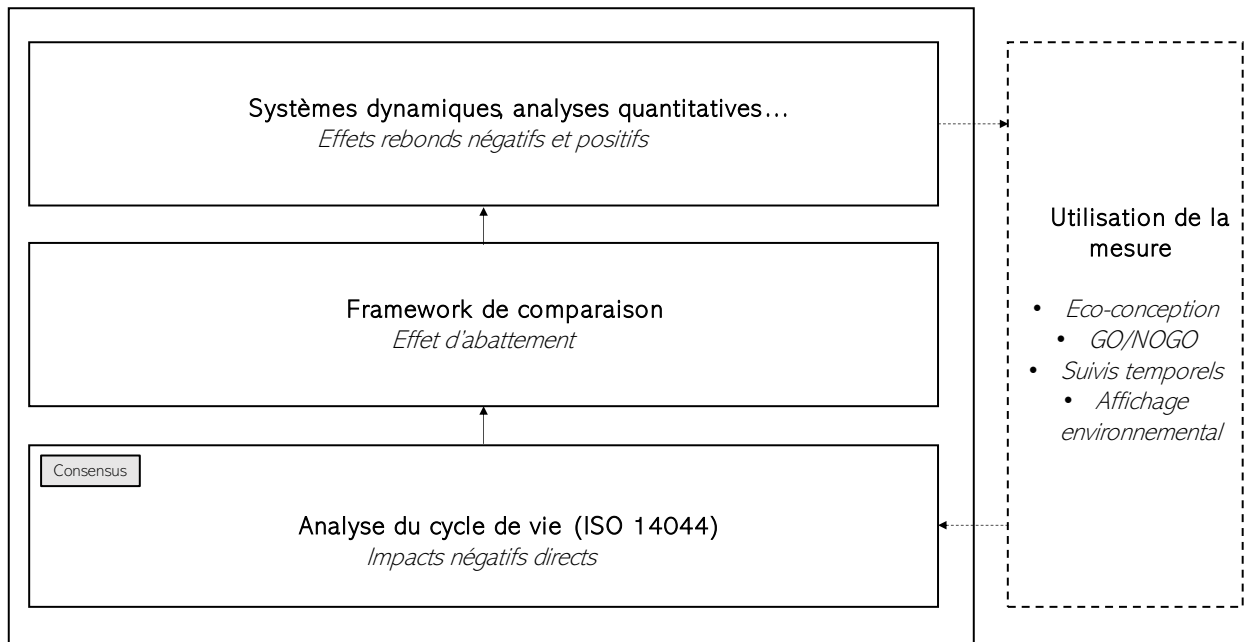


Figure 13 - Framework de classification des méthodes de mesure des impacts environnementaux de systèmes informatiques visant à réduire l'impact environnemental de processus polluants

5. Limites et futurs développements

La contrainte de temps de mon travail de recherche a limité les critères d'inclusion et a maximisé les critères d'exclusion de cette MLR. Ont été exclues les publications qui traitent de la mesure dans le cadre d'un cas d'usage précis. De ce fait, un nombre inconnu de méthodologies testées n'ont potentiellement pas été explorées. Si celles rencontrées lors de la phase d'inclusion n'ont pas révélé d'importantes divergences avec la littérature sélectionnée, la recherche y perd néanmoins une part de son caractère holistique et ne permet pas d'observer l'influence de la typologie du cas d'usage sur les stratégies de mesure.

Il serait nécessaire de tester un maximum de méthodes présentées lors de ce travail sur un ou plusieurs cas d'usages précis pour évaluer leur pertinence, ainsi que leur faisabilité dans un cas concret.

La question des effets rebonds mériterait également un travail de recherche spécifique, notamment sur l'intégration d'études qualitatives dans le cadre d'une mesure d'impact. C'est cette voie que j'aimerais aujourd'hui explorer. Je pense notamment que l'utilisation des méthodes d'observation participante empruntées à la sociologie, associée à d'autres stratégies quantitatives et qualitatives, pourraient permettre de mieux comprendre les effets d'usage et d'anticiper leurs dynamiques.

Sources

- [1] United Nations Climate Change, ONU, Article 2, 1.a – Accord de Paris, 2015, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- [2] WWF Sweden, The potential global CO2 reductions from ICT use Identifying and assessing the opportunities to reduce the first billion tonnes of CO2, 2008
- [3] Christopher L. Weber, Jonathan G. Koomey, H. Scott Matthews, The Energy and Climate Change Implications of Different Music Delivery Methods *Journal of Industrial Ecology*, 2010, 10.1111/j.1530-9290.2010.00269.x
- [4] Eva Ericsson, Hanna Larsson, Karin Brundell-Freij, Optimizing route choice for lowest fuel consumption – Potential effects of a new driver support tool, 10.1016/j.trc.2006.10.001, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2006
- [5] Hugues Ferreboeuf, Lean ICT, Pour un sobriété numérique, The Shift Project, 2018
- [6] Anders Andrae, Tomas Edler, On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030 , Challenges,10.3390/challe6010117, 2015
- [7] Eric Drezet, situation et tendances des matières premières, CNRS Ecoinfo, 24 avril 2014 <https://ecoinfo.cnrs.fr/2014/04/24/situation-et-tendances-des-matieres-premieres/>
- [8] Cédric Gossart, Rebound Effects and ICT: A Review of the Literature, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 10.1007/978-3-319-09228-7_26, 2014
- [9] Nowak P., Beware the rebound effect. *Corp. Knights Mag.*11, 8 juin 2012
- [10] Juliette Denis, Allegra Donadio, and Katherine Klein, The Environmental Impact of Growing Numbers of E-books in Libraries, Environmental Studies Department, Boston College
- [11] Abraham Zhang, Ray Y Zhong, Muhammad Farooque, Kai Kang, V G Venkatesh, Blockchain-based life cycle assessment: An implementation framework and system architecture, *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 10.1016/j.resconrec.2019.104512
- [12] Article 8 - LOI organique n° 2009-403 du 15 avril 2009 relative à l'application des articles 34-1, 39 et 44 de la Constitution (1) – Légifrance, 15 avril 2009
- [13] Réduire l'empreinte environnementale du numérique, transmise au Sénat le 11 juin 2021
- [14] Hugues Ferreboeuf, Déployer la sobriété numérique, The Shift Project, Octobre 2020
- [15] Anand Raju, Sven Lindmark, Simon Delaere, Pieter Ballon, A Holistic Impact-Assessment Framework for Green ICT, *IT Professional*, 2013, 10.1109/mitp.2012.119
- [16] GeSI, Evaluating the carbonreducing impacts of ICT An assessment methodology, 2010
- [17] Garousi, Vahid, & al. "Guidelines for Including Grey Literature and Conducting Multivocal Literature Reviews in Software Engineering." *Information and Software Technology*, vol. 106, 2019, pp. 101–121., doi:10.1016/j.infsof.2018.09.006.
- [18] European Telecommunication Standards Institute Environmental Engineering (ETSI EE). Life Cycle Assessment (LCA) of ICT equipment, networks and services; General methodology and common requirements. ETSI ES 203 199 (02/2015): Version 1.3.1, 2015

- [19] International Telecommunication Union Standardization Sector (ITU-T). Methodology for environmental life cycle assessments of information and communication technology goods, networks and services. ITU-T L.1410., 2014
- [20] Bieser, J., & Hilty, L. (2018). Assessing indirect environmental effects of information and communication technology (ict): A systematic literature review. *Sustainability*, 10(8), 2662. <https://doi.org/10.3390/su10082662>
- [21] AGIT – Alliance Green IT, Baromètre Green IT , 2020
- [22] Coroamă, Vlad C., Pernilla Bergmark, Mattias Höjer, and Jens Malmudin. “A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services.” *Proceedings of the 7th International Conference on ICT for Sustainability*, 2020. <https://doi.org/10.1145/3401335.3401716>.
- [23] Ahmadi Achachlouei, Mohammad. “Exploring the Effects of ICT on Environmental Sustainability: From Life Cycle Assessment to Complex Systems Modeling .” Thesis, KTH, 2015.
- [24] Bonvoisin, Jeremy, Alan Lelah, Fabrice Mathieux, and Daniel Brissaud. “An Integrated Method for Environmental Assessment and Ecodesign of Ict-Based Optimization Services.” *Journal of Cleaner Production* 68 (2014) : 144–54. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.003>.
- [25] Börjesson Rivera, Miriam, Cecilia Håkansson, Åsa Svenfelt, and Göran Finnveden. “Including Second Order Effects in Environmental Assessments of ICT.” *Environmental Modelling & Software* 56 (2014): 105–15. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.02.005>.
- [26] ISO, ISO 14044:2006, Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices, 2006
- [27] Malmudin, Jens, and Vlad Coroama. “Assessing ICT's Enabling Effect through Case Study Extrapolation — the Example of Smart Metering.” *2016 Electronics Goes Green 2016+ (EGG)*, 2016. <https://doi.org/10.1109/egg.2016.7829814>.
- [28] Jevon, William Stanley. *He Coal Question; An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal Mines*. London, Royaume-Uni : Macmillan & Co., 1865.
- [29] GIEC, Rapport de synthèse afférent au sixième Rapport d'évaluation, 2021
- [30] ADEME, Caractérisation des effets rebond induits par le télétravail, 2020
- [31] Fanny Lopez, Cécile Diguët, Les impacts énergétiques et spatiaux des data centers sur les territoires, Institut Paris région, 18 décembre 2019
- [32] ADEME, [Étude] Le véhicule électrique dans la Transition écologique en France, décembre 2017
- [33] Fuchs, Christian. “Theorising and Analysing Digital Labour: From Global Value Chains to Modes of Production.” *The Political Economy of Communication*, 2013.
- [34] Larousse, Processus dans le dictionnaire en ligne (point 2), consulté le 24 juillet 2021 <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/processus/64066>
- [35] Larousse, Abiotique dans le dictionnaire en ligne (point 2), consulté le 24 juillet 2021 <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/abiotique/109>
- [36] Larousse, Ecoconception dans le dictionnaire en ligne, consulté le 24 juillet 2021 <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/%C3%A9coconception/186328>