

POTENTIEL DE CONTRIBUTION DU NUMERIQUE A LA REDUCTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX : ETAT DES LIEUX ET ENJEUX POUR LA PROSPECTIVE

Décembre 2016

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par *Deloitte Développement Durable, EcoInfo, Futuribles et le CRÉDOC*

Contrat n°15 10 C0035

Coordination technique ADEME : *Laurent Meunier, Patrick Jolivet, Service Économie et Prospective, ADEME*



RAPPORT FINAL

REMERCIEMENTS

Membres contributeurs :

DELOITTE DEVELOPPEMENT DURABLE	Benoît Tinetti Pierre-Alexis Duvernois Yannick Le Guern
ECOINFO	Françoise Berthoud Carole Charbuillet Cédric Gossart Anne-Cécile Orgerie Laurent Lefèvre
FUTURIBLES	François de Jouvenel Cécile Desaunay
CREDOC	Pascale Hébel

Nous tenons également à remercier les membres du Comité de Pilotage qui ont activement participé à l'étude.

ADEME	Alain Anglade Philippe Bajeat Marion Berthelon Fabienne Benech Cyrielle Borde Daniel Clément Amandine Crambes Alain Geldron Patrick Jolivet Laurent Meunier Marie Payeur Hervé Pernin Gabriel Plassat Olivier Réthoré
DGE	Marie-Catherine Lejard

CITATION DE CE RAPPORT

Tinetti B., Duvernois P-A., Le Guern Y., Berthoud F., Charbuillet C., Gossart C., Orgerie A-C., Lefèvre L., de Jouvenel F., Desaunay C., Hébel P. (2016), Potentiel de contribution du numérique à la réduction des impacts environnementaux : Etat des lieux et enjeux pour la prospective – Rapport Final ADEME, 145 pages.

Copyright :

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	2
SOMMAIRE.....	3
RESUME	6
EXECUTIVE SUMMARY	8
GLOSSAIRE	10
I. INTRODUCTION	12
I.1. LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX DES TICs.....	12
I.1.1. Le changement climatique	12
I.1.2. L'épuisement des ressources naturelles	13
I.1.3. Le traitement en fin de vie.....	14
I.2. OBJECTIFS DE LA MISSION	14
II. PERIMETRE DE L'ETUDE	16
II.1. EFFETS CONSIDERES	16
II.2. USAGES CONSIDERES	17
III. METHODOLOGIE	18
III.1. VISION D'ENSEMBLE DE LA METHODOLOGIE DE L'ETUDE	18
III.2. METHODOLOGIE DU VOLET 1	18
III.2.1. Recherche bibliographique à partir de sources académiques.....	18
III.2.2. Recherche bibliographique à partir de sources institutionnelles	19
III.2.3. Caractérisation et compilation des sources bibliographiques recensées en fonction de leur pertinence 20	
III.3. METHODOLOGIE DU VOLET 2	21
III.3.1. Élaboration de fiches de lecture.....	21
III.3.2. Focus sur des usages particuliers des TICs.....	22
III.3.3. Réflexions sur l'intégration des TICs aux études prospectives de l'ADEME.....	22
IV. ENSEIGNEMENTS DE LA RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	24
IV.1. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU NUMERIQUE, UN SUJET DE PLUS EN PLUS INVESTIGUE	24
IV.2. ENSEIGNEMENTS SUR LE PERIMETRE D'ANALYSE DES PUBLICATIONS	25
IV.2.1. Considérations sur le cycle de vie des TICs.....	25
IV.2.2. Considérations sur les impacts environnementaux considérés.....	25
IV.2.3. Considérations sur les impacts directs, indirects ou systémiques.....	26
IV.2.4. Considérations sur le périmètre géographique des publications.....	26
IV.3. ENSEIGNEMENTS SUR LES METHODOLOGIES UTILISEES.....	27
IV.4. ETATS DES LIEUX DES CONNAISSANCES SUR LES EFFETS REBOND DES TICs ET SUR LEUR PRISE EN COMPTE.....	29

IV.5. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LA QUALITE DES DONNEES UTILISEES ET LEURS IMPACTS SUR LES CONCLUSIONS DES ETUDES.....	30
IV.6. CONCLUSIONS DE LA RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	31
V. FOCUS SUR PLUSIEURS USAGES DES TICS	33
V.1. SELECTION DE PUBLICATIONS POUR ANALYSE APPROFONDIE.....	33
V.1.1. Critères de sélection	33
V.1.2. Liste de de publications retenues	33
V.2. LE TELETRAVAIL	33
V.3. LA DEMATERIALISATION	39
V.4. LE E-COMMERCE	44
V.5. AUTRES FOCUS	48
V.5.1. La consommation collaborative	48
V.5.2. Autres usages importants des TICs étudiés	48
V.5.3. Focus sur les nouveaux usages des TICs (et de leurs impacts sur l'environnement)	49
VI. INTEGRATION DU NUMERIQUE DANS LES ETUDES PROSPECTIVES.....	50
VI.1. ENSEIGNEMENTS SUR LES TRAVAUX PROSPECTIFS PREEXISTANTS EN LIEN AVEC LES TICs	50
VI.2. RELECTURE CRITIQUE DES TRAVAUX PROSPECTIFS DE L'ADEME	54
VI.2.1. Alléger l'empreinte environnementale des Français	55
VI.2.2. Visions 2030-2050	55
VI.2.3. Étude sur le potentiel d'extension de la consommation collaborative pour réduire les impacts environnementaux	57
VI.2.4. Conclusions sur l'analyse des travaux prospectifs	58
VII. RECOMMANDATIONS POUR DES TRAVAUX FUTURS.....	59
VII.1. RECOMMANDATIONS POUR AMELIORER LES CONNAISSANCES DE L'ADEME SUR LES IMPACTS DU NUMERIQUE	59
VII.1.1. Bonnes pratiques	59
VII.1.2. Éléments à intégrer dans les futurs cahiers des charges de l'ADEME	60
VII.1.3. Sujets à investiguer.....	61
VII.1.4. Établissement d'une feuille de route pour l'ADEME	63
VII.2. RECOMMANDATIONS EN VUE D'INTEGRER LE NUMERIQUE DANS LES ETUDES PROSPECTIVES DE L'ADEME	66
VIII. CONCLUSIONS.....	68
ANNEXES	73
ANNEXE I : BIBLIOGRAPHIE DU VOLET 1	74
ANNEXE II : LISTE DES PUBLICATIONS AYANT FAIT L'OBJET DE FICHES DE LECTURE.....	83
ANNEXE III : FICHES DE LECTURE	85
III.1. FICHE DE LECTURE N°9, N°19 ET N°32 (SMART 2020).....	85
III.2. FICHE DE LECTURE N°13	89
III.3. FICHE DE LECTURE N°33 – VOLET E-COMMERCE / DEMATERIALISATION.....	93

III.4.	FICHE DE LECTURE N°33 – VOLET TELETRAVAIL	97
III.5.	FICHE DE LECTURE N°35	101
III.6.	FICHE DE LECTURE N°36	105
III.7.	FICHE DE LECTURE N°40	108
III.8.	FICHE DE LECTURE N°49	111
III.9.	FICHE DE LECTURE N°51	114
III.10.	FICHE DE LECTURE N°55	117
III.11.	FICHE DE LECTURE N°69	120
III.12.	FICHE DE LECTURE N°71	123
III.13.	FICHE DE LECTURE N°81	127
III.14.	FICHE DE LECTURE N°89-90	130
III.15.	FICHE DE LECTURE N°110	136
III.16.	FICHE DE LECTURE N°114	140

RESUME

Les technologies de l'information et de la communication (TICs) sont présentes dans quasiment tous les aspects de notre quotidien et de notre économie. Fréquemment, les TICs sont présentées comme partie intégrante d'une démarche globale de développement d'une économie verte. Cependant, ses **impacts environnementaux sont encore relativement mal évalués car le numérique présente un niveau d'interdépendance élevé et une rapidité d'évolution particulièrement importante**. Ainsi, il existe peu d'études environnementales complètes et publiques dans ce domaine.

Cette étude vise à dresser un état des lieux des connaissances sur la contribution du numérique à la réduction des impacts environnementaux. Elle s'organise en deux volets : une revue bibliographique internationale permettant de dresser un état des lieux des impacts environnementaux directs, indirects et systémiques du numérique, et une synthèse des éléments de contribution du numérique à la réduction des impacts environnementaux en analysant de manière plus détaillée certains usages particuliers. Les enseignements de ces deux volets ont enfin permis d'élaborer des recommandations à destination de l'ADEME en vue d'une part d'améliorer ses connaissances sur les impacts du numérique, et d'autre part d'intégrer le numérique dans ses futurs travaux prospectifs.

Le périmètre de cette étude englobe les impacts de 1^{er} ordre (directs, TICs elles-mêmes), de 2^{ème} ordre (indirects, applications des TICs à d'autres secteurs) et de 3^{ème} ordre (système). Les usages considérés englobent l'intégralité des usages orientés « grande consommation » des TICs pour le premier volet et, pour le second volet, un focus sur trois usages particuliers : le télétravail, le e-commerce et la dématérialisation.

L'étude bibliographique fait ressortir une forte hausse du nombre de publications pertinentes sur les impacts environnementaux des TICs. **Celles-ci traitent principalement des équipements « anciens »**, et les objets connectés, smart grid, smart city sont très rarement considérés sous l'angle environnemental.

Cependant, ces diverses publications présentent une forte hétérogénéité en termes de frontières des systèmes considérés. La très grande majorité se focalise essentiellement sur la phase d'usage des équipements. La phase de fin de vie est souvent négligée ou très approximative. L'analyse de la phase de fabrication, quant à elle, repose souvent sur des données anciennes dont la représentativité temporelle, et donc technologique, est discutable.

Les indicateurs considérés dans l'analyse des impacts environnementaux sont majoritairement limités aux émissions de gaz à effet de serre et à la consommation d'énergie même si quelques analyses plus étendues proposent des analyses de cycle de vie complètes multi-indicateurs. Concernant les impacts considérés, ils relèvent essentiellement des impacts directs et plus rarement des impacts indirects ou systémiques, l'analyse de ces effets étant essentiellement dans la littérature orientée effets rebond et traitant spécifiquement de ce sujet. Par ailleurs, le périmètre géographique des publications considéré montre que l'Europe et le continent nord-américain sont les plus actifs sur le sujet.

Il ressort de l'étude bibliographique que les effets rebond associés aux TICs sont peu documentés. Ils sont induits par l'amélioration de l'efficacité énergétique des équipements et par les progrès techniques permettant la miniaturisation des équipements numériques et de leurs composants. Dans les deux cas, il y a gain d'efficacité (matériaux ou énergie). En dépit des gains, on constate dans certains cas une augmentation de la quantité de matériaux utilisés et de la consommation d'énergie ; cela correspond à l'effet rebond. Il est à noter que de nombreuses incertitudes demeurent quant à l'évaluation des effets rebond des TICs. Cela peut s'expliquer par le manque de données mais aussi par l'hétérogénéité des méthodes de mesure.

Cependant, cette étude montre que **les effets rebond du numérique existent bel et bien et sont potentiellement très élevés**.

Globalement, plusieurs zones d'incertitudes sont identifiées. En particulier, l'importante variabilité sur les hypothèses de scénario (durée d'usage des produits, temps de lecture des documents numériques, type d'équipement, etc.) couplée à la complexité et l'évolutivité des technologies mises en œuvre rendent les résultats non comparables entre eux. Ceci constitue un véritable frein à la consolidation des données et des résultats scientifiques. Un travail de standardisation pourrait constituer une piste d'amélioration intéressante.

Le deuxième volet de l'étude s'est focalisé sur trois usages spécifiques des TICs : le télétravail, la dématérialisation et le e-commerce. **Les études sur le télétravail montrent une réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) même si les gains à l'échelle d'un pays demeurent faibles. Pour la dématérialisation, les études sont focalisées sur des produits plutôt que des usages** par les TICs. Ce

choix ne permet pas de prendre en compte le comportement des usagers ce qui génère des fortes variations dans les résultats de comparaison entre un service dématérialisé et son équivalent conventionnel. **Les études sur le e-commerce souffrent d'un manque de robustesse méthodologique** ; elles démontrent néanmoins une réduction des impacts environnementaux sur une majorité d'indicateurs. La logistique finale influence fortement les gains potentiels du e-commerce.

L'impact de cette étude a été élargi aux travaux prospectifs existants. L'ensemble de ces travaux adopte une approche de type « Empreinte Carbone » qui se focalise sur les émissions de GES ou les consommations d'énergie et ne prennent pas en compte toutes les étapes du cycle de vie. Les études existantes sont très simplifiées et manquent d'une approche systémique, et **il serait plus approprié de qualifier ces publications d'extrapolations plutôt que d'études prospectives**. Une relecture critique des travaux prospectifs de l'ADEME (dont « Visions 2030-2050 » et « Alléger l'empreinte environnementale des Français ») a été conduite en vérifiant la couverture de l'état de l'art du domaine, la prise en compte de nouveautés (techniques, comportementales) et la présence d'une approche systémique. Il ressort de cet exercice que l'ADEME privilégie des approches larges mais peu précises sur les impacts du numérique.

Il ressort de cette étude focalisée que de nombreuses limitations en termes méthodologiques sont communes entre les différents usages. Ainsi, au vu des écueils identifiés sur l'analyse des trois usages spécifiques et des travaux prospectifs existants, il a été observé **l'impossibilité de développer une réflexion prospective de qualité suffisante sur les impacts environnementaux du numérique adaptées au contexte français à horizon 2030**.

Cette étude se conclue par **un ensemble de recommandations pour améliorer les connaissances de l'ADEME sur les impacts du numérique**. Ces recommandations incluent un ensemble de **bonnes pratiques** : adopter des approches environnementales multicritère et multi-étapes, intégrer les effets indirects et effets rebond dans les évaluations, améliorer la transparence des hypothèses et prendre en compte l'équivalence du service rendu qui permettra des comparaisons plus réalistes avec les approches conventionnelles.

Un ensemble d'**éléments à intégrer dans les futurs cahiers des charges** des études lancées par l'ADEME est également proposé : améliorer la qualité des données d'activités utilisées en favorisant les données réelles plutôt que bibliographiques, impliquer l'industrie dans la collecte des données, élargir les comités de pilotage des études ADEME en incluant notamment des personnes de la recherche académique ou industrielle et développer des analyses de sensibilité avec des approches de type « point de bascule » qui évitent des visions binaires et tranchés.

Il en ressort un ensemble de **sujets à investiguer** sur le fait de dresser un panorama des TICs dans les secteurs d'activités les plus importants, alimenter les bases de données publiques, développer des approches macroscopiques, mieux prendre en compte l'enjeu des métaux critiques pour les TICs et la fin de vie et enfin appliquer les principes de l'économie circulaire au secteur du numérique.

L'amélioration des connaissances sur les impacts environnementaux du numérique est une des conditions nécessaires au développement de **travaux de prospective** de qualité sur la réalisation desquels nous proposons également des recommandations.

L'ensemble de ces recommandations mettent en valeur le besoin d'améliorer les connaissances actuelles sur les impacts du numérique afin de pouvoir identifier dans quelle mesure ces impacts pourraient évoluer dans les prochaines décennies. **Le rôle de l'ADEME, en tant qu'institution publique, est donc central, afin d'accélérer la mutation de tout le secteur des TICs vers un développement plus soutenable.**

EXECUTIVE SUMMARY

Information and communication technologies (ICTs) are present in almost every aspect of our daily lives and our economy. Frequently, ICTs are presented as an integral part of a global approach towards the development of a green economy. However, its **environmental impacts are still relatively poorly assessed because digital technology has a high level of interdependence and a particularly rapid rate of change**. Thus, there are few comprehensive and public environmental studies in this area.

The purpose of this study is to draw up an inventory of knowledge on the contribution of digital technology to the reduction of environmental impacts. It is organized in two parts: an international bibliographic review to assess the direct, indirect and systemic impacts of the digital environment and a synthesis of the elements of digital technology contribution to the reduction of environmental impacts by analysing more specific uses. Finally, the lessons learned from these two parts allow for drawing up recommendations for ADEME in order first to improve its knowledge of the impact of digital technology, and second to integrate digital technology into its future prospective work.

The scope of this study encompasses 1st order (direct, ICTs themselves), 2nd order (indirect, ICT applications to other sectors) and 3rd order (systemic) impacts. The uses considered cover all the "mass-market" uses of ICTs for the first part and, for the second part, a focus on three specific uses: teleworking, e-commerce and dematerialization.

The literature review shows a significant increase in the number of relevant publications on the environmental impacts of ICTs. **These mainly deal with "old" equipment**; and connected objects, smart grid, smart city are very rarely considered from an environmental point of view.

However, these various publications present a strong heterogeneity in terms of the boundaries of the systems considered. The overwhelming majority focuses on the use phase of equipment. The end-of-life phase is often neglected or very approximate. As for the analysis of the manufacturing phase, it often relies on old data whose temporal, and thus technological, representativeness is questionable.

The metrics considered in the environmental impact assessment are mainly limited to greenhouse gas emissions and energy consumption, although some more extensive studies offer comprehensive multi-indicator life cycle analyses. Concerning the types of impacts considered, they relate mainly to direct impacts and more rarely to indirect or systemic impacts, the analysis of these effects being mainly in the literature oriented on rebound effects and dealing specifically with this subject. In addition, the geographic perimeter of the considered publications shows that Europe and the North American continent are the most active on the subject.

The bibliographic effects shows that the rebound effects associated with ICTs are poorly documented. They are induced by the improvement of the energy efficiency of the equipment and by the technical advances allowing the miniaturization of the digital devices and their components. In both cases, there is gain in efficiency (materials or energy). Despite these gains, in some cases there has been an increase in the amount of materials used and in energy consumption. This corresponds to the rebound effect. It should be noted that many uncertainties remain regarding the assessment of the rebound effects of ICTs. This can be explained by the lack of data but also by the heterogeneity of the measurement methods.

However, this study shows that **the rebound effects of ICT exist well and truly and are potentially very high**.

Overall, several areas of uncertainty are identified. In particular, the large variability in the scenario assumptions (duration of use of products, reading time of digital documents, type of equipment, etc.) coupled with the complexity and progress of the technologies make results not comparable among themselves. This constitutes a real brake on the consolidation of scientific data and results. A standardization work could be an interesting trail for improvement.

The second part of the study is focused on three specific uses of ICTs: teleworking, dematerialization and e-commerce. **Studies on telework show a reduction in greenhouse gas (GHG) emissions** even though gains at a country level remain low. **For dematerialization, studies are focused on products** rather than in usages. This choice does not make it possible to take into account the behaviour of users, which generates large variations in the results comparing between a dematerialized service and its conventional equivalent. **Studies on e-commerce suffer from a lack of methodological robustness**; they nevertheless

demonstrate a reduction in environmental impacts on a majority of indicators. The final logistics strongly influence the potential gains of e-commerce.

The impact of this study has been extended to existing prospective work. All of this work adopts a "Carbon Footprint" approach that focuses on GHG emissions or energy consumption and does not take into account all stages of the life cycle. Existing studies are very simplified and lack a systemic approach. And, **it would be more appropriate to classify these publications as extrapolations rather than prospective studies.** A critical re-reading of ADEME's prospective work (including "Visions 2030-2050" and "Alléger l'empreinte environnementale des Français") was carried out by checking the coverage of the domain's state-of-the-art, the taking into account of new features (technical, behavioural) and the presence of a systemic approach. It emerges from this exercise that ADEME favours broad but not very precise approaches on the impacts of digital technologies.

It emerges from this focused study that many methodological limitations are common between the different uses. Thus, in view of the pitfalls identified on the analysis of the three specific uses and existing prospective works, it has been observed that **it is impossible to develop prospective reflection of sufficient quality on the environmental impacts of digital technology adapted to the French context by 2030.**

This study concludes with **a set of recommendations to improve ADEME's knowledge on the impacts of ICT.** These recommendations include a set of **good practices**: adopting multi-criteria and multi-stage environmental approaches, integrating indirect impacts and rebound effects into evaluations, improving the transparency of assumptions and taking into account the equivalence of the rendered service, which will allow more realistic comparisons with conventional approaches.

A set of **elements to be included in the future specifications** of the studies launched by ADEME is also proposed: to improve the quality of the activity data used by promoting real data rather than bibliographic one, to involve the industry in collecting data, to enlarge the steering committees of the ADEME studies by including in particular people from academic or industrial research, and to develop sensitivity analyses using "breaking point" approaches that avoid binary and sliced visions.

A set of **topics to investigate** is provided: to draw up a panorama of ICTs in the most important sectors of activity, to feed public databases, to develop macroscopic approaches, to better take into account the issue of critical metals for ICTs and end-of-life, and finally to apply the principles of the circular economy to the digital sector.

Improving knowledge about the environmental impacts of digital technology is one of the prerequisites for the development of quality **prospective work**, on which we also propose recommendations.

All of these recommendations highlight the need to improve current knowledge about the impacts of ICTs in order to be able to identify the extent to which these impacts could evolve in the coming decades. **The role of ADEME, as a public institution, is therefore central, in order to accelerate the transformation of the entire ICT sector towards a more sustainable development.**

GLOSSAIRE

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV)	<p>Méthode d'évaluation quantitative des impacts environnementaux d'un produit, d'un service ou d'un procédé. Ayant pris son essor au début des années 90, l'ACV est une méthode :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Multicritère : plusieurs types d'impacts environnementaux étudiés ; • Multi-étapes : l'ensemble du cycle de vie du produit/service procédé est étudié ; et • Standardisée, par la série des normes ISO 14040.
ACV ATTRIBUTIONNELLE	<p>Évaluation environnementale basée sur une approche descriptive du système étudié, tel qu'il est prévu de fonctionner. Ce type d'approche ne considère pas (ou peu) les interactions et les conséquences directes et indirectes que peut engendrer le système étudié sur le fonctionnement d'autres systèmes. Cette approche ne comptabilise donc que les impacts environnementaux directement attribuables au système étudié.</p>
ACV CONSEQUENTIELLE	<p>Cette approche vise à évaluer les conséquences environnementales directement et indirectement attribuables au système étudié. Ce type d'approche est aussi appelé « basée sur le marché » ou « orientée effets ». Elle permet notamment de considérer les effets environnementaux sur l'économie liés à une décision, selon un périmètre plus ou moins large (par exemple : augmentation ou diminution marginale du fonctionnement de certains systèmes industriels liés au changement de stratégie d'une entreprise ou modifications structurelles du marché et de l'économie liées à une décision politique). Pour information, l'International Reference Life Cycle Data System (ILCD) fournit différentes recommandations selon le type d'ACV réalisée :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Situation A : aide à la décision à l'échelle microscopique : ceci s'applique à des décisions dont les conséquences ont une portée limitée, le plus souvent à l'échelle d'un produit ou d'un service. Il n'y a pas de conséquences dans le système d'arrière-plan (background system). Par exemple, ce contexte d'application sied à un industriel qui souhaite déterminer la performance environnementale de son produit. • Situation B : aide à la décision à l'échelle méso ou macroscopique : ceci est approprié dans le cas où une décision a des conséquences significatives sur le système d'arrière-plan, impliquant des mécanismes de marché. Par exemple, ce contexte d'application est pertinent dans le cadre d'une décision politique sur l'implémentation des biocarburants dans le secteur du transport en Europe. • Situation C : elle est associée à la description purement descriptive d'un système (plutôt en comptabilité) et n'est pas pertinente ici. <p>Ceci conditionne les frontières du système : les ACV attributionnelles (Situation A) incluent toutes les activités physiquement reliées à la chaîne de valeur du produit étudié, tandis que les ACV conséquentielles (situation B) incluent les activités affectées par une prise de décision.</p>
CONSOMMATION COLLABORATIVE	<p>Échange, entre particuliers et à des fins d'usage, d'un bien ou d'un service. Cet échange peut être marchand ou non, en ligne ou hors ligne, impliquant ou non un transfert de propriété. La consommation collaborative peut utiliser une plateforme collaborative, i.e. système informatique qui met à disposition de ses utilisateurs des ressources et des outils pour mettre en relation et faciliter les échanges.¹</p>
(D)EEE	(Déchets d')Équipements Électriques et Électroniques
DEMATÉRIALISATION / RE-MATÉRIALISATION	<p>La dématérialisation consiste au remplacement dans une organisation de ses supports d'informations matériels par des fichiers informatiques et des ordinateurs. La re-matérialisation est le procédé inverse.</p>
E-COMMERCE	<p>Ensemble des transactions commerciales s'opérant à distance par le biais d'interfaces électroniques et digitales. Le e-commerce englobe essentiellement les transactions commerciales s'effectuant sur Internet à partir de différents types de terminaux (ordinateurs, tablettes, smartphones, consoles, TV connectées) mais également celles réalisées à partir d'applications spécifiques (applications mobiles) qui ne font pas toujours appel aux protocoles Internet.</p>
E-LEARNING	<p>Utilisation des nouvelles technologies multimédias et de l'Internet pour améliorer la qualité de l'apprentissage en facilitant l'accès à des ressources et des services, ainsi que les échanges et la collaboration à distance.</p>
ÉCONOMIE DE FONCTIONNALITE	<p>Économie privilégiant l'usage à la possession et tend à vendre des services liés aux</p>

¹ Le périmètre exact de la consommation collaborative sera précisé à la fin du Volet 1 de l'étude en vue d'une analyse plus approfondie dans le Volet 2.

	produits plutôt que les produits eux-mêmes.
ÉCONOMIE NUMERIQUE	Comprend le secteur des télécommunications, de l'audiovisuel, du logiciel, de l'Internet et les secteurs qui les utilisent en tant que cœur ou support de leur activité.
EFFET DIRECT, INDIRECT, SYSTEMIQUE	Cf. Tableau du chapitre II.
EFFET REBOND	Cf. Tableau du chapitre II
GES	Gaz à effet de serre
OBSOLESCENCE PROGRAMMEE	Ensemble des techniques par lesquelles un metteur sur le marché vise à réduire délibérément la durée de vie d'un produit pour en augmenter le taux de remplacement.
TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION (TIC)	Ensemble des techniques et des équipements informatiques permettant de communiquer à distance par voie électronique. Cela comprend à la fois les équipements côté utilisateur final (ordinateur, téléphone, etc.) mais également les infrastructures réseau (datacentres, réseau internet, etc.).
TELETRAVAIL	Toute forme d'organisation du travail dans laquelle un travail qui aurait également pu être exécuté dans les locaux de l'employeur est effectué par un salarié hors de ces locaux de façon régulière et volontaire en utilisant les technologies de l'information et de la communication dans le cadre d'un contrat de travail ou d'un avenant à celui-ci.
UNITE FONCTIONNELLE (UF)	Représente en ACV une quantification de la fonction d'un produit/service/procédé. L'unité fonctionnelle fournit donc une référence par rapport à laquelle définir et normaliser les intrants et extrants du système étudié. Cela permet d'assurer la comparabilité des résultats d'une ACV sur une base commune. Dans le cadre de l'ACV d'une initiative de consommation collaborative, il est préférable de ramener l'UF à l'usage du produit, plutôt qu'à sa possession sur une certaine période de temps

I. INTRODUCTION

A l'heure actuelle le numérique est présent dans quasiment tous les aspects de notre quotidien et de notre économie. Certaines technologies de l'information et de la communication (TIC) paraissent maintenant incontournables (téléphone portables, moyens de communication en ligne, e-commerce, etc.). Par exemple, selon les données du CREDOC, en 2014, 8 ménages sur 10 disposent d'une connexion Internet à domicile, près de la moitié possèdent un smartphone².

Le soutien de l'économie numérique et du développement des TIC est fréquemment présenté comme faisant partie intégrante d'une démarche globale de développement d'une économie verte. Une publication de l'institut international du développement durable (IDDRI)³, estime par exemple que l'utilisation de *smart systems* dans les domaines de l'énergie, du transport, du bâtiment et manufacturiers permettra de diminuer leurs émissions de CO₂ de 15% en 2020 par rapport à un scénario *business as usual* (en référence à 2002).

Malgré les vertus « écologiques » largement communiquées du numérique, force est de constater que les effets environnementaux sont encore aujourd'hui relativement mal connus, pour différentes raisons :

- Parce que les connaissances scientifiques actuelles restent assez partielles concernant les impacts sur le monde vivant des substances contenues dans les équipements ;
- Parce que les secrets industriels limitent l'accès aux données qui permettraient de développer ces connaissances ; et
- Peu de travaux scientifiques envisagent de regarder les impacts de deuxième et troisième ordre de l'usage de ces technologies, voire les effets rebond (cf. définitions présentées dans le Tableau 2).

Or, le numérique se caractérise par une grande complexité et hétérogénéité, et un niveau d'interdépendance inégalé depuis le début de l'ère industrielle. On trouve relativement peu d'études environnementales complètes et publiques dans ce domaine. La plupart se basent sur des données génériques, relativement anciennes alors que ces technologies évoluent à une rapidité extraordinaire (mise sur le marché de nouveaux types d'équipement plusieurs fois par an, nouveaux procédés, nouveaux composants, nouveaux usages).

I.1. LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX DES TICs

Les usages liés au TICs, comme le télétravail, la dématérialisation, peuvent conduire à une réduction des impacts environnementaux par rapport à leurs équivalents sans TICs. Cependant, les TICs ont un réel impact sur l'environnement, non négligeable qui s'il est non maîtrisé peut venir annuler ce gain et ce indépendamment des effets indirects ou effets rebond éventuels.

I.1.1. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

D'un point de vue environnemental, les TIC font principalement parler d'eux pour leur forte contribution à la consommation d'énergie et aux émissions de GES en phase d'usage. De nombreuses études existent sur le sujet et ne s'entendent pas toutes sur les périmètres, hypothèses et résultats. Cependant la tendance globale est la suivante.

Concernant l'impact des TICs en phase d'usage, il était estimé à 5% de la consommation mondiale d'électricité en 2012⁴ (sans prendre en compte les téléviseurs, téléphones mobiles et périphériques audio). La répartition approximative était alors la suivante : 30% pour les datacentres, 30% pour les équipements terminaux (principalement les ordinateurs) des utilisateurs et 40% pour les réseaux de télécommunications. Une étude plus récente⁵ indique que la consommation annuelle des TICs (incluant les téléviseurs, téléphones mobiles et périphériques audio) se situe en 2015 autour de 8% de la consommation mondiale

² <http://www.credoc.fr/pdf/Rapp/R317.pdf>

³ ICTs as Enablers of the Green Economy: A brief on Internet policy issues – Policy Brief - 2011

⁴ "D8.1. Overview of ICT energy consumption", EINS Consortium, deliverable, 2013

⁵ "Green Cloud? The current and future development of energy consumption by data centers, networks and end-user devices", R. Hintemann, J. Clausen, International Conference on ICT for Sustainability, 2016.

d'électricité. Les prévisions indiquent que cette part devrait globalement continuer à augmenter (croissance estimée à 7% par an). Concernant la répartition entre les différents secteurs, il semblerait que les parts dues aux datacentres et aux réseaux de télécommunication devraient augmenter, tandis que la part des équipements des utilisateurs devrait diminuer. Cette diminution s'explique par une amélioration de l'efficacité énergétique des équipements terminaux, mais elle s'accompagnera d'un renouvellement plus fréquent des équipements qui pourra impacter les autres phases du cycle de vie. Quant à l'augmentation de la part des datacentres et des réseaux, elle est essentiellement provoquée par la multiplication des services offerts par le Cloud.

La contribution de cette consommation sur les émissions de GES dépend fortement du mix énergétique et donc de la localisation géographique de l'usage (répartition entre le charbon, le gaz, le nucléaire et les énergies renouvelables).

Les hypothèses du scénario d'usage conditionnent donc fortement les résultats du bilan environnemental et énergétique. Par exemple, pour un ordinateur l'impact sur le changement climatique peut varier de 138 à 266 kg eq. CO₂ en fonction du temps d'utilisation, de la durée d'usage choisie...⁶

D'autre part, la phase de fabrication des TICs a également un impact non négligeable. Ainsi, en fonction de la durée d'usage du produit et le type de produit, la fabrication apparait comme la plus impactante. La part de la fabrication pour un ordinateur peut varier de 26% à plus de 80% en fonction de l'étude considérée⁶.

1.1.2. L'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES NATURELLES

La quasi-totalité des études environnementales de type ACV se focalisent sur la consommation d'énergie et les émissions de GES, mais les TIC représentent également un enjeu majeur d'un point de vue de la consommation des ressources naturelles non renouvelables. De toutes les industries, celle des TIC est de loin la plus gourmande en ressources par unité de production : matériaux, métaux, énergie, eau, produits chimiques.

Du fait de la forte concentration en métaux très divers dans les composants électroniques (un smartphone contient une trentaine de métaux différents), les TIC contribuent fortement à la réduction des réserves d'éléments considérés comme critiques par l'Union européenne (métaux rares, métaux précieux) (cf. Tableau 1).

Tableau 1 – Exemples de métaux utilisés dans les TIC et les enjeux associés (Drezet 2012, Vidal 2016)⁷

	Argent	Cuivre	Indium	Galium	Germanium	Lithium	Tantale	Terres rares
Usage	Contact	Câbles	Ecrans	Leds	Wifi	Batteries	LCD, condensateurs	LCD, aimants
Part de la production mondiale dédiée aux TIC	21%	42%	>50%	40%	15%	20%	66%	20%
Réserves (ans)	15-30	40	10-15	10-15	10-15	Grandes	150	Grandes
Recyclage	>50%	>50%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%

Dans ce tableau, une réserve représente une quantité géologiquement identifiée, extraite avec la technologie disponible aujourd'hui et tenant compte de la valeur économique du métal aujourd'hui, et estimée sur les bases de la consommation actuelle (et de la croissance de consommation actuelle). Ces valeurs sont donc à prendre avec précaution. Cependant, la réalité d'aujourd'hui est que la concentration des métaux va en moyenne en diminuant dans les nouvelles mines découvertes.

Par ailleurs, les TICs nécessitent l'extraction d'un certain nombre de ressources qui sont des sous-produits de métaux porteurs. Par exemple, le gallium est exclusivement un sous-produit de l'extraction de l'aluminium. Donc une diminution de la demande en aluminium entrainera une réduction de l'accessibilité au

⁶ « Analyse du cycle de vie d'un ordinateur portable », Thèse professionnelle- Institut Arts et Métiers de Chambéry, Quentin Bézier, 2014

⁷ http://ecoinfo.imag.fr/IMG/mp4/ecoinfo-3-olivier_vidal___questions.mp4

gallium, et réciproquement une augmentation du prix du gallium n'entraînera pas automatiquement une augmentation de la demande en aluminium. La disponibilité des ressources est ainsi une question majeure pour le devenir des TICs. D'autre part, côté ressources naturelles, l'énergie et l'eau nécessaires à l'extraction minière sont également un grand enjeu puisque cette dernière en nécessite toujours en plus. Ceci contribue à l'augmentation de l'impact de la fabrication des TICs.

1.1.3. LE TRAITEMENT EN FIN DE VIE

Aujourd'hui, moins de 50% des DEEE français sont recyclés dans les filières réglementées et seulement 15,5% au niveau mondial suivent ce type de filières (Université des Nations Unies 2015⁸). Une grande partie de ces produits, est donc traitée dans des filières informelles ou illégales et exportée pour traitement dans des pays en voie de développement. Dans ce cadre, le traitement des TIC, notamment des cartes électroniques, n'est pas effectué dans des conditions acceptables que ce soit d'un point de vue environnemental ou pour la santé humaine. En effet, leur traitement non réglementé et principalement manuel, engendre par exemple l'émission de polluants organiques persistants et de métaux lourds non dégradables et bio-accumulables. Ces émissions ont des conséquences lourdes sur les écosystèmes et la santé humaine.

1.2. OBJECTIFS DE LA MISSION

La prise en compte du sujet des impacts environnementaux des TICs au sein de l'ADEME est relativement récente : les premiers travaux sur l'ACV du e-commerce, de la clé USB, du courriel et de la requête web ont été réalisés entre 2009 et 2011, ce qui est synchrone avec l'essor du sujet à partir de 2008 identifié en section IV.1.

Par ailleurs, les travaux sur le télétravail [13]⁹ et la consommation collaborative [14] font aussi figure d'études pionnières, au moins en France pour la première et à l'échelle mondiale pour la seconde.

Enfin, on notera que la thématique des impacts environnementaux des TICs est abordée de façon relativement transverse à l'ADEME :

- L'étude ACV sur l'e-commerce [1], le courriel [12], la requête web [17] et la clé USB [11] ont été commanditées par la Direction de la communication, de la formation et du développement ;
- L'étude sur le télétravail [13] a été commanditée par le Service Transports et Mobilité ; et
- L'étude sur la consommation collaborative [14] ainsi que la présente étude ont été commanditées par le Service Économie et Prospective.

Ceci illustre le besoin d'un rapprochement des différents services de l'ADEME sur cette thématique, ce qui constitue justement l'un des objectifs de la présente étude.

L'ADEME a également publié, en 2014, les résultats de sa réflexion prospective « Alléger l'empreinte environnementale des Français : vers une évolution en profondeur des modes de vie »¹⁰. Néanmoins, l'impact global des TIC sur l'empreinte environnementale des consommateurs français demeure encore difficile à estimer précisément, pour plusieurs raisons :

- Le potentiel de réduction de l'impact environnemental dépendra des grandes logiques dans lesquelles s'inscrira leur utilisation. Ainsi, le numérique peut favoriser de nouveaux modèles économiques comme l'économie collaborative, mais celle-ci peut aussi bien s'inscrire soit dans une logique de sobriété que favoriser l'hyperconsommation ;
- L'impact environnemental de la dématérialisation n'est pas forcément positif : l'étude d'analyse de cycle de vie (ACV) conduite pour l'ADEME a mis en évidence le bilan environnemental nuancé d'une lecture sur support papier et d'une lecture sur support numérique. Par ailleurs, l'utilisation des TIC s'inscrit de

⁸ <http://i.unu.edu/media/unu.edu/news/52624/UNU-1stGlobal-E-Waste-Monitor-2014-large-optimized.pdf>

⁹ Les numéros entre crochets font référence à l'ID des documents considérés dans la revue bibliographique et listés dans l'ANNEXE I.

¹⁰ <http://www.ademe.fr/alléger-lempreinte-environnementale-consommation-francais-2030>

plus en plus souvent dans une logique de renouvellement accéléré, qui tend à réduire leur durée de vie¹¹.

Il paraît essentiel donc aujourd'hui d'apporter des éléments plus complets permettant aux décideurs et autres acteurs des sphères publiques et privées de comprendre, évaluer, et a minima avoir une idée plus étendue des impacts directs et indirects des services proposés par l'économie numérique.

Dans ce contexte, l'ADEME souhaite améliorer ses connaissances sur la contribution du numérique à la réduction des impacts environnementaux. Pour cela, l'ADEME souhaite disposer d'une revue bibliographique internationale des études menées récemment sur ce sujet afin de pouvoir dresser la typologie des effets du numérique. Les objectifs opérationnels qui en découlent sont les suivants :

- Dresser un état des lieux des données disponibles sur les impacts environnementaux liés au numérique, et identifier les zones d'incertitudes ou de manques ;
- Analyser les points de convergence entre les études, et les points de divergence en se focalisant sur les éléments explicatifs ;
- Approfondir certaines études déjà réalisées ou en cours au sein de l'ADEME (et les autres exercices prospectifs menés par l'ADEME) ;
- Identifier les conditions permettant d'optimiser les bénéfices environnementaux liés au numérique ; et
- Établir des recommandations d'actions à conduire et identifier les besoins en études supplémentaires.

Pour atteindre les objectifs précédemment mentionnés, l'étude s'articule en deux volets :

- **Volet 1** : Réalisation d'un état des lieux des connaissances sur les impacts directs, indirects et systémiques du numérique, en vue d'identifier les principaux enjeux et les principales zones d'ombre ; et
- **Volet 2** : Éléments d'appréciation de la contribution du numérique à la réduction des impacts environnementaux et croisement avec les études prospectives de l'ADEME.

¹¹ Sur ce sujet, voir notamment l'article d'Eric Vidalenc et Laurent Meunier dans le numéro 402 de Futuribles : <https://www.futuribles.com/fr/base/revue/402/obsolescence-des-produits-limpact-ecologique/>

II. PERIMETRE DE L'ETUDE

II.1. EFFETS CONSIDERES

Le Tableau 2 ci-dessous présente les divers effets des TICs basés sur la typologie définie par l'OCDE¹² et notre compréhension de leurs applications, illustrée par des exemples. Suite à la réunion de lancement et au regard des objectifs de l'étude, il est convenu que rentrent dans le périmètre de l'étude les impacts de 1^{er} ordre, les impacts de 2^{ème} ordre et les impacts de 3^{ème} ordre, hors effets rebond macroéconomiques. En effet, ceux-ci ne sont pas attribuables exclusivement au secteur du numérique et l'estimation de la contribution du numérique n'est pas réalisable sans modélisation.

Tableau 2 – Cadre conceptuel d'analyse des liens entre TICs et environnement¹³
(vert : inclus dans l'étude ; rouge : hors périmètre)

Type d'effet	TICs en tant que solution	TICs en tant que problème
Impacts de 1^{er} ordre (directs : TICs elles-mêmes)	Fabriquer plus avec moins <i>Ex. : téléphone portable éco-conçu</i>	Cycle de vie des TICs : Production, Utilisation, Fin de vie <i>Ex. : consommation de terres rares, énergie consommée par les serveurs, déchets électroniques</i>
Impacts de 2^{ème} ordre (indirects : Applications des TIC à d'autres secteurs)¹⁴	Effets d'optimisation <i>Ex. : utilisation de TIC pour réduire la consommation énergétique d'un véhicule</i> Effets de substitution <i>Ex. : la facture électronique remplace la facture papier</i>	Effets induits <i>Ex. : achat d'imprimante lié à l'utilisation d'un ordinateur, achat d'un billet d'avion low cost via internet</i>
Impacts de 3^{ème} ordre (systémiques)	Profond changement structurel vers une économie dématérialisée <i>Ex. : télétravail, covoiturage, e-commerce, dématérialisation, économie collaborative, etc.</i>	Effets rebond (liés à un gain en consommation de ressources – énergie ou matériaux) - directs (on consomme plus de la même chose) <i>Ex. : la miniaturisation des équipements électroniques permet d'en installer partout (gain en matériaux) ; les gains en efficacité énergétique dans les datacentres permettent d'installer plus de serveurs</i> - indirects (on consomme plus d'autre chose) <i>Ex. : si l'hébergement de mes sites Internet me coûte moins cher, cela va me permettre d'équiper tout mon personnel en tablettes numériques.</i> - macroéconomiques (changements structurels dans la société) <i>Ex. : la baisse du prix du pétrole favorise dans l'ensemble de l'économie les secteurs les plus intenses en énergie aux dépens des secteurs qui en consomment peu. Elle peut également favoriser la croissance économique qui est elle-même gourmande en énergie.</i>

¹² OECD (2001) *Impacts of Information and Communication Technologies on Environmental Sustainability: speculations and evidence*

¹³ Source : EcolInfo (<http://ecoinfo.cnrs.fr/article360.html>), d'après le tableau présenté en page 147 du livre de L. Hilty (2008), *Information technology and sustainability : Essays on the relationships between information technology and sustainable development*, Books on Demand.

¹⁴ Soulignons que Hilty omet de mentionner l'usage des TIC pour le monitoring de l'environnement. À ce sujet, voir Gossart, C. and R. Garelo (2015). *Technologies numériques et environnement*. [Revue de l'électricité et de l'électronique](https://gossart.wp.mines-telecom.fr/files/2016/01/Num%C3%A9rique-et-environnement-draft.pdf) 4: 39-44. <https://gossart.wp.mines-telecom.fr/files/2016/01/Num%C3%A9rique-et-environnement-draft.pdf>.

II.2. USAGES CONSIDERES

Le Volet 2 de l'étude correspond, d'après le cahier des charges de l'étude, à un focus sur trois usages en particulier : le télétravail, le e-commerce et la consommation collaborative. Au cours du projet, il a été évoqué la possibilité de substituer un de ces usages par un autre plus opportun, si la revue bibliographique ne nous permettait pas d'identifier un nombre suffisant de documents pertinents. La revue bibliographique effectuée dans le cadre du Volet 1 de l'étude a donc inclus une recherche des études et articles disponibles sur les nouveaux usages des TICs. La section V.5.3. est consacrée à ce point.

Au final, un large panel d'usages des TICs a été considéré. Suite à l'établissement des connaissances sur ces différents usages, les trois focus mentionnés ci-avant ont finalement porté sur le télétravail, le e-commerce et la dématérialisation au sens large.

III. METHODOLOGIE

III.1. VISION D'ENSEMBLE DE LA METHODOLOGIE DE L'ETUDE

La méthodologie générale de l'étude est présentée dans la Figure 1.

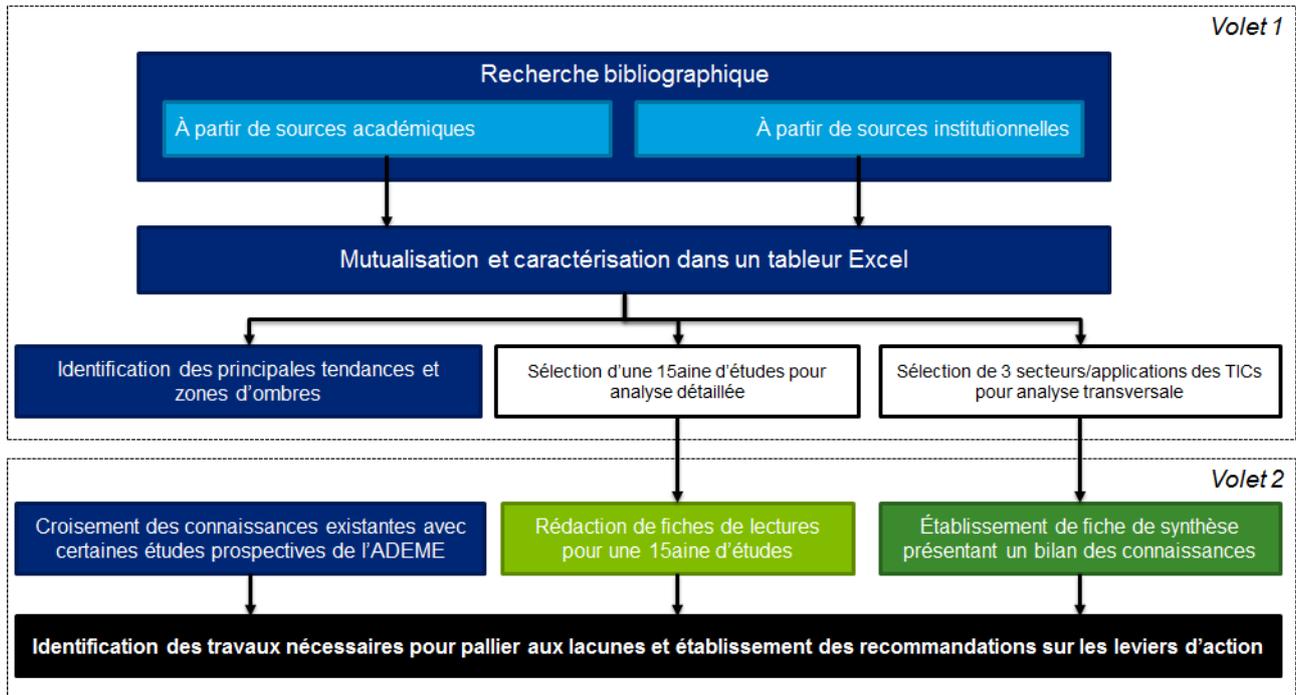


Figure 1 – Méthodologie générale de la mission

III.2. METHODOLOGIE DU VOLET 1

III.2.1. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE A PARTIR DE SOURCES ACADEMIQUES

L'élaboration de cette liste préliminaire de sources bibliographiques est basée :

- Sur les connaissances des membres de l'équipe projet ; et
- Une première recherche bibliographique utilisant les mots clés présentés ci-dessous (en français et anglais). Les éléments concernant les secteurs numériques ont été combinés aux différents mots-clés environnementaux et ce, en français et en anglais.

Tableau 3 – Mots clés retenus pour la recherche bibliographique

Mots-clés environnementaux		Secteur numérique
LCA	X	Collaborative consumption
Life Cycle		E-commerce
Environmental analysis		ICT
Enviromental impacts		Remote working
Energy		Sharing schemes
GhG emissions		Sharing economy
Carbon		Teleworking
Climate change		Telework
Rebound		Telecommuting
		Videoconference
	Videoconferencing	
	Smart grid	

Mots-clés environnementaux		Secteur numérique
		Smart city

Les bases de données utilisées sont présentées dans le Tableau 4.

Tableau 4 – Bases de données utilisées pour la recherche bibliographique

Base de données	Contenu
Science Direct	Plus de 2 000 revues en sciences de l'ingénieur, sciences de la vie et médicales, sciences humaines, de l'éditeur ELSEVIER.
Scopus	Base de données de références bibliographiques en sciences de l'ingénieur, sciences de la vie et médicales et sciences humaines ELSEVIER.
Springer Link	Plus de 1 500 revues en sciences et techniques et en sciences humaines et médicales SPRINGER et KLUWER.
Wiley	Revue en sciences et techniques et en sciences humaines et médicales WILEY en texte intégral depuis 1999.
Web of Science	Base de données de références bibliographiques et Journal of Citation reports. Archives depuis 1991.
Google Scholar	Moteur de recherche de documents à vocation académique : articles scientifiques, thèses, livres, résumés ou des rapports techniques dans plusieurs domaines de recherche.
ACM	Publications de l'association for Computing Machinery.
IEEE	Base de données dans le domaine de l'ingénierie électrique et électronique.
Business Source Complete	Base de données de publications dans le domaine des affaires et du commerce.
HAL	Archive ouverte pluridisciplinaire pour la diffusion d'articles scientifiques et de thèses, issus de laboratoires ou d'établissement de l'enseignement supérieur et de la recherche.

Environ 250 publications ont ainsi été identifiées. Cependant, un travail de tri a été effectué par l'équipe projet permettant d'évincer les publications qui ne répondaient pas à la problématique de la présente étude ou qui ne comportaient pas suffisamment d'intérêt. Ce travail de sélection a d'abord été fait sur le titre des articles, puis sur le résumé ou l'abstract, selon l'adéquation de la publication avec les objectifs de la présente étude. Par ailleurs, lorsque des articles étaient redondants ou trop similaires à d'autres déjà identifiés, le choix a été fait de ne garder que celui qui paraissait le plus pertinent.

III.2.2. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE A PARTIR DE SOURCES INSTITUTIONNELLES

La recherche bibliographique de publications émises par des pouvoirs publics, des industriels, des ONG ou des bureaux d'étude a été faite de façon différente de la recherche bibliographique à partir de sources académiques.

Plutôt qu'une recherche par mots-clés, il a été choisi sur la base de l'expertise de l'équipe projet de concentrer spécifiquement la recherche sur les sites internet de différents acteurs relativement au thème des impacts environnementaux des technologies numériques.

La liste des acteurs « institutionnels » couverts est décrite dans le Tableau 5.

Tableau 5 – Liste d'organisations ciblées dans la recherche bibliographique à partir de sources institutionnelles

Organisation	Type d'acteur
Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME)	Pouvoirs publics (France)
Commission Européenne DG ENV	Pouvoirs publics (Europe)
Commission Européenne DG CONNECT	Pouvoirs publics (Europe)
Commission Européenne DG JRC	Pouvoirs publics (Europe)
Commission Européenne DG Research	Pouvoirs publics (Europe)

Organisation	Type d'acteur
Agence Internationale de l'Énergie (AIE)	Pouvoirs publics (Monde)
Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE)	Pouvoirs publics (Monde)
Department for Environment, Food & Rural Affairs (DEFRA)	Pouvoirs publics (Royaume-Uni)
Waste & Resources Action Programme (WRAP)	ONG (Royaume-Uni)
Global e-Sustainability Initiative (GeSI)	Consortium mixte entre entreprises et pouvoirs publics
Office of Communications (OFCOM)	Pouvoirs publics (Royaume-Uni)
Greengrid	ONG / Consortium mixte (Monde)
GreenIT	Presse (France)
European Telecommunications Standards Institute (ETSI)	Pouvoirs publics (Europe)
International Telecommunication Union (ITU)	Pouvoirs publics (Monde)
European non-governmental organisation of Information and Communication Technology (ICT) Users (EG4U)	ONG (Europe)
Base de données de projets de recherche européennes FP6 FP7 H2020	Pouvoirs publics (Europe)
World Wide Fund for Nature (WWF)	ONG (Monde)
Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE)	Pouvoirs publics (Monde)

Environ 120 publications (rapports d'études principalement) ont ainsi été identifiées. Cependant, un travail de tri a été effectué par l'équipe projet permettant d'évincer les publications qui ne répondaient pas à la problématique de la présente étude ou qui ne comportaient pas suffisamment d'intérêt. Ce travail de sélection a d'abord été fait sur le titre des études, puis sur le résumé ou l'abstract quand ils étaient présents, selon l'adéquation de la publication avec les objectifs de la présente étude.

Au final, ce sont 38 publications pertinentes qui ont été retenues par ce biais.

III.2.3. CARACTERISATION ET COMPILATION DES SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES RECENSEES EN FONCTION DE LEUR PERTINENCE

Afin d'identifier les documents les plus pertinents et adaptés au contexte de cette étude, chaque source bibliographique identifiée a été consignée dans un fichier Excel suivant un certain nombre de critères de pertinence (cf. Tableau 6). Les critères de pertinence sont choisis en fonction des objectifs à atteindre. Ils sont là pour effectuer un pré-tri des références bibliographiques, et pour faciliter l'analyse comparative.

Le fichier Excel a été décomposé en trois onglets distincts :

- Guide de lecture : Introduction à l'ensemble du fichier, fournit les clés de lecture pour sa compréhension et son exploitation ;
- Revue bibliographique : Cœur du fichier ; tableau rassemblant l'ensemble des publications identifiées dans le Volet 1 de l'étude, ainsi que les différents critères de caractérisation auxquelles elles sont soumises ; et
- Listes : Onglet annexe où sont rassemblées les listes pour les colonnes à choix déterminées de la grille d'analyse du tableau de l'onglet « Revue bibliographique ».

Le tableau suivant reprend les éléments de l'onglet « Guide de lecture » et notamment les différents critères intégrés à la grille d'analyse des publications. Sont distingués les champs libres (pas de restriction sur le remplissage) des champs restreints (choix entre plusieurs propositions).

Tableau 6 – Liste de critères de la grille d'analyse Excel

Nom du champ	Rôle/ Description
Id	Champ verrouillé - Sert au référencement des différentes publications
Titre	Champ libre - Titre de la publication
Nom des auteurs	Champ libre - Nom des auteurs de la publication. Quand pertinent, sont distingués le commanditaire et le réalisateur de l'étude

Nom du champ	Rôle/ Description
Année de publication	Champ libre
Nombre de pages	Champ libre
Produit / service étudié	Champ libre - périmètre de la publication en termes d'applications TIC visées
Type de document	Champ restreint - Distinction entre rapports d'étude et articles scientifiques
Type d'étude	Champ libre - distinction entre analyses de services, produits, études prospectives, etc.
Type d'auteur	Champ restreint - Distinction entre académiques, consultants, pouvoirs publics, consortium mixte, etc.
Type de méthode	Champ restreint - distinction entre méthodes quantitatives et qualitatives
Type d'évaluation environnementale	Champ restreint - Ajout de précisions sur la méthodologie employée (ACV, empreinte carbone, etc.)
Revue indépendante	Champ restreint - Mention ou non d'une revue de l'étude par un tiers indépendant
Frontières des systèmes considérés	Champ restreint - Distinction les études mono-étape de celles incluant plusieurs phases voire toutes les phases du cycle de vie des applications TIC visées
Exhaustivité des effets environnementaux étudiés	Champ restreint - Distinction entre études multicritère et études monocritère (GES uniquement par exemple)
Type de données utilisées	Champ restreint - Distinction entre approche <i>bottom-up</i> (approche microscopique, extrapolée à un plus haut niveau par agrégation), approche <i>top-down</i> (approche consistant à prendre des données macroscopique et à ensuite ventiler les résultats via des règles de répartition), et approche mixte
Représentativité temporelle du mix électrique	Champ restreint - Écart entre la date de publication du document et la date de création/mise à jour des données relatives au mix électrique
Représentativité temporelle des données des équipements	Champ restreint - Écart entre la date de publication du document et la date de création/mise à jour des données utilisées
Représentativité technologique	Champ libre - Distinction entre études considérant des TIC traditionnels (type ordinateur, mail, etc.) et des NTIC (objets connectés, tablettes, drones, etc.)
Représentativité géographique	Champ restreint - Représentativité sur les données d'usage, sur le périmètre de la mission
Impacts analysés	Champ restreint - Distinction entre impacts directs, indirects ou systémiques des TICs
Prise en compte des effets rebond	Champ restreint - Considération d'effets rebond ou non, et si oui lesquels
Points-clés / Commentaires	Champ libre - Énumération des principaux points d'attention de la publication, ses limites, etc.

L'analyse faite en section IV de ce rapport a été conduite via l'analyse de ce fichier.

III.3. METHODOLOGIE DU VOLET 2

III.3.1. ÉLABORATION DE FICHES DE LECTURE

Comme vu en Figure 1, les études jugées les plus pertinentes parmi les publications identifiées dans la revue bibliographique ont été sélectionnées pour une analyse approfondie. Les critères de sélection sont présentés en section V.1.

Les fiches de lecture ont pour objectif de résumer ces publications. La structure de ces fiches est la suivante :

- Objectifs et champ de l'étude ;
- Périmètre ;
- Méthodologie employée ;
- Données utilisées ;
- Hypothèses-clés ;
- Principaux résultats et chiffres-clés ;

- Conclusions et discussions de l'auteur ; et
- Limites et besoins de données complémentaires.

Il est important de souligner que les premières sections de ces fiches de lecture correspondent à une analyse sans jugement du travail effectué. Nous avons en revanche concentré notre analyse critique et la prise de recul par rapport au travail des auteurs dans la dernière section « Limites et besoins de données complémentaires ».

III.3.2. FOCUS SUR DES USAGES PARTICULIERS DES TICs

Sur la base des fiches de lecture, l'enjeu de cette phase est d'analyser les informations issues de la bibliographie sur les impacts environnementaux du numérique et de produire une comparaison entre eux.

Cependant les informations extraites peuvent dépendre du contexte, des hypothèses et/ou des choix méthodologiques considérés par les auteurs. C'est pourquoi nous nous sommes attachés à évaluer et à analyser dans quelle mesure les bénéfices et préjudices environnementaux présentés dans la littérature sont traités sur une base méthodologique homogène.

Les usages considérés sont ceux mentionnés en section 0: télétravail, e-commerce et dématérialisation. La structure de chaque focus est relativement proche de celle des fiches de lecture :

- Contexte et champ des études ;
- Périmètre ;
- Approches méthodologiques ;
- Données utilisées ;
- Résultats marquants et principales tendances ; et
- Principales limites, besoins complémentaires.

Pour chaque point, les axes de convergence et/ou de divergence entre les différentes études ciblées ont été analysés. Sur cette base, un tableau récapitulatif pour chaque usage a été fait et résume les principaux points.

III.3.3. REFLEXIONS SUR L'INTEGRATION DES TICs AUX ETUDES PROSPECTIVES DE L'ADEME

L'objectif de cette phase est de confronter les résultats des enseignements issus de la bibliographie (en s'appuyant notamment sur les focus usages et les fiches de lectures) avec les résultats des études prospectives réalisées (en cours ou déjà publiées) par l'ADEME.

Ceci s'est tout d'abord concrétisé par une analyse comparée des travaux prospectifs existants sur les impacts du numérique avec les études prospectives de l'ADEME. L'analyse des travaux prospectifs existants sur les impacts des TICs a été faite de façon similaire aux focus réalisés sur le télétravail, le e-commerce et la dématérialisation.

L'analyse des travaux prospectifs existants de l'ADEME s'est faite en essayant d'apporter des réponses aux questions suivantes :

- L'étude est-elle à l'état de l'art des connaissances actuelles sur les impacts environnementaux du numérique ?
- L'étude prend-elle en compte les nouveautés (techniques, comportementales) ?
- L'étude a-t-elle une approche systémique ?

Cette analyse a porté sur les travaux suivants publiés par l'ADEME :

- Alléger l'empreinte environnementale des Français, 2014 ;
- Étude sur le Potentiel d'extension de la Consommation collaborative pour réduire les impacts environnementaux¹⁵, 2015-2016 ; et

¹⁵ En cours de publication au moment de la rédaction du présent rapport.

- Visions 2030-2050, 2015.

IV. ENSEIGNEMENTS DE LA RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

114 documents jugés pertinents ont été identifiés et analysés. Ils sont listés en ANNEXE I. Dans la suite de ce chapitre, les numéros entre crochets font référence à l'ID du document identifié dans l'ANNEXE I.

IV.1. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU NUMERIQUE, UN SUJET DE PLUS EN PLUS INVESTIGUE

Une des premières tendances analysées a été l'évolution du nombre de publications pertinentes identifiées en fonction de l'année, comme le montre le graphique ci-dessous.

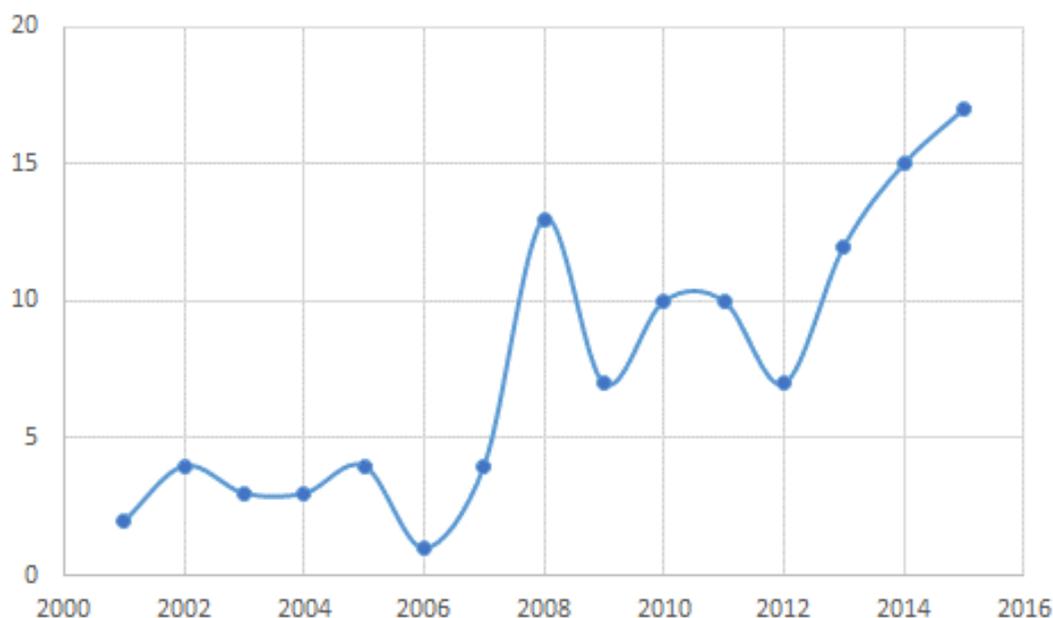


Figure 2 – Évolution entre 2000 et 2015 du nombre de publications pertinentes identifiées au cours de l'étude

On observe une forte hausse du nombre de publications pertinentes identifiées à partir de 2007. Depuis, malgré des variations entre 2009 et 2012, le sujet des impacts environnementaux des TICs apparaît comme étant de plus en plus étudié.

Pour rappel, la sélection ne s'est basée que sur les articles jugés les plus pertinents au vu des objectifs de la présente étude. Notamment, nous n'avons pas sélectionné les articles similaires à ceux que nous avons, les statistiques d'évolution du nombre d'articles sont donc à prendre avec précaution. Cependant, il sera intéressant de relever la fluctuation du nombre d'études/articles scientifiques en fonction de facteurs non scientifiques comme l'arrivée d'une nouvelle réglementation (cas du télétravail aux USA au début des années 2000 avec un grand nombre de publications entre 2002 et 2006 puis une diminution), le développement de l'e-commerce pour lequel l'argument écologique a été utilisé, ou évidemment l'émergence de nouvelles technologies (visio-conférences, e-reader, smartx notamment). Les articles ou études sélectionnés s'appliquent à analyser le lien entre ces technologies et l'environnement. À l'évidence, le nombre d'articles est boosté par le regain d'intérêt pour la question du réchauffement climatique et un « effet COP21 », comme le démontre le nombre très important d'articles proposés à la conférence ICT4S¹⁶ ou EnviroInfo¹⁷ cette année. Cette problématique du lien entre ICT et Environnement est donc sujette à des fluctuations conjoncturelles.

¹⁶ International conference « ICT for Sustainability » : <http://ict4s.org/>

¹⁷ <http://enviroinfo2016.org/>

IV.2. ENSEIGNEMENTS SUR LE PERIMETRE D'ANALYSE DES PUBLICATIONS

IV.2.1. CONSIDERATIONS SUR LE CYCLE DE VIE DES TICs

Le Tableau 7 recense le nombre de publications selon les frontières des systèmes considérés.

Tableau 7 – Répartition des publications selon les frontières des systèmes considérés

	Nombre de publications	dont publications institutionnelles	dont publications académiques
Mono-étape	29	17	12
Cycle de vie partiel	24	10	14
Cycle de vie complet	33	18	15
Autre / NA	28	2	26

Dans cette première sélection nous avons essayé de repérer les analyses complètes en termes d'étapes du cycle de vie. En effet, la très grande majorité des articles se focalise essentiellement sur la phase d'usage des équipements, la phase de fin de vie est négligée ou très approximative

Par ailleurs, lorsque la phase de fabrication est prise en compte, elle repose souvent sur des données anciennes. En effet, seulement 12% des publications identifiées ont des données relatives aux équipements de représentativité temporelle de moins de 2 ans (contre 36% ayant une représentativité temporelle de plus de cinq ans). Fréquemment, les données utilisées proviennent de la base de données d'ACV ecoinvent au mieux, ou plus rarement sur des données constructeurs (un peu plus récentes que les données ecoinvent).

Note : afin de compléter les données bibliographiques, nous n'avons pas restreint notre recherche aux seuls articles qui utilisaient la méthodologie d'analyse de cycle de vie. Certains articles traitent des effets rebond et les présentent selon une approche scientifique ad hoc certains articles développent une autre approche méthodologique – input/output par exemple, d'autres proposent une revue des différentes ACV parues sur le sujet, etc. Selon les cas de figures, il y a donc une grande diversité de types de cycle de vie – complet, partiel ou mono-étape. Ceci explique le nombre important de publications incluses dans la catégorie Autre / NA.

IV.2.2. CONSIDERATIONS SUR LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX CONSIDERES

La grille d'analyse des publications portait sur les impacts environnementaux considérés. Comme le montre la Figure 3, la majorité des documents analysés ne traitent qu'un ou deux indicateurs : un indicateur d'impact potentiel, relatif aux émissions de gaz à effet de serre, et un indicateur de flux, relatif à la consommation d'énergie¹⁸. On note d'ailleurs que les consommations d'énergie et les émissions de GES peuvent provenir d'une même source, la combustion d'énergies fossile. La combinaison de ces deux informations est donc partiellement redondante. Plus rares sont ceux qui présentent une ACV complète respectant la notion de multi-indicateurs, par exemple [81][89][90]. En général, dans cette première sélection nous avons essayé de repérer les analyses les plus étendues, en termes d'impacts environnementaux inclus.

¹⁸ Souvent restreint à la phase d'utilisation

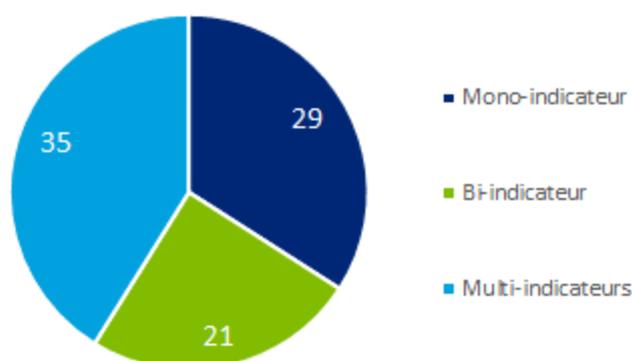


Figure 3 – Répartition du nombre de publications selon les types d'impacts environnementaux considérés (29 publications sont classés « Autre / NA »)

Note : similairement à la section précédente, le critère mono-, bi-, multi-indicateurs était difficilement applicable à certaines publications revues, ce qui explique un nombre de 29 publications incluses dans la catégorie Autre / NA.

IV.2.3. CONSIDERATIONS SUR LES IMPACTS DIRECTS, INDIRECTS OU SYSTEMIQUES

Le Tableau 8 illustre la répartition des publications selon les types d'impacts analysés. Pour rappel, les notions d'impacts directs indirects et systémiques sont définies en section dans le Tableau 2.

Tableau 8 – Recensement des publications en fonction des types d'impacts analysés

	Nombre de publications	Part relative
Effets directs	74	65%
Effets indirects	36	32%
Effets systémiques	25	22%
Autre / NA	4	4%

Attention, certains documents couvrent à la fois les impacts directs et indirects, d'autres les impacts indirects et systémiques, etc. Ceci explique pourquoi la somme de l'ensemble de ces valeurs n'est pas égale au nombre total de publications (114 documents analysés).

Plus rares sont les documents où sont pris en compte les impacts indirects ou systémiques. On trouve soit de la littérature orientée effet rebond qui traite spécifiquement du sujet en prenant des exemples parmi les TICs, soit des articles focalisés sur les impacts directs (méthodologie type ACV attributionnelle ou autre) qui évoquent éventuellement quelques effets indirects [81].

Note : similairement aux sections précédentes, les considérations sur les types d'effets considérés étaient difficilement applicables à quelques articles de revue scientifique, ce qui explique que certains d'entre eux soient inclus dans la catégorie Autre / NA.

IV.2.4. CONSIDERATIONS SUR LE PERIMETRE GEOGRAPHIQUE DES PUBLICATIONS

Le Tableau 9 analyse le champ géographique des publications identifiées.

Tableau 9 – Recensement des publications selon le pays/zone géographique couvert

Nombre de publications

	Nombre de publications
France	14
Européenne	11
Nord-Américaine	14
Globale	19
Spécifique à un autre pays	37
Autre / NA	19

Les zones géographiques les plus actives sont principalement l'Europe et le continent nord-américain.

Sur les 14 publications de périmètre français, on notera que huit d'entre elles sont des études commanditées par l'ADEME.

En Europe, on peut mentionner qu'un certain nombre de travaux de bonne qualité sont initiés à l'initiative des structures de recherche de l'EMPA (Suisse)¹⁹ et du KTH (Suède)²⁰. Ceci s'illustre notamment au travers de notre sélection de publications pour les fiches de lecture (cf. section V.1.).

Attention toutefois, le critère « spécifique à un autre pays » est vaste et regroupe à la fois des pays occidentaux et des pays non-occidentaux. Un certain nombre d'études ont un périmètre global. Parmi les pays non-européens ou non-américains pour lesquels des publications ont été identifiées, on peut souligner l'identification de publications en Australie [16], au Japon [61] [80] et en Corée du Sud [62].

En ce qui concerne les enjeux du télétravail, les régions Nord-américaines et l'Australie sont très prolifiques en rédaction d'articles [81] [83] [84] [85]. En effet, il existe des réglementations incitant au télétravail et certaines des études analysent les bénéfices potentiels de telles réglementations sur les émissions carbone liées au transport et la consommation d'énergie.

Note : similairement aux sections précédentes, les considérations sur le périmètre géographique étaient parfois difficilement applicables à quelques articles de revue scientifique, ce qui explique que certaines publications soient incluses dans la catégorie Autre / NA. Cela comprend essentiellement des articles de revue qui proposent une synthèse de nombreuses ACV, dont les périmètres géographiques sont différents les uns et autres (et dont nous n'avons pas connaissance).

IV.3. ENSEIGNEMENTS SUR LES METHODOLOGIES UTILISEES

Le Tableau 10 classe les publications selon le type de méthode d'évaluation environnementale utilisée.

Tableau 10 – Recensement des publications selon le type de méthode d'évaluation utilisé

Type de méthode	Nombre de publications	dont publications institutionnelles	dont publications académiques
ACV attributionnelle ISO	11	7	4
ACV attributionnelle simplifiée (i.e. non ISO)	11	2	9
ACV conséquentielle	0	0	0

¹⁹ EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology

²⁰ KTH Royal Institute of Technology in Stockholm, Centre for Sustainable Communications

Type de méthode	Nombre de publications	dont publications institutionnelles	dont publications académiques
Empreinte Carbone²¹	28	23	5
MFA (Material Flow Analysis)	0	0	0
Analyse Input/Output	1	0	1
Évaluation qualitative	9	4	5
Couplage MFA/ACV	2	0	2
Autre approche mixte	13	4	9
Méthode non reconnue (création d'une nouvelle méthode)	3	2	1
Autre / NA	36	5	31
Total	114	47	67

Comme le montre le tableau ci-dessus, on distingue deux tendances entre publications institutionnelles et publications académiques :

- Les publications académiques présentent une grande variété de méthodes d'évaluations, autant des méthodes de type analyse de cycle de vie que d'autres méthodes plus hybrides. On rencontre plusieurs approches mixtes, de type MFA+ACV [82], et des propositions pour ajouter d'autres types de variables ou intégrer par exemple le facteur humain (temps notamment), le coût [83] [85]. Peu d'études associent un calcul d'incertitudes. L'article [86] propose un calcul avec la méthode Monte-Carlo pour une ACV comparative entre un achat en ligne et en magasin.
- Un grand nombre de publications institutionnelles ont une approche de type empreinte carbone, c'est-à-dire une évaluation à l'aide de simples facteurs d'émissions pour évaluer des émissions de gaz à effet de serre. Des études avec une méthodologie plus élaborée de type ACV ont également été identifiées, mais en plus faible proportion. On notera par ailleurs, sur les 9 études de type ACV parmi ce type de publications, 6 ont été publiées par l'ADEME [1] [11] [12] [13] [14] [17]. D'une manière générale, la méthode ACV est donc encore peu appliquée de façon globale pour étudier les impacts environnementaux des TICs parmi les pouvoirs publics. Quant aux industriels s'ils ont recours à cette méthodologie, les études correspondantes ne sont pas publiées.

Plusieurs pistes de recherche ou nouvelles approches méthodologiques sont développées dans les articles en lien avec des technologies plus récentes ([37] par exemple sur la consommation collaborative, [73] [101] [102]). Ces approches permettent notamment d'affiner le contour d'un domaine (par exemple la consommation collaborative) et d'apporter quelques données macro-économiques. Enfin, plusieurs articles proposent une revue des articles existant et souvent des pistes d'amélioration méthodologique.

Note : certains articles (méta-analyses, articles sur les effets rebonds) présentent parfois plusieurs approches à la fois, ce qui explique que certaines publications soient incluses dans la catégorie Autre / NA.

²¹ Ici, on entend empreinte carbone au sens large, c'est-à-dire une évaluation environnementale principalement centrée sur la quantification des émissions de CO₂ ou plus largement de GES, à l'aide de facteurs d'émissions. Ceci comprend donc les évaluations de type Bilan Carbone, GHG Protocol, les études conformes à la norme ISO 14067, etc.

IV.4. ETATS DES LIEUX DES CONNAISSANCES SUR LES EFFETS REBOND DES TICS ET SUR LEUR PRISE EN COMPTE

Les effets rebond directs associés aux TIC sont assez peu documentés, et sont notamment liés aux progrès techniques permettant la miniaturisation des équipements numériques et de leurs composants. Par exemple, la miniaturisation des composants microélectroniques couplée avec des performances techniques croissantes (phénomène décrit par la loi de Moore) permet une baisse des prix de ces composants et donc un accroissement de leur consommation.

Les effets rebond associés aux TIC les plus documentés sont les effets rebond indirects. Lorsque le coût d'un produit ou service numérique diminue, il entraîne une hausse de la consommation d'un autre bien ou service. La miniaturisation génère aussi des effets rebond indirects dans la mesure où elle pousse les consommateurs à acheter des nouveaux ordinateurs, dont la puissance accrue permet d'installer des logiciels plus puissants qui fonctionnent mal sur des équipements moins puissants. En outre, si les composants microélectroniques sont moins chers, le coût des équipements numériques va avoir tendance à baisser, ce qui combiné à d'autres facteurs pousse leur demande à la hausse. Hilty (2008) montre qu'en Suisse, entre 1990 et 2005 la masse physique moyenne d'un téléphone mobile a été divisée par 4,4, alors que la masse totale de tous les téléphones utilisés en Suisse a été multipliée par 8²². Un autre exemple de gains d'efficacité entraînant des effets rebond dans les technologies numériques sont ceux obtenus grâce à la virtualisation des centres de données. Cette technique permet de diminuer le nombre de serveurs (à stockage de données constant) et de réduire le coût de l'octet stocké, d'où une explosion de la demande d'espace de stockage de données. Hilbert et al. (2011) montrent que de 1986 à 2007 la capacité mondiale de traitement de données a augmenté cinq fois plus vite que la croissance économique²³.

Les effets rebond indirects ont également été observés pour les services numériques visant à réduire les déplacements. Par exemple, dans les cas du téléachat, du télétravail et des téléconférences, une partie importante des économies de déplacement est annulée par l'augmentation des trajets non professionnels pour faire des courses ou pour transporter des membres de sa famille (déplacements de loisir). Falch (2012) montre par exemple que c'est au Danemark que l'on trouve le plus fort effet rebond lié au télétravail (73%)²⁴. En effet, pour ce pays le télétravail a permis de réduire les déplacements domicile-travail motorisés d'environ 105 km par semaine. Mais il a dans le même temps occasionné des déplacements personnels d'environ 77 km, qui annulent en partie les kilomètres économisés grâce au télétravail, d'où un effet rebond d'environ 73%. On voit bien dans cet exemple que le comportement des acteurs est la clé du changement environnemental, quelle que soit la performance environnementale de la technologie « verte » qu'ils utilisent.

Dans leur revue de la littérature des effets rebond indirects qu'ils rédigent en vue de développer des méthodes de mesure dans le cas des TIC, Rivera et al. [49] suggèrent également que le commerce en ligne pourrait réduire les coûts de transaction commerciaux et donc augmenter la consommation. Enfin, la publication d'Håkansson et al. [51] sur les effets rebond indirects est intéressante de par son utilisation de la méthode EEIO (analyse input-output étendue) sur des données suédoises. Leurs résultats suggèrent que ces effets peuvent être de grande ampleur.

On peut citer trois autres travaux qui ne font pas de distinction particulière entre les types d'effets rebond, mais dont les méthodes sont intéressantes pour rendre compte de ces phénomènes. Par exemple, Werner [55] compare la diffusion spatiale des TIC en Europe avec leur consommation d'électricité, ce qui lui permet de révéler l'empreinte spatiale des effets rebond (très forte en France, au Royaume-Uni et en Allemagne) et leurs caractéristiques propres. L'auteur recommande que les effets rebond soient intégrés dans le calcul des bénéfices du développement des TIC. Quant à Takahashi et al. [42], même si l'article est relativement ancien, on peut souligner la méthode utilisée pour évaluer les effets rebond, qui combine un modèle utilisant des données de questionnaire avec une ACV. Enfin, Galvin offre une première tentative de prise en compte dans le calcul des effets rebond des TIC via les changements de comportements et des structures sociotechniques [52]. Basée sur une analyse de la littérature, son étude met en parallèle les changements structurels intervenus dans différents secteurs suite à une amélioration de l'efficacité énergétique des TIC. Ses résultats suggèrent que pour les TIC, tout accroissement de l'efficacité énergétique induit une augmentation de la consommation d'énergie de la société dans son ensemble, et donc des émissions de gaz à effet de serre.

²² Hilty, L. (2008). *Information technology and sustainability: Essays on the relationships between information technology and sustainable development*. Norderstedt, Books on Demand.

²³ Hilbert, M. et P. López (2011). *The World's Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information*. Science, 332(6025): 60-65.

²⁴ Falch, M. (2012). Environmental Impact of ICT on the Transport Sector. *Telecommunication Economics*. A. Hadjiantonis et B. Stiller (Eds.), Springer Berlin Heidelberg. 7216 : 126-137.

La prise en compte des effets rebonds est moins généralisée côté publications institutionnelles. Seuls sept documents parmi 38 identifiés incluent a minima quelques effets rebonds. Beaucoup de documents se contentent d'évoquer l'existence d'effets rebonds sans les quantifier [9] [31] [62]. On gardera en tête les études ADEME sur le télétravail [13] et la consommation collaborative [14] qui essayent de comptabiliser les impacts environnementaux de quelques effets rebonds directs ou indirects associés à ces pratiques, avec toutefois de fortes incertitudes.

La dernière étude SMARTer2030 du GeSI est également à signaler [32]. Celle-ci cherche en effet à quantifier l'effet rebond associé aux TICs à l'échelle mondiale. Le calcul est basique, s'appuyant principalement sur un travail qualitatif de la Commission européenne (Joint Research Centre) paru en 2004 [5]. Le résultat est que les effets rebonds des TICs représentent environ $1,4 \cdot 10^9$ t CO₂ éq., à comparer aux $12 \cdot 10^9$ t CO₂ éq. d'économies potentielles selon cette même étude. Ces chiffres sont toutefois à prendre avec précaution, devant être confrontés à d'autres évaluations.

Pour conclure, on peut souligner qu'il reste de nombreuses incertitudes quant à l'évaluation des effets rebond des TIC. Cela peut s'expliquer par le manque de données mais aussi par l'hétérogénéité des méthodes de mesure. Une conclusion robuste se dégage toutefois : les effets rebond du numérique existent bel et bien et sont potentiellement très élevés. Qu'ils soient supérieurs ou inférieurs aux effets indirects positifs des TICs dépend alors des scénarios modélisés, des usages considérés, etc. Dès lors, afin d'intégrer ces effets aux analyses coût-bénéfice d'un projet ou d'une politique publique, on peut par exemple appliquer un taux d'actualisation²⁵ venant réduire par exemple de 20% ou 30% les bénéfices environnementaux attendus. Mais les études sur les effets rebond montrent aussi qu'il est indispensable de prendre en compte les comportements des consommateurs, car leur réaction aux baisses de prix détermine en grande partie l'ampleur des effets rebond.

IV.5. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LA QUALITE DES DONNEES UTILISEES ET LEURS IMPACTS SUR LES CONCLUSIONS DES ETUDES

Pour les quelques ACV complètes référencées dans les articles scientifiques, les ICV sont majoritairement constitués de données génériques. Le calcul des incertitudes sur les résultats est quasi-inexistant et aucune méthode d'évaluation de la qualité des données utilisées n'est proposée. Pour les ACV effectuées en 2011 par l'ADEME [1][11][12][17], peu d'informations spécifiques sur la constitution des équipements réseaux (routeur, box, serveurs, etc.) avaient pu être récupérées, et ce sont principalement des données génériques qui avaient été utilisées²⁶. Il est donc difficile d'évaluer leur complétude par rapport aux objectifs de l'étude et par conséquent la robustesse des résultats obtenus. D'ailleurs, une grande majorité d'articles scientifiques ne sont pas compatibles avec les normes ISO, et traitent peu cette question.

D'un point de vue représentativité temporelle, les données utilisées pour les mix électriques sont en cohérence avec l'année de l'étude. Par contre, les données de fabrication des équipements datent en général de plus de 5 ans par rapport à l'année de l'étude. Dans ce cas, les choix technologiques ne sont pas représentatifs des technologies actuelles ou contemporaines à l'étude.

Concernant les scénarios d'usages, ils sont très variables en fonction des hypothèses retenues et des produits ou services étudiés. On ne peut pas les qualifier de robustes, s'agissant dans certains cas d'appréciations assez subjectives.

Parmi les publications issues de sources institutionnelles, seul un rapport d'une entreprise australienne sur le télétravail [81] mentionne clairement le comité de la revue critique et les résultats associés, outre les études ADEME parues en 2011 [1] [11] [12] [17]. Néanmoins, on notera que 32 publications retenues parmi les 114 sont des articles soumis à une revue scientifique, faisant donc l'objet d'une révision indépendante par deux chercheurs compétents dans le domaine.

²⁵ Autrement dit, une déduction a priori.

²⁶ Et soumises à validation par des experts.

IV.6. CONCLUSIONS DE LA RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

L'objectif de ce premier volet de l'étude était de dresser l'état des connaissances, données disponibles et zones d'ombres sur les impacts environnementaux des TICs. Ces éléments sont détaillés ci-après. **Cependant, ceux-ci mériteront d'être complétés ultérieurement, grâce aux enseignements fournis par les fiches de lecture élaborées pour une sélection de publications pertinentes, ainsi que les focus sur trois usages particuliers associés au numérique.**

- Concernant l'état des connaissances sur les impacts environnementaux des technologies du numérique :

Comme évoquées dans les précédentes sections de ce chapitre, les connaissances les plus abouties à l'heure actuelle concernent la phase d'utilisation des appareils, en caractérisant les consommations d'électricité associées. À cet égard, sont très souvent associés aux enjeux environnementaux du numérique les impacts en termes de consommations d'énergie et d'émissions de GES. Néanmoins, des progrès restent à faire pour considérer les impacts des TICs selon une approche ACV (multicritère et multi-étapes). Peu d'études sont abordées sous cet angle complet.

Si les impacts directs des TICs commencent à être bien identifiés, les impacts indirects restent encore à caractériser plus finement. Un certain nombre d'études identifient les TICs comme « solution » pour réduire les impacts environnementaux. En revanche, les TICs en tant que « problème », et plus précisément les effets rebond qu'elles génèrent, sont encore peu documentés. Toutefois, le sujet commence à être abordé dans certains articles scientifiques et rapports provenant des pouvoirs publics.

Enfin, on notera que les connaissances se concentrent aujourd'hui encore principalement sur les objets numériques ancrés dans notre quotidien depuis un certain temps déjà (ordinateur, téléphone, etc.). Les technologies émergentes, comme les objets connectés ou les services collaboratifs, sont peu abordés dans leurs aspects en lien avec l'environnement.

- Concernant la qualité des données disponibles :

La disponibilité des données est de façon logique en lien avec l'état des connaissances actuelles. Les données relatives aux consommations d'énergie des appareils sont assez bien documentées en comparaison des données relatives aux phases de fabrication ou de fin de vie, malgré l'importance significative de ces phases amont et aval dans la répartition des impacts environnementaux.

Si l'on considère la représentativité temporelle des données environnementales utilisées (facteurs d'émissions, ICV), on observe une distinction nette entre mix électrique et équipements. D'un côté, les impacts environnementaux associés à l'électricité consommée (de sa production à sa distribution) sont bien documentés et régulièrement mis à jour. De l'autre, les données sur les équipements sont fréquemment anciennes et se basent sur un seul modèle d'appareil. De fait, dans la mesure où il s'agit d'appareils complexes, aux évolutions technologiques rapides, la collecte de données environnementales les concernant est peu aisée.

De façon globale, on pourra tout de même regretter l'absence quasi-systématique d'analyse de la qualité des données dans les articles scientifiques et les études, et donc d'évaluation de la robustesse des résultats.

- Concernant les zones d'incertitudes restantes :

Plusieurs zones d'ombres ont été identifiées. À propos des phases amont et aval du cycle de vie des TICs, outre l'étape de fabrication, on note l'absence de modélisation complète et réaliste de la fin de vie. Les incertitudes concernent d'une part les scénarios de fin de vie des DEEE (part recyclée, part envoyée à l'étranger, etc.) et d'autre part la caractérisation des impacts environnementaux associés. Des travaux sont en cours sur ce sujet ; un réel approfondissement est nécessaire, notamment afin de mieux évaluer les impacts associés aux émissions dans l'environnement de métaux et composants chimiques.

Enfin, l'importante variabilité sur les hypothèses de scénario (durée d'usage des produits, temps de lecture des documents numériques, type d'équipement, etc.) couplée à la complexité et l'évolutivité des technologies mises en œuvre rendent les résultats non comparables entre eux, et parfois discutables, même pour des études ou articles qui ont bénéficié de revue critique. Ceci constitue un véritable frein à la

consolidation des données et des résultats scientifiques. Un travail de « standardisation », comme ce qui est proposé pour les ACV sur les datacentres²⁷ pourrait constituer une piste intéressante.

²⁷ Pour plus d'informations voir : EBRC (2016) La normalisation et les référentiels dans le cycle de vie d'un Datacentre, dernier accès le 25 mai 2016 : http://ecoinfo.cnrs.fr/IMG/pdf/8_-_fery_-_presentation_generale_ebrc_ecoinfo_paris_-_v1.pptx.pdf

V. FOCUS SUR PLUSIEURS USAGES DES TICS

V.1. SELECTION DE PUBLICATIONS POUR ANALYSE APPROFONDIE

Le Volet 2 de l'étude comporte une phase d'élaboration de fiches de lecture sur une quinzaine de publications particulièrement pertinentes. L'objectif est qu'elles puissent nourrir la réflexion sur les impacts environnementaux des technologies du numérique en lien avec la Vision 2030 de l'ADEME.

Les focus faits sur plusieurs usages spécifiques en lien avec les TICs se nourrissent des enseignements de ces fiches de lecture.

V.1.1. CRITERES DE SELECTION

La sélection des publications a été faite au regard des objectifs de la présente étude. Les critères suivants ont notamment été considérés pour considérer certaines publications au détriment d'autres :

- Le caractère quantitatif de l'étude ;
- Le niveau de détail de la publication ;
- L'exhaustivité du périmètre du cycle de vie retenu ;
- La variété des types d'effets environnementaux (directs, indirects, effets rebonds) ;
- L'exhaustivité des types d'impacts environnementaux considérés (GES, énergie, mais aussi d'autres types d'impacts) ;
- La thématique de l'étude (les études consacrées au télétravail ou au e-commerce par exemple) ; et
- La réalisation d'une revue indépendante.

Autrement dit, ont été privilégiées autant que possible les publications transparentes et complètes, recouvrant l'ensemble du cycle de vie, multicritère, considérant à la fois effets directs et indirects,

V.1.2. LISTE DE DE PUBLICATIONS RETENUES

La liste des publications retenues est présentée en ANNEXE II. L'Identifiant est repris du fichier Excel de consolidation des publications. Les fiches de lecture ainsi réalisées sont présentées en ANNEXE III.

V.2. LE TELETRAVAIL

Contexte et champ des études

Les articles sélectionnés dans le champ de cette étude proposent des analyses environnementales sur les bénéfices apportés par le télétravail. Différents scénarios en termes de nombres de salariés impactés, nombre de jours télé-travaillés, mode et type de déplacement, impacts sur les entreprises (surface de bureau, etc.) sont étudiés et comparés dans chacune des études.

Périmètre

Les périmètres sont variables d'une étude à l'autre : le périmètre géographique est propre à chaque publication : France [13], États-Unis [33], Australie [81]. Ce périmètre géographique est très marqué, et s'illustre via le fait que les publications [33] et [81] ne considèrent des trajets domicile-travail qu'en véhicule particulier, excluant les transports en commun.

Le principal impact environnemental considéré concerne le réchauffement climatique (émissions de CO₂). D'autres indicateurs peuvent aussi être pris en compte comme la consommation d'énergie [13][33], les émissions de PM, NO_x [13], l'oxydation photochimique, le potentiel d'épuisement des ressources non renouvelables ou encore la toxicité humaine [81]. L'ensemble d'indicateurs considérés est cependant hétérogène d'une étude à l'autre.

Les études portent sur les phases amont (fabrication) et usage. Aucune étude ne prend en compte de façon exhaustive la fin de vie des TICs utilisées pour le télétravail (seule l'étude [81] l'inclut, et elle considère par défaut un enfouissement des équipements utilisateurs selon une approche par défaut). Le focus de ces études est avant tout la phase de transport domicile-travail.

Les effets rebond ne sont pas pris en compte dans ces études. Cependant, un effort significatif est mis sur l'évaluation des impacts indirects. Les types d'impacts pris en compte sont :

- de 2^{ème} ordre²⁸ :
 - Modification des habitudes de transport domicile-travail [13][33][81] ;
 - Modifications des habitudes de transports pour des trajets d'ordre personnel [13] ; et
 - Modification de l'environnement de bureau (chauffage, éclairage, etc.) [13][33][81].
- de 3^{ème} ordre²⁹ :
 - Réduction des surfaces de bureau [33][81].

Approches méthodologiques

La méthodologie ACV est utilisée [81] ou évaluation de type empreinte carbone utilisant des facteurs d'émissions³⁰ [13][33]. En élargissant l'analyse à d'autres études identifiées en volet 1, on remarque cependant que l'application de la méthodologie ACV est minoritaire par rapport à l'évaluation de type empreinte carbone [39][66][70][73][83][84].

Selon les trois études analysées plus finement, on distingue deux approches méthodologiques distinctes. Les publications [33] et [81] ont une approche basée sur la littérature et des données bibliographiques. De fait, différents scénarios sont étudiés selon la fréquence du télétravail. A l'inverse, l'étude [13] se base elle sur une enquête auprès des télétravailleurs pour comprendre les pratiques et utilisés des valeurs les plus proches possibles de la réalité, et distingue différents scénarios selon le profil de télétravailleur.

Données utilisées

De nombreuses données sont issues de publications disponibles publiquement.

Des données internes à l'entreprise [81] peuvent être prises en compte dans certains cas. Afin d'estimer certains comportements et usages (déplacements, nombre de jours télé-travaillés, type de télétravail), des enquêtes ont été réalisées auprès des salariés [13], comme mentionné précédemment.

En fonction du périmètre géographique, différentes données contextuelles sont utilisées pour modéliser les impacts environnementaux : EPA / Modèle GREET [33], adaptation des facteurs de toxicité CML 2001 au modèle australien [81], OEET, EMEP/EEA [France, 13]. Ceci est à mettre en lien avec le périmètre géographique marqué de ces études.

Résultats marquants et principales tendances

Toutes les études démontrent que le télétravail permet de réduire les émissions de GES, la consommation d'énergie, les émissions de particules, l'oxydation photochimique et l'épuisement de ressources non renouvelables. Les principaux contributeurs de cette réduction sont des impacts indirects : il s'agit d'abord du poste déplacements (réduction du nombre de km lié aux déplacements domicile-travail), ensuite le mode de déplacement et enfin l'optimisation énergétique des lieux de travail. Dans [33], le télétravail permet de réduire de 16 km à 43 km le déplacement en fonction de la fréquence du télétravail. Ceci conduit à une réduction d'émissions de GES de 300 kg CO₂ eq./personne/an pour une fréquence de 1 à 5 jours par mois à 2 805 kg CO₂ eq./personne/an pour une fréquence d'au moins 20 jours par mois. Selon [13], le télétravail permet de réduire d'environ 30% les impacts environnementaux associés aux trajets entre le domicile et le lieu de travail pour un nombre moyen de jours télétravaillés de 2,9 par semaine.

En revanche, une tendance divergente se distingue nettement entre les études basées sur des approches bibliographiques et l'étude basée sur des données empiriques. En effet, les études [33] et [81] estiment que les bénéfices environnementaux associés au télétravail croissent quasi-linéairement avec le nombre de jours télétravaillés. L'étude [13] fait la distinction selon les profils de télétravailleurs et conclut que les profils de

²⁸ Impacts liés à l'application des TIC à d'autres secteurs

²⁹ Impacts systémiques liés à un profond changement structurel vers une économie dématérialisée

³⁰ Avec inclusion des consommations d'énergie en plus des émissions de GES

« gros » télétravailleurs (indépendants, personnes à cheval sur plusieurs sites, homeshoring³¹) ne sont pas les plus vertueux du point de vue environnemental. Ceci amène à penser que l'évolution des impacts du télétravail est régie par des facteurs plus complexes que le simple nombre de jours télétravaillés.

Le télétravail peut, dans certains cas, conduire à d'éventuels impacts négatifs sur la toxicité humaine. Ainsi le gain obtenu par la réduction du nombre de km ne permet pas de compenser l'augmentation de la toxicité due au chauffage à domicile (mix énergétique incluant du charbon, dont l'extraction et l'utilisation rejettent des substances toxiques dans l'eau et les sols). Ce résultat est interdépendant de la zone d'étude et ne concerne que les pays dont le mix énergétique est principalement basé sur le charbon : ce t ne s'applique toutefois qu'au contexte australien [81]. Des transferts de pollutions sont donc néanmoins possibles et sont aujourd'hui trop méconnus et non traités dans la littérature.

Les trois études prennent en compte plusieurs effets indirects du télétravail. Selon [13] par exemple, pour les effets rebonds indirects sur les habitudes de transport : il y a des variations significatives selon le type de télétravail: une réduction de 19% pour le télétravail en indépendant et augmentation de 41% pour le homeshoring³². Mais en moyenne sur tous les critères de variation du télétravail, cela représente une très faible variation (environ 1%).

Pour les effets indirects sur le logement, une augmentation des émissions GES due à la consommation d'énergie au domicile peut être constatée. La prise en compte de ces effets permet de définir des scénarios maximisant et minimisant permettant de borner les impacts environnementaux [33].

Il est important de mettre en avant ce réel effort d'évaluation de ces impacts indirects (ex : surface de bureaux, consommation d'énergie, transport personnel) mais il reste encore de fortes incertitudes, associées notamment aux données [13]. On n'observe pas forcément de consensus entre les différentes études quant à la magnitude des impacts associés à ces effets indirects et rebonds.

Les gains annuels à l'échelle d'un pays du télétravail en termes d'émissions de GES restent faibles :

- Gain de 0,09 à 0,12% pour les États-Unis [33] ; et
- Gain de 0,5%, équivalent aux émissions de GES de 366 000 Français, dans le cadre d'un scénario de diffusion ambitieux du télétravail en France [13].

Principales limites, besoins complémentaires

Sur l'ensemble de ces études, la réalisation d'une revue indépendante conforme aux attentes de la norme ISO 14040 est rare. [81] bénéficie d'une revue critique mais elle n'est pas en totale adéquation avec les exigences de la norme.

Malgré un réel effort de prise en compte des effets indirects, les études (et les approches méthodologiques développées) comportent encore de trop grandes incertitudes. Pour [13], elles sont notamment liées à l'utilisation de données déclaratives issues du terrain, qui comportent un faible niveau de confiance. Pour [33] et [81], ces incertitudes sont liées aux données d'experts ou de la bibliographie, voire à l'application d'un modèle trop simpliste (uniquement basé sur la fréquence du télétravail).

Plusieurs limites apparaissent dans ces études : non-considération des impacts directs des équipements et leurs infrastructures, évaluation majoritairement bi-indicateur, non-exhaustivité en termes de couverture du cycle de vie, manque de transparence sur certaines données.

Cependant, la prise en compte des effets indirects du télétravail permet d'avoir des ordres de grandeur exploitables sur le bilan environnemental du télétravail. En comparaison des autres usages développés plus loin dans ce rapport, le télétravail est l'usage TIC pour lequel la prise en compte de ces effets indirects est la plus mature.

Les besoins pour les études sur le télétravail portent principalement sur : la prise en compte de l'impact matériel, le nombre d'indicateurs mesurés et la prise en compte des effets rebond.

Le tableau suivant compare les publications abordées afin d'en montrer les principaux points de convergence et de divergence sur les éléments quantitatifs.

³¹ Télétravail cadré et majoritaire (3 à 5 jours/semaine) qui consiste à industrialiser l'externalisation de métiers de production à plus faible valeur ajoutée dans une logique gagnant-gagnant (productivité vs. qualité de vie)

³² Ces différences entre profils de télétravailleurs sont difficiles à expliquer, étant donné le côté déclaratif du questionnaire et le faible échantillon de répondants sur certains profils de télétravail.

Tableau 11 – Illustration comparative de différentes publications étudiées concernant le télétravail

Item	« Impact du télétravail, des tiers lieux et du coworking sur la réduction des consommations d'énergie et émissions de GES, et sur l'organisation des entreprises », BIO by Deloitte, Greenworking, BVA, pour l'ADEME, 2015 [13]	« The Energy and Greenhouse Gas Emissions Impacts of Telecommuting and e-Commerce », Fraunhofer USA (D. Harbor, K. Roth, Michael Zeifman, V. Shmakova) pour la Consumer Electronics association (CEA), 2015 [33]	« Teleworking Life Cycle Analysis », URS Melbourne pour Telstra, 2008 [81]
Périmètre géographique	France	Etats-Unis	Australie (entreprise Telstra)
Approche générale	Evaluation de l'impact du télétravail et des tiers-lieux sur la réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre	Estimation de l'impact du télétravail et du e-commerce (livres et journaux) sur les émissions de GES et les consommations d'énergie à l'échelle des États-Unis	ACV comparative entre le télétravail et le travail en bureau pour l'entreprise australienne de télécommunications Telstra
Méthodologie	<ul style="list-style-type: none"> • ACV attributionnelle simplifiée • Les impacts sont calculés à partir de facteurs d'émissions de sources d'information reconnues (ex pour les GES : base carbone de l'Observatoire Energie Environnement et Transport) • Les impacts indirects en termes de transport personnel et de consommation énergétique du logement sont pris en compte 	<ul style="list-style-type: none"> • Évaluation bi-indicateur avec Empreinte Carbone appliquée sur le cycle de vie partiel • Collecte des données à partir d'une recherche bibliographique (publications et sources institutionnelles) 	<ul style="list-style-type: none"> • ACV complète de type ISO 14040 • Revues : une revue critique interne par URS Melbourne, une revue critique externe
Données utilisées	<ul style="list-style-type: none"> • Les données d'activité utilisées sont principalement basées sur une enquête faite auprès de 850 télétravailleurs français (salariés et indépendants) : nombre de jours moyens télétravaillés, le nombre de km moyen parcourus et par quels modes, le lieu de télétravail • Les données environnementales utilisées : facteurs d'émissions issus de sources reconnues (OEET, EMEP/EEA guidebook, OFEFP...) 	<ul style="list-style-type: none"> • Données d'activité : <ul style="list-style-type: none"> - Données issues d'une enquête sur les déplacements des ménages effectuée aux Etats-Unis en 2009 sur 150 000 foyers (nombre de télétravailleurs, la fréquence, et les distances parcourues) - Consommations d'énergie liées au chauffage basées sur les statistiques nationales de consommations d'énergie • Données environnementales utilisées : 	<ul style="list-style-type: none"> • Données d'activité : données primaires de Telstra ; données secondaires issues journaux scientifiques, bureau australien des statistiques) et bases de données australiennes • Données environnementales : les facteurs de toxicité utilisés dans CML 2001 ont été adaptés au modèle australien.

		facteurs d'émissions issus de sources reconnues issues d'un contexte nord-américain : chiffres de l'EPA, du modèle GREET ³³	
Principales hypothèses	Le nombre moyen de jours télétravaillés est de 2,9 par semaine	Cette étude ne comporte pas d'hypothèse-clé	<ul style="list-style-type: none"> • 3 000 salariés sur 40 000 faisant du télétravail, 2 (50%) ou 4 (50%) jours par semaine • Hypothèse du temps de travail d'un employé de Telstra : 8h par jour, 5 jours par semaine, 45 semaines par an (6 semaines de congés et 5 jours d'arrêt)
Résultats-clés	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction d'environ 30% des impacts environnementaux associés aux trajets entre le domicile et le lieu de travail. Ceci est dû à la réduction du nombre de km parcourus entre le domicile et le lieu de travail • Plus forte réduction des impacts pour le teleworking³⁴ : réduction de 35% des GES contre 25% pour le telecommuting³⁵ et 5% pour le homeshoring³⁶ • Pour les impacts indirects sur les habitudes de transport : en moyenne sur tous les critères de variation du télétravail, cela représente une très faible variation (environ 1%) • Pour les impacts indirects sur le logement : réduction des GES uniquement pour le travail à domicile, et une mixité des lieux de travail • Scénarios prospectifs en France en prenant en 	<ul style="list-style-type: none"> • Le principal contributeur est le poste déplacements • Pour une fréquence de télétravail faible (1 à 5 jours/mois) : impacts évité de 300 kg CO₂ eq./personne/an et de 4 GJ/personne/an • Pour une fréquence de télétravail élevée (plus de 20 jours par mois) : impacts évités de 2 805 kg CO₂ eq./personne/an et de 37 à 43 GJ/personne/an • A l'échelle des États-Unis, gains annuels de l'ordre 0,09% à 0,12% des émissions de GES du pays 	<ul style="list-style-type: none"> • Bénéfices en termes de réchauffement climatique, oxydation photochimique, potentiel d'épuisement des ressources non renouvelables. • Réduction de 728 t éq. CO₂/an ce qui est équivalent aux émissions de GES produites par 168 voitures dans l'état du Victoria (Australie) • Augmentation des impacts en termes de toxicité humaine

³³ The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model by Argonne National Laboratory.

³⁴ Télétravail occasionnel correspondant à un télétravail flexible et léger (par exemple 15 jours/an) et est généralement pratiqué par des cadres autonomes et hyperconnectés

³⁵ Télétravail sur quelques journées complètes par mois (le plus fréquent étant 1 jour/semaine) afin de réduire les trajets domicile-bureau

³⁶ Télétravail cadré et majoritaire (3 à 5 jours/semaine) qui consiste à industrialiser l'externalisation de métiers de production à plus faible valeur ajoutée dans une logique gagnant-gagnant (productivité vs. qualité de vie)

	<p>compte uniquement les effets directs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Entreprise de 1 000 salariés avec 100% des salariés en télétravail 1 jour par semaine : économies annuelles de 447 t CO₂ eq./an (soit émissions de 37 français sur une année) - 50% de la population active télétravaillant 2,9 jours par semaine : gain de 0,5%, équivalent aux émissions annuelles de GES de 366 000 Français 		
<p>Possibilité de généralisation</p>	<p>Données de l'enquête réutilisables si sort de la confidentialité</p>	<p>La majorité des données sont réutilisables car issues de publications publiques mais elles sont propres au contexte nord-américain</p>	<p>Les données sont spécifiques au contexte d'une entreprise australienne et obsolète (2007)</p>

V.3. LA DEMATERIALISATION

Remarque préalable : la synthèse ci-dessous se base essentiellement sur des articles scientifiques dont deux articles de revue [35] et [36] qui proposent eux-mêmes une analyse de plusieurs dizaines d'articles & études. Ces articles scientifiques sont produits par des équipes de recherches localisés hors de France (il n'y a pas d'équipe de recherche en France adressant spécifiquement la problématique de l'impact des TIC sur l'environnement). Aussi les périmètres géographiques sont en très grande majorité hors du territoire Français. Par ailleurs, il est important de souligner que même si les articles cités ci-dessus ont été publiés en 2014, ils se réfèrent à des données et/ou articles plus anciens : typiquement couvrant la période 2000-2012.

Contexte et champ des études

Les articles sélectionnés dans le champ de cette étude proposent des analyses environnementales de services dématérialisés. En général, ces analyses comparent le service dématérialisé avec son équivalent conventionnel : les cas les plus couramment traités dans la littérature comparent la visio-conférence aux déplacements [69][71], les e-books aux ouvrages papier [90], la lecture de journaux sur tablette versus l'achat de journal papier, etc. [33][40]. Très souvent la comparaison porte sur la comparaison des « produits » utilisés, par exemple une tablette utilisée à x% par rapport à un journal papier de telle et telle dimension [36]. Les scénarios d'usage sont spécifiques à chaque étude, ils sont presque toujours basés sur des hypothèses d'utilisation et non sur des données réelles [35][36][40][90].

Périmètre

Les périmètres sont évidemment variables d'une étude à l'autre : les périmètres géographiques sont propres à chaque étude de cas (à noter que les articles de revue analysent plusieurs dizaines d'études de cas dont nous n'avons pas les détails). Compte tenu de l'importance relative de la phase d'usage pour les équipements de type serveurs, réseaux et gros équipements, le mix électrique de la zone considéré a une incidence importante sur le résultat final. Par exemple, l'étude [90] souligne l'influence sur les résultats du mix électrique peu carboné de la Suède.

En général la phase de fabrication des équipements terminaux (équipement de l'utilisateur) et/ou du papier est bien prise en compte même si elle s'appuie sur des données anciennes. Par contre, les phases de transport sont souvent négligées, soit par manque de données, soit parce que les auteurs considèrent cette phase comme négligeable [35]. La prise en compte des équipements impliqués dans le cloud et/ou internet (datacentre, serveurs etc..) est difficile, tandis que la consommation d'énergie par l'équipement terminal de l'utilisateur est correctement estimée dans le cadre des scénarios spécifiques envisagés. Quant aux transports et traitements liés à la fin de vie, ils sont le plus souvent négligés [33] ou sous-estimés [35][90], encore une fois par manque de données.

Les analyses sont basées sur des scénarios d'utilisation ou de fin de vie très variables d'une étude à l'autre (réutilisation ou recyclage du papier, taux de TICs recyclés, nombre de lecture d'un ouvrage papier, distance évitée par l'usage de la visioconférence, types d'équipement utilisés et durée de vie des équipements etc.). Ceci rend non seulement les études non comparables entre elles, mais surtout empêche la généralisation des résultats [35][36].

Approches méthodologiques

En dépit d'un secteur complexe, fortement évolutif du point de vue technologique et du point de vue des usages, c'est la méthodologie d'ACV qui est le plus souvent utilisée [35][36][40][90]. En général, elle s'appuie sur des produits (par exemple e-paper vs journal) et non sur des usages (un utilisateur lira un article journal depuis son ordinateur, sa tablette, son smartphone, achètera le journal et/ou l'imprimera selon les cas).

Lorsque des données réelles peuvent être utilisées (par exemple étude [69] comparative visioconférence / déplacements), une méthodologie plus empirique peut être employée.

D'une façon générale, les seuls indicateurs analysés sont ceux liés à la consommation d'énergie. Souvent d'ailleurs, on trouve seulement deux indicateurs : émissions de GES et énergie consommée alors même que les auteurs parlent d'une méthodologie de type ACV [36].

Les analyses de sensibilité sont peu développées [35][36][40], et seules les études [71][90] pratiquent l'exercice. En particulier, la publication [90] adopte une approche intéressante en cherchant le « point de bascule » selon les indicateurs environnementaux, en fonction du taux d'utilisation de la liseuse (nombre de livres lus). Par exemple, l'étude estime qu'il faut 25 livres pour que la lecture sur liseuse soit plus pertinente que la lecture papier (un seul lecteur) en termes de réchauffement climatique. En revanche, ce nombre

passé à 350 pour l'indicateur écotoxicité des eaux douces (voir fiche de lecture n°90, section ANNEXE III.10).

Données utilisées

Les scénarios sont en général basés sur des hypothèses d'utilisation assez simplifiées par rapport à la réalité.

Pour la phase de fabrication des produits mis en œuvre, le plus souvent, les données ecoinvent sont utilisées, même si elles sont anciennes à l'échelle de la vitesse de développement de ces technologies [35][36][40][90].

Lorsqu'elles sont disponibles, les données nécessaires à la modélisation de la phase d'usage sont issues du terrain [69][71][90]. Dans le pire des cas, elles sont moyennées et approximées [33]. D'une façon générale, il ressort un manque de données sur l'impact des services internet [35][36].

À noter qu'une majorité des articles ne proposent pas d'analyse de la fiabilité des données [35][36].

Résultats marquants et principales tendances

Les résultats de comparaison d'un service dématérialisé à son équivalent conventionnel ne sont pas unanimes du fait des variations concernant les scénarios d'utilisation (durée de vie des produits, taux d'utilisation, mix électrique utilisé...) et de fin de vie.

En général, des transferts de pollution sont mis en exergue (par exemple vers l'épuisement des ressources ou l'écotoxicité) [40][90] même si globalement, il apparaît un avantage au numérique (dans les scénarios envisagés, les hypothèses posées, les données utilisées et avec les limites soulignées ci-dessous... Ce qui fait beaucoup de conditions !).

Principales limites, besoins complémentaires

Les unités fonctionnelles se rapportent le plus souvent à un produit ou service plutôt qu'à un usage. Ce choix ne permet pas de rendre compte réellement du comportement de l'utilisateur qui dispose le plus souvent de nombreuses solutions alternatives non exclusives. Par ailleurs, le choix de l'unité fonctionnelle est rarement discuté alors qu'il peut se révéler subjectif et dans tous les cas, il est évident que la définition de l'unité fonctionnelle influence fortement les résultats [35][36].

Les effets indirects et les effets rebond ne sont jamais pris en compte de façon globale.

Se pose la question de la pertinence du choix de la méthodologie de type ACV. En effet, l'évolution actuelle de ces technologies réduit la taille et la consommation en énergie des produits mais entraîne un transfert d'impact aux phases pour lesquelles les données sont moins fiables : l'extraction des matières premières, le traitement de fin de vie et l'usage d'Internet. Par ailleurs, les choix d'indicateurs peuvent se révéler subjectifs.

- Il paraît nécessaire de fixer un cadre méthodologique pour ce type d'étude avec un nombre d'indicateurs restreints mais pertinents : a minima les catégories d'impacts liées aux GES (la consommation d'énergie pourrait être ajoutée comme indicateur de flux), la pollution de l'eau, l'épuisement des ressources naturelles non renouvelables. Des indicateurs liés à la toxicité seraient également indispensables car cela peut faire la différence entre une solution papier et une solution TIC.
- Il est nécessaire de comparer des usages et non des produits en tenant compte de la diversité des usages et en se rapprochant le plus possible de la réalité de terrain.
- Les analyses de sensibilité donnent des résultats en général plus intéressants que le cas de référence lui-même, tel que proposé dans l'ACV. Il s'agit d'un point pas suffisamment mis en exergue et à développer dans les messages finaux des différentes publications (notamment par rapport aux hypothèses sur les usages).
- Il serait également intéressant de conduire des études à un niveau plus « macroscopique » pour accroître le potentiel de généralisation de ces études, ou au moins la reprise d'éléments dans des travaux prospectifs.

Le tableau suivant compare les publications abordées afin d'en montrer les principaux points de convergence et de divergence sur les éléments quantitatifs.

Tableau 12 – Illustration comparative de différentes publications étudiées concernant la dématérialisation (exemple de supports de lecture)

Item	“Mat – an ICT application to support a more sustainable use of print products and ICT devices », R Hischer & all, ICT4S 2013	« Life cycle Assessment of e Magazine, Part I et II » A comparison of Print and Tablet edition. M.A. Achachlouei & A Moberg ; Journal of industrial Ecology, 2015
Périmètre géographique	Suisse/Europe	Suède
Approche générale	Élaboration d'une interface pour réaliser une ACV comparative journal papier/journal lu sur tablette en offrant à l'utilisateur la possibilité de faire varier plusieurs paramètres	Évaluation environnementale comparative magazine papier versus e-magazine lu sur tablette
Méthodologie	ACV multicritère (ReCiPe) : changement climatique, qualité écosystème, santé humaine et ressources	ACV multicritère : changement climatique, épuisement des métaux, épuisement des ressources fossiles, acidification terrestre, eutrophisation des eaux douces, formation d'oxydants photochimiques
Données utilisées	<p>Données reprises d'un fabricant de tablettes électroniques (Apple), incluant des extrapolations. Basé sur ipad2 10pouces</p> <p>Données pour le papier (journal) issu de différents rapports environnementaux d'imprimeries Allemandes et Autrichiennes</p> <p>Processus d'impression : ecoinvent v2.2</p> <p>Consommation énergétique liée au transfert des données issue de données Américaines + ecoinvent : 0,275 kWh/Go</p>	<p>Données tablette issues de l'identification des composants d'un modèle de tablette électronique (Ipad2). Fabrication des composants modélisés avec EcoInvent 2.2 et 3 (sur circuits imprimés)</p> <p>Données réseau & datacentres issues des travaux de Malmodin & all (2014)</p> <p>Electricité en phase d'usage de la tablette : basé sur l'énergie nécessaire au chargement de la batterie et sur le temps max de charge de la batterie en mode wifi et rapporté eu temps de lecture du magazine</p> <p>Données papier à partir du cas d'un magazine « Shöna Hem », données production papier issues du cas réel</p> <p>Données production électricité issues de ecoinvent (donnée Finlande, 2007)</p>
Hypothèses notables	<p>Durée de vie de 2 ans, utilisation de 2h par jour (reste du temps en mode veille) ; 100MB de données transitent par jour</p> <p>Quota de recyclage du papier : 67% (le reste est incinéré)</p> <p>100% des équipements sont supposés être dépollués puis traités mécaniquement</p> <p>Mix énergétique correspondant à la moyenne Européenne</p>	<p>Magazine lu par 4,4 personnes</p> <p>Version numérique lue par une seule personne</p> <p>Durée de vie de 3 ans, utilisation de 14h/semaine (pas d'utilisation en dehors de ce temps) ; 100MB de données transitent par jour</p> <p>Quota de recyclage du papier : 94%</p> <p>80% de la tablette entre dans un système de recyclage, le reste est valorisé énergétiquement</p>

Item	<p>“Mat – an ICT application to support a more sustainable use of print products and ICT devices », R Hischier & all, ICT4S 2013</p>	<p>« Life cycle Assessment of e Magazine, Part I et II » A comparison of Print and Tablet edition. M.A. Achachlouei & A Moberg ; Journal of industrial Ecology, 2015</p>															
		<p>Mix énergétique correspondant à la moyenne Suédoise</p> <p>Transport de la tablette : bateau depuis Shanghai à Rotterdam puis en camion jusqu'à Stockholm</p> <p>Temps de lecture du journal papier 41min ; temps de lecture du journal numérique : 41min (dans le scénario mature)</p>															
<p>Résultats-clés</p>	<p>Concernant la partie tablette : sa production domine le cycle de vie pour tous les indicateurs environnementaux examinés, représentant dans presque tous les cas 60% et plus de l'impact total.</p> <p>Au sein de la production, les composants électroniques, c'est-à-dire la carte de circuit imprimé et ses composants (CI, résistances, condensateurs, etc.) est clairement responsable de l'impact principal (toujours au-dessus de 75%, souvent supérieur à 90%).</p> <p>Le média numérique génère moins d'impacts environnementaux que le média papier.</p>	<p>Importance de l'impact environnemental lié à la production de contenu de magazines dédiés à la version tablette (répartition du coût environnemental par tablette) : à noter que ce résultat est fortement influencé par le temps de lecture sur la tablette en regard de son temps d'utilisation total (dans d'autres études c'est la production de la tablette qui est relativement la plus impactante dans l'ACV de la lecture d'un e-journal)</p> <p>Pour la plupart des indicateurs utilisés, le stockage et la distribution du e-magazine représentent la plus grosse part des impacts (surtout datacentres)</p> <p>Quelques données sur le cout énergétique du stockage et du transport des données (différents auteurs, différents technologies, différents périmètres)</p> <table border="1" data-bbox="1243 821 2011 1018"> <thead> <tr> <th></th> <th>Transport données</th> <th>Stockage données</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Malmodin et al</td> <td>0,08 kWh/Go</td> <td>1 kWh/Go</td> </tr> <tr> <td>Baliga et al.(2009)</td> <td>>0,17 kWh/Go</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Coroama et al. (2013)</td> <td>0,2 kWh/Go</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Schien et al. (2013)</td> <td>0,038 à 0,121 kWh/Go selon la technologie</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Par rapport au comparatif magazine papier et magazine lu sur tablette (mêmes temps de lecture), on a :</p> <ul style="list-style-type: none"> • un avantage environnemental pour la version électronique sur les indicateurs suivants : <ul style="list-style-type: none"> - épuisement des ressources fossiles - changement climatique, - formation d'oxydants photochimiques (ozone par exemple) • avantage environnemental pour la version magazine sur les indicateurs suivants : <ul style="list-style-type: none"> - épuisement des métaux - eutrophisation des eaux (douces) - acidification terrestre 		Transport données	Stockage données	Malmodin et al	0,08 kWh/Go	1 kWh/Go	Baliga et al.(2009)	>0,17 kWh/Go		Coroama et al. (2013)	0,2 kWh/Go		Schien et al. (2013)	0,038 à 0,121 kWh/Go selon la technologie	
	Transport données	Stockage données															
Malmodin et al	0,08 kWh/Go	1 kWh/Go															
Baliga et al.(2009)	>0,17 kWh/Go																
Coroama et al. (2013)	0,2 kWh/Go																
Schien et al. (2013)	0,038 à 0,121 kWh/Go selon la technologie																

Item	<p>“Mat – an ICT application to support a more sustainable use of print products and ICT devices », R Hischier & all, ICT4S 2013</p>	<p>« Life cycle Assessment of e Magazine, Part I et II » A comparison of Print and Tablet edition. M.A. Achachlouei & A Moberg ; Journal of industrial Ecology, 2015</p>
Possibilité de généralisation	<p>Très faible Peu de données disponibles. Les données ainsi que les résultats ne sont pas vraiment transposables au contexte français ou européen</p>	<p>Faible Certaines données d’industriels pourraient être réutilisées mais l’étude est très spécifique aux médias de lecture en Suède</p>

V.4. LE E-COMMERCE

Contexte et champ des études

En termes de cadre général, les études cherchent souvent à comparer les impacts du e-commerce avec le commerce traditionnel ([33][89][90] par exemple).

Un aspect intéressant à considérer est la diversité de biens de consommations étudiés. Or, le sujet des études est très souvent restreint. Si l'on se limite aux publications [33] et [89] (ayant fait l'objet d'une fiche de lecture), les deux couvrent l'achat d'un bien culturel (livre et/ou journal). Le constat est similaire si l'on étend l'analyse à d'autres publications analysées en volet 1 de l'étude : livre [80][85][94], disque flash type clé USB [86], CD de musique [88]. Globalement, on peut donc observer que certaines formes « nouvelles » de e-commerce (on pensera aux biens alimentaires par exemple) sont encore très peu traitées par la littérature.

Quelques publications vont plus loin et couplent à la fois e-commerce et dématérialisation (achat et usage sur des appareils électroniques), ce qui est en particulier le cas des publications [33] et [90].

Périmètre

Les études ciblées sont dans la majorité des analyses comparatives entre un mode d'achat dématérialisé et un mode traditionnel. Par exemple, la publication [89] compare pour un livre un achat en librairie à un achat effectué sur internet. De même, la publication [33] estime les impacts environnementaux du e-commerce par rapport au commerce traditionnel. L'approche adoptée pour l'analyse est donc relativement proche de celle prise pour le télétravail ou la dématérialisation.

En termes de périmètre géographique, la majorité des études ([89][90] et d'autres parmi les publications identifiées en volet 1 de l'étude) ont une approche unitaire, considérant l'achat d'un produit à la fois. Seule la publication [33] a été identifiée comme ayant une approche macroscopique, étendue à l'échelle des États-Unis.

Approches méthodologiques

L'approche méthodologique utilisée pour quantifier les impacts est très souvent une approche simplifiée considérant uniquement les émissions de GES et les consommations d'énergie [33] (mais aussi [80][85][86] par exemple). Quelques publications adoptent toutefois une approche ACV multicritère [1][89][90], mais cela est plus rare.

Comme évoqué précédemment, la majorité des publications adoptent une approche comparative pour évaluer la pratique digitale à son équivalent traditionnel, le commerce en boutique. De fait, ces études se focalisent avant tout sur la modélisation différenciée des impacts environnementaux liés à l'étape de distribution et de transport du bien acheté.

On pourrait imaginer la mise en place d'une approche méthodologique basée sur des données empiriques (sondage) comme pour l'étude [13] sur le télétravail. Celle-ci permettrait de déterminer plus finement les comportements des différents acteurs de la chaîne de valeur du e-commerce, ainsi que les conséquences en matière d'impacts environnementaux. Une étude sur le sujet vient d'être lancée par l'ADEME et pourrait répondre à ce besoin.

Données utilisées

En termes de données utilisées, les observations faites sont relativement analogues à celles faites pour la dématérialisation. La majorité des études se basent sur des données génériques ou issues de la littérature [33] (et d'autres publications identifiées en volet 1 : [80][85][86][91][92]).

Ces publications se basent alors sur beaucoup d'hypothèses, voire des données anciennes. Par exemple, parmi les trois principales sources bibliographiques utilisées par l'étude [33] publiée en 2015 figurent deux articles scientifiques datant de 2002 et 2003.

En revanche, les publications [89][90] utilisent des données fournies par des libraires « physiques » (ex. : consommation d'énergie du magasin et de l'entrepôt) ainsi que des libraires « dématérialisés », ce qui permet de disposer de données de meilleure qualité, propre au cas d'étude spécifique considéré, et d'améliorer la robustesse des résultats.

Résultats marquants et principales tendances

Si l'on regarde de manière individuelle les résultats des différentes études analysées, on constate que le e-commerce permet une réduction des impacts environnementaux sur une majorité d'indicateurs. C'est le cas

de la publication [89], qui a une véritable approche multicritère et présente cette tendance sur l'ensemble des catégories d'impacts environnementaux couvertes. L'étude [33] le confirme, bien qu'elle soit bi-indicateur (consommation d'énergie et émissions de GES).

Autre tendance que l'on peut observer à partir de l'étude [89] : le mode d'acheminement « final » du bien peut quasiment faire varier du simple au double le bilan environnemental du e-commerce. L'étude analyse que pour l'achat d'un livre, le bilan GES peut varier de 1,3 kg CO₂ éq. pour l'achat en librairie avec déplacement en voiture, à 0,68 kg CO₂ éq. pour la livraison au domicile par courrier classique.

Seule l'étude [33] fournit une extrapolation des impacts du e-commerce à une échelle macroscopique. Selon cette étude, les livres numériques et les journaux numériques permettraient des gains de l'ordre de 0,02% à 0,03% et 0,04% à 0,05% respectivement des émissions de GES des États-Unis. Bien qu'appliqué uniquement à un type de bien, le chiffre est faible.

Principales limites, besoins complémentaires

La principale limite des différentes études analysées est un manque de robustesse méthodologique. L'adoption d'une approche multi-étapes et multicritère n'est pas encore un réflexe et montre que l'évaluation environnementale du e-commerce est un sujet qui nécessite encore de mûrir. Les impacts directs (liés à l'achat sur internet) ne sont pas systématiquement inclus et se restreignent souvent à une seule évaluation des impacts de la logistique. Enfin, une revue indépendante systématique devrait également être mise en place (ce qui n'est pas le cas de la publication [33]).

Considérant les types d'effets des TICs couverts, le périmètre est souvent incomplet. Par ailleurs, aucune étude analysée ne considère les effets rebonds associés au e-commerce, et notamment les achats supplémentaires induits par le e-commerce. Selon nous, ces effets rebonds nécessiteraient une approche plus fine pour caractériser les modifications de comportements des consommateurs.

En termes de données, l'étude [89] montre que le mode de livraison est un paramètre sensible, alors que beaucoup de publications analysées modélisent cette phase de manière simplifiée ([33] et autres publications également citées précédemment). A l'opposé sur le commerce traditionnel, on remarque également que la modélisation des impacts associés au stockage en magasin est limitée par un manque général de données [89][90]. Ceci s'explique par une méconnaissance (du moins dans les évaluations environnementales) des chaînes logistiques associées au e-commerce et au commerce de façon générale. Il est aussi difficile pour l'ensemble des publications d'allouer les impacts de la livraison entre les différents colis.

Enfin, on peut s'interroger sur l'évolution du bilan environnemental selon le type de bien acheté en ligne. On peut suspecter de fortes variations d'impacts environnementaux dans certaines configurations, par exemple pour les services de courses alimentaires en ligne qui nécessitent de respecter la chaîne du froid. Ce point, ainsi que la question des effets rebond, figurent parmi les sujets méthodologiques à mieux investiguer à court-moyen terme. L'étude ADEME qui vient de se lancer sur les impacts environnementaux du e-commerce avec une analyse réaliste des divers modes logistiques associés permettra sûrement d'apporter des avancées sur les principales limites relevées dans la présente étude.

Le tableau suivant compare les publications abordées afin d'en montrer les principaux points de convergence et de divergence sur les éléments quantitatifs.

Tableau 13 – Illustration comparative des différentes publications étudiées concernant le e-commerce

Item	The Energy and Greenhouse Gas Emissions Impacts of Telecommuting and e-Commerce, Fraunhofer USA (D. Harbor, K. Roth, Michael Zeifman, V. Shmakova) pour la Consumer Electronics association (CEA), 2015 [33]	Books from an environmental perspective – Part 1 – environmental impacts of paper books sold traditional and internet bookshops, C. Borggren et al. Int. Journal of LCA, 2011 [89]																													
Périmètre géographique	États-Unis	Suède																													
Approche générale	Évaluation environnementale comparative face au commerce traditionnel, appliqué à un bien en particulier (livre et/ou journal)																														
Méthodologie	Empreinte carbone (bi-indicateur)	ACV multicritère																													
Données utilisées	Données génériques exclusivement	Données spécifiques fournies par des entreprises de la distribution complétées par des données génériques																													
Hypothèses notables	Scénarios d'utilisations min et max de 17 et 51 minutes de lecture par jour Estimation des ventes par la différence maximale de statistiques de ventes États-Unis sur les années 2010 et 2013. 2/3 des e-books vendus aux États-Unis se substituent à des livres papier	Estimation d'un déplacement de 2 km en voiture par le consommateur pour acheter le livre en librairie Hypothèse par défaut que les livres ne sont lus que par une personne																													
Résultats-clés	Les livres numériques et les journaux numériques permettraient des gains de l'ordre de 0,02% à 0,03% et 0,04% à 0,05% respectivement des émissions de GES des États-Unis, soit respectivement 1,8 Mt CO ₂ éq. et 3,3 Mt CO ₂ éq au maximum.																														
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Cas étudié</th> <th rowspan="2">Poste d'impacts considéré</th> <th colspan="2">Émissions de GES (Mt CO₂ éq/an)</th> </tr> <tr> <th>Cas min</th> <th>Cas max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">Livres numériques</td> <td>Production du média numérique et lecture</td> <td>0,2</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>Évitement de la production de livre papier</td> <td>-1,0</td> <td>-1,3</td> </tr> <tr> <td>Évitement de la phase d'acheminement du livre papier</td> <td>-0,7</td> <td>-0,8</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>-1,5</td> <td>-1,8</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Journaux numériques</td> <td>Production du média numérique et lecture</td> <td>0,07</td> <td>0,27</td> </tr> <tr> <td>Évitement de la production du journal papier</td> <td>-2,9</td> <td>-3,5</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>-2,9</td> <td>-3,3</td> </tr> </tbody> </table>		Cas étudié	Poste d'impacts considéré	Émissions de GES (Mt CO ₂ éq/an)		Cas min	Cas max	Livres numériques	Production du média numérique et lecture	0,2	0,3	Évitement de la production de livre papier	-1,0	-1,3	Évitement de la phase d'acheminement du livre papier	-0,7	-0,8	Total	-1,5	-1,8	Journaux numériques	Production du média numérique et lecture	0,07	0,27	Évitement de la production du journal papier	-2,9	-3,5	Total	-2,9	-3,3
	Cas étudié	Poste d'impacts considéré			Émissions de GES (Mt CO ₂ éq/an)																										
			Cas min	Cas max																											
Livres numériques	Production du média numérique et lecture	0,2	0,3																												
	Évitement de la production de livre papier	-1,0	-1,3																												
	Évitement de la phase d'acheminement du livre papier	-0,7	-0,8																												
	Total	-1,5	-1,8																												
Journaux numériques	Production du média numérique et lecture	0,07	0,27																												
	Évitement de la production du journal papier	-2,9	-3,5																												
	Total	-2,9	-3,3																												
Le E-commerce permet un gain environnemental de 10% à 20% en moyenne par rapport au commerce traditionnel sur la majorité des indicateurs environnementaux																															
Le mode de livraison peut faire varier du simple au double le bilan environnemental du e-commerce (variation de 0,68 à 1,3 kg CO ₂ éq. par livre acheté dans le cas étudié). Si l'on considère un trajet de 10 km en voiture du consommateur, les impacts environnementaux augmentent de 50% à 150%																															
Selon le type de papier utilisé pour produire le livre, les impacts environnementaux de la production du livre papier diminuent de 30% en moyenne selon les indicateurs, ce qui réduit l'écart avec le livre dématérialisé.																															
L'amortissement des impacts de la liseuse est sensiblement lié au nombre de livres lus sur l'appareil :																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Type d'impact considéré</th> <th>Amortissement par rapport au livre papier acheté en librairie (nombre de livres lus par liseuse)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Type d'impact considéré	Amortissement par rapport au livre papier acheté en librairie (nombre de livres lus par liseuse)																												
Type d'impact considéré	Amortissement par rapport au livre papier acheté en librairie (nombre de livres lus par liseuse)																														

		<table border="1"> <tr> <td>Réchauffement climatique</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>Consommation d'énergie primaire</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>Épuisement des ressources abiotiques</td> <td>32</td> </tr> <tr> <td>Écotoxicité des eaux douces</td> <td>350</td> </tr> </table>	Réchauffement climatique	25	Consommation d'énergie primaire	12	Épuisement des ressources abiotiques	32	Écotoxicité des eaux douces	350
Réchauffement climatique	25									
Consommation d'énergie primaire	12									
Épuisement des ressources abiotiques	32									
Écotoxicité des eaux douces	350									
Possibilité de généralisation	<p>Très faible</p> <p>Les données ainsi que les résultats ne sont pas vraiment transposables au contexte français ou européen</p>	<p>Faible</p> <p>Certaines données d'industriels pourraient être réutilisées mais l'étude est très spécifique aux médias de lecture en Suède.</p>								

V.5. AUTRES FOCUS

V.5.1. LA CONSOMMATION COLLABORATIVE

Dans le cadre de la recherche bibliographique effectuée dans le premier volet de l'étude, une seule publication liant consommation collaborative et impact environnemental a été identifiée : il s'agit de l'étude à paraître de l'ADEME « Potentiels d'extension de la consommation collaborative pour réduire les impacts environnementaux » [14]. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce manque bibliographique :

- La consommation collaborative regroupe un large panel d'applications, dans la mobilité, les biens meubles ou immobiliers, les biens alimentaires. Ce périmètre large complique l'identification de publications relatives au sujet des TICs associées à la consommation collaborative ;
- Il s'agit d'un sujet émergent depuis quelques années seulement ; et
- Le lien entre TICs et consommation collaborative est moins évident que le lien entre TICs et télétravail ou e-commerce. En effet, l'étude ADEME a identifié les TICs comme un levier de croissance de la consommation collaborative, dans le sens où les TICs facilitent la mise en relation entre usagers. Mais la consommation collaborative peut aussi exister sans l'apport des TICs.

L'étude de l'ADEME à paraître ne comporte pas de focus précis sur les impacts des TICs. Cependant, les évaluations environnementales de type ACV réalisées dans l'étude ont montré que les impacts directs des TICs (mise en relation entre usagers) sont globalement faibles en comparaison des impacts de l'acte de consommation lui-même, et ce pour un large panel d'initiatives collaboratives (covoiturage, réemploi, location entre particuliers).

Plusieurs articles scientifiques existent sur la consommation collaborative [101][102]. Ils ne présentent pas d'évaluation environnementale mais illustrent la « jeunesse » de ce concept en affinant la définition de la consommation collaborative et en proposant quelques données macro-économiques.

V.5.2. AUTRES USAGES IMPORTANTS DES TICs ETUDIÉS

Concernant les autres usages des TICs identifiés dans la recherche bibliographique, on peut mentionner :

- Une étude [96] sur l'impact des RFID (tags intelligents) sur la fin de vie des déchets auxquels ils sont intégrés (non issus des TICs) ;
- Plusieurs études sur l'impact des smart grids, notamment en termes de réduction d'émission de GES [20] [22]³⁷ ; et
- Une étude sur l'optimisation de la collecte de déchets urbains de la ville de Grenoble à l'aide d'un réseau de capteurs [110], qui a fait l'objet d'une fiche de lecture (cf. Annexe III.15). Cette étude établit un cadre méthodologique pour évaluer les impacts environnementaux d'un service d'optimisation basé sur les TIC, et l'applique ensuite au cas réel de la ville de Grenoble. Les impacts environnementaux du système non-optimisé (i.e. poubelles sans capteurs et tournées classiques à fréquence régulière des camions poubelles) sont comparés à la somme des impacts environnementaux du service optimisé (i.e. basé sur l'utilisation de capteurs et d'échanges d'informations via un système centralisé), de ceux des équipements numériques et de ceux utilisés pour l'optimisation du service. Plusieurs scénarios intégrant des solutions d'éco-conception sont ensuite comparés. Le cas d'école étudié est très intéressant car 1) il est basé sur une situation réelle déployée à l'échelle d'une ville de taille importante, Grenoble ; 2) il est appliqué à une problématique environnementale, à savoir la gestion des déchets de verre ménagers ; 3) il engendre, dans le scénario de référence, un transfert de pollution de l'indicateur réchauffement climatique (réduction des consommations de diesel des camions-poubelles) vers l'indicateur épuisement des ressources (production d'un nombre important de capteurs). Cela montre ainsi que l'utilisation du numérique n'implique pas forcément un bénéfice environnemental global.

³⁷ On notera aussi que la plupart des études prospectives (cf. VI.1.) traitant des impacts globaux des TICs sur l'environnement incluent une quantification des réductions d'impacts grâce aux smart grids.

V.5.3. FOCUS SUR LES NOUVEAUX USAGES DES TICs (ET DE LEURS IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT)

Mis à part le cas des smart grids qui, au vu de la littérature, semble être étudié depuis quelques années [9] [20] [114], les autres nouveaux usages des TICs (smart cities, objets connectés, etc.) ne bénéficient pas encore d'études poussées et leurs impacts ne sont pas encore analysés.

Bien que relativement nombreuses, les études sur les smart grids sont cependant souvent limitées à quelques critères d'études (typiquement consommation d'énergie et émissions de GES), concernent principalement l'Amérique du Nord et l'Europe et sont souvent commanditées par des acteurs du secteur ou des organismes gouvernementaux. Par exemple, une étude de l'EPRI³⁸ estimait en 2008 que 60 à 2011 Mt CO₂ pourraient être économisées en 2030 grâce aux smart grids aux Etats-Unis [20]. Pour la France, l'étude France2020 [114] estimait en 2010 que 6,4 Mt CO₂ éq. pouvaient être évitées grâce aux compteurs intelligents et aux smart appliances.

³⁸ EPRI : Institut de Recherche de l'Energie Electrique, organisation de recherche à but non lucrative, financée par l'Industrie énergétique aux Etats-Unis

VI. INTEGRATION DU NUMERIQUE DANS LES ETUDES PROSPECTIVES

VI.1. ENSEIGNEMENTS SUR LES TRAVAUX PROSPECTIFS PREEXISTANTS EN LIEN AVEC LES TICS

Dans le cadre de la recherche bibliographique réalisée dans le premier volet de l'étude, 16 publications présentant un travail de prospective ont été identifiées [5][9][14][15][18][19][20][26][27][28][29][31][32][62][75][114]. Les fiches de lecture réalisées en volet 2 portent sur les études SMART2020 [9][19][32] ainsi qu'une étude par la Fédération Française des Télécoms, l'Alliance TiCS et la Fédération des Industries Électriques, Électroniques et de Communication [114].

Contexte et champ des études

Le champ et le contexte de ces études sont très similaires entre les différentes publications : il s'agit d'étudier de façon globale les impacts des TICS à l'échelle d'une région géographique, que ce soit le Monde pour les études de type SMART2020 [9][19][32], l'Europe [18] ou un pays (la France par exemple [114]).

Périmètre

En termes de périmètre, là encore ces études sont relativement proches. Pour chacune d'entre elles, il s'agit d'évaluer et de comparer :

- Les impacts directs négatifs³⁹ d'une partie des TICS, essentiellement les objets « end-user » comme les ordinateurs ou les téléphones, ainsi que les datacentres et le réseau ; et
- Les impacts indirects positifs⁴⁰ de ces mêmes TICS, appliqués à différents usages ou secteurs : la dématérialisation, la mobilité, les bâtiments, les réseaux énergétiques, voire l'industrie et l'agriculture.

Par ailleurs, ces deux types d'impacts sont évalués de façon indépendante. Par exemple, les études SMART2020 [9][19][32] calculent d'abord l'empreinte directe des TICS en estimant les quantités d'équipements en jeu ainsi que leurs consommations d'énergie, puis estiment les gains possibles application par application : télétravail, e-commerce, bâtiment, smart grids, etc. L'étude Green2020 appliquée à la France [114] ne calcule que les impacts indirects positifs des TICS ; l'empreinte directe négative est calculée dans une seconde étude complémentaire (réalisée par un autre prestataire, ce qui limite la comparabilité). Dans les faits, on constate donc que les impacts directs sont calculés selon une approche « top-down » alors que les impacts indirects sont calculés selon une approche « bottom-up ».

Le périmètre temporel de ces différentes études est un horizon 2020 [9][19][114] ou 2030 [32] pour les études les plus récentes.

Approches méthodologiques

L'ensemble des publications identifiées au cours des recherches bibliographiques adopte une méthodologie de type « Empreinte Carbone » (équivalente à une « ACV monocritère »). Dans ce cadre, seules les émissions de GES voire les consommations d'énergie sont étudiées. Par ailleurs, certaines phases du cycle de vie ne sont pas prises en compte par ces études. Les phases d'approvisionnement et de fin de vie ne sont pas incluses de façon exhaustive et/ou transparente dans les études SMART2020 ou Green2020. De fait, aucune étude adoptant une approche ACV (multicritère et multi-étapes) n'a été identifiée. On notera cependant que l'étude SMARTer2030 [32] intègre également aux calculs les économies d'argent et de consommations d'eau grâce aux TICS. A noter qu'aucune de ces études ne considère de limitations dans l'approvisionnement des ressources dans les scénarios (métaux, énergie ou eau). Elles se placent toujours dans le contexte de ressources infinies.

Un second point-clé pour la mise en œuvre de ces études est la création d'un scénario « Business-as-Usual ». Il s'agit à chaque fois d'un scénario tendanciel où l'on ne considère aucune évolution particulière imputable aux TICS. Cependant, aucun de ces scénarios ne considère d'évolutions technologiques, par exemple dans les matériaux et les types d'équipements informatiques utilisés.

³⁹ Négatifs car cela correspond à des impacts supplémentaires sur l'environnement. Du point de vue calculatoire, cela correspond à des valeurs positives.

⁴⁰ Positifs car cela correspond à des bénéfices environnementaux, autrement dit des impacts évités sur l'environnement. Du point de vue calculatoire, cela correspond à des valeurs négatives.

Données utilisées

Ces études prospectives consistent le plus souvent en des agrégations d'hypothèses issues de sources variées : agences publiques, industriels, rapport d'études, organisations internationales, d'experts, etc. Des données issues de travaux académiques sont plus rares. Cette diversité de sources de données est en quelque sorte inhérente à cet exercice. Un certain nombre de ces données peuvent être utilisées sans analyse du contexte dans lequel elles ont été produites et sont extrapolés à l'ensemble du monde par exemple dans l'étude smart2020. L'étude Green2020 [114] considère les résultats de projets pilotes (en France ou à défaut à l'étranger) sur différents usages pour extrapoler les gains environnementaux indirects des TICs. Cependant, l'analyse de la robustesse de ces différentes données est peu développée. Globalement, la fiabilité de ces données hétérogènes est donc faible.

Résultats marquants et principales tendances

La majorité des études ciblées aboutissent au même consensus : les impacts potentiels (sur le réchauffement climatique) indirects positifs sont supérieurs à la somme des impacts directs négatifs générés par la fabrication et l'usage des équipements électroniques dans un scénario « Business-as-Usual ». Par exemple, les études SMART2020, réalisées en 2008 [9], 2012 [19] et 2015 [32] concluent que le ratio absolu entre impacts indirects positifs et impacts directs négatifs augmente progressivement. Il passe de 5,5 à 7,2 et enfin à 9,7 : autrement dit les impacts indirects des TICs seraient 9,7 fois plus importants en 2030 que leurs impacts directs (i.e. 12 t CO₂ éq. économisées contre 1,3 t CO₂ éq. dus aux impacts directs des TICs).

Ces différentes études font une analyse sectorielle des gains d'impacts. Les études SMART2020 identifient l'optimisation des réseaux énergétique (*smart grids*) et la mobilité (télétravail, e-commerce, visioconférence) comme les secteurs où les gisements de réduction d'émissions de GES sont les plus importants. Le bâtiment et l'industrie sont également ciblés dans un second temps.

Principales limites, besoins complémentaires

Les faiblesses méthodologiques liées à ces études sont nombreuses. Comme évoqué plus haut, aucune d'entre elles n'adopte une approche :

- **Multicritère** : les impacts étudiés de façon quasi-exclusive sont les émissions de GES et les consommations d'énergie. Cependant, il serait pertinent de quantifier les enjeux (et les possibles transferts de pollution) liés aux TICs en lien avec les consommations de matériaux critiques, par exemple.
- **Multi-étapes** : la phase d'utilisation est systématiquement prise en compte. La phase de production n'est pas incluse de façon systématique [114]. La fin de vie et l'approvisionnement sont beaucoup plus rarement considérés [9][19][32][114] alors que les enjeux associés à la fin de vie des DEEE prennent une place grandissante et complexe dans la société. De très nombreuses hypothèses sont prises, en dehors du contexte dans lequel elles ont été initialement posées. Par exemple, de nombreuses extrapolations de gains des TICs à l'échelle d'un pays (via un projet pilote par exemple) sont transposées à l'échelle mondiale, sans prise de recul. Les possibles évolutions technologiques ne sont pas prises en compte, ce qui aboutit à des résultats peu crédibles dans le contexte de technologies à fort potentiel évolutif comme les TICs.

Plus globalement, on peut s'interroger sur la partialité des commanditaires de ces études. En effet, les TICs sont majoritairement perçues dans ces rapports comme des solutions et plus rarement comme des problèmes à la gestion des impacts environnementaux des activités humaines. Il n'y a par exemple quasiment pas de prise en compte des effets rebonds, qu'ils soient positifs ou négatifs. Les premières études SMART2020 les évoquent brièvement de façon qualitative [9][19] tandis que l'étude SMARTer2030 les quantifie grossièrement via un calcul simplifié [32] mais sans les prendre en compte dans les résultats globaux. Les impacts indirects négatifs ne sont évoqués dans aucune des études ciblées. Effectuer une revue critique par un panel indépendant permettrait de lever les doutes sur la partialité de ces travaux.

Enfin, étant donné la façon dont les TICs s'insèrent dans toutes les dimensions de la société, il serait intéressant de considérer les enjeux socio-économiques associés à leur essor, en plus des impacts environnementaux. Seule l'étude SMARTer2030 [32] a adopté une approche allant en ce sens.

En conclusion de cette analyse, les méthodologies déployées dans ces études sont très simplifiées. Il n'y a pas d'approche systémique, de prise en compte des effets de seuil, ou de considération des évolutions technologiques, comme cela devrait être considéré. De façon plus juste, on pourrait donc qualifier ces publications d'extrapolations plutôt que d'études prospectives.

Le tableau suivant compare les publications abordées afin d'en montrer les principaux points de convergence et de divergence sur les éléments quantitatifs.

Tableau 14 - Comparaison des différentes publications étudiées concernant les études prospectives existantes

Item	Études « Smart2020 » [9][19][32]	Étude « Green2020 » [114]
Périmètre géographique	Monde	France
Approche générale	Estimation des impacts indirects des TICs sur les différents secteurs de l'économie au regard des impacts directs des TICs, en termes d'émissions de GES et de consommation d'énergie	
Méthodologie	Méthodologie de type « empreinte carbone » Utilisation d'un scénario « Business-as-Usual » permettant de calculer les gains des TICs	
Données utilisées	Agrégation de données issues de différents contextes pour estimer de façon unitaire le gain environnemental permis par chaque application des TICs	
Principales hypothèses	Extrapolation au niveau mondial de plusieurs données produites pour un pays en particulier Les impacts négatifs indirects, les effets rebond et les impacts négatifs directs dus au recyclage sont négligés.	Extrapolation à l'échelle nationale de données issues de projets pilotes en France ou à l'étranger
Résultats-clés	En termes d'émissions de GES, le ratio (absolu) des impacts indirects induits par les TICs au regard de leurs impacts directs est égal à un facteur : 5,5 pour l'étude Smart2020 [9] 7,2 pour l'étude SMARTer2020 [19] 9,7 pour l'étude SMARTer2030 [32]	Globalement, les TIC peuvent permettre de réaliser des réductions d'émissions de GES équivalentes à 7% des émissions totales de la France à horizon 2020, soit un tiers de l'objectif national.
Possibilité de généralisation	limitée étant donné les faiblesses de l'approche méthodologique	limitée, étant donné les faiblesses de l'approche méthodologique (et l'ancienneté de l'étude) Cependant, quelques résultats peuvent être repris à titre qualitatif étant donné l'adaptation au contexte spécifique français (et à son mix électrique atypique)

VI.2. RELECTURE CRITIQUE DES TRAVAUX PROSPECTIFS DE L'ADEME

Pour établir une revue critique des travaux prospectifs de l'ADEME au regard des enseignements clés issus de la présente étude, il convient de repréciser ce qu'on peut attendre d'une démarche prospective sur le sujet, les messages clés issus de cette étude, et la grille d'analyse qui permet d'évaluer les travaux de l'ADEME.

Différents types de démarches prospectives

Les démarches prospectives visent à comprendre les dynamiques en cours, à explorer les différents futurs possibles en germe dans la situation actuelle, pour identifier des enjeux majeurs sur lesquels il est possible d'agir.

Par nature, une démarche prospective est **systemique**, c'est-à-dire qu'elle prend en compte la diversité des facteurs qui peuvent jouer sur la problématique étudiée. La sélection des variables pertinentes à prendre en compte est donc la première et incontournable étape d'une démarche de ce type.

Les réflexions prospectives prennent aussi nécessairement en compte **les discontinuités et les ruptures qui peuvent intervenir et modifier les dynamiques en cours**.

Au regard de cette double caractéristique des démarches prospectives, les publications issues de la revue bibliographique et analysées dans ce rapport pâtissent de limites importantes :

- **Elles sont très rarement systemiques** et négligent notamment fortement les évolutions de comportements dont le numérique est devenu une composante essentielle et qui peuvent jouer de façon importante sur les impacts environnementaux de modes de vie devenus en partie numériques ; et
- **Elles prennent peu en compte la nouveauté**, que ce soit les nouveautés techniques, ou les innovations comportementales alors même que ces nouveautés sont les germes des futurs alternatifs.

En revanche, les publications analysées permettent de faire le point sur l'état de l'art scientifique sur la question des impacts environnementaux du numérique, ce qui constitue la base de toute réflexion prospective rigoureuse. Sur ce point également, force est de constater que les méthodologies sont encore relativement balbutiantes même s'il existe de nombreux travaux intéressants. **Le champ reste neuf**.

Le défi est donc de pouvoir articuler de façon pertinente au regard des enjeux que l'ADEME cherche à éclairer :

- L'état des connaissances ;
- La prise en compte de la nouveauté ; et
- L'analyse systemique.

C'est au regard de cette exigence qu'il est possible d'analyser les études de prospective de l'ADEME.

Une réflexion a été menée sur l'utilisation des travaux recensés et analysés dans la présente étude afin d'alimenter les travaux prospectifs de l'ADEME avec des données robustes. Cependant, nous avons constaté dans l'analyse bibliographique essentiellement sur les impacts environnementaux directs des TIC (65% des études analysées), et de façon plus imparfaite sur les impacts indirects (32% des études analysées), abordés souvent de façon sectorielle, fort peu, sauf en creux, sur les impacts systemiques (analysés, souvent de façon très parcellaire ou spécifique, dans 22% des publications).

La prise en compte des innovations de rupture ou des nouveautés (ex. : nouveaux équipements) étant absente de la quasi-totalité des publications analysées, ce n'est pas au regard de celles-ci qu'il sera possible d'analyser les études de l'ADEME, mais nous posons néanmoins cet élément comme critère d'évaluation. Il en est de même pour l'approche systemique. Ces éléments permettront en effet de nourrir les recommandations sur les études prospectives ultérieures que l'ADEME pourrait engager.

L'analyse se concentre sur trois études :

- Alléger l'empreinte environnementale des Français ;
- Visions 2030-2050 ; et
- Étude ADEME sur le potentiel d'extension de la consommation collaborative pour réduire les impacts environnementaux.

VI.2.1. ALLEGER L'EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE DES FRANÇAIS

Cet exercice de prospective réalisé en 2014 s'est attaché à donner une vision à l'horizon 2030 des changements technologiques, économiques et sociaux nécessaires à la réduction de l'empreinte environnementale des Français. Il s'agit donc d'une étude prospective orientée. L'objectif est dans ses grandes lignes fixé d'avance, et il s'agit d'explorer ses conditions de réalisation.

L'étude est-elle à l'état de l'art des connaissances actuelles sur les impacts environnementaux du numérique ?

Dans la partie 3 organisée par thématique de consommation, le numérique n'apparaît pas en tant que tel comme dimension importante des évolutions dans la plupart des rubriques.

La raison principale en est que l'insistance porte davantage sur la mention d'objectifs chiffrés de réduction de l'empreinte environnementale et sur les grands principes qui permettent de les atteindre que sur la mention des modalités de la transition dans lesquelles le numérique aurait toute sa place. On mentionne ainsi la volonté de réduire le gaspillage alimentaire de 60 % entre 2007 et 2030 mais sans mettre l'accent sur les contributions que le numérique pourrait apporter (meilleure gestion des stocks et des flux, information aux consommateurs via puces RFID, objets connectés, mise en place de taxes spécifiques permises par la surveillance numérique (exemple de la collecte optimisée des déchets à partir de capteurs mesurant le remplissage des poubelles), etc.).

Dans le domaine de l'habitat, on mentionne que la domotique présente un potentiel d'économie d'énergie de l'ordre de 20 %, mais que « les conditions d'un développement des TIC garantissant une réduction de l'empreinte environnementale doivent encore être définies ».

De façon générale, le numérique est présent « en creux » comme support dans le fait de favoriser les solutions les plus adaptées aux besoins ce qui suppose une information en temps réel couplée avec une offre de services.

L'étude prend-elle en compte les nouveautés (techniques, comportementales) ?

La prise en compte des nouvelles aspirations des consommateurs, et des comportements de production et de consommation émergents sont à la base des scénarios : nouveaux mouvements de consommation, modes de production, etc.

De même, les nouveaux espaces d'innovations ouverts par l'économie numérique sont largement présents dans le récit du scénario. Une place est accordée aux objets connectés et au développement de l'intelligence artificielle. Surtout, le scénario accorde une large place aux « data bien exploitées » comme levier d'innovation, notamment pour permettre l'éclosion de l'économie circulaire. Sont également mentionnés la diversification des formes commerciales grâce aux potentialités ouvertes par le numérique, l'émergence des tiers lieux qui ne peut se développer que dans le cadre du télétravail, etc.

L'étude a-t-elle une approche systémique ?

L'étude a une approche systémique dans le sens où elle construit un récit cohérent qui sous-tend l'ensemble du scénario de vision. On retrouve cette approche systémique, ou du moins globale, dans la partie « déploiement » où l'étude insiste par exemple sur l'enjeu de lutte contre les effets rebonds. En revanche, l'approche systémique n'est pas nette lorsqu'on redescend dans les postes de consommation. De façon plus générale, ce sont les trajectoires et la façon dont les leviers, notamment ceux issus du numérique, peuvent jouer qui restent flous.

VI.2.2. VISIONS 2030-2050

Cette démarche comprend une partie à horizon 2030 qui explore la façon dont l'ensemble des économies d'énergie possibles et le développement des sources d'énergie renouvelable peut s'articuler (« tendanciel volontariste ») et une partie à horizon 2050 normative puisqu'elle propose une vision permettant d'atteindre le facteur 4.

L'étude est-elle à l'état de l'art des connaissances actuelles sur les impacts environnementaux du numérique ?

L'analyse de la consommation énergétique est conduite secteur par secteur.

Le secteur du numérique n'apparaît pas en tant que tel comme secteur de consommation. Cependant son bilan serait sans doute très faible en termes de consommation énergétique si l'on ne prend en compte que les fabrications sur le sol français. Ce n'était pas l'objet de l'exercice que d'estimer les impacts environnementaux des produits numériques consommés en France en prenant en compte l'ensemble de leur cycle de vie.

Les consommations énergétiques issues de l'utilisation des TIC sont essentiellement apparentes dans le poste « usages spécifiques de l'électricité » dans le secteur du bâtiment résidentiel. Les chiffres avancés sont une augmentation de 11 % de la consommation unitaire d'ici 2030 de la rubrique « autres postes et nouvelles consommations » qui comprend les TIC, mais pas seulement. Néanmoins, la consommation des usages « spécifiques » des bâtiments résidentiels baisse de 5,9 MTEp en 2010 à 5 MTEp en 2030. Il est donc prévu une inversion de tendance dans les usages spécifiques de l'électricité justifiée par la baisse de la consommation énergétique des produits blancs (notamment via les innovations dues aux TIC) faisant plus que compenser la hausse prévisible des « nouvelles consommations »⁴¹.

De façon plus générale, les améliorations en terme d'efficacité énergétique offerts par les TIC sont estimées secteur par secteur, souvent de façon assez générale compte tenu du peu de données disponibles. Prenons deux exemples.

- La mobilité

Les hypothèses retenues concernent les évolutions du besoin global de mobilité, l'offre de transport, les évolutions technologiques. Le numérique est mentionné essentiellement comme un facteur accélérant le déploiement de nouvelles offres de mobilité (géolocalisation, véhicules communicants, etc.). Il n'y a pas de lien direct apparent entre le développement de ces nouvelles offres et les hypothèses construites sur la demande de mobilité. Elles sont présentées comme des leviers qui peuvent contribuer à justifier les hypothèses de consommation énergétiques présentées. Les évolutions technologiques sont surtout abordées à travers les transformations des motorisations.

Dans Vision 2050, l'hypothèse de réduction de la mobilité individuelle de 20 % est construite en prenant en compte différentes évolutions permises par le numérique, notamment le développement du télétravail. De ce point de vue, la démarche ne semble pas prendre en compte l'analyse des effets rebonds qui peuvent être importants (le rapport cite Falch (2012), qui trouve par exemple un effet rebond du télétravail sur les déplacements qui peut aller jusqu'à 73% au Danemark⁴²).

- La production industrielle

Trois catégories d'action d'efficacité énergétique sont analysées dans Vision 2030 : techniques, organisationnelles, innovantes. Si les possibilités offertes par le numérique sont en arrière-plan, elles ne sont pas précisées. Les innovations en termes de modèles économiques (de type économie de la fonctionnalité par exemple) qui peuvent être favorisées par le numérique (systèmes d'information performants) ne semblent pas avoir été prises en compte.

Le principal domaine où les progrès du numérique apparaissent de façon centrale est celui des technologies smart grids permettant la bonne intégration technique des ENR sur le réseau électrique (maîtrise de la prévision à court terme permettant l'équilibre offre-demande).

À l'horizon 2050, les transformations de la production industrielle sont abordées de façon plus systémique, avec l'objectif de tendre vers une économie plus circulaire. Le numérique n'est pas abordé en tant que tel mais est un sous-jacent des évolutions décrites, soit parce qu'il permet le développement de nouveaux modèles économiques (économie d'usage), soit parce qu'il peut favoriser l'émergence de technologies de rupture.

Au total, il est difficile d'estimer si les évaluations des impacts environnementaux du numérique sont à l'état de l'art de la littérature scientifique compte tenu du manque de précision des hypothèses retenues sur ce champ dans la démarche Vision. La question de savoir s'il serait possible et souhaitable d'introduire plus de précision sur les impacts des transformations numériques dans une étude prospective de ce type et comment, sera abordée dans la partie recommandations.

⁴¹ Voir page 46 du rapport associé : « *Ainsi, les usages spécifiques de l'électricité pourront être contraints en profitant de la baisse des consommations énergétiques associées aux produits blancs pour compenser la hausse des « nouvelles consommations » électriques.* »

⁴² Falch, M. (2012). Environmental Impact of ICT on the Transport Sector. *Telecommunication Economics*. A. Hadjantonis et B. Stiller (Eds.), Springer Berlin Heidelberg. 7216 : 126-137.

L'étude prend-elle en compte les nouveautés (techniques, comportementales) ?

L'étude prend en compte des développements technologiques en cours et estime leurs potentialités de développement. Compte tenu du champ couvert par l'étude, ces estimations se font de façon assez générale.

Les innovations de rupture que peuvent susciter le développement du numérique sont peu prises en compte à l'horizon 2030 ; elles sont centrales, mais peu détaillées à l'horizon 2050.

L'étude a-t-elle une approche systémique ?

L'approche développée dans Vision 2030 fait l'objet d'un bouclage général puisqu'elle présente un scénario équilibré d'offre et demande énergétique. Elle va par exemple prendre en compte les évolutions de la demande de mobilité liée aux évolutions des comportements et les transformations de l'offre de mobilité (véhicules électriques, etc.). En revanche, l'étude s'inscrit dans une approche sectorielle et ne développe pas d'analyse systémique à proprement parler. Pour rester dans le domaine de la mobilité, il n'y a pas par exemple de mise en cohérence globale entre des hypothèses portant sur les motifs de déplacements (travail, loisirs, etc.) et des hypothèses d'offre.

Dans Vision 2050, l'approche systémique est plus visible sur certains postes, notamment celui de la mobilité. L'hypothèse centrale étant une baisse de la mobilité individuelle de 20% sous l'effet de plusieurs facteurs : télétravail, structure de la population, urbanisme et infrastructure permettant d'optimiser les besoins en mobilité, changement de paradigme de la mobilité individuelle (usage plutôt que propriété), etc. Néanmoins, il ne semble pas y avoir d'analyse des effets rebond et des effets systémiques tels qu'abordés dans cette étude.

VI.2.3. ÉTUDE SUR LE POTENTIEL D'EXTENSION DE LA CONSOMMATION COLLABORATIVE POUR REDUIRE LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Cette étude a été réalisée en 2015-2016 par Deloitte Développement Durable, le Crédoc et Ouishare pour l'ADEME. Elle s'est attachée à dresser un état des lieux des différentes formes existantes de la consommation collaborative en France, puis à identifier quels facteurs peuvent permettre un développement soutenable de ces nouvelles initiatives de consommation, au moyen d'une méthodologie de type ACV.

L'étude est-elle à l'état de l'art des connaissances actuelles sur les impacts environnementaux du numérique ?

La première phase de l'étude cible le numérique comme étant un des principaux leviers de l'essor de la consommation collaborative, et en particulier la croissance du taux de pénétration des smartphones dans la population française.

La troisième phase de l'étude correspond à des évaluations environnementales « unitaires » portant sur une douzaine d'initiatives de consommation collaborative : covoiturage, location de biens meubles ou immobiliers entre particuliers, réemploi, etc. Les impacts environnementaux du numérique ne constituent donc pas le cœur de l'analyse.

Cependant, un scénario moyen a été constitué par l'équipe projet pour chaque évaluation pour prendre en compte les impacts du numérique concernant la mise en relation entre les usagers : un temps de consultation de pages Internet de 25 minutes et 4 échanges de courriels de 100 ko chacun. Les données environnementales reprises sont celles des ACV d'un achat sur Internet et d'une requête web réalisées par Deloitte Développement Durable (à l'époque BIO Intelligence Service) pour l'ADEME [1][12].

Cette approche a le mérite de permettre une évaluation multicritère et multi-étapes des impacts du numérique au sein de la consommation collaborative. Cependant, on ne peut parler d'état de l'art des connaissances actuelles des impacts environnementaux du numérique : ceci aurait été permis par une analyse plus fine en termes d'usages du numérique (scénario d'utilisation) et de modélisation environnementale associée (réalisation d'une modélisation *ad hoc* plutôt qu'une réutilisation de chiffres issues d'une ACV plus ancienne).

À la suite des évaluations dites « unitaires », des projections des impacts environnementaux macroscopiques au niveau national ont ensuite été faites selon plusieurs scénarios, dont deux scénarios prospectifs à horizon 2030.

Au même titre que l'étude ne conclut pas sur les impacts environnementaux totaux de la consommation collaborative, il n'y a pas d'évaluation des impacts environnementaux directs des TICs au sein de la consommation collaborative. Comme évoqué dans l'étude, la majorité des impacts des TICs en lien avec la consommation collaborative sont liés aux effets rebonds. Or, ces effets n'ont été étudiés que de façon parcellaire, par manque de données.

L'étude prend-elle en compte les nouveautés (techniques, comportementales) ?

L'étude a considéré selon les horizons de temps différentes dimensions d'évolution, dont des évolutions sociétales et techniques :

- Evolution des mix énergétiques ;
- Modernisation du parc automobile ;
- Evolution de la démographie française ;
- Amélioration des filières REP (Responsabilité Élargie des Producteurs) de traitement des déchets ; et
- Amélioration de l'efficacité énergétique des appareils consommateurs d'énergie.

Les effets pris en compte ne sont pas exhaustifs. Toutefois, un panel de nouveautés significatives a donc été intégré. Par ailleurs, les évolutions prises en compte se sont basées autant que possible sur des hypothèses déjà prises dans les deux autres études prospectives de l'ADEME, par souci d'homogénéité. **Les scénarios prospectifs développés dans l'étude sur la consommation collaborative sont donc des prolongements des scénarios déjà développés par l'ADEME dans ses autres travaux prospectifs, sans approfondissement particulier sur les TICs elles-mêmes.**

L'étude a-t-elle une approche systémique ?

L'étude a une approche systémique dans la mesure où les deux scénarios prospectifs ont été construits selon des bases communes. En effet, les deux scénarios ont pris comme principales variables de changement l'intervention des pouvoirs publics (ou non) et la professionnalisation du secteur. Le travail de prospective réalisé dans le cadre de la phase 2 de l'étude a été réalisée selon une structure globale identique à la base, comprenant à la fois des paramètres invariants (communs entre les différents scénarios) et des paramètres différenciants. Ces différentes hypothèses ont été déclinées individuellement à chaque initiative. Ceci a abouti à la construction d'un récit cohérent de projection de la consommation collaborative. Cependant, les deux scénarios n'ont pas forcément pour objectif de correspondre exactement à la réalité : ils préfigurent en fait chacun un extremum possible d'évolution de la consommation collaborative.

VI.2.4. CONCLUSIONS SUR L'ANALYSE DES TRAVAUX PROSPECTIFS

De façon simple, on pourrait dire que les publications scientifiques analysées dans le cadre de notre étude se cantonnent à des approches précises mais très parcellaires des impacts du numérique sur l'environnement, tandis que les études de l'ADEME privilégient des approches larges mais peu précises sur les impacts du numérique.

La question est de savoir s'il est possible et souhaitable de mailler davantage les deux approches, et comment. C'est l'objet des recommandations présentées en section VII.2.

VII. RECOMMANDATIONS POUR DES TRAVAUX FUTURS

VII.1. RECOMMANDATIONS POUR AMELIORER LES CONNAISSANCES DE L'ADEME SUR LES IMPACTS DU NUMERIQUE

VII.1.1. BONNES PRATIQUES

Adopter une approche environnementale multicritère

De futurs travaux portant sur les impacts environnementaux de nouvelles tendances de consommation ou d'usages en lien avec les TICs devraient inclure de façon systématique une approche ACV complète, donc multicritère. L'inclusion du potentiel de réchauffement climatique et des consommations d'énergie devrait donc être a minima complétée par des indicateurs relatifs à l'épuisement des ressources abiotiques (métaux) et à la toxicité/écotoxicité.

Adopter une approche environnementale multi-étapes

Dans la même lignée, l'approche méthodologique à adopter concernant l'évaluation environnementale de services en lien avec les TICs devrait avoir un périmètre exhaustif en termes de cycle de vie. En plus de la phase d'usage et de la phase de fabrication, il apparaît indispensable d'également intégrer la fin de vie (avec une modélisation réaliste), ainsi que les phases d'approvisionnements.

De fait, il est donc recommandé de suivre autant que possible les principes de base de la méthodologie ACV, multicritère et multi-étapes.

Intégrer une discussion sur les effets indirects et rebond

Aucune approche systémique et applicable à toutes les situations n'a été identifiée dans le cadre de l'étude pour évaluer les effets indirects et rebond des TICs. A minima, il est tout de même souhaitable d'amorcer une réflexion sur l'intégration de ces effets, via une approche idéalement quantitative ou à défaut qualitative. S'il est difficile d'établir une évaluation ex ante scientifique des effets indirects ou rebond des TICs, il est en revanche possible d'établir des scénarios d'usage permettant de définir les conditions dans lesquelles les usages peuvent être vertueux. De telles analyses prospectives doivent s'appuyer sur des études rétrospectives rigoureuses.

Améliorer la transparence des hypothèses prises

Une faiblesse ciblée au cours des recherches bibliographiques et de l'élaboration de fiches de lecture est le nombre important d'hypothèses établies et de données reprises d'autres publications pour construire les modèles d'évaluation. Ceci est particulièrement vrai pour la modélisation de la phase d'usage. Le risque associé est un manque de consistance et une forte hétérogénéité de ces hypothèses et données, avec une utilisation en dehors du contexte où elles ont initialement été produites. Le problème n'est pas forcément exclusif au secteur du numérique. Cependant, améliorer la transparence des hypothèses effectuées permettrait une meilleure capitalisation d'une étude à une autre.

Traiter la question de l'équivalence du service rendu

Une tendance commune à beaucoup de publications est l'adoption d'approches comparatives entre un service numérique et ce qui est désigné dans l'unité fonctionnelle comme son « équivalent conventionnel ». Une telle comparaison frontale nous paraît être inévitable afin d'évaluer les bénéfices et impacts environnementaux associés aux TICs. Cependant, il convient de garder en tête que la réalité est plus complexe et que les usages sont plutôt mixtes entre pratique numérique et pratique conventionnelle. Intégrer ce point permettrait d'avoir une vision moins simpliste des impacts environnementaux des TICs. Au-delà de la mixité des usages, il convient de prendre en compte également les nouveaux usages permis par le numérique. Le potentiel d'innovation sociale offert par le numérique peut aussi être abordé grâce à des

dispositifs de veille prospective (repérage des initiatives, analyse de leurs possibilités de diffusion et estimation de leurs impacts environnementaux).

Clarifier la durée de vie à prendre en compte pour les équipements

La question de la durée de vie est cruciale et pourtant difficile à prendre en compte en ce qui concerne les TICs. Cependant, comme ce qui a été fait dans l'étude ADEME sur la consommation collaborative, une distinction entre durée d'existence, durée(s) de détention, et durée(s) d'usage (en lien avec les taux de panne, de réemploi et de réparation) permettrait d'aborder le problème de façon plus proche de la réalité. On notera qu'une étude a été menée par l'ADEME en 2012 sur le sujet, spécifiquement aux EEE, complétée par la publication d'un avis⁴³ en 2016.

VII.1.2. ÉLÉMENTS A INTEGRER DANS LES FUTURS CAHIERS DES CHARGES DE L'ADEME

Outre les bonnes pratiques citées précédemment, les éléments suivants sont à intégrer dans les futurs cahiers des charges de l'ADEME relatifs à des sujets du numérique.

Améliorer la qualité des données d'activité utilisées

Un enjeu-clé est l'amélioration de la qualité des données. Cela passe dans un premier temps par l'utilisation autant que possible de données réelles plutôt que bibliographiques, autrement dit la collecte de données spécifiques. Dans un second temps, cela se concrétise par une analyse de la robustesse des données⁴⁴, mais aussi d'une analyse du cadre de validité des données et des analyses en découlant. Cela peut être réalisé par des analyses de sensibilité voire des analyses d'incertitudes, ou alors des approches plus qualitatives. L'objectif est donc de prendre du recul sur les données utilisées afin de mieux évaluer dans quelles conditions le numérique est pertinent du point de vue environnemental.

Impliquer l'industrie dans la collecte des données

En lien avec l'enjeu précédent, il nous apparaît primordial de plus impliquer l'industrie, comme ce qui a été fait pour le Guide Sectoriel 2012 pour la réalisation de Bilans GES appliqués aux TICs [2]. Ceci concerne à la fois les équipements côté utilisateur final, mais également les données relatives aux équipements en arrière-plan (datacentres, réseau internet, etc.). Très peu de données existent à l'heure actuelle sur ces équipements⁴⁵. À noter que l'industrie pourrait notamment être sollicitée afin d'obtenir des données sur les phases d'usage.

Un frein évident à cette approche est la confidentialité des données en jeu. Une façon de contourner le problème pourrait être d'avoir une approche itérative avec :

- Un premier travail basé sur des données génériques et/ou bibliographiques, sur lesquels les industriels sont amenés à réagir ; et
- Une seconde itération intégrant les réactions des industriels avec une modélisation plus fine.

Une approche itérative est imposée en ACV par les normes ISO. Amener les industriels à être en réaction plutôt qu'en pro-action serait alors une façon plus efficace de les impliquer.

Élargir les comités de pilotages des études ADEME

Un certain nombre d'études lancées par l'ADEME sont déjà menées depuis longtemps par des comités de pilotage mixtes, faisant intervenir des personnes d'autres institutions ou organisations souvent publics. Dans le cas particulier et complexe des TICs, nous proposons d'aller plus loin en incluant également des personnes de la recherche, et éventuellement de l'industrie pour faire le lien avec la recommandation précédente.

⁴³ Voir <http://www.ademe.fr/avis-lademe-lallongement-duree-vie-produits>

⁴⁴ Via l'approche DQR (Data Quality Rating) développée par le JRC dans le cadre de l'ILCD et de l'expérimentation Product Environmental Footprint

⁴⁵ On peut citer le projet Eureka en cours à l'échelle européenne, qui porte sur les datacentres, voir <https://www.dceureca.eu/fr>

Développer les analyses de sensibilité avec des approches de type « point de bascule »

Plus globalement, l'enjeu d'études sur les impacts environnementaux des TICs devrait se focaliser sur les conditions de réalisation de bénéfices environnementaux, plutôt que sur une vision binaire et tranchée. Ceci peut être permis par des analyses de sensibilité de type « point de bascule », comme ce qui a été fait dans l'étude [90] concernant le nombre de livres à lire pour que la liseuse soit intéressante du point de vue environnemental. Les recommandations à faire auprès des décideurs et du grand public en deviendraient alors plus efficaces.

Élargir la question des impacts du numérique à la sphère socio-économique

Les transformations sociales et économiques globales engendrées par le numérique doivent également être pris en compte dans les impacts environnementaux. Peuvent être par exemple inclus les impacts socio-économiques du numérique (nombre d'emplois créés ou détruits, évolution du PIB, etc.). On notera au passage que les articles de méta-revue bibliographique [35][36] mentionnent encore un faible développement de l'ACV sociale appliquée au numérique.

VII.1.3. SUJETS A INVESTIGUER

Développer un cadre méthodologique simplifié

La définition d'un cadre méthodologique conforme aux normes ISO 14040 et 14044 mais plus spécifique des ACV pourrait représenter une valeur ajoutée importante dans une idée de réutilisation des résultats et de généralisation. Le document⁴⁶ produit par exemple par The Green Grid qui est spécifique aux datacentres en est une bonne illustration. Il définit par exemple les règles à suivre pour la définition du périmètre, la durée de vie ou d'utilisation des équipements, etc. Ce document pourrait proposer un certain nombre d'impacts à prendre en compte à minima (voire à maxima), des recommandations sur la modélisation réaliste de la fin de vie spécifique au périmètre français ou européen, des données sur les types de distribution, des scénarios d'usage type correspondant à des études récentes, etc.

Il serait important de mettre à jour et compléter un tel « guide » régulièrement.

Cette idée rejoint partiellement la notion de Product Category Rules (PCR) qui est en cours de déploiement via l'expérimentation PEF/OEF sur l'affichage environnemental⁴⁷. Pour les TICs, on peut imaginer à moyen terme l'établissement d'un PCR « parapluie » applicable à l'ensemble des TICs, ainsi que des PCRs spécifiques à des types d'objets relevant du numérique (téléphones, ordinateurs, imprimantes, etc.). Ceci nécessitera un bon niveau de maturité de l'industrie vis-à-vis de ces enjeux environnementaux.

Quant au cadre simplifié que nous proposons ci-avant, il aurait vocation, comme son nom l'indique, à être moins complexe qu'un PCR.

Approfondir les initiatives existantes portant sur les enquêtes/sondages auprès des usagers

La définition d'un scénario d'utilisation joue de façon très sensible sur les résultats d'impacts environnementaux produits. D'après le focus sur le télétravail (section V.2.), nous avons vu que l'évolution des impacts environnementaux selon la fréquence de télétravail était linéaire dans le cas d'approches bibliographiques, alors que l'étude ADEME basée sur un sondage auprès de télétravailleurs apportait des éléments de réponses plus nuancés. Globalement, il est vraisemblable que cette observation soit généralisable à beaucoup d'usages des TICs. Malgré les biais associés aux données déclaratives, une collecte de données empirique (sondage, enquête consommateurs) permettrait d'obtenir des éléments de réponses plus nuancés et plus proches de la réalité. Le Crédoc publie chaque année pour l'ARCEP le Baromètre du Numérique, consacré aux usages des TICs par les Français : notre proposition est donc

⁴⁶ <http://www.thegreengrid.org/~media/whitepapers/wp45v2datacentrelifecycleassessmentguidelines.pdf>

⁴⁷ En effet, le référentiel méthodologique PEF s'insère sous les normes ISO portant sur l'ACV et l'ILCD, en établissant des règles méthodologiques plus précises que ces derniers, pour le périmètre européen (indicateurs, principes de modélisation, prise en compte de la fin de vie, etc.). Les PCRs se situent un cran en dessous dans la hiérarchie en définissant des règles encore plus précises (choix de l'unité fonctionnelle, etc.) pour des catégories de produits en particulier (par exemple : les batteries, les pâtes, les bouteilles d'eau minérale).

d'aller plus loin dans les questions posées. Il faut réaliser des enquêtes de mesure basées sur des questionnements sur les derniers usages permettant d'éviter les déclarations subjectives lorsque les questions sont très générales. Il est important d'élargir à l'ensemble des pratiques pour comparer les usages en grandeur nature et mieux prendre en compte les effets rebonds.

Dresser un panorama des impacts des TICs selon les secteurs d'activité les plus importants

Les études comme SMART2020 [9][19][32] et Green2020 [114] dressent un panorama des impacts directs et indirects les plus significatifs des TICs selon les secteurs et usages concernés. Cependant, nous avons identifié des faiblesses significatives en termes de méthodologie appliquée dans ces études.

Reproduire l'exercice de façon indépendante, plus complète et plus robuste permettrait à l'ADEME de mieux définir les priorités d'action en lien avec les impacts environnementaux des TICs. On note qu'un tel travail vient d'être initié par le Pôle Eco-conception de Saint-Etienne.

Alimenter les bases de données publiques avec des projets de grande envergure

Les données environnementales actuellement disponibles sur la fabrication et l'usage d'Internet sont de très faible qualité (quasiment dix ans dans certains cas). Il est donc nécessaire de soutenir les projets ayant vocation à générer de nouvelles données, plus récentes et plus fidèles des équipements mis en œuvre aujourd'hui. L'implication des industriels, enjeu abordé plus haut, est clé.

Comme évoqué précédemment, ce travail ne constitue pas une tâche aisée, considérant la diversité d'objets et la vitesse d'évolutions des technologies mises en œuvre. Des travaux sont en cours⁴⁸ et doivent être suivis de façon attentive.

Développer les approches macroscopiques

Les effets rebond et macro-structurels des TICs sont aujourd'hui encore méconnus. Une raison à cela est le fait que les méthodologies « classiques » de type empreinte carbone ou ACV attributionnelle ne permettent pas de bien capter ces effets. Ces approches sont plutôt microscopiques. Des approches macroscopiques permettraient d'avoir une meilleure vision de ces mécanismes complexes à modéliser. On peut par exemple citer les approches Input/Output hybride entre évaluation économique et environnementale.

On peut également mentionner l'ACV conséquentielle (voir glossaire). En élargissant l'évaluation environnementale à une prise de décision, elle permet d'évaluer les impacts environnementaux liés à des changements dans l'économie. Notamment, on peut imaginer que les notions d'effets indirects, systémiques rebonds, ainsi que le fait que les TICs soient souvent des produits multifonctionnels, soient mieux capturées par l'ACV conséquentielle. L'application de cette méthodologie a le potentiel pour produire des évaluations plus fines des impacts environnementaux des TICs que l'ACV attributionnelle. Toutefois, nous estimons que son application au secteur des TICs est plutôt envisageable à moyen-terme ; l'approche nécessite de plus amples développements, notamment sur les frontières du système : les TICs ayant un rôle transversal dans tous les pans de l'économie, l'expansion du système requise par l'ACV conséquentielle serait difficile à définir.

Mieux intégrer l'enjeu des métaux critiques associé aux TICs

Le sujet des matériaux critique et des ressources abiotiques est croissant au sein de l'Union européenne. Afin de mieux comprendre les enjeux associés au secteur du numérique, nous proposons d'organiser les travaux en trois étapes.

La première étape est de mieux identifier les flux (nature et quantité) de matériaux critiques selon les secteurs et les équipements. Plusieurs travaux ont déjà été menés en ce sens au niveau français et européen. On peut par exemple citer le projet RMSA⁴⁹ qui a fait ceci pour l'ensemble de l'industrie

⁴⁸ Au sein de l'ADEME, le développement de facteurs d'impacts sur les équipements électroniques grand public pour la base Carbone et la base Impacts. Sinon, on peut également citer l'étude préparatoire sur l'éco-conception des datacentres : Preparatory study for implementing measures of the Ecodesign Directive 2009/125/EC DG ENTR Lot 9 Enterprise servers and data equipment, Juin 2015.

⁴⁹ Study on Data Inventory for a Raw Material System Analysis (2016), BIO by Deloitte et al. pour la Commission Européenne, accessible via : http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/newsroom/cf/itemdetail.cfm?item_id=8732&lang=en

européenne. Sur cette base, il serait possible de restreindre l'analyse au secteur du numérique dans un premier temps puis au périmètre français dans un second temps.

La seconde étape est ensuite d'estimer la criticité⁵⁰ associée à ces matériaux. Y sont associés les enjeux de substitution et de recyclabilité⁵¹ : Ces derniers sont dépendants à la fois des produits concernés et des matériaux, selon le besoin requis par les produits et le niveau de performance fourni par la matière secondaire.

La troisième étape est ensuite d'appliquer ces deux étapes dans un travail prospectif. En effet, l'estimation de la criticité est généralement faite sur les cinq dernières années. Il est en revanche beaucoup plus difficile d'estimer une criticité « future ». Ce paramètre peut en effet varier selon de multiples raisons : le développement de nouvelles technologies (donc de nouveaux besoins), la découverte de nouveaux gisements de ressources exploitables, ou encore l'essor d'innovations de rupture. Selon nous, cette troisième étape n'est faisable que via une approche qualitative dans l'état des connaissances actuelles sur le sujet. Néanmoins, cette inclusion permettrait déjà de prendre en compte une dimension importante de l'essor des TICs, à l'heure où la transition énergétique apporte de forts bouleversements en termes de matériaux utilisés.

Améliorer les connaissances sur la fin de vie

Comme cela a déjà été dit, le problème associé à la modélisation de la fin de vie est à la fois situé sur les données d'activité et les données environnementales.

En termes de données environnementales, le développement de nouvelles données est nécessaire, en lien avec la recommandation précédente de contribuer au développement des bases de données. A ce titre, on peut citer le projet d'Eco-systèmes, Récylum et l'ADEME, qui vise à développer de nouveaux inventaires du cycle de vie correspondant au traitement des DEEE.

En termes de données d'activité, on peut déjà citer les chiffres produits annuellement par l'Observatoire de la filière REP des DEEE. Ces chiffres sont à utiliser en priorité à l'échelle française pour réaliser des évaluations environnementales impliquant des DEEE. Néanmoins, nous pensons qu'il serait nécessaire d'aller plus loin en termes de détail de DEEE : il n'y a pas de ventilation particulière des données selon les équipements informatiques. Il faut également aller plus loin dans la chaîne de recyclage : des flux significatifs de DEEE sont exportés hors de France voire hors d'Europe, sans plus d'informations. Néanmoins, les données génériques développées par Eco-systèmes, Récylum et l'ADEME pourraient répondre à cet enjeu. À noter que la phase de transport des déchets ne doit pas être négligée, y compris pour les transports nationaux et intra-européens.

Appliquer les principes de l'économie circulaire au secteur du numérique

L'économie circulaire est un sujet majeur au sein de l'ADEME. Pourtant, on décèle aujourd'hui encore peu d'applications de ce concept à destination du secteur des TICs. Jusqu'à présent, les principales questions posées en termes d'économie circulaire sont les thématiques de l'éco-conception et de la fin de vie des DEEE (voir point précédent). Cependant, nous pensons que ceci mériterait d'être élargi à d'autres sujets plus larges, comme l'obsolescence des équipements, ou les modèles économiques alternatifs (économie de fonctionnalité, équipements vendus en modules, etc.). Ces points mériteraient d'être approfondis dès maintenant, au fur à et mesure que le secteur devient plus mature vis-à-vis de ces sujets.

VII.1.4. ÉTABLISSEMENT D'UNE FEUILLE DE ROUTE POUR L'ADEME

L'articulation entre ces différentes recommandations proposées est organisée via la figure page suivante. Un code couleur spécifique distingue les bonnes pratiques (vert clair) des éléments à intégrer dans de futurs cahiers des charges (vert foncé) et des sujets à investiguer (bleu). Nous avons distingué ces recommandations selon plusieurs horizons de temps. Le court-terme correspond à un pas de temps de moins de deux ans, tandis que le long-terme est plutôt à horizon de cinq ans. Enfin, on notera qu'un certain

⁵⁰ Par criticité, on entend ici le croisement entre d'une part le risque en terme d'approvisionnement et d'autre part l'importance économique

⁵¹ Cf. étude ADEME en cours sur les capacités de recyclage des CRM en France

nombre de recommandations sont liées, ou s'enchaînent les unes avec les autres. Ceci est représenté par des flèches dans la figure.

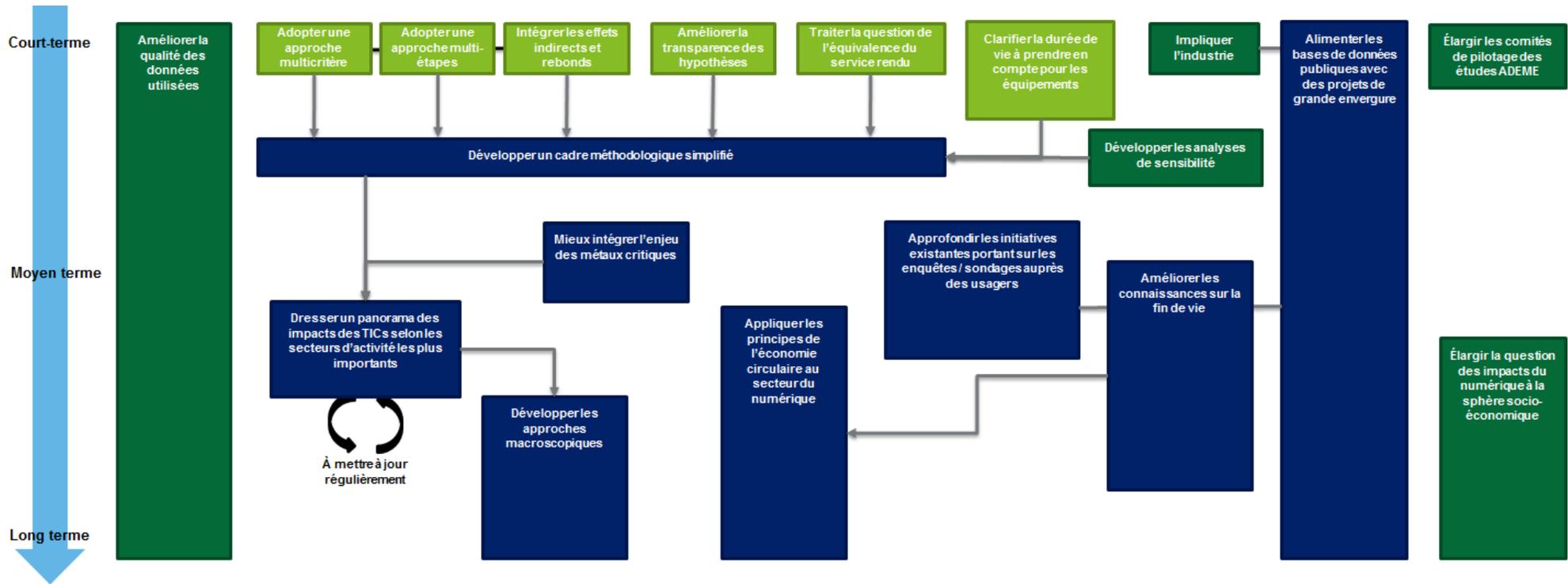


Figure 4 - Feuille de route des recommandations à considérer pour améliorer les connaissances sur les impacts environnementaux du numérique

VII.2. RECOMMANDATIONS EN VUE D'INTEGRER LE NUMERIQUE DANS LES ETUDES PROSPECTIVES DE L'ADEME

Les démarches de prospective, on l'a dit, ont vocation à comprendre les évolutions en cours, à évaluer leurs perspectives d'évolution pour identifier des enjeux majeurs et des leviers d'action. Ces démarches sont qualifiées de prospective lorsqu'elles concernent des domaines empreints d'incertitude (sinon, on parle de prévision). Cette incertitude est le plus souvent double : liée à l'état actuel de nos connaissances, liée également à l'imprévisibilité intrinsèque de certains phénomènes.

Ces constats posés, il convient de s'interroger sur les domaines et les approches prospectives pertinents au regard des missions de l'ADEME qui, globalement, consistent à favoriser la transition énergétique et écologique.

Dans le domaine du numérique, notre étude a insisté sur trois types d'impacts environnementaux du numérique : directs, indirects, systémiques. Ces trois échelles d'analyse semblent pertinentes pour se réinterroger sur les besoins d'analyse prospective qui pourraient être conduits par l'ADEME.

Impacts directs

Nous avons constaté que les données sur les impacts directs des TICs concernent surtout la phase d'utilisation des TIC, sont centrées sur la consommation d'énergie et les émissions de GES et que les analyses multicritères sur l'ensemble du cycle de vie sont encore rares.

Concernant les anticipations, il faut rappeler qu'il existe une difficulté à appréhender la « nouveauté ». Nous avons noté plus haut que « les connaissances se concentrent aujourd'hui encore principalement sur les objets numériques ancrés dans notre quotidien depuis un certain temps déjà (ordinateur, téléphone, etc.). Les technologies émergentes, comme les objets connectés ou les services collaboratifs, sont peu abordés dans leurs aspects en lien avec l'environnement. »

Les anticipations existantes sur les impacts directs du numérique prennent en compte des hypothèses simples voire simplistes liées aux objets eux-mêmes (leur fabrication), aux infrastructures qui en permettent le fonctionnement (réseaux, serveurs), à leur diffusion et à leurs usages par les particuliers et acteurs économiques.

Dans la majorité des publications analysées, ces anticipations sont des extrapolations au regard des dynamiques en cours, sans prise en compte de ruptures. Pourtant, il n'est qu'à regarder le passé pour comprendre que celles-ci ne sont pas moins improbables que la continuation des trajectoires actuelles.

Ces extrapolations ont l'intérêt néanmoins de manifester ce qui se passerait si l'on poursuivait les tendances actuelles et de mettre l'accent sur un certain nombre d'impasses ou de problèmes. Elles peuvent donc permettre d'identifier des défis à relever pour limiter/réduire les impacts environnementaux du numérique.

Au regard de ces constats, il peut sembler utile :

- D'accroître les connaissances sur les impacts environnementaux des objets numériques sur l'ensemble de leur cycle de vie pour disposer d'éléments robustes permettant d'anticiper les impacts environnementaux du développement de ces technologies. Il s'agit là non de prospective, mais de travaux académiques utiles à la réflexion prospective ; et
- De développer une réflexion prospective sur les impacts directs que pourrait avoir un essor important des objets connectés. L'approche la plus pertinente étant sans doute de s'interroger sur les impacts environnementaux directs d'une diffusion très large de ces objets. Ceci est à mettre en regard de la rubrique suivante.

Impacts indirects

L'usage du numérique peut venir modifier l'usage d'autres produits et services (optimisation, substitution) ou créer de nouveaux marchés. Ceci correspond à des impacts indirects. Les publications analysées ont montré que les effets d'optimisation et de substitution faisaient l'objet de travaux mais encore peu nombreux, et que l'analyse des nouveaux produits et services permis par le numérique restait l'exception.

Au regard de ces constats, il peut sembler utile de développer deux approches complémentaires :

- Une analyse fonctionnelle consistant à comprendre comment les fonctions remplies aujourd'hui par certains produits ou services peuvent être modifiées par l'apparition de nouveaux produits et services numériques ou permis par le numérique ; et
- Une analyse partant des innovations (techniques, organisationnelles, sociales) permises par le numérique pour examiner comment elles peuvent venir modifier les comportements des acteurs. Une démarche de ce type peut être conduite à travers des ateliers de prospective centrés autour d'hypothèses de rupture.

Ces deux approches supposent de développer une veille prospective sur les nouveaux objets, services, comportements numériques qui émergent pour estimer leurs potentiels de transformation et leurs impacts. .

Impacts systémiques

Les impacts systémiques s'attachent à comprendre comment le numérique peut participer d'une transformation des modes de vie et d'estimer les impacts environnementaux de ceux-ci.

Les analyses existantes dans la littérature étudiée ici concernent essentiellement les effets rebonds indirects (lorsque le coût d'un produit ou service numérique diminue, il entraîne une hausse de la consommation d'un autre bien ou service polluant). Et encore cette étude des effets rebonds est loin d'être présente partout (aucune sur le développement du e-commerce par exemple) alors même qu'ils semblent très importants. Si l'analyse rétrospective semble déjà ardue et hésitante sur les méthodologies dans les publications analysées, l'analyse prospective est, elle, quasiment inexistante.

Pour construire des réflexions systémiques et prospectives intégrant les impacts environnementaux du numérique, il est nécessaire d'examiner un ensemble de variables relevant plus globalement des modes de production et de consommation. Il s'agit en effet de comprendre en quoi le numérique peut être un des facteurs de transformation vers des modes de vie plus respectueux de l'environnement ou, dans une approche plus normative, à quelles conditions le numérique peut-il devenir un des leviers de modes de vie plus vertueux du point de vue environnemental.

Au regard de ces constats, il peut donc sembler utile de :

- Construire des scénarios d'usage qui présenteraient les conditions d'usage du numérique permettant de favoriser des modes de vie « durables » ; et
- Reprendre des scénarios globaux déjà existant sur les modes de vie pour examiner quelle place y tient le numérique (et envisager de construire un guide des « bons » usages du numérique ?).

VIII. CONCLUSIONS

L'objectif de cette étude était d'évaluer quelle était l'influence des Technologies de l'Information et des Communications (TICs) sur l'empreinte environnementale des Français, et de projeter ces connaissances dans le contexte des travaux prospectifs menés par l'ADEME sur l'empreinte environnementale des Français.

On notera que cette étude était principalement axée sur la grande consommation et les usages particuliers des TICs.

Cette étude a tout d'abord permis de remettre à plat **les différentes dimensions à prendre en compte dès que l'on aborde le sujet des impacts environnementaux du numérique** :

- La notion de cycle de vie (de l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie des équipements) ;
- La notion d'évaluation multicritère ; et
- La notion de typologie d'effets du numérique, depuis les effets directs des TICs, jusqu'aux effets systémiques en passant par les effets indirects, sans oublier les effets rebond.

Le premier volet des travaux réalisés ici a consisté en une revue bibliographique. Celle-ci a permis d'identifier plus d'une centaine de publications pertinentes abordant le cas des impacts environnementaux du numérique. De leur analyse, nous avons constaté une grande hétérogénéité entre les différents documents étudiés. En effet, certains étaient spécifiques à un usage donné des TICs tandis que d'autres considéraient le secteur du numérique dans son ensemble.

Au regard des dimensions mentionnées ci-avant à prendre en compte pour étudier les impacts environnementaux du numérique, nous avons constaté une grande disparité dans les choix méthodologiques effectués. Un grand nombre de travaux réalisés à ce jour n'ont pas d'approche multi-étapes ; la phase de production et surtout les phases de fin de vie et de transport sont souvent exclues des analyses. Le caractère multicritère des évaluations n'est également pas systématique, et beaucoup de travaux ne considèrent que les impacts sur le changement climatique et les consommations d'énergie. Enfin, la considération de tous les effets du numérique n'est elle aussi pas très développée, et les études qui considèrent à la fois effets directs, indirects et rebond sont inexistantes.

En lien avec ces faiblesses d'ordre méthodologiques, nous avons noté que la qualité des données disponibles est médiocre. En particulier, les données relatives aux consommations d'énergie des appareils sont assez bien documentées en comparaison des données relatives aux phases de fabrication ou de fin de vie et des données relatives aux traitements dans les datacentres.

Les incertitudes associées à ces différents points sont donc d'ordre multiple. Nous avons noté d'une part que les phases amont et aval du cycle de vie des TICs ne sont pas encore modélisées de façon complète et réaliste. D'autre part, on constate une très forte variabilité sur les hypothèses de scénario d'utilisation, ce qui constitue **un véritable frein à la consolidation des données et des résultats scientifiques**.

Le second volet de l'étude a consisté en la réalisation de plus de quinze fiches de lecture sur les publications jugées les plus pertinentes lors de la revue bibliographique. Sur la base de ces fiches de lecture, nous avons effectué des focus sur trois usages spécifiques des TICs, à savoir le télétravail, la dématérialisation et le e-commerce.

Ces différents travaux ont montré d'assez fortes divergences en termes de choix méthodologiques, confirmant les observations faites dans le volet précédent. Sur le télétravail, nous avons globalement observé un consensus sur les bénéfices environnementaux de cette pratique. Cependant, il existe des écarts significatifs entre d'une part les études ayant une approche bibliographique et d'autre part l'étude se basant sur une approche plus empirique. Un certain nombre d'effets indirects ont été pris en compte par ces différents travaux. Pour la dématérialisation, nous avons observé une très forte variabilité selon les scénarios d'usage considérés, et des approches méthodologiques plutôt centrées sur les produits alors que la dématérialisation est plutôt liée une question de service rendu. Le constat est analogue pour l'analyse sur le e-commerce.

Cet exercice d'analyse spécifique sur certains usages des TICs a permis de confirmer une majorité des observations faites dans le premier volet de l'étude. De plus, nous avons pu observer qu'un grand nombre de limitations en termes méthodologiques étaient communes entre les différents usages.

Le **Tableau 15 regroupe des connaissances déjà établies sur les impacts des TICs** (chiffres à l'appui quand cela est possible), distingués selon plusieurs axes d'analyse :

- Par étape du cycle de vie des TICs considérées ;
- Par type d'impact environnemental ;
- Par type d'effet des TICs ; et
- Par type d'objet : ont été distingués les objets côté utilisateur (ordinateur, téléphone, etc.) des objets compris dans les infrastructures réseaux (datacentres, routeurs, etc.).

Par ailleurs, nous avons également mis en perspective les travaux prospectifs existants de l'ADEME avec des publications sur les impacts à attendre du numérique. Cependant, nous avons décelé des faiblesses significatives en termes méthodologiques de ces travaux prospectifs sur le numérique. Notamment, ces travaux ne considèrent pas l'ensemble des notions d'évaluation multi-étapes, multicritère et multi-effets, et leur approche « prospective » devrait plutôt être qualifiée d'extrapolation que de prospection.

Ainsi, au vu des écueils identifiés sur l'analyse des trois usages spécifiques et des travaux prospectifs existants, il a été observé **l'impossibilité de développer une réflexion prospective de qualité suffisante sur les impacts environnementaux du numérique adaptées au contexte français à horizon 2030**. L'objectif initial de la présente mission ne peut donc pas être rempli en l'état actuel des connaissances. La dernière étape de ce rapport a donc consisté en la formulation de recommandations afin que l'ADEME puisse à terme atteindre cet objectif.

Certaines recommandations formulées relèvent plutôt **de la bonne pratique** à adopter dans l'immédiat, à considérer dès que l'ADEME aborde le cas des impacts environnementaux des TICs. Parmi ces bonnes pratiques, on considère notamment la nécessité d'adopter une véritable approche de type ACV, via une approche autant multicritère, multi-étapes et multi-effets que possible.

Certaines recommandations sont plutôt **des éléments à intégrer dans de futurs cahiers des charges de l'ADEME**. Cela implique notamment de mieux inclure l'industrie dans les travaux à lancer, d'améliorer la qualité des données utilisées et de mieux borner les conditions dans lesquelles le numérique peut permettre de réduire les impacts environnementaux.

Enfin, nous avons identifié **les travaux à lancer afin de combler les zones d'ombre qui empêchent de déterminer de façon plus précise l'influence du numérique sur l'impact environnemental des Français**. Parmi ces travaux, nous notons la nécessité de développer un cadre méthodologique spécifique, d'améliorer les initiatives existantes en termes d'enquêtes auprès des usagers ou encore de participer à l'amélioration des données environnementales utilisées et des connaissances sur la fin de vie et les métaux critiques. De façon générale, un changement de paradigme est nécessaire dès que l'on étudie les impacts environnementaux du numérique ; la question à poser ne serait pas de déterminer si le numérique est vertueux ou non du point de vue environnemental, mais plutôt d'étudier dans quelles conditions et scénarios il peut apporter des bénéfices environnementaux à la société. On notera que le développement de l'ACV conséquente, évaluant les impacts environnementaux d'une prise de décision et de ses conséquences sur la sphère économique, pourrait permettre de mieux répondre à cette question.

L'amélioration des connaissances sur les impacts environnementaux du numérique est une des conditions nécessaires au développement de **travaux de prospective** de qualité sur la réalisation desquels nous proposons également des recommandations.

L'ensemble de ces recommandations mettent en valeur le besoin d'améliorer les connaissances actuelles sur les impacts du numérique afin de pouvoir identifier dans quelle mesure ces impacts pourraient évoluer dans les prochaines décennies. **Le rôle de l'ADEME, en tant qu'institution publique, est donc central, afin d'accélérer la mutation de tout le secteur des TICs vers un développement plus soutenable.**

Tableau 15 – Synthèse des connaissances et zones d'ombres sur les impacts environnementaux des TICs (les phrases en italique font référence à des exemples issues des publications analysées dans la revue bibliographique)

	Connaissances	Zones d'ombres / Points d'attention
Par étape du cycle de vie		
Production	La miniaturisation des objets a tendance à augmenter les impacts environnementaux (raccourcissement de la durée de vie, faible modularité de leur conception qui décourage réparation et recyclage)	Les données environnementales existantes n'arrivent pas à suivre les rapides évolutions technologiques et à rendre compte de la variabilité des équipements (selon les technologies existantes, exemple : type d'écran, type de stockage, etc.)
Transport	Les impacts des différentes phases de transport ne sont pas à négliger (pendant les phases de fabrication et de traitement de fin de vie) : <i>jusqu'à 20% d'impacts supplémentaires sur la phase de production de composants électroniques [35]</i>	La présence accrue du e-commerce modifie les étapes de distribution des produits, et multiplie les possibilités pour un consommateur d'acquérir un produit.
Utilisation	La phase d'utilisation correspond essentiellement aux consommations d'électricité des TICs. Celles-ci sont assez bien connues pour les équipements terminaux grâce à la facilité de mesure. Par ailleurs, plusieurs réglementations (ex : Directive éco-conception 125/2009/CE) et labels (ex : Energy Star, 80 plus) visent à améliorer l'efficacité énergétique de certaines TICs.	<p>Beaucoup d'études se contentent encore d'étudier seulement cette phase du cycle de vie.</p> <p>De fortes incertitudes subsistent selon la représentativité géographique de l'étude (variabilité des impacts environnementaux du mix électrique).</p> <p>La consommation électrique liée à l'usage du réseau et des équipements dans les datacentres sont beaucoup plus difficiles à évaluer.</p> <p>Les scénarios d'utilisation définis dans les études sont soumis à trop de variables (durée de détention, taux d'usage, nombre d'utilisateurs, etc.).</p>
Fin de vie	Selon la modélisation adoptée, la valorisation matière en fin de vie peut permettre de réduire les impacts environnementaux sur la majorité des indicateurs (<i>environ -10% selon les publications [89]</i>).	<p>La fin de vie n'est pas étudiée de façon exhaustive. Des incertitudes demeurent concernant :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La caractérisation des filières de traitement (taux de recyclage, filières d'exportation, etc.) ; • La modélisation des impacts environnementaux associés.
Par type d'impact environnemental		
Changement climatique et consommation d'énergie	<p>L'information portée par ces deux indicateurs est souvent corrélée. Ces indicateurs sont le plus fréquemment couverts.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>L'envoi d'un mail de 1 Mo correspond aux émissions de 20 g de CO₂ éq. ;</i> • <i>Le télétravail permettrait de réduire de 0,5% les émissions de GES en France dans un scénario optimiste.</i> 	L'indicateur « consommation d'énergie » se restreint souvent à la phase d'utilisation.
Épuisement des ressources	<p>L'introduction de TICs peut amener des transferts de pollution sur l'épuisement des ressources abiotiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>exemple : augmentation des impacts de confidentialité des données pour avoir la 25% sur un système de gestion</i> 	L'épuisement des ressources (métalliques principalement) est un enjeu associé aux TICs encore peu étudié, et se confronte à la composition exacte et précise des

Connaissances	Zones d'ombres / Points d'attention
	<p>automatisé de collecte des déchets à équipements. Grenoble à partir de capteurs installés dans les poubelles [110])</p>
Toxicité / éco-toxicité / eutrophisation	<p>Des émissions dans l'eau et dans les sols sont principalement générées lors des étapes d'extraction des métaux et lors de l'élimination des DEEE, générant des impacts significatifs sur ces indicateurs (<i>résultats d'impacts les plus élevés en effectuant une normalisation des résultats [1][11][12][17]</i>).</p> <p>De fortes incertitudes subsistent sur les modèles permettant de quantifier les émissions dans l'eau et les sols d'éléments traces métalliques. Les indicateurs de toxicité et d'éco-toxicité sont encore peu robustes à l'heure actuelle (robustesse interim/III selon le JRC).</p>
Par type d'équipement	
Equipements côté utilisateur final	<p>Les données environnementales existantes n'arrivent pas à suivre les rapides évolutions technologiques et à rendre compte de la variabilité des équipements (selon les technologies existantes, exemple : type d'écran, type de stockage, etc.).</p> <p>Dans la plupart des études, les impacts sont concentrés sur la production et la fin de vie (faible durée d'usage et taux d'utilisation limité des objets).</p>
Equipements infrastructures réseaux	<p>Peu de publications étudient les impacts des infrastructures réseau en comparaison des objets côté utilisateur final.</p> <p>Dans la plupart des études, les impacts sont concentrés sur la phase d'usage (plus longue durée d'usage et fort taux d'usage des objets).</p>
Nouveaux équipements, objets connectés	<p>-</p> <p>Le sujet est récent et le monde de la recherche n'a pas pu encore se l'approprier complètement sous l'angle des liens avec l'environnement.</p>
Par type d'usage	
Télétravail	<p>Toutes les études démontrent que le télétravail permet de réduire les émissions de GES, la consommation d'énergie, les émissions de particules, l'oxydation photochimique et l'épuisement de ressources non renouvelables.</p> <p>Les facteurs clés du bilan environnemental du télétravail sont le nombre de jours télétravaillés et le report modal.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Selon [13], le télétravail permet de réduire d'environ 30% les impacts environnementaux associés aux trajets entre le domicile et le lieu de travail pour un nombre moyen de jours télétravaillés de 2,9 par semaine; • Dans [33], le télétravail conduit à une réduction d'émissions de GES de 300 kg CO₂ éq./personne/an pour une fréquence de 1 à 5 jours par mois à 2 805 kg CO₂ éq./personne/an pour une fréquence d'au moins 20 jours par mois. <p>Il est difficile d'avoir une estimation précise des impacts indirects. En effet, cela nécessiterait de suivre un échantillon représentatif et suffisant de télétravailleurs sur une période longue avant et après la mise en place du télétravail afin de mesurer les consommations d'énergie du logement et les distances parcourues pour les trajets personnels.</p> <p>Les impacts de 3^{ème} ordre, principalement la manière dont le télétravail peut permettre une réduction et une optimisation des surfaces de bureau, sont encore peu étudiés. Les effets rebonds ont quant à eux été omis de toutes les publications considérées.</p> <p>Les impacts indirects sur le transport et le logement sont importants à prendre en compte pour avoir une vue réaliste de l'impact «net» du télétravail.</p> <p>Le télétravail aura un impact très limité au niveau national à la réduction des émissions de GES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gain de 0,09 à 0,12% pour les USA [33] ; • Gain de 0,5%, dans un scénario de diffusion ambitieux du télétravail en France [13].

	Connaissances	Zones d'ombres / Points d'attention
<p>Dématérialisation (support papier vs. support numérique)</p>	<p>Le transfert de pollution vers l'épuisement des ressources ou l'écotoxicité est significatif et peut contrebalancer les bénéfices en termes d'émissions de GES. L'amortissement des impacts de la liseuse est sensiblement lié au nombre de livres lus sur l'appareil au cours de sa durée d'usage, et dépend de l'indicateur environnemental considéré d'après [89] :</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Réchauffement climatique</i> : 25 • <i>Consommation d'énergie primaire</i> : 12 • <i>Épuisement des ressources abiotiques</i> : 32 • <i>Écotoxicité des eaux douces</i> : 350 	<p>Les résultats de comparaison d'un service dématérialisé à son équivalent conventionnel ne sont pas unanimes du fait des variations concernant les scénarios d'utilisation (durée de vie des produits, taux d'utilisation, mix électrique utilisé...) et de fin de vie.</p> <p>Les usages sont très variés entre les utilisateurs de services dématérialisés et peu d'informations existent sur un comportement représentatif.</p>
<p>E-commerce</p>	<p>Le e-commerce permet une réduction des impacts environnementaux sur une majorité d'indicateurs.</p> <p>Le mode de livraison est un paramètre sensible et peut faire varier du simple au double le bilan environnemental du e-commerce (variation de 0,68 à 1,3 kg CO₂ éq. par livre acheté dans le cas étudié dans [89]).</p>	<p>Aucune étude analysée ne considère les effets rebonds associés au e-commerce, et notamment les achats supplémentaires induits par le e-commerce.</p> <p>La question de l'influence du produit livré suite à un achat via e-commerce sur le bilan environnemental est encore peu abordée ; on peut anticiper que les produits alimentaires nécessitant de respecter la chaîne du froid engendrent plus d'émissions de GES que la livraison d'un livre acheté sur Internet. La question perdure quant à la comparaison avec l'achat des mêmes produits alimentaires en magasin physique.</p>
<p>Cas des effets rebond</p>		
	<p>Les effets rebonds peuvent être de grande ampleur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>1,4 Gt CO₂ éq. à l'échelle mondiale selon l'étude SMARTer2030 [32] ;</i> • <i>Dans le cas du télétravail : entre 10% [13] et 73%²³ d'impacts supplémentaires pour les trajets personnels supplémentaires.</i> 	<p>Comme pour les scénarios d'utilisation, les effets rebonds sont soumis à de fortes incertitudes. La question de la part des effets rebonds (surconsommation par exemple) imputables aux TICs nécessite d'être affinée.</p>

ANNEXES

ANNEXE I : BIBLIOGRAPHIE DU VOLET 1

Le tableau suivant présente les différentes publications identifiées dans le Volet 1 de l'étude telles que reportées dans le tableur Excel mentionné en section III.2.3.

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
1	Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique - Volet e-commerce : Rapport final	Commanditaire: ADEME Réalisation: Bio Intelligence Service	2011
2	Complete life-cycle assessment of the energy/CO2 costs of videoconferencing vs face-to-face meetings	Dennis Ong, Tim Moors and Vijay Sivarama	2012
3	Réalisation d'un bilan Gaz à effet de serre - Technologies Numériques, Information et Communication - Guide sectoriel 2012	ADEME, APCC, Atrium Data, CIGREF, CLER, CNRS, DEMTECH, EVEA, Greenflex, GREENIT.FR, INRIA, La Poste, META IT, ORANGE, SAGEMCOM SYNTEC Numérique, SFIB / HP, ZEN'IO	2012
4	Impacts of Information and Communication Technologies on Environmental Sustainability: speculations and evidence	Commanditaire : OCDE Réalisation : F. Berkhout, J. Hertin, Université du Sussex	2001
5	The Future Impact of ICTs on Environmental Sustainability	Commanditaire : JRC IPTS Réalisation : Lorenz Erdmann (IZT), Lorenz Hilty (EMPA/FHSO), James Goodman (Forum for the Future), Peter Arnfalk (IIIEE)	2004
6	Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective? The environmental impacts of the Swiss take-back and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE)	R. Hischier, P. Wäger, J. Gauglhofer	2005
7	TIC et Développement Durable	Commanditaire : CGEDD Réalisation : H. Breuil, D. Burette, Bernard Flury-Hérard, J. Cueugnet, D. Vignolles	2008
8	ICTs: from Cradle to e-Waste A Life Cycle Assessment Study of Desktop PC Systems	M. Eugster (EMPA)	2008
9	SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age	Commanditaire : The Climate Group on behalf of the Global eSustainability Initiative Réalisation : McKinsey & Company	2008
10	Évaluation de la consommation électrique de la couche TIC dans les Smart Grids	Commanditaire : ADEME, Service Réseaux et Énergies Renouvelables Réalisation : Cap Gemini Consulting	2015

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
11	Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique - Volet clé USB : Rapport final	Commanditaire: ADEME Réalisation: BIO Intelligence Service	2011
12	Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique - Volet courrier électronique : Rapport final	Commanditaire: ADEME Réalisation: BIO Intelligence Service	2011
13	Évaluation de l'impact du télétravail & des tiers-lieux sur la réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre et sur l'organisation des entreprises	Commanditaire : ADEME Réalisation : BIO Intelligence Service, Greenworking, BVA	2015
14	Potentiels d'extension de la consommation collaborative pour réduire les impacts environnementaux - rapport technique détaillé n°3 - Fiches évaluations	Commanditaire : ADEME Réalisation : BIO by Deloitte, CREDOC, OuiShare	2016
15	GreenTouch Green Meter Research Study: Reducing the Net Energy Consumption in Communications Networks by up to 90% by 2020	Greentouch	2013
16	The Energy Consumption and Carbon Footprint of ICT Usage in Australia in 2010	Commanditaire : Australian Computer Society Réalisation : Connection Research	2010
17	Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique - Volet requête web : Rapport final	Commanditaire: ADEME Réalisation: BIO Intelligence Service	2011
18	Impacts of Information and Communication Technologies on Energy Efficiency	Commanditaire : CE DG INFSO Réalisation : BIO Intelligence Service, IZM, E5	2008
19	GeSI SMARTer 2020: The Role of ICT in Driving a Sustainable Future	Commanditaire : the Global eSustainability Initiative Réalisation : Boston Consulting Group	2012
20	The Green Grid: Energy Savings and Carbon Emissions Reductions Enabled by a Smart Grid	Electric Power Research Institute (EPRI)	2008
21	ICT concepts for optimization of mobility in Smart Cities	Commanditaire : Commission Européenne DG Communications Networks, Content & Technology Réalisation : AustriaTech, VTT, ISIS, POLIS	2013
22	SG4-GHG: Methodologies to Measure the Potential of Smart Grids for Green House Gas Reductions	Commanditaire : Commission Européenne DG Communications Networks, Content & Technology	2013

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
		Réalisation : Vaassa-ett, Pöyry, University of Oxford, ECI	
23	Using State-of-the-Art Models and Tools for the Assessment of ICT Impacts on Growth and Competitiveness in a Low-Carbon Economy	Commanditaire : Commission Européenne DG Communications Networks, Content & Technology Réalisation : University of Denver, Collège d'Europe Bruges Natolin.	2009
24	Impact of Information and Communication Technologies on Energy Efficiency in Road Transport- Final Report	Commanditaire : Commission Européenne DG Communications Networks, Content & Technology Réalisation : TNO	2009
25	Understanding the Environmental Impact of Communication Systems	Commanditaire : Office of Communications of the UK (OFCOM) Réalisation : Plextek, Efec	2009
26	SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age - United States report Addendum	Commanditaire : The Climate Group on behalf of the Global eSustainability Initiative Réalisation : Boston Consulting Group	2008
27	SMART 2020 Germany Addendum: The ICT Sector as the Driving Force on the Way to Sustained Climate Protection	"Commanditaire : The Climate Group on behalf of the Global eSustainability Initiative Réalisation : Boston Consulting Group"	2010
28	SMART Portugal 2020: Reducing Emissions and Increasing Energy Efficiency through ICT	Commanditaire : The Climate Group on behalf of the Global eSustainability Initiative, Association Portugaise pour le développement des Télécommunications (APDC) Réalisation : Boston Consulting Group	2008
29	SPAIN2020: ICT and Sustainability	Commanditaire : Club de Excelencia en Sostenibilidad Réalisation : Accenture	2012
30	Measuring the Energy Reduction Impact of Selected Broadband-Enabled Activities Within Households	"Commanditaire : the Global eSustainability Initiative (GeSI), ACEEE Réalisation : Yankee Group"	2012
31	The potential global CO2 reductions from ICT use - Identifying and assessing the opportunities to reduce the first billion tonnes of CO2	Commanditaire : WWF Suède, HP Réalisation : Ecofys Italie	2008

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
32	#SMARTer2030 ICT Solutions for 21st Century Challenges	Commanditaire : Global e-Sustainability Initiative Réalisation : Accenture Strategy	2015
33	The Energy and Greenhouse Gas Emissions Impacts of Telecommuting and e-Commerce	Commanditaire : Consumers Electronics Association (CEA) Réalisation : Fraunhofer USA Center	2015
34	Life Cycle Assessment of Virtual Meeting Solutions	Guldbrandsson & Malmodin (Ericsson)	2010
35	Lessons learned - Review of LCAs for ICT products and services	Arushanyan Y. & all	2014
36	Environmental Impact Assessment Review	Bull J.G. & Kosak R.A.	2014
37	Evaluating Sustainability of Sharing Economy Business Models	Daunoriene A. & all	2015
38	Critical success factors in developing teleworking programs	Kellyann Berube Kowalski, Jennifer Ann Swanson	2005
39	Energy-Related Emissions from Telework	Kitou E. & Horvath A.	2003
40	Evaluating the sustainability of electronic media: Strategies for life cycle inventory data collection and their implications for LCA results	Hischier & all	2014
41	Sustainable services, electronic education and the rebound effect	Horace Herring, Robin Roy	2002
42	Environmental Impact of Information and Communication Technologies Including Rebound Effects	Kazue Ichino Takahashi, Hidetoshi Tatemichi, Tohoru Tanaka, Shiro Nishi, Tatsuya Kunioka	2004
43	Consumers' Behaviour and Environmental Impact of Time Use: An analysis by the waste input-output model and a consumer model	Koji TAKASE, Yasushi KONDO, Ayu WASHIZU	2005
44	The relevance of information and communication technologies for environmental sustainability: A prospective simulation study	Lorenz M. Hilty, Peter Arnfalk, Lorenz Erdmann, James Goodman, Martin Lehmann, Patrick A. Wäger	2006
45	Information technology and efficiency in trucking	Philippe Barla, Denis Bolduc, Nathalie Boucher, Jonathan Watters	2010

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
46	On the rebound: how can we meet our carbon targets in light of rebound effects?	Y. Hübner, P.T. Blythe	2010
47	Estimating direct and indirect rebound effects for U.S. households with input–output analysis Part 1: Theoretical framework	Brinda A. Thomas, Inês L. Azevedo	2013
48	Lessons learned – Review of LCAs for ICT products and services	Yevgeniya Arushanyan, Elisabeth Ekener-Petersen, Göran Finnveden	2014
49	Including second order effects in environmental assessments of ICT	Miriam Börjesson Rivera, Cecilia Håkansson, Åsa Svenfelt, Göran Finnveden	2014
50	Green IT in practice: virtual meetings in Swedish public agencies	Peter Arnfalk, Ulf Pilerot, Per Schillander, Pontus Grönvall	2015
51	Indirect Rebound and Reverse Rebound Effects in the ICT-sector and Emissions of CO2	Cecilia Håkansson, Göran Finnveden	2015
52	The ICT/electronics question: Structural change and the rebound effect	Ray Galvin	2015
53	Organisational effects of virtual meetings	Peter Abrahamsson Lindeblad, Yuliya Voytenko, Oksana Mont, Peter Arnfalk	2015
54	The misleading effect of energy efficiency information on perceived energy friendliness of electric goods	Signe Waechter, Bernadette Sütterlin, Michael Siegrist	2015
55	The Rebound Effect of Information and Communication Technologies Development in the European Union	Piotr Werner	2015
56	Rebound Effects and ICT: A Review of the Literature	Cédric Gossart	2015
57	Comparison of the energy, carbon and time costs of videoconferencing and in-person meetings	Ong D. & all	2014
58	Printed and tablet e-paper newspaper from an environmental perspective —A screening life cycle assessment	Moberg A. & all	2010
59	Exploring (un)sustainable growth of digital technologies in the home	Bates O. & all	2015
60	Energy demand of workplace computer solutions	Hintemann R. & Fichter K.	2015
61	ITU-T L.1410 – Case studies	ITU	2013
62	The case of Korea: the quantification of GHG reduction effects achieved by ICTs	Commanditaire : ITU Réalisation : Korea Radio Research Agency, Korea Association for ICT	2013

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
		Promotion, SK Telecom, H. Kwak	
63	Effect of modelling approach on climate change focused life cycle assessments for a contemporary smartphone device	Huawei, Orange Labs, National University of Ireland	2014
64	The Energy Efficiency Potential of Cloud-Based Software: A U.S. Case Study	Commanditaire : Google Réalisation : Lawrence Berkeley National Laboratory, Northwestern University	2013
65	Carbon footprint of science: More than flying	Wouter M.J. Achtena, Joana Almeidaa, Bart Muys	2013
66	Broadband and Telecommuting: Helping the U.S. Environment and the Economy	Joseph P. Fuhr, Stephen Pociask	2010
67	A review of research on the environmental impact of e-business and ICT	Lan Yi, Hywel R. Thomas	2007
68	Electricity consumption of telecommunication equipment to achieve a telemeeting	X. Chavanne, S. Schinella, D. Marquet, J.P. Frangi, S. Le Masson	2014
69	Effects of Internet-based multiple-site conferences on greenhouse gas emissions	Vlad C. Coroama a, Lorenz M. Hilty a,b,†, Martin Birtel a	2011
70	Executive Summary: Improving Quality of Life Through Telecommuting	Wendell Cox	2009
71	Business meetings at a distance - decreasing greenhouse gas emissions and cumulative energy demand?	Clara Borggrena, Åsa Moberga, Minna Räsänenb, Göran Finnveden	2012
72	Impact des TIC sur la consommation d'énergie à travers le monde	Académie des technologies	2014
73	External Air Pollution Costs of Telework	Erasmia Kitou and Arpad Horvath	2007
74	Power Consumption of Videoconferencing Equipment	Geoff Constable	2011
75	Energy Technology Perspectives 2015	Agence internationale de l'énergie	2015
76	Telework and the transition to lower energy use in transport: On the relevance of rebound effects	Piet Rietveld	2011
77	Policy Brief on the Impacts of Telecommuting Based on a Review of the Empirical Literature	Susan Handy and Gil Tal, Marlon G. Boarnet	2013

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
78	Environmental Analysis of Telework: What We Know, and What We Do Not Know and Why	Arpad Horvath	2010
79	Environmental policy implications of working from home: Modelling the impacts of land-use, infrastructure and socio-demographics	Miao Fu, J. Andrew Kelly, J. Peter Clinch, Fearghal King	2012
80	Energy implications of online book retailing in the United States and Japan	H. Scott Matthews, Eric Williams, Takashi Tagami, Chris T. Hendrickson	2002
81	Teleworking Life Cycle Analysis	Commanditaire: Telstra Auteur: Gabrielle McCorkell	2008
82	Environmental work profiles- A visionary Life Cycle Analysis of the week at the office	Martin Lehmann, Olli Hietanen	2009
83	Assessing the potential for telecommuting at UC Berkeley	Mashail Arif, Melissa Darr, Matthew Norgren, Crystal Sun	2013
84	There's No Place like Home? Telecommuting as a Viable Commuting Alternative for San Jose Government and Companies to Reduce Vehicle Miles Travelled and Greenhouse Gas Emissions	Jennifer Marie Piozet	2013
85	The Energy and Greenhouse Gas Emissions Impact of Telecommuting and e-commerce	Commanditaire: Consumer Electronics Association (CEA) Réalisation : TIAX LLC	2007
86	Life Cycle comparison of traditional retail and e-commerce logistics for electronic products : A case study of buy.com	Christopher Weber, Chris Hendrickson, Paulina Jaramillo, Scott Matthews, Amy Nagengast, Rachael Nealer	2008
87	Comparative Analysis of the carbon footprints of conventional and online retailing: a "last mile" perspective	Julia B. Edwards, Alan C. McKinnon and Sharon L. Cullinane	2009
88	The Energy and Climate Change Implications of Different Music Delivery Methods	Christopher L. Weber, Jonathan G. Koomey, and H. Scott Matthews	2010
89	Books from an environmental perspective— Part 1: environmental impacts of paper books sold in traditional and internet bookshops	Clara Borggren & Åsa Moberg & Göran Finnveden	2011
90	Books from an environmental perspective— Part 2: e-books as an alternative to paper books	Åsa Moberg & Clara Borggren & Göran Finnveden	2011
91	Environmental implications for online retailing	Janice E. Carrillo, Asoo J. Vakharia, Ruoxuan Wang	2014

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
92	A comparative analysis of carbon emissions from online retailing of fast moving consumer goods	Patricia van Loon, Lieven Deketele, Joost Dewaele, Alan McKinnon,Christine Rutherford	2015
93	Comparative Energy, Environmental, and Economic Analysis of Traditional and E-commerce DVD Rental Networks	Deepak Sivaraman, Sergio Pacca, Kimberly Mueller, and Jessica Lin	2007
94	Market Dynamics and Environmental Impacts of E-commerce: A Case Study on Book Retailing	Ming Xu, Junbeum Kim, Ramzy Kahhat, Braden Allenby	2008
95	Eco-efficiency in the era of electronic commerce e should 'Eco-Effectiveness' approach be adopted?	Sajed M. Abukhader	2008
96	End-of-Life Impacts of Pervasive Computing	PH. Krauchi, P.A. Wager, M. Eugster, G. Grossmann et L. Hilty	2005
97	Life Cycle Assessment in the Telecommunication Industry: A Review	Wolfram Scharnhorst	2008
98	Recent developments in Life Cycle Assessment	Goran Finnveden, Michael Z. Hauschild, Tomas Ekvall, Jeroen Guinee, Reinout Heijungs, Stefanie Hellweg, Annette Koehler, David Pennington, Sangwon Suh	2009
99	Modelling and evaluating the sustainability of smart solutions	L. Hilty, B. Aebischer, et A. Rizzoli	2014
100	Using LCA-based Decomposition Analysis to Study the Multidimensional Contribution of Technological Innovation to Environmental Pressures	D. Font Vivanco, R. Kemp, E. van der Voet, et R. Heijungs	2014
101	The sharing economy: make it sustainable	Damien Demailly et Anne-Sophie Novel	2014
102	The sharing economy: A pathway to sustainability or a nightmarish form of neoliberal capitalism	Chris J. Martin	2016
103	Environmental and Economic Effects of E-Commerce - A case study of book publishing and retail logistics	H. Scott Matthews, Christ T. Hendrickson et Denise L. Soh	2001
104	Energy Use in Sales and Distribution via E-Commerce and Conventional Retail - A case study of the Japanese book sector	E. Williams et T. Tagami	2002
105	Shipping news: the implications of electronic commerce for logistics and freight transport	Markus Hesse	2002

Id	Titre	Nom des auteurs	Année
106	Effects of E-Commerce on Greenhouse Gas Emissions - A case study of grocery home delivery in Finland	H. Siikavirta, M. Punakivi, M. Karkkainen et L. Linnanen	2003
107	E-Commerce - Sorting out the environmental consequences	Klaus Fichter	2003
108	E-commerce and the environment: A gateway to the renewal of greening supply chains	S. Abukhader et G. Jonson	2004
109	E-Commerce: prospect or threat for environment	S. Tiwari, P. Singh	2011
110	An integrated method for environmental assessment and ecodesign of ICT-based optimization services	J. Bonvoisin, A. Lelah, F. Mathieux et D. Brissaud	2014
111	The cloud begins with coal: big data, big networks, big infrastructures and big power. An overview of the electricity used by the global digital ecosystem	Mark P. Mills	2013
112	The diffusion of smart meters in France: A discussion of the empirical evidence and the implications for smart the empirical evidence and the implications for smart the empirical evidence and the implications for smart	Adnane Kendel, Nathalie Lazaric	2015
113	More data, less energy: making network standby more efficient in billions of connected devices	Agence internationale de l'énergie	2014
114	Green IT - France 2020	Commanditaire : Fédération Française des Télécoms, Alliance TiCS, Fédération des Industries Electriques, Electroniques et de Communication Réalisation : Boston Consulting Group	2010

ANNEXE II: LISTE DES PUBLICATIONS AYANT FAIT L'OBJET DE FICHES DE LECTURE

Id	Titre	Nom des auteurs	Année	Thème
9	SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age	Commanditaire : The Climate Group on behalf of the Global eSustainability Initiative Réalisation : McKinsey & Company	2008	
19	GeSI SMARTer 2020: The Role of ICT in Driving a Sustainable Future	Commanditaire : the Global eSustainability Initiative	2012	Prospective
32	#SMARTer2030 ICT Solutions for 21st Century Challenges	Réalisation : Boston Consulting Group		
		Commanditaire : Global e-Sustainability Initiative Réalisation : Accenture Strategy	2015	
13	Évaluation de l'impact du télétravail & des tiers-lieux sur la réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre et sur l'organisation des entreprises	Commanditaire : ADEME Réalisation : BIO by Deloitte, Greenworking, BVA	2015	Télétravail
33	The Energy and Greenhouse Gas Emissions Impacts of Telecommuting and e-Commerce	Commanditaire : Consumers Electronics Association (CEA) Réalisation : Fraunhofer USA Center	2015	Télétravail E-commerce / dématérialisation
35	Lessons learned - Review of LCAs for ICT products and services	Arushanyan Y. & all	2014	Méta-analyse
36	Environmental Impact Assessment Review	Bull J.G. & Kosak R.A.	2014	Dématérialisation
40	Evaluating the sustainability of electronic media: Strategies for life cycle inventory data collection and their implications for LCA results	Hischier & all	2014	Dématérialisation
49	Including second order effects in environmental assessments of ICT	Miriam Börjesson Rivera, Cecilia Håkansson, Åsa Svenfelt, Göran Finnveden	2014	Effets rebond

Id	Titre	Nom des auteurs	Année	Thème
51	Indirect Rebound and Reverse Rebound Effects in the ICT-sector and Emissions of CO2	Cecilia Håkansson, Göran Finnveden	2015	Effets rebond
55	The Rebound Effect of Information and Communication Technologies Development in the European Union	Piotr Werner	2015	Effets rebond
69	Effects of Internet-based multiple-site conferences on greenhouse gas emissions	Vlad C. Coroama a, Lorenz M. Hilty a,b,†, Martin Birtel a	2011	Visio-conférence
71	Business meetings at a distance - decreasing greenhouse gas emissions and cumulative energy demand?	Clara Borggrena, Åsa Moberga, Minna Räsänenb, Göran Finnveden	2012	Visio-conférence
81	Teleworking Life Cycle Analysis	Commanditaire: Telstra Réalisation : Gabrielle McCorkell	2008	Télétravail
89	Books from an environmental perspective— Part 1: environmental impacts of paper books sold in traditional and internet bookshops	Clara Borggren & Åsa Moberg & Göran Finnveden	2011	e-commerce
90	Books from an environmental perspective— Part 2: e-books as an alternative to paper books	Clara Borggren & Åsa Moberg & Göran Finnveden	2011	Dématérialisation
110	An integrated method for environmental assessment and ecodesign of ICT-based optimization services	J. Bonvoisin, A. Lelah, F. Mathieux et D. Brissaud	2014	Smart cities
114	Green IT - France 2020	Commanditaire : Fédération Française des Télécoms, Alliance TiCS, Fédération des Industries Electriques, Electroniques et de Communication Réalisation : Boston Consulting Group	2010	Prospective

ANNEXE III : FICHES DE LECTURE

III.1. FICHE DE LECTURE N°9, N°19 ET N°32 (SMART 2020)

- « *SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age*” McKinsey & Company, report to The Climate Group on behalf of the Global eSustainability Initiative, 2008.
- « *GeSI SMARTer 2020: The Role of ICT in Driving a Sustainable Future*” Boston Consulting Group, report to the Global eSustainability Initiative, 2012.
- « *SMARTer2030 ICT Solutions for 21st Century Challenges*” Accenture Strategy, report to the Global eSustainability Initiative, 2015.

Ces rapports réalisés par des consultants et commandités par un think tank de l'industrie du numérique, le GeSI (http://gesi.org/ICT_sustainability_members_and_partners). Chacun constitue une mise à jour du précédent.

1. Objectif et champs de l'étude

L'objectif des trois rapports est de mettre en avant la contribution potentielle des TIC à la réduction des émissions de GES, par la conception et la vente de produits et services « green IT » dans différents pays et secteurs économiques.

2. Périmètre de l'analyse

- Les trois rapports portent sur les TIC, qui comprennent terminaux et périphériques (PC, tablettes, smartphones et autres téléphones portables, imprimantes 3D), centres de données, et réseaux ; à l'exclusion des TV et imprimantes 2D.
- Les impacts indirects sont estimés dans les secteurs suivants : dématérialisation, transports, industrie, bâtiments intelligents et smart grids (1^{er} rapport) puis l'agriculture & l'usage des sols, les bâtiments, les transports, l'industrie, l'énergie et les services dans le deuxième rapport.
- Des études de cas sont proposées pour différents pays et secteurs, afin de proposer une réponse quantifiée aux questions suivantes : combien de Gt CO_{2e} peut-on économiser dans tel et tel pays grâce aux TIC ? combien de Gt CO_{2e} peut-on économiser dans tel ou tel secteur fortement émetteur de GES grâce aux TIC ?
- Le premier rapport porte sur une étude réalisée sur 6 mois d'octobre 2007 à mars 2008, le deuxième propose des résultats sur la période allant de 2002 à 2020, et le dernier compare les principaux résultats des deux premiers rapports et projette des tendances jusqu'à 2030.

3. Méthodologie employée

- Globalement il s'agit d'une méthode de type « empreinte carbone »
- Quantitative : un premier modèle permet d'estimer les émissions de GES générées par les produits et services TIC, et un second modèle d'estimer les émissions de GES pouvant être évitées par les TIC (tous les deux expliqués en annexe des rapports).
- L'approche cycle de vie est employée « quand cela était possible », à savoir très rarement, la phase de fin de vie n'étant quasiment jamais mentionnée.

4. Données utilisées

- Les données sont de seconde main et collectées auprès d'agences publiques, d'entreprises industrielles ou de conseil, d'organisations internationales, beaucoup plus rarement de travaux académiques. Des données nationales sont parfois utilisées pour extrapoler *ceteris paribus* des résultats au niveau mondial (cf. dernier rapport, cas de la e-santé, p. 32). Des entretiens avec des expert-e-s, provenant majoritairement de l'industrie, sont aussi utilisés pour collecter des informations permettant de calibrer les modèles.

5. Hypothèses-clés

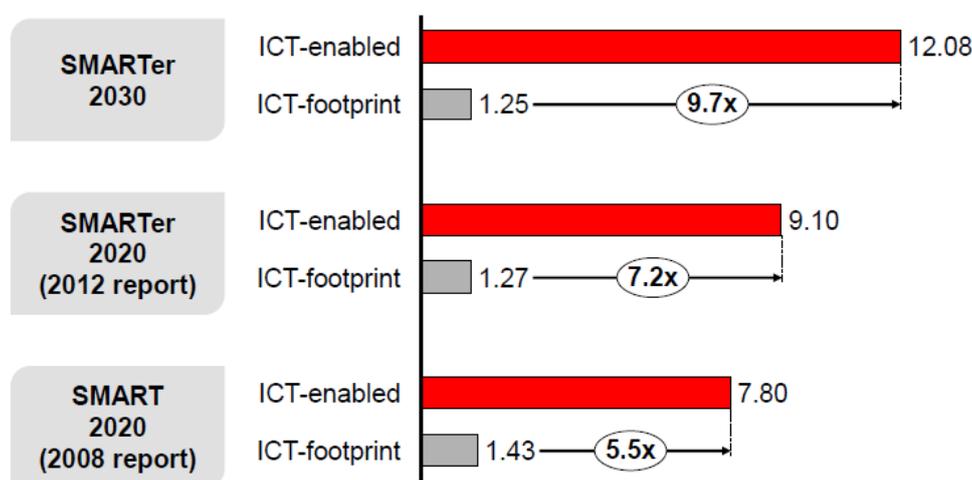
- Elles sont nombreuses pour les deux modèles et pour chaque analyse sectorielle (les hypothèses sont détaillées en annexe des rapports).

- D'une façon générale, un scénario « Business as Usual » est utilisé. Les projections sur les gains en efficacité des équipements sont établies à partir des récents gains en efficacité.

6. Principaux résultats et chiffres-clés

- En 2007 : les émissions de GES générées par les TIC s'élevaient à 2% des émissions globales (75% sont attribuables à la phase d'utilisation), et devraient augmenter de 6% par an jusqu'en 2020, notamment à cause des émissions associées à l'usage des PC (600 Mt CO_{2e} contre 200 Mt en 2002), dont le nombre devrait s'élever à plus de 4 milliards en 2020. Les pays en développement devraient générer 60% des GES des TIC en 2020.
- Un indicateur clé utilisé dans les trois documents pour mettre en évidence la contribution positive des TIC aux réductions d'émissions de GES est le rapport entre les émissions que le numérique permet d'éviter et celles qu'il génère lui-même. Ce chiffre était dans l'ordre chronologique des rapports estimé à 5,5 ; 7,2 et 9,7. Ces chiffres permettent d'étayer l'argument central des trois rapports, à savoir que si les TIC génèrent des émissions de GES, leur déploiement reste souhaitable car leurs émissions nettes sont négatives.
- La figure suivante (cf. dernier rapport, p. 10) résume et compare les résultats clés des trois rapports. Dans le dernier, il est précisé que près de la moitié des réductions potentielles sont attribuables aux terminaux et périphériques (50% des émissions de GES des TIC), notamment grâce à la diffusion des tablettes et smartphones qui tendent à se substituer aux PC.

Figure 2: ICT benefits factor in 2020 and 2030 (Gt CO_{2e})



Source: Source: WRI, IPCC, GeSI, SMARTer2020, Accenture analysis & CO2 models

- Les auteurs mettent également en avant les bénéfices économiques découlant des solutions green IT qu'ils mettent en avant, dont beaucoup sont développées par des membres du GeSI (le dernier rapport évoque 11 000 milliards de dollars au cours des 15 prochaines années, p. 11).

7. Conclusions et discussions de l'auteur

Pas de conclusion/discussion particulières en dehors des résultats.

8. Limites, points d'attention, besoins de travaux complémentaires

- De manière générale, les trois rapports donnent le sentiment d'un exercice de communication à l'usage d'industriels souhaitant mettre en avant leurs solutions technologiques. Des ordres de grandeurs sur les émissions de GES des TIC peuvent toutefois être utiles, mais à la lecture des chiffres concernant les émissions évitables par secteur et par pays on a du mal à faire abstraction du biais pro-industriel de chacun des rapports, et donc à faire confiance aux résultats et recommandations.
- La méthode utilisée du *forecasting* comporte des limites qui ne sont pas discutées dans les rapports : basée sur des tendances passées qui sont projetées dans le futur, les évaluations restent prisonnières des trajectoires passées, ce qui peut être atténué par une méthode proposant plusieurs scénarios comme le fait le GIEC, ce qui n'est pas le cas ici. Le risque est de n'envisager que ce qui semble possible pour les industriels dont la perspective domine très largement les rapports, et de perdre de vue les objectifs environnementaux qui devraient être liées aux frontières

planétaires⁵² à ne pas dépasser, comme les +2°C de réchauffement climatique global à l'horizon 2100. Une méthode de *backcasting* pourrait donner des résultats plus intéressants, en répondant par exemple, à la question « Quels impacts est-ce que ces +2°C auraient sur les TIC ? », ou à celle de savoir comment les TIC peuvent contribuer à ne pas dépasser cette frontière planétaire⁵³.

- Les trois rapports ne mettent pas en perspective les réductions d'émissions de GES rendues possibles par chacune des solutions éco-TIC avec leurs propres émissions de GES, sauf à un niveau très agrégé. Cela rend difficile tout jugement sur la contribution marginale de chaque solution éco-TIC à la réduction de ces émissions.
- Des données nationales sont parfois utilisées pour extrapoler *ceteris paribus* des résultats au niveau mondial (cf. dernier rapport, cas de la e-santé, p. 32), ce qui n'est pas sans risque d'imprécision dans les estimations.
- Les critères permettant de juger de la robustesse des données utilisées sont parfois légers, comme dans le premier rapport où le chiffre publié par Gartner ('les TIC représentent 2% des émissions de GES de l'industrie') est repris car « ce chiffre a depuis été largement cité ».
- Les sources sur lesquelles les hypothèses sont basées ne sont pas claires, et les hypothèses sont appliquées de manière indifférenciée à des contextes socioéconomiques très différents. Par exemple, dans le premier rapport, le modèle d'estimation des émissions évitables grâce à la visioconférence suppose que cette technologie peut permettre d'éviter 30% des trajets professionnels, alors que l'étalement urbain et les pratiques de mobilité varient fortement d'un pays à l'autre. Surévaluer ce chiffre permet d'obtenir des réductions d'émissions dues aux TIC plus élevées.
- Les évaluations étant monocritères (GES), les rapports auraient dû discuter les risques de transfert d'impacts d'une catégorie d'impact ou d'une phase du cycle de vie à une autre (ex. : on peut réduire les émissions de GES grâce à la diffusion des TIC en phase de production ou d'utilisation, mais générer une augmentation des DEEE en fin de vie). Plus globalement, la robustesse méthodologique de l'évaluation environnementale aurait été améliorée par l'adoption d'une approche multicritère et multi-étapes.
- Le premier rapport précise la nécessité d'une « transformation radicale de l'infrastructure actuelle » pour valider leurs projections. Cela ne fut pas le cas (ex. : les *smart grids* ne sont pas largement déployés, et l'éco-conception circulaire (en *cradle-to-cradle*, n'est pas du tout répandue et reste très difficile à mettre en œuvre dans le numérique), mais ne semble pas avoir empêché le chiffre ci-dessus d'augmenter. Le dernier rapport recommande toutefois l'adoption de modèles d'affaire en économie circulaire et en donne différents exemples (p. 21).
- Il est dommage que les auteurs du dernier rapport ne vérifient pas les hypothèses du premier rapport à partir d'éléments quantitatifs observés (par exemple nombre de serveurs vendus compte tenu de la multiplication des serveurs virtuels etc.)
- Les auteurs supposent que le bilan écologique de la substitution des PC par les tablettes et smartphone est positif alors que miniaturisation ne rime pas nécessairement avec haute qualité environnementale, du fait par exemple du raccourcissement de la durée de vie des nouveaux produits, de la faible modularité de leur conception qui décourage réparation et recyclage, et de la multiplication de ces équipements dont la taille et la baisse de prix facilitent la prolifération par l'entremise d'effets rebond.
- Les projections agrégées d'émissions de GES proposées par les modèles posent problème car on ne connaît pas l'intensité carbone du mix énergétique retenu (celui-ci est parfois mentionné dans les études pays).
- Les pistes proposées pour réduire les émissions de GES sont d'ordre purement technologique dans le premier rapport. Même si elles évoluent dans le dernier rapport pour évoquer le rôle des TIC dans l'amélioration des connaissances, il manque à ces pistes une perspective systémique qui pourrait fournir l'articulation sociétale nécessaire au succès de la contribution du numérique à toute transition écologique. Le premier rapport mentionne l'approche néerlandaise du *transition management* (p. 4/60), mais sans malheureusement la mobiliser dans les

⁵² *Planetary boundaries*, voir J. Rockstrom *et al.*, A safe operating space for humanity, *Nature*, 461 (2009) ; et W. Steffen *et al.*, Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet, *Science*, 347 (2015).

⁵³ Pour une discussion sur ce sujet, voir Gossart C. (2016), "Planetary Boundaries and innovation: What role for ICT in defining a safe operating space for humanity?", présentation donnée à la conférence *Innovation Forum VII, Session 17, Paris*. [Slides-Gossart - Session 17. DRAFT-Paper](#).

études de cas.⁵⁴ Dès lors, la piste de l'adaptation des besoins pour éviter de franchir la frontière planétaire climatique n'est pas du tout abordée, et le raisonnement est donc toujours fait à besoins matériels constants voire croissants.⁵⁵

- Bon nombre des solutions numériques proposées reposent sur l'optimisation (de la consommation énergétique, des flux de transport, ...), et pourtant il n'est presque jamais question des conditions de succès de ces technologies qui dépendent largement du comportement des acteurs qui les adoptent (avec des effets rebond évidents dont nous reparlons dans le point suivant), alors même que les TIC ont la capacité d'influencer le comportement de ces acteurs en les sensibilisant aux enjeux écologiques et aux solutions existantes pour y faire face (y compris en matière de changement de mode de vie –autre solution qui n'est jamais évoquée). Le deuxième rapport l'évoque rapidement (p. 37) : "*Work is needed to incentivize behavior change. This can often be achieved through education*".
- Les effets rebond sont mentionnés dans les rapports mais de manière très générale. Dans le premier il est reconnu que les effets rebonds peuvent entraîner le fait que les gains d'efficacité dans l'utilisation des ressources grâce aux TIC pourraient avoir comme conséquence un accroissement des émissions (p. 3/50). Dans le deuxième rapport il est précisé qu'il est très compliqué de les intégrer dans les modèles, mais que les différentes parties prenantes devraient les prendre en considération dans leurs décisions. Et dans le dernier rapport une tentative d'évaluation quantitative et de discussion plus étendue est esquissée (p. 112), mais de manière peu rigoureuse et pour minimiser la portée négative des effets rebond sur les bénéfices des éco-TIC : les deux études citées pour soutenir l'argument sont un rapport de l'IPTS ancien (datant de 2004) et un article de blog d'un *think tank* conservateur américain connu pour ses thèses climatosceptiques⁵⁶.
- Les solutions technologiques proposées sont celles qui sont en cours de développement par l'industrie, ce qui manque de prospective à long terme sur les éco-TIC du futur, qui pourraient être par exemple entièrement recyclables, à bilan carbone neutre, ou ne contenant que des matériaux éthiquement certifiés (comme le coltan).
- Les limites de leurs estimations ne sont pas discutées, mis à part un paragraphe relevant plus du « disclaimer » que d'une analyse critique de leurs méthodes, données et résultats.
- Enfin, les conséquences sociétales négatives des solutions envisagées sont passées largement sous silence, tout comme les conséquences en termes de privacité du monitoring par les TIC (par exemple dans le cas des compteurs intelligents), mais aussi la déshumanisation des services à la personne causée par la diffusion généralisée d'outils d'autodiagnostic de santé pour les personnes âgées.
- Bien que ces études essaient d'être exhaustives concernant les impacts indirects des TICs, elles se focalisent uniquement sur les secteurs qui peuvent tirer bénéfices des technologies mais elles omettent par exemple les secteurs nouveaux comme le secteur des jeux vidéo, des réseaux sociaux, des communications instantanés, etc. qui sont boostés par la multiplication des équipements et des offres de service et constituent des impacts indirects négatifs des TICs. Lorsque les TICs ne présentent pas d'impacts potentiellement positifs sur l'environnement, ils sont tout simplement ignorés comme solution possible évidemment mais aussi comme problème potentiel.
- On notera que des cas d'études spécifiques à des contextes nationaux ont été faits pour les États-Unis [26], le Portugal [28], l'Allemagne [27] et l'Espagne [29]. Une étude analogue a également été faite pour la France en 2009 [114], cette dernière faisant l'objet d'une autre fiche de lecture.

⁵⁴ Pour une application de cette méthode au cas des DEEE, voir Bahers, J.-B., Capurso, I., Gossart, C. (2015), Réseaux et environnement : regards croisés sur les filières de gestion des DEEE à Toulouse et à Milan. *Flux* 99(1): 32-46. [lien vers l'article publié](#) ; [lien vers le dernier draft complet](#).

⁵⁵ De nouveaux modèles d'affaire permettent pourtant d'intégrer ces nouveaux besoins de sobriété, voir par exemple N.M.P. Bocken, S.W. Short, Towards a sufficiency-driven business model: Experiences and opportunities, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 18 (2016).

⁵⁶ Le Pr. P. Michaels y défend par exemple la thèse du 'global cooling' : voir à son sujet l'article intitulé « Patrick Michaels: Cato's Climate Expert Has History Of Getting It Wrong », <http://www.skepticalscience.com/patrick-michaels-history-getting-climate-wrong.html>.

III.2. FICHE DE LECTURE N°13

« *Impact du télétravail, des tiers lieux et du coworking sur la réduction des consommations d'énergie et émissions de GES, et sur l'organisation des entreprises* », BIO by Deloitte, Greenworking, BVA, pour l'ADEME, 2015, 210 p.

Rapport d'étude commanditée par l'ADEME, financements publics, sans revue extérieure

1. Objectif et champ de l'étude

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact du télétravail et des tiers-lieux sur la réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre et sur l'organisation des entreprises.

L'étude est composée de trois grandes parties :

- Une enquête auprès des télétravailleurs pour (i) définir l'organisation du télétravail et les freins et motivations associés, (ii) évaluer l'impact du télétravail sur les conditions de travail et l'organisation de l'entreprise, et (iii) évaluer l'impact environnemental notamment en termes de déplacement ;
- Une évaluation quantitative des impacts environnementaux du télétravail à partir de résultats de l'enquête et une évaluation qualitative, voire quantitative des impacts indirects ; et
- Retour d'expériences de DRH sur l'impact du télétravail pour l'organisation de l'entreprise.

Dans cette fiche de lecture, seule la partie sur l'évaluation environnementale est analysée.

2. Périmètre de l'analyse

L'analyse environnementale du télétravail porte sur une évaluation comparative entre la situation sans télétravail et avec télétravail (variation des kms parcourus, consommation d'énergie au domicile...).

Frontières du système	Amont (fabrication)	✓
	Utilisation	✓
	Aval (fin de vie)	✗
Périmètre géographique		France
Impacts environnementaux considérés	Changement climatique	✓ CO ₂ et GES (du puits à la roue)
	Consommation d'énergie	✓ Énergie primaire (du puits à la roue)
	Multi-indicateurs	✓ Émissions de PM, NO _x , COVNM (phase de transport uniquement)
Types d'effets	1 ^{er} ordre (directs)	✗
	2 nd ordre (indirects)	✓ Modification des habitudes de transport liées au télétravail (évaluation quantitative) Modification des habitudes pour des trajets personnels, augmentation de la consommation d'énergie au domicile (évaluation quantitative), Réduction de la consommation de papier, diminution des embouteillages (évaluation qualitative)
	3 ^{ème} ordre (systémiques)	✓ Réduction des surfaces de bureaux de l'entreprise (qualitative)
Effets rebonds	Directs	✗
	Indirects	✗
	Macroéconomiques	✗

3. Méthodologie employée

- **Type de méthode d'évaluation environnementale utilisée** : ACV attributionnelle simplifiée. L'analyse environnementale du télétravail porte sur une évaluation comparative entre la situation sans télétravail et avec télétravail (variation des kms parcourus, consommation d'énergie au domicile...). Les auteurs ont utilisés des facteurs d'émissions de sources d'information reconnues pour calculer les différents impacts (ex: pour les GES: base carbone de l'Observatoire Énergie Environnement et Transport).
- **Méthode de collecte des données d'activité** : Approche mixte :
 - une approche "terrain" (données primaires) : basée sur les résultats d'une enquête menée par BVA auprès de plus de 850 personnes: ensemble de questions sur les pratiques du télétravail, les habitudes de déplacement et les points positifs et négatifs du télétravail. Ces données ont été reprises de l'enquête selon trois axes d'analyse: la situation de télétravail déclarée (teleworking = télétravail occasionnel sans définition en termes de jour ou durée, telecommuting = télétravail plusieurs jours par mois, homeshoring= télétravail cadré à domicile ou tiers-lieu 3 à 5 jours par semaine, indépendant, à cheval sur plusieurs sites...), le type de télétravailleur (salariés, indépendant) et le lieu de travail (domicile, tiers-lieu).
 - une approche basée sur des données de référence (données génériques): base de données sur les facteurs d'émissions. Pour les modules de transport en phase d'amont, il n'y a pas d'indications sur le type de base de données utilisé.

4. Données utilisées

- **Données d'activité utilisées** :
 - Pour les données issues de l'enquête: nombre de jours moyens télétravaillés en fonction des types de télétravail (de 1,9 à 4,9 jours par semaine; tous types confondus=2,9); le nombre de km moyen parcourus et par quel mode et ce avant et après télétravail en fonction du type de télétravail; la part de salariés et d'indépendants qui ont répondu à l'enquête (78% / 22%); le lieu de télétravail. Les données de consommation d'énergie du logement sont basées sur le montant total de la facture énergétique avant et après télétravail.
- **Données environnementales utilisées** : facteurs d'émissions issus de sources reconnues (OEET, EMEP/EEA guidebook, OFEFP...), données de transport issues du modèle HBEFA⁵⁷
- **Fiabilité et robustesse des données** (d'activités, environnementales, ICV, etc.) d'après l'auteur :
 - Données de base (enquête) considérées comme ayant un faible niveau de confiance (valeur déclarative) ;
 - Données de facteurs d'émissions considérées comme fiables car provenant de sources reconnues ;
 - Pas de commentaires sur les autres données.
- **Réutilisabilité des données** : données de l'enquête réutilisables si sort de la confidentialité

5. Hypothèses-clés

L'impact du télétravail peut-être mesuré en faisant un sondage sur les habitudes de transport des salariés sans et avec télétravail, même si de nombreux paramètres peuvent influencer le résultat (déménagement, changement du nombre de personnes dans le foyer).

6. Principaux résultats et chiffres-clés

Le télétravail permet de réduire d'environ 30% les impacts environnementaux associés aux trajets entre le domicile et le lieu de travail. Ce gain atteint jusqu'à 58% pour les émissions de particules. Ceci est dû à la réduction du nombre de km parcourus entre le domicile et le lieu de travail mais aussi par le changement de mode de transport.

C'est le teleworking⁵⁸ qui permet d'obtenir la plus forte réduction des impacts: réduction de 35% des GES contre 25% pour le telecommuting⁵⁹ et 5% pour le homeshoring⁶⁰. Ces tendances sont généralisables aux autres indicateurs.

⁵⁷ HBEFA : outil et base de données de facteurs d'émissions de polluants des modes de transport routiers à l'utilisation, basés sur des modèles théoriques et un calibrage à partir de données mesurées réelles. HBEFA est co-développé en France par le CEREMA.

⁵⁸ Télétravail occasionnel correspondant à un télétravail flexible et léger (par exemple 15 jours/an) et est généralement pratiqué par des cadres autonomes et hyperconnectés

⁵⁹ Télétravail sur quelques journées complètes par mois (le plus fréquent étant 1 jour/semaine) afin de réduire les trajets domicile-bureau

Il n'y a pas de différence notable sur les impacts entre les salariés et les indépendants.

Le télétravail à domicile permet de réduire les impacts environnementaux et ce pour tous les indicateurs. Le gain est bien plus faible pour le tiers-lieu. Le mélange deux types de localisation n'est pas favorable.

Pour les impacts indirects sur les habitudes de transport :

- Il y a des variations significatives selon le type de télétravail: une réduction de 19% pour le télétravail en indépendant et augmentation de 41% pour le homeshoring. Mais en moyenne sur tous les critères de variation du télétravail, cela représente une très faible variation (environ 1%) ;
- La réduction sur les GES est de 19% pour les indépendants mais une légère augmentation est constatée pour les salariés ; et
- En fonction du lieu de travail, le bilan est négatif pour le domicile et le tiers-lieu mais une réduction sur les GES de 54% est constatée pour la mixité des deux lieux de télétravail.

Pour les impacts indirects sur le logement :

- Une augmentation 86% des GES est constatée pour les indépendants et une légère réduction pour les salariés ; et
- Une réduction des GES est constatée uniquement pour le travail à domicile, et une mixité des lieux de travail.

Scénarios prospectifs en France en prenant en compte uniquement les effets directs :

Scénario 1	Entreprise de 1 000 Salariés	économies de 447 t CO ₂ eq. /an (soit émissions de GES de 37 français sur une année)
	100% des salariés télétravaillent 1j/semaine	
Scénario 2	50% de la population active télétravaille	économies de des émissions de GES de 366 000 français sur une année
	2,9 jours/semaine	

7. Conclusions et discussions de l'auteur

- Pour les impacts directs du télétravail⁶¹ par rapport à la réduction du nombre de trajets, une réduction est obtenue par une diminution des trajets entre le domicile et le lieu de travail et quel que soit le type de travailleur et le lieu.
- Pour les impacts indirects sur le transport, il n'y a quasiment pas de variation des impacts environnementaux directs dus aux trajets personnels
- Pour les effets indirects sur le logement : il y a une augmentation des impacts environnementaux dus à la consommation d'énergie au domicile
- Néanmoins, les auteurs soulignent la forte variabilité des résultats selon les profils de télétravailleurs, et les incertitudes associées aux données déclaratives. Un sondage sur un plus large panel de répondants permettrait de réduire ces incertitudes.

8. Limites, points d'attention, besoins de travaux complémentaires

- Faible niveau de confiance dans les données de base (valeur déclarative) ;
- Incertitudes importantes sur l'évaluation des effets indirects ;
- Pas de quantification d'autres effets indirects (moins consommation de papier, moins surface de bureaux de l'entreprise) ;
- Scénario basés sur des données déclaratives mais représentatives de la situation en entreprise ;

⁶⁰ Télétravail cadré et majoritaire (3 à 5 jours/semaine) qui consiste à industrialiser l'externalisation de métiers de production à plus faible valeur ajoutée dans une logique gagnant-gagnant (productivité vs. qualité de vie)

⁶¹ L'étude fait la distinction entre effets directs, qui sont les effets en lien direct avec les impacts liés à la mobilité domicile-travail, par opposition directs aux effets indirects reliés à d'autres postes d'émissions (consommations d'énergie des bâtiments, mobilité pour des usages personnels, etc.)

- Prendre en compte l'impact matériel du télétravail ainsi que les infrastructures supplémentaires nécessaires au télétravail.

III.3. FICHE DE LECTURE N°33 – VOLET E-COMMERCE / DEMATERIALISATION

« *The Energy and Greenhouse Gas Emissions Impacts of Telecommuting and e-Commerce* », Fraunhofer USA (D. Harbor, K. Roth, Michael Zeifman, V. Shmakova) pour la Consumer Electronics association (CEA), 2015, 81p.

Rapport d'étude, financements privés. Absence de revue indépendante

1. Objectifs et champs de l'étude

Cette étude vise à estimer l'impact du télétravail et du e-commerce/dématérialisation (livres et journaux) sur les émissions de GES et les consommations d'énergie à l'échelle des États-Unis, via une approche cycle de vie. Cette étude est une mise à jour d'une étude datant de 2007. La présente fiche est uniquement consacrée au volet e-commerce. Deux cas d'études y sont traités : les livres et les journaux, achetés en boutique, ou sur internet en version dématérialisée.

2. Périmètre de l'analyse

Frontières du système	Amont (fabrication)	✓
	Utilisation	✓
	Aval (fin de vie)	x
Périmètre géographique		États-Unis
Impacts environnementaux considérés	Changement climatique	✓
	Consommation d'énergie	✓
	Multi-indicateurs	x
Types d'effets	1 ^{er} ordre (directs)	✓ Impact de la production des médias de lecture, du téléchargement du livre ou du journal, et de l'utilisation du média de lecture
	2 nd ordre (indirects)	✓ Impacts de la substitution du média papier par le média numérique (logistique incluse)
	3 ^{ème} ordre (systémiques)	x
Effets rebonds	Directs	x
	Indirects	x
	Macroéconomiques	x

3. Méthodologie employée

- **Type de méthode d'évaluation environnementale utilisée** : Évaluation bi-indicateur de type Empreinte Carbone (utilisation de facteurs d'émissions), appliquée sur le cycle de vie partiel du service étudié. Comparaison faite avec le média papier en évaluant les impacts environnementaux de la substitution du média papier par le média numérique.
- **Méthode de collecte des données d'activité** : Collecte des données réalisée à travers une recherche bibliographique, utilisant à la fois des données issues de statistiques nationales et des chiffres repris d'autres publications scientifiques

4. Données utilisées

- Données d'activité utilisées :

Type de données	Description
Volumes de e-books et e-journaux vendus	Estimation par la différence maximale de statistiques de ventes États-Unis sur les années 2010 et 2013. Une source bibliographique de 2013 estime que deux tiers des e-books vendus aux États-Unis se substituent à des livres papier.

Type de données	Description
Scénario d'utilisation	Données principalement issues de trois publications : Matthews (2002) ⁶² , Kozak (2003) ⁶³ et Masanet (2013) ⁶⁴ . Plusieurs cas d'études sont distingués. Le premier estime un temps de lecture journalier de 17 minutes (un tiers du temps de lecture), et une répartition du taux d'utilisation entre tablette et liseuse faite selon les taux d'équipements des ménages ; le second estime un temps de lecture de 51 minutes et une répartition du taux d'utilisation entre tablette et liseuse faite selon les statistiques d'accès aux sites internet d'achat
Impact de la production du média	L'impact de la production du livre ou du journal papier et de sa distribution (en magasin ou par e-commerce) sont estimées via des données bibliographiques : EPA, ainsi que les trois études mentionnées précédemment. Pour la lecture numérique, des statistiques d'utilisation sont exploitées afin de répartir les impacts entre tablette, ordinateur fixe, ordinateur portable et smartphone.
Lecture numérique	La lecture numérique est faite sur tablette (type modèle Apple) ou sur liseuse pour le livre. Pour le journal, la tablette, l'ordinateur fixe ou portable sont considérés. Les données sur le temps de lecture, la durée d'usage et la durée de vie des équipements sont reprises d'autres sources bibliographiques.

- **Données environnementales utilisées** : Utilisation de facteurs d'impacts pour les émissions de GES et les consommations issus d'un contexte nord-américain : chiffres de l'EPA, du modèle GREET⁶⁵ principalement.
- Fiabilité et robustesse des données d'après les auteurs :
 - Pas d'analyse de la robustesse des données.
 - Cependant, plusieurs cas d'études (minimal et maximal) sont distingués et permettent d'évaluer l'influence des conditions d'utilisation des médias numérique sur les impacts environnementaux.
- **Réutilisabilité des données** : Les données sont quasiment toutes issues de publications disponibles publiquement. Cependant, quasiment toutes ces données sont propres au contexte nord-américain. Il serait peu judicieux de les appliquer directement à un contexte français ou européen.

5. Hypothèses-clés

Cette étude ne comporte pas d'hypothèse-clé majeure.

6. Principaux résultats et chiffres-clés

Les principaux résultats de l'étude sont présentés ci-après, à l'échelle des États-Unis.

Cas étudié	Poste d'impacts considéré	Émissions de GES (Mt CO ₂ éq/an)		Consommations d'énergie (PJ/an)	
		Cas min	Cas max	Cas min	Cas max
Livres numériques	Production du média numérique et lecture	0,2	0,3	1,7	2,6
	Évitement de la production de livre papier	-1,0	-1,3	-4,2	-5,2
	Évitement de la phase d'acheminement du livre papier	-0,7	-0,8	-9,3	-11,5
	Total	-1,5	-1,8	-11,8	-14,1
Journaux numériques	Production du média numérique et lecture	0,07	0,27	0,5	1,6
	Évitement de la production du journal papier	-2,9	-3,5	-24	-29
	Total	-2,9	-3,3	-22,5	-27,4

Globalement, les deux cas d'études présentent des gains d'impacts environnementaux (cf. les valeurs négatives) dans les cas minimal et maximal.

⁶² Matthews, H.S., Williams, E., Tagami, T., and Hendrickson, C. T. 2002. "Energy implications of online book retailing in the United States and Japan." Environmental Impact Assessment Review 22. pp. 493-507. Dernier accès en juillet 2016 : <http://www.cmu.edu/gdi/docs/energy-implications-of-online-book.pdf>

⁶³ Kozak, G. 2003. "Printed Scholarly Books and E-book Reading Devices: A Comparative Life Cycle Assessment of Two Book Options." Final Report to the Center for Sustainable Systems, University of Michigan. August.

⁶⁴ Masanet, E., Shehabi, A., Ramakrishnan, L., Liang, J., Ma, X., Walker, B., Hendrix, V., and P. Mantha (2013). "The Energy Efficiency Potential of Cloud-Based Software: A U.S. Case Study". Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California. June. Dernier accès en juillet 2016 : https://crd.lbl.gov/assets/pubs_presos/ACS/cloud_efficiency_study.pdf

⁶⁵ The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model by Argonne National Laboratory.

- Concernant la lecture de livres

Si l'on regarde la répartition des impacts sur les consommations d'énergie, un tiers de ces gains est permis par l'évitement de la production de nouveaux livres au format papier. Les deux autres tiers correspondent à l'évitement de la phase de distribution des livres papier. Les impacts directs des TICs, associés à la lecture sur média numérique (incluant également l'accès à Internet et l'énergie grise de l'appareil) comptent pour 15 à 20% d'impacts)

Les tendances sont similaires pour l'indicateur changement climatique. Entre les cas minimisant et maximisant, les gains environnementaux nets totaux sont compris entre 1,5 et 1,8 Mt de CO₂ éq⁶⁶.

- Concernant la lecture de journaux

Les impacts directs associés à la production des supports de lecture ainsi qu'à la phase d'utilisation sont peu significatifs en comparaison des gains permis par l'évitement de la production de journaux papiers. En termes de consommations d'énergie, les journaux numériques permettent une réduction d'impacts nette de 22 à 28 PJ/an à l'échelle des États-Unis. En termes de poids, l'étude estime la production de 550 à 620 millions de kg de journaux est évitée en 2013 aux États-Unis. Relativement au changement climatique, les journaux numériques permettent d'éviter les émissions de 2,8 à 3,3 Mt de CO₂ éq. par an aux États-Unis.

- Chiffres globaux

En termes d'impacts à l'échelle des États-Unis, les livres numériques et les journaux numériques permettraient des gains en termes d'émissions de GES de l'ordre de **0,02% à 0,03%** et **0,04% à 0,05% respectivement des émissions de GES du pays**.

7. Conclusions et discussions de l'auteur

L'étude ne dispose pas d'une section de conclusion et de discussions.

8. Limites, points d'attention, besoins de travaux complémentaires

- Les auteurs travaillent au sein d'un bureau d'études réputé en évaluations environnementales liés aux EEE ou aux TICs (le Fraunhofer Institute en Allemagne a contribué à plusieurs études préparatoires dans le cadre de la Directive Eco-conception (2009/125/CE), notamment). Cependant, le financement de l'étude par une fédération d'industriels, l'absence de revue indépendante et le manque de recul sur les données et les résultats diminuent l'impartialité et la fiabilité de l'étude.
- L'étude dit utiliser une approche de type ACV. Concernant la couverture du cycle de vie, ceci est partiellement vrai dans la mesure où la production et l'utilisation des médias numériques et papier sont considérés. En revanche, aucune mention n'est faite de la phase de fin de vie (pour les médias papier ou pour les EEE). Pour l'aspect multicritère propre à l'ACV, il serait intéressant d'également étudier les impacts sur l'épuisement des ressources et la pollution de l'eau (eutrophisation, toxicité). Ceci n'est pas mentionné par les auteurs
- La méthodologie du rapport est structurée de telle façon que les données utilisées entre les deux indicateurs environnementaux considérés sont présentées séparément. Ceci nuit à la lisibilité et à la compréhension de l'étude, ainsi que de ses choix méthodologiques. De façon plus générale, peu de recul est pris sur les choix méthodologiques et beaucoup d'hypothèses sont faites à dire d'expert ou à partir d'un nombre assez important de publications variées en termes d'objectifs, de méthodologie, etc. La consistance et l'homogénéité des données utilisées sont donc faibles.
- Beaucoup de ces données reposent sur des dires d'expert mais la séparation en deux cas minimisant et maximisant a le mérite de borner les impacts environnementaux potentiellement générés.
- Des données sont mentionnées concernant le nombre d'e-journaux ou d'e-books achetés sans qu'il y ait substitution à un équivalent papier. Ceci pourrait s'assimiler à un effet rebond des TICs, qui pourrait être quantifié. Toutefois, le rapport ne distingue pas de façon particulière cet aspect de l'analyse.
- En conclusion, la méthodologie employée et les résultats de cette étude sont donc discutables. Plusieurs écueils fréquemment rencontrés dans les études sur les TICs apparaissent : évaluation bi-indicateur, non-exhaustivité en termes de couverture du cycle de vie, manque de transparence sur certains choix méthodologiques et enfin manque de données robustes sur certaines hypothèses d'utilisation. Néanmoins, l'approche de l'étude permet d'aboutir à une fourchette de l'impact de ces deux activités de dématérialisation à l'échelle nationale des États-Unis.

⁶⁶ NB : Pour point de repère, on peut estimer qu'un Français émet environ 10 t de CO₂ éq. par an. La valeur est vraisemblablement plus importante pour un Nord-Américain.

- Plus globalement, on constate que d'après cette étude, les gains d'impacts permis par la dématérialisation de la lecture sont très peu significatifs en comparaison de l'empreinte environnementale des États-Unis. Ceci s'explique potentiellement par le fait que l'empreinte carbone absolue des États-Unis est relativement élevée, à cause de son mix électrique fortement carboné.

III.4. FICHE DE LECTURE N°33 – VOLET TELETRAVAIL

« The Energy and Greenhouse Gas Emissions Impacts of Telecommuting and e-Commerce », Fraunhofer USA (D. Harbor, K. Roth, Michael Zeifman, V. Shmakova) pour la Consumer Electronics association (CEA), 2015, 81p.

Rapport d'étude, financements privés. Absence de revue indépendante.

1. Objectifs et champs de l'étude

Cette étude vise à estimer l'impact du télétravail et du e-commerce / dématérialisation (livres et journaux) sur les émissions de GES et les consommations d'énergie à l'échelle des États-Unis, via une approche cycle de vie. Cette étude est une mise à jour d'une étude datant de 2007. La présente fiche est uniquement consacrée au volet télétravail.

2. Périmètre de l'analyse

Frontières du système	Amont (fabrication)	✓
	Utilisation	✓
	Aval (fin de vie)	x
Périmètre géographique		États-Unis
Impacts environnementaux considérés	Changement climatique	✓
	Consommation d'énergie	✓
	Multi-indicateurs	x
Types d'effets	1 ^{er} ordre (directs)	x
	2 nd ordre (indirects)	✓ Impacts sur les déplacements Impacts sur les consommations d'énergie au bureau et à domicile (chauffage, éclairage, usages spécifiques) et sur les consommations de papier
	3 ^{ème} ordre (systémiques)	✓ Impact sur la réorganisation des surfaces de bureau
Effets rebonds	Directs	x
	Indirects	x
	Macroéconomiques	x

3. Méthodologie employée

- **Type de méthode d'évaluation environnementale utilisée** : Évaluation bi-indicateur de type Empreinte Carbone (utilisation de facteurs d'émissions), appliquée sur le cycle de vie partiel du service étudié.
- **Méthode de collecte des données d'activité** : Collecte des données réalisée à travers une recherche bibliographique, utilisant à la fois des données issues de sources institutionnelles et des chiffres repris de publications scientifiques.
- **Définition du télétravail** : Correspond aux travailleurs qui ont travaillé à domicile au moins 1 fois par mois en moyenne.

4. Données utilisées

- Données d'activité utilisées :
 - Utilisation des données d'une enquête sur les déplacements des ménages⁶⁷ effectuée aux États-Unis en 2009 sur 150 000 foyers, afin d'évaluer l'échantillon de population qui télétravaille, la fréquence, et les distances parcourues les jours normaux vs. les jours de télétravail.

⁶⁷ 2009 National Highway Transportation Survey (NHTS)

- Estimation des consommations d'énergie liées au chauffage supplémentaires à domicile basées sur les statistiques nationales de consommations d'énergie à domicile et la réduction moyenne de la consigne du chauffage par les particuliers les jours où le domicile n'est pas occupé (estimation via deux cas min et max).
- Estimation des consommations d'énergie liées à l'éclairage : hypothèse propre à l'étude testée sur deux cas min et max.
- Pas d'évolution sur les consommations d'énergie de l'ordinateur. Il est considéré que les consommations d'énergie de l'ordinateur (portable) sont identiques entre le domicile et le lieu de travail, et que la variation d'énergie associée aux réseaux internet au débit de données est négligeable.
- Estimation de la consommation d'énergie de l'imprimante et de la réduction du taux d'impression à domicile via des hypothèses propres à l'étude (estimation via deux cas min et max).
- Analyse de sensibilité sur la réduction des espaces de bureaux, estimée via une hypothèse propre à l'étude et des données de l'ancienne étude TIAx de 2007.
- **Données environnementales utilisées** : Utilisation de facteurs d'impacts pour les émissions de GES et les consommations issus d'un contexte nord-américain : chiffres de l'EPA, du modèle GREET⁶⁸.
- **Fiabilité et robustesse des données d'après les auteurs** :
 - Pas d'analyse de la robustesse des données.
 - Cependant, les postes d'impacts autres que les déplacements sont systématiquement analysés via deux extrêmes. La réduction des espaces de bureau est elle évoquée en tant qu'analyse de sensibilité.
- **Réutilisabilité des données** : Les données sont quasiment toutes issues de publications disponibles publiquement. Les données relatives aux effets indirects sur les consommations d'énergie dans le domicile, au bureau etc. pourraient être réutilisées. Cependant, l'ensemble de ces données sont propres au contexte nord-américain. Il serait peu judicieux de les appliquer directement à un contexte français ou européen.

5. Hypothèses-clés

Cette étude ne comporte pas d'hypothèse-clé.

6. Principaux résultats et chiffres-clés

Les principaux résultats de l'étude sont présentés ci-après.

Fréquence de télétravail	Émissions de GES (kg CO ₂ eq/personne/an)	Consommations d'énergie (GJ/personne/an)	
	Cas min ⁶⁹	Cas min	Cas max
Fréquence de télétravail faible (1 à 5 jours par mois)	-300	-4	-5
Fréquence de télétravail élevée (plus de 20 jours par mois)	-2 805	-37	-43

Globalement le télétravail permet de réduire les impacts en termes d'émissions de GES et de consommations d'énergie, dans le cas min et dans le cas max. Les chiffres présentés sont **négatifs** car il s'agit bien d'impacts évités (non-générés) D'après le tableau ci-dessus, télétravailler souvent permet donc de réduire d'autant plus les impacts environnementaux

Le principal contributeur à la réduction des impacts environnementaux est le poste déplacements. Selon les chiffres utilisés par l'étude, le télétravail permet de réduire de 16 km à 43 km les déplacements professionnels, selon la fréquence de télétravail. Les impacts en termes de consommations de chauffage, d'éclairage et de l'ordinateur personnel sont quasiment négligeables, qu'ils soient positifs (impacts supplémentaires) dans le cas min ou négatifs (gains d'impacts) dans le cas max.

Selon les chiffres de l'étude, la réduction des espaces de bureau permettrait de générer des gains d'impacts supplémentaires non négligeables (en moyenne +20% en valeur absolue par rapport aux chiffres présentés ci-dessus) dans le cas des fortes fréquences de télétravail.

⁶⁸ The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model by Argonne National Laboratory.

⁶⁹ Seul le cas minimal est montré dans l'étude

En termes d'impacts à l'échelle des États-Unis, le télétravail permettrait donc des gains en termes d'émissions de GES de l'ordre de **0,09% à 0,12% des émissions de GES du pays**. Pour les consommations d'énergie primaire, ce ratio est de 0,07% à 0,12%.

7. Conclusions et discussions de l'auteur

L'étude ne dispose pas d'une section de conclusion et de discussions.

8. Limites, points d'attention, besoins de travaux complémentaires

- Les auteurs sont un bureau d'études réputés en évaluations environnementales liés aux EEE ou aux TICs (le Fraunhofer Institute en Allemagne a contribué à plusieurs études préparatoires dans le cadre de la Directive Eco-conception (2009/125/CE), notamment). Cependant, le financement de l'étude par une fédération d'industriels, l'absence de revue indépendante et le manque de recul sur les données et les résultats diminue l'impartialité et la fiabilité de l'étude.
- L'étude dit utiliser une approche de type ACV. Concernant la couverture du cycle de vie, ceci est partiellement vrai dans la mesure où la production et la maintenance des véhicules est prise en compte. En revanche, aucune mention n'est faite de la phase de fin de vie (pour les véhicules ou les autres postes d'impacts). Pour l'aspect multicritère propre à l'ACV, il serait intéressant d'également étudier les impacts sur l'épuisement des ressources et la pollution de l'eau (eutrophisation, toxicité).
- L'étude manque de transparence sur certaines hypothèses qui sont faites implicitement. En particulier, aucune mention n'est faite sur l'exclusion des impacts directs liés aux TICs, bien que l'on puisse imaginer qu'ils soient négligeables en comparaison des impacts liés au transport. De même, la phase de fin de vie n'est pas du tout mentionnée, et les phases production et fin de vie ne sont pas mentionnées pour les postes d'impacts liés au résidentiel, aux surfaces de bureaux et aux imprimantes. De façon plus générale, peu de recul est pris sur les choix méthodologiques et beaucoup d'hypothèses sont faites de dires d'expert ou à partir d'un grand nombre de publications diverses et variées en termes d'objectifs, de méthodologie, etc. La consistance et l'homogénéité des données utilisées sont donc faibles.
- Concernant les déplacements, l'étude ne semble considérer que les trajets effectués en voiture. Ceux-ci sont évalués en véhicule.mile, et non en personne.mile. La conséquence implicite est que le taux d'occupation des véhicules est égal à 1 personne/véhicule (dans la réalité, il doit être légèrement supérieur à 1). Au-delà de ça, la vraie problématique est que les déplacements via d'autres modes de transport sont négligés. Or, on peut imaginer que la population de télétravailleurs est constituée en proportion non-négligeable de profils types cadres supérieurs, travaillant dans des grandes villes comme New York ou Los Angeles, lesquelles disposent d'infrastructures et de réseaux de transport en commun non négligeables.
- La distinction entre profils de télétravailleurs n'est faite que selon la fréquence du télétravail. Il aurait été souhaitable de distinguer différents profils qui incluent d'autres caractéristiques plutôt sociologiques (salarié ou indépendant, travailleur à cheval sur plusieurs sites, etc.). L'étude exclut aussi le télétravail en tiers-lieu sans le justifier.
- Une qualité tout à fait appréciable de l'étude est le fait que plusieurs effets indirects/ sont traités : consommations d'énergie dans le logement, au bureau, consommations de papier, réduction des surfaces de bureau. Beaucoup de ces données reposent sur des dires d'expert mais la séparation en deux cas minimisant et maximisant permet de borner les impacts environnementaux générés. On constate d'ailleurs qu'ils sont relativement faibles en comparaison des impacts liés au transport (sauf pour la réduction des surfaces de bureau, qui amène des gains d'impacts non négligeables). Il est toutefois dommage que les effets indirects liés aux déplacements personnels générés par le télétravail ne soient pas évoqués.
- En conclusion, la méthodologie employée et les résultats de cette étude sont donc discutables. Plusieurs écueils fréquemment rencontrés dans les études sur les TICs apparaissent : non-considération des impacts directs des TICs, évaluation bi-indicateur, non-exhaustivité en termes de couverture du cycle de vie, manque de transparence sur certains choix méthodologique et enfin manque de données sur certaines hypothèses d'utilisation. Néanmoins, un réel effort a été fait pour couvrir un certain nombre d'impacts indirects liés au télétravail, ce qui permet d'obtenir des ordres de grandeur de leur influence sur le bilan environnemental du télétravail. L'approche de l'étude est intéressante dans le fait qu'elle fournit des ordres de grandeur macroscopiques de l'impact du télétravail.

Si l'on regarde ces chiffres d'impacts à l'échelle nationale, on constate que d'après cette étude, les gains d'impacts permis par le télétravail sont très faibles en comparaison de l'empreinte environnementale des États-Unis. Ceci

s'explique potentiellement par le fait que l'empreinte carbone absolue des États-Unis est relativement élevée, à cause de son mix électrique fortement carboné.

III.5. FICHE DE LECTURE N°35

« *Lessons learned – Review of LCAs for ICT products and services* », Yevgeniya Arushanyan⁷⁰⁷¹, Elisabeth Ekener-Petersen⁶⁹⁷⁰, Göran Finnveden⁶⁹⁷⁰, *Computers in Industry*, 2014, 24 p.

Article publié dans un journal scientifique, revue indépendante, financements publics.

1. Objectifs et champs de l'étude

Cet article constitue une méta-analyse de plusieurs dizaines de publications cherchant à étudier les impacts environnementaux des TICs, en particulier au moyen d'études ACV. L'objectif est de voir quels sont les produits les mieux étudiés, les types d'impacts environnementaux les plus évoqués, les raisons expliquant les impacts environnementaux et enfin les points méthodologiques à approfondir.

2. Périmètre de l'analyse

L'analyse inclut les publications de méthodologie ACV publiées dans des revues scientifiques à partir de l'année 2000, appliquées aux TICs. Certains documents de type « rapport d'étude » sont cependant aussi inclus dès qu'ils répondent aux objectifs de la méta-analyse. Le périmètre géographique de la recherche est mondial.

3. Méthodologie employée

La méthodologie employée est celle d'une recherche bibliographique classique :

- Utilisation de moteurs de recherche scientifiques spécialisés, et des connaissances préalables des auteurs ;
- Utilisation de mots-clés en anglais type « LCA », « ICT », « computer », etc. ;
- Identification de 130 documents puis 70 après une étape d'analyse plus approfondie ;
- Compilation des résultats dans un tableur avec différentes colonnes caractérisant les publications.

4. Données utilisées

Les données utilisées sont les résultats et les points de discussion des 70 publications identifiées. La section 3 de la publication (« Overview of LCA studies on ICT products and services ») présente une partie de ces études ainsi que leurs conclusions.

5. Hypothèses-clés

Cette étude ne comporte pas d'hypothèse-clé majeure.

6. Principaux résultats et chiffres-clés

- Principaux produits ou services investigués

Selon la répartition des différentes études analysées, environ deux-tiers d'entre elles analysent les impacts directs d'un équipement informatique. Les équipements les plus couverts sont les téléviseurs, téléphones, écrans et surtout les ordinateurs (40% du total des études dont 20% pour les ordinateurs). Les autres produits informatiques sont moins étudiés (datacentres, réseaux mobiles et TIC, serveurs, composants électroniques - moins de 6% des études chacun et 25% des études au total). Beaucoup de biens d'équipements informatiques ne sont pas du tout étudiés, comme les consoles vidéo, les lecteurs DVD, systèmes audio, caméras, etc. 14% des publications ont une vision macroscopique et traitent des TICs dans leur ensemble.

Le tiers restant des études concerne soit des comparaisons de services rendus par les TIC vs. des pratiques conventionnelles (21% des études, portant par exemple sur la visioconférence ou la dématérialisation) ou des études portant sur le secteur des TIC en général (14%).

- Principaux types d'impacts étudiés

Une majorité des publications identifiées essayent d'avoir une approche multicritère (68%). Cependant, une analyse plus fine permet de voir que 38% des études se limitent à l'étude des impacts sur le changement climatique et les

⁷⁰ KTH Royal Institute of Technology, Division of Environmental Strategies Research – fms, Drottning Kristinas Väg 30, 100 44 Stockholm, Sweden

⁷¹ KTH Royal Institute of Technology, CESC – Centre for Sustainable Communications, Lindstedtsvägen 5, 100 44 Stockholm, Sweden

consommations d'énergie. Plusieurs auteurs justifient ce choix par le fait que le changement climatique peut servir à également approximer les impacts (ou du moins les tendances) sur d'autres types d'indicateurs, comme l'épuisement en ressources fossiles ou l'épuisement en ressources abiotiques. Cependant, il n'y a pas de consensus sur la justification de ces approximations. Pour d'autres auteurs, ce choix est causé par manque de données ou par manque de robustesse de ces données permettant d'estimer les impacts des TICs sur d'autres indicateurs. Les auteurs regrettent le risque de moindre optimisation de la réduction des impacts environnementaux causé par une analyse mono ou bi-critère.

- Phase du cycle de vie la plus significative en termes d'impacts

La question principale est de savoir qui de la phase de fabrication ou de la phase d'usage a la plus forte influence sur le bilan environnemental. L'objectif est ainsi d'identifier quels leviers actionner pour améliorer ce bilan. Deux tendances peuvent être distinguées selon le schéma d'utilisation des TICs. Les réseaux, datacentres et les serveurs ont une longue durée de vie et sont quasiment toujours en fonctionnement. La phase d'usage prédomine pour le bilan environnemental de ces équipements. En revanche pour les équipements en fin de chaîne d'utilisation, la durée de vie ainsi que le taux d'utilisation sont moindre, ce qui donne proportionnellement plus de poids à la phase de fabrication.

Néanmoins, si l'on compare les études portant chacune sur un même équipement, il y a souvent des divergences, que ce soit sur les ordinateurs, les écrans (surtout selon les technologies : CRT, LCD, Plasma, LED), téléviseurs. Un auteur en particulier pointe du doigt le fait que le lieu d'utilisation est important : le mix électrique utilisé pour la modélisation joue fortement sur le bilan, notamment en termes d'émissions de GES. Sur les téléphones et les tablettes, les études illustrent toutes que la miniaturisation des équipements fait augmenter de façon absolue les impacts de la phase de fabrication.

La phase de transport des équipements est souvent négligée dans l'interprétation des résultats. Certaines études vont jusqu'à dire que les impacts associés à cette phase sont négligeables. Cependant ce n'est pas toujours le cas, notamment lorsque du transport par voies aériennes est en jeu, ou que le trajet final en véhicule particulier est pris en compte (pour le e-commerce notamment, avec la logistique des derniers kilomètres). De fortes incertitudes subsistent quant au scénario d'acheminement moyen à modéliser, ce qui implique d'être attentif aux impacts de cette phase.

De la même façon que pour le transport, une faible attention est également accordée à la phase de fin de vie. Le focus de beaucoup d'études sur les consommations d'énergie et les émissions de GES entraînent une mésestimation des impacts de cette phase. Une fin de vie avec un fort taux de valorisation peut engendrer des bénéfices environnementaux significatifs. Cependant, déterminer ce scénario est rendu difficile par la complexité des processus mis en jeu, et de l'existence de filières de recyclage informelles, souvent délocalisées.

L'ensemble de ces observations mettent l'accent sur la phase de conception initiale des produits, où des efforts peuvent être faits pour à la fois réduire les impacts associés à leur fabrication-même, mais aussi leur utilisation (meilleure efficacité énergétique).

- Conditions d'utilisation

Beaucoup d'études comparent un service dématérialisé à son équivalent conventionnel. Le résultat de ces comparaisons n'est pas unanime du fait des incertitudes concernant les scénarios d'utilisation. Beaucoup de paramètres rentrent en jeu, comme la durée de vie des produits, le taux d'utilisation, le scénario de fin de vie, le mix électrique utilisé... Cela s'applique à l'ensemble des produits étudiés. Peu d'études font un travail de fond sur le comportement des usagers. Pourtant, des connaissances plus fines seraient nécessaires (données moyennes et distinction par types d'usagers).

Ces incertitudes ont un impact large, jusqu'au choix de l'unité fonctionnelle. Il est clair que la comparaison entre service dématérialisé et matérialisé n'est pas exactement équivalente, l'un et l'autre apportant chacun des fonctions légèrement différentes. Cela indique que la comparaison est différente, et que ces services ne sont pas de simples substituts l'un à l'autre ; ils peuvent même parfois être complémentaires.

- Composants et matériaux importants

Pour les équipements comme les ordinateurs et les serveurs, la carte mère est l'équipement dont l'impact lié à la fabrication est le plus important. Les circuits intégrés sont eux les composants les plus énergie-intensifs. Dans le cas d'équipements plus petits, il s'agit de l'équipement comportant le plus d'impact, avec l'écran LCD. Pour les écrans et les téléviseurs, le module LCD ou le tube CRT sont les composants jouant le plus sur le bilan environnemental de ces équipements. Enfin, on notera quelques équipements ayant un impact également significatif sur l'indicateurs changement climatique : le chargeur de l'ordinateur ou du téléphone portable, ainsi que les métaux et le plastique contenus dans l'ordinateur.

En termes de métaux utilisés, l'or est identifié comme le métal générant le plus d'impact, en particulier pour les téléphones portables.

- Données et choix méthodologiques

Le manque de données pertinentes est souvent cité. La première raison à cela est le rapide développement technologique des TICs (exemple des semi-conducteurs). La seconde est la diversité d'équipements existants. L'extrapolation de certaines données selon la taille des équipements (estimer les impacts d'un ordinateur portable de 19 pouces selon un ratio des impacts d'un ordinateur portable de 17 pouces par exemple) n'est pas toujours valide.

Concernant la fin de vie, l'échelle de temps considérée peut apporter des variations significatives (plusieurs ordres de grandeur) sur les impacts environnementaux liés aux émissions lors de l'enfouissement des équipements (ou de l'extraction minière). Ceci joue tout particulièrement sur les indicateurs d'eutrophisation des milieux aquatiques et de toxicité.

Enfin, un auteur discute la pertinence de la méthode ACV pour évaluer les impacts environnementaux des TICs, pour les raisons cités précédemment. Sa recommandation est de privilégier une approche hybride avec une analyse Input/Output.

- Substitution et effets rebonds

Beaucoup d'études comparent un service dématérialisé à son équivalent conventionnel. L'hypothèse clé est à chaque fois que ces deux pratiques se substituent, ce qui n'est pas toujours le cas. Dans certains cas, les deux sont utilisés conjointement. Les effets rebonds ne sont pas souvent pris en compte. Ceux-ci doivent cependant être inclus autant que possible, de même que les autres effets indirects des TICs. Cependant, un auteur identifié insiste sur la complexité de la tâche : les TICs changent les limites temporelles et géographiques de la vie du quotidien, influençant les comportements des usagers sur le long-terme.

- Sources d'inconsistances et de variabilité

La variabilité et les incertitudes incluses dans les études sont causés par le rapide développement technologique, le périmètre géographique des utilisations, la qualité des données, le choix du modèle étudié et enfin les conditions d'utilisation. La difficulté d'accès aux données sur les composants informatiques complexifie la tâche d'évaluation des impacts environnementaux des TICs. Par ailleurs, le développement rapide des TICs a pour conséquence l'apparition de d'études aux méthodologies trop simplificatrices (utilisation de données moyennes ou génériques, extrapolation des données selon la taille des équipements, etc.).

- ACV sociale

Quelques études ont été identifiées et illustrent des problématiques sociales fortes associées au secteur. Cependant, la méthodologie est encore relativement peu mature à l'heure actuelle. En particulier, elle ne permet pas bien d'évaluer les impacts positifs associés aux TICs

7. Conclusions et discussions de l'auteur

Le manque de transparence des publications peut être noté de façon générale, sur le périmètre, les choix méthodologiques, les données utilisées, etc. Les frontières des systèmes considérés varient d'une étude à l'autre et rendent impossibles les comparaisons entre différentes publications. Le périmètre géographique ou le type de données utilisées (génériques ou spécifiques) ne sont pas toujours précisés. Beaucoup d'hypothèses sont faites pour les conditions d'utilisation et de fin de vie des équipements, ce qui est également une claire limite de ces études. Couvrir plus de types d'impacts environnementaux permettrait d'avoir une meilleure vision, et des méthodes de pondération permettraient de hiérarchiser les résultats selon les indicateurs considérés. Enfin, il convient de mieux intégrer les effets de substitution et les effets rebonds.

A l'avenir, les auteurs recommandent de plus systématiquement avoir une vraie approche multicritère, afin de mieux intégrer les problématiques liés à la fin de vie et aux impacts en termes de toxicité. Une prise en compte plus réaliste des comportements des usages est également nécessaire. Sur le long-terme, les politiques en matière d'environnement doivent s'assurer que les TICs aient un impact positif sur l'environnement, tout en réduisant les effets rebonds.

8. Limites, points d'attention, besoins de travaux complémentaires

- Les auteurs sont des chercheurs confirmés dans le domaine de l'évaluation des impacts environnementaux des TICs.
- La comparaison avec les résultats du volet 1 de notre propre étude est homogène et beaucoup de conclusions sont communes entre cette publication et nos travaux.
- Le cas de l'ACV sociale est mentionné, mais l'analyse n'aborde pas ou peu pas d'autres méthodes récentes d'évaluations des impacts, comme l'ACV conséquentielle, ou les analyses input-output (ce qui signifie peut-être que

rien n'existe à date). On peut aussi regretter l'absence d'analyse plus fine sur les types d'usages TICs principalement investigués dans la littérature.

Pour aller plus loin, l'article aurait pu étudier les solutions à apporter aux différentes difficultés rencontrées dans l'évaluation des impacts des TICs. Un travail d'identification des initiatives cherchant à résoudre ces problèmes aurait été intéressant. Ceci ferait toutefois l'objet d'un tout autre travail.

III.6. FICHE DE LECTURE N°36

« *Comparative life cycle assessments: The case of paper and digital media* », Environmental Impact Assessment Review, Justin G. Bull, Robert A. Kozak, University of British Columbia, Canada, 2014, 9 p.

Article publié dans une revue scientifique, financements publics, article révisé.

1. Objectif et champ de l'étude

L'article propose une revue de la littérature scientifique sur les analyses de cycle de vie qui comparent les empreintes environnementales des médias numériques et papier. Les auteurs tentent de dégager les forces et faiblesses de la méthodologie d'ACV dans l'analyse de produits si différents et comprendre pourquoi dans la recherche académique, les médias numériques sont souvent vus comme mieux pour l'environnement. Ils cherchent également à améliorer notre connaissance du rôle du contexte (ici secteur TIC) sur la mesure des impacts environnementaux et par conséquent sur les résultats d'ACV comparatives (différences sur les matériels utilisés).

2. Périmètre de l'analyse

Analyse d'études/articles portant sur l'ACV comparative du média papier par rapport au média numérique. Les auteurs se sont focalisés non pas sur la comparaison papier vs numérique mais sur les produits TIC nécessaires à leur obtention (liseuse, imprimante, ordinateur, pda) Le périmètre de la recherche bibliographique est le monde et les articles couvrent une période allant de 2002 à 2010.

3. Méthodologie employée

D'un point de vue méthodologique, deux types d'études ACV ont été analysés pour permettre aux auteurs de faire ressortir les problématiques liées aux ACV comparatives et analyser la robustesse des résultats :

- Les ACV comparatives en lien avec les TIC (média papier vs média numérique)
- Les ACV de produits TIC (ACV utilisées comme référence par les auteurs pour valider leurs résultats). Par exemple, si le même problème est identifié dans les ACV comparatives et les ACV de TIC alors les auteurs estiment pouvoir conclure que ce problème est lié au contexte des TIC et influencent grandement les résultats.
- L'analyse bibliographique a été conduite selon les étapes suivantes :
- Description du cadre analytique destiné à évaluer les problèmes dans la façon de réaliser les ACV (comparative et ACV TIC).
- Présentation de la méthode utilisée par les auteurs pour sélectionner les études ACV comparatives pertinentes et validation des résultats au travers d'ACV de TIC.
- Organisation des résultats autour des problèmes identifiés précédemment.
- Description de chaque problème et examen de la façon dont il est traité dans les ACV comparatives.

4. Données utilisées

- Les données primaires sont des articles scientifiques. Huit publications concernent des analyses comparatives du cycle de vie dont :
- Id 58: Moberg Å, JohanssonM, Finnveden G, Jonsson A. Printed and tablet e-paper newspaper from an environmental perspective— a screening life cycle assessment. Environ. Impact. Assess. 2010; 30(3), 177–191.
- Fiche de lecture Id 90 : Moberg Å, Borggren C, Finnveden G. Books from an environmental perspective — part 2: e-books as an alternative to paper books. Int. J. LCA 2011; 16(3): 238–246.
- Neuf publications concernent des ACV de produits TIC non comparatives.

5. Hypothèses-clés

- Les différences dans les systèmes de production des médias papiers ou numériques (notamment d'un point de vue TIC) affaiblissent la robustesse des résultats d'ACV comparative.

- Les caractéristiques du secteur industriel des TICs et ses rapides évolutions affaiblissent l'ACV en tant que méthodologie d'évaluation environnementale.

6. Principaux résultats et chiffres-clés

Les problèmes principaux identifiés par les auteurs sont : la définition de l'unité fonctionnelle, la définition du périmètre, les allocations, variabilité spatiale et géographique et enfin la qualité et disponibilité des données utilisées. Les résultats sont présentés selon le cadre méthodologique proposé par Reap et al. (2008a,b) [cf. ci-dessous section 8] :

- Unité fonctionnelle

Les unités fonctionnelles se rapportent plus souvent à un produit qu'à un service. Par ailleurs, le choix de l'unité fonctionnelle n'est en général pas discuté alors qu'elle peut se révéler subjective et influence les résultats. Elles sont soit monofonction (liseuse) soit multifonctions (PC, PDA). Cependant les multifonctions se basent sur des données moyennes d'utilisation et la majorité ne rendent pas compte du comportement réel de l'utilisateur. Les études se focalisent majoritairement sur un produit et non sur un service.

- Périmètre :

Les périmètres sont extrêmement variables d'une étude à l'autre. Selon les articles, tel ou tel processus est jugé négligeable sans réelle justification (par exemple le transport du document papier du point d'achat au lieu de lecture ou l'utilisation du datacentre etc.). Dans les ACV comparatives, la définition des périmètres pour les TIC est difficile compte-tenu du peu de données disponibles. Une autre difficulté porte sur la définition de la phase d'utilisation au périmètre très variable du produit papier au produit numérique, rendant difficile la comparaison.

La même problématique se retrouve pour la définition du schéma de fin de vie : très variable d'une étude à l'autre (réutilisation ou recyclage du papier, pourcentage de TIC recyclé : 95%), manque de disponibilité des données...

Les mêmes difficultés de choix de périmètre se retrouvent dans les ACV de TIC non comparatives, avec un focus sur le manque d'informations sur les matières premières compte-tenu dans les produits électroniques.

- Allocation :

Les questions d'allocation sont particulièrement complexes dans le monde du numérique à cause de l'aspect multifonctionnel des équipements et des processus considérés. Elles se posent notamment dans les phases d'extraction et de fin de vie des équipements. Elles sont largement prises en compte dans les ACV comparatives mais très peu dans les ACV de TIC.

- Variation spatiale :

La prise en compte de la variabilité locale (conditions externes) n'est quasiment jamais intégrée. Les impacts locaux peuvent être très différents des impacts moyennés, selon les caractéristiques géographiques, physique, chimiques, météorologiques, etc. du milieu local. Compte de la difficulté d'obtenir des informations précises sur les TIC, les données des bases de données ont globales et non spécifiques à une situation locale. Ce sont les mêmes conclusions pour les ACV comparatives et les ACV de TIC.

- Qualité et disponibilité des données

En général, les auteurs conviennent que les données d'ICV ne sont pas largement disponibles, ni de haute qualité. "Les données peuvent être dépassées, compilées à des moments différents et correspondent à différents matériaux produits sur des périodes de temps différentes." Aussi, le risque est important que des données de « faible qualité » soient utilisées dans des ACV que ce soit dans les ACV comparatives ou les ACV de produits/services.

7. Conclusions et discussions de l'auteur

La discussion est organisée autour de 3 axes :

- Les inévitables incertitudes dans les ACV

La plus grande source d'incertitude provient des données primaires qui lorsqu'elles existent sont en général moyennées ou agrégées. Ceci est particulièrement vrai pour les données concernant l'extraction des matières premières. L'évaluation de l'impact de « l'internet » souffre de nombreuses données manquantes ou pas à jour. L'autre source d'incertitude provient de l'évaluation de la fin de vie des équipements par manque de données fiables. Enfin plusieurs études se focalisent uniquement sur la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre. De toute façon les niveaux d'incertitudes sur les impacts potentiels comme la toxicité, la déplétion des ressources abiotiques, etc.

sont importants. Pour finir, les impacts sociaux (problèmes de santé etc.) sont principalement liés à la phase de fabrication. Les auteurs rappellent que leur étude était focalisée sur les aspects environnementaux.

- Les hypothèses qui sont posées :

La plupart des ACV, même comparatives, s'appuient sur des ACV de produits et non d'usage. Or les usages ont une grande influence sur les résultats : par exemple une personne qui lit une revue sur internet peut le faire à partir de son ordinateur personnel, au travail à partir de son ordinateur fixe, sur le mobile etc. On peut avoir des résultats très différents, voire inversés dans une ACV comparative selon le scénario utilisé et selon les usages pris en compte (par exemple prise en compte ou non du transport pour l'achat de la liseuse, usage par une seule personne ou utilisation partagée etc.). D'autre part, les données d'usage prises en compte sont basées sur des hypothèses et rarement sur des données réelles et ceci a une incidence forte sur la pertinence des résultats.

- Le rôle que joue l'industrie des TICs dans l'affaiblissement de l'utilisation de cette méthodologie :

La loi de Moore qui régit l'évolution des composants électroniques et informatiques ne permet pas d'avoir des données à jour (par exemple le niveau de pureté nécessaire aujourd'hui pour la fabrication des composants miniaturisés n'est pas pris en compte dans les ACV). De plus la multiplicité des acteurs dans le processus de fabrication des équipements et leur besoin de « secret industriel » rendent impossible l'obtention de données fiables et à jour. Enfin la faible durée de vie des composants (commercialisation) contraint les fabricants d'équipements à longue durée de vie (>15 ans) à faire des stocks de composants.

Les auteurs soulignent la difficulté de conduire une étude comparative d'ACV qui s'étale sur une grande période de temps compte tenu de l'évolution des équipements et des usages sur cette période. Quoi qu'il en soit les auteurs soulignent l'amélioration de la qualité des données des bases de données.

En conclusion, compte tenu de la variabilité dans les ACV comparatives (média/papier), les auteurs s'interrogent sur la pertinence du choix de la méthode pour savoir laquelle des alternatives est la mieux pour l'environnement. D'autant plus que l'évolution actuelle de ces technologies réduit leur taille et leur consommation en énergie mais entraîne un transfert d'impact aux phases pour lesquelles les données sont moins fiables : l'extraction des matières premières, le traitement de fin de vie et l'usage d'internet.

8. Limites, points d'attention, besoins de travaux complémentaires

Les auteurs mettent bien en évidence les limitations de la méthodologie d'ACV lié au secteur des TIC et aux ACV comparatives papier vs numérique, on peut regretter qu'ils n'ouvrent pas sur des solutions méthodologiques.

- À lire pour aller plus loin (articles sources très souvent cités) :
 - Reap J, Roman F, Duncan S, Bras B. A survey of unresolved problems in life cycle assessment. Int J LCA 2008a;13(5):290–300.
 - Reap J, Roman F, Duncan S, Bras B. A survey of unresolved problems in life cycle assessment. Int J LCA 2008b;13(5):374–88.

III.7. FICHE DE LECTURE N°40

« *Evaluating the sustainability of electronic media: Strategies for life cycle inventory data collection and their implications for LCA results* », Roland Hischier⁷², Mohammad Ahmadi Achachlouei⁶⁹⁷³⁷³, Lorenz M. Hilty⁶⁹⁷⁴⁷⁵, Environmental Modelling & Software, 2014, 10 p.

Article publié dans un journal scientifique, revue indépendante, financements publics.

1. Objectifs et champs de l'étude

Cette étude compare deux Analyses de Cycle de Vie relatives à la lecture sur tablette électronique vs. papier. Une analyse des différences entre les approches de collecte de données, sur les équipements, et sur les résultats en découlant est faite. Elle met en lumière plusieurs points méthodologiques-clés dans la réalisation d'évaluations environnementales sur les TICs.

2. Périmètre de l'analyse

- Analyse comparée entre une étude faite par EMPA pour un contexte européen, et une faite par KTH pour un contexte suédois.
 - 1^{ère} comparaison entre deux méthodes de constitution de l'inventaire du cycle de vie complet d'une tablette électronique.
 - 2^{nde} comparaison sur le bilan environnemental comparé de la lecture papier vs. lecture sur tablette.

Frontières du système	Amont (fabrication)	✓
	Utilisation	✓
	Aval (fin de vie)	✓
Périmètre géographique	Suisse/Europe pour l'étude EMPA, Suède pour l'étude KTH	
Impacts environnementaux considérés	Changement climatique	✓
	Consommation d'énergie	✓ (Épuisement des ressources fossiles)
	Multi-indicateurs	Épuisement des métaux, épuisement des ressources fossiles, acidification terrestre, eutrophisation des eaux douces, formation d'ozone photochimique
Types d'effets	1 ^{er} ordre (directs)	✓
	2 nd ordre (indirects)	✗
	3 ^{ème} ordre (systémiques)	✗
Effets rebonds	Directs	✗
	Indirects	✗
	Macroéconomiques	✗

3. Méthodologie employée

- **Méthodologie de l'article** : reprise des données d'activité et des données environnementales des deux études. Définition d'un scénario d'usage commun et utilisation des mêmes indicateurs environnementaux pour la comparaison.
- **Type de méthode d'évaluation environnementale utilisée par les deux études de base** : ACV attributionnelle, utilisation de la méthode ACV de caractérisation des impacts environnementaux « ReCiPe ».

⁷² EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Technology and Society Lab, St. Gallen, Switzerland, leading author

⁷³ KTH Royal Institute of Technology, Division of Environmental Strategies Research (fms), Stockholm, Sweden

⁷⁴ KTH Royal Institute of Technology, Centre for Sustainable Communications (CESC), Stockholm, Sweden

⁷⁵ University of Zürich, Department of Informatics, Zürich, Switzerland

- **Méthode de collecte des données d'activité** : Deux approches de collecte des données pour construire l'ICV de la tablette électronique :
 - Une approche « lab-based », utilisée par KTH, consistant à désassembler l'appareil et identifier, mesurer et peser les différents composants.
 - Une approche « desk-based », utilisée par EMPA, consistant en des recherches bibliographiques de données de fabricants.

4. Données utilisées

- Utilisation conjointe des données des deux études comparées.
- Données d'activité utilisées :
 - Pour l'approche « desk-based » : données reprises d'un fabricant de tablettes électroniques (Apple), incluant des extrapolations.
 - Pour l'approche « lab-based » : données issues de l'identification des composants d'un modèle de tablette électronique (Apple iPad2).
 - Données relatives à l'utilisation des équipements : dires d'experts principalement.
- **Données environnementales utilisées** : Utilisation d'ICV issus d'ecoinvent v2.2.
- Fiabilité et robustesse des données (d'activités, environnementales, ICV, etc.) d'après l'auteur :
 - Données d'activité sur la composition de la tablette relativement proches, mais l'approche « desk-based » nécessite beaucoup d'extrapolations, notamment sur la population des cartes électroniques.
 - Les mix électriques choisis sont différents entre les deux études, à cause du périmètre géographique différent.
 - Pas de commentaires sur les données relatives au scénario d'utilisation, pour la plupart sourcées sur d'autres publications des mêmes auteurs.
 - Données relatives à la fin de vie des équipements significativement différentes entre les deux études (périmètre géographique et filières de traitement différentes), malgré l'utilisation commune de la méthode de substitution pour la modélisation.
 - Données environnementales relatives aux équipements trop génériques, souvent trop vieilles, sans possibilité d'obtenir plus de détail de la part du fabricant.
- **Réutilisabilité des données** : données « desk-based » disponibles dans une autre publication de R. Hirschier ; données « lab-based » également publiées par M. Achachlouei. dans une autre publication. Ces données peuvent être réutilisées pour modéliser la production d'équipements électroniques.

5. Hypothèses-clés

L'hypothèse-clé de cette publication est que deux ACV réalisées par des auteurs différents peuvent être comparables.

Un scénario (étude EMPA) considère une durée de vie de 2 ans, une utilisation de 2h/jour, le reste du temps étant en mode veille. L'autre étude (KTH) considère une durée de vie de 3 ans, une utilisation de 14h/semaine (pas de précision sur le mode utilisé lors du temps restant). Dans les deux cas, on estime que 100 MB de données transitent sur l'appareil chaque jour (pour la lecture).

Pour les comparaisons, un scénario commun est établi, incluant une durée de vie de 3 ans, 2 h/jour d'utilisation et 22h/jour de veille, 41 min de lecture papier, un poids de 163 MB pour la version électronique, et 4,4 lecteurs par copie de la version papier.

6. Principaux résultats et chiffres-clés

- Concernant la comparaison entre modélisations de la tablette

Globalement, dans le cas où chaque étude conserve son scénario d'utilisation initial, la majorité des impacts sont concentrés sur la phase de production de la tablette, et sur la production des composants électroniques en particulier.

Si l'on prend un même scénario d'utilisation pour les deux cas d'études, les résultats totaux sont relativement proches pour quatre des six indicateurs considérés. Cependant, la répartition des impacts sur les différentes étapes du cycle de vie n'est similaire que sur l'indicateur « Réchauffement Climatique ». Sur les autres indicateurs sur lesquels une différence est constatée, est principalement mis en cause le niveau d'incertitudes des données pour l'approche « desk-

based ». Notamment, les impacts de la tablette « version EMPA » sont moindres que pour la tablette « version KTH » concernant l'indicateur *Metal Depletion* car l'inventaire de la tablette considère une population des cartes électroniques moins dense, équivalente à celle d'un PC portable. L'étude EMPA (« desk-based ») comporte aussi plus d'impacts pour la phase de transfert des données sur la tablette, car le mix électrique utilisé est différent de l'autre étude.

- Concernant la comparaison des deux études avec la lecture papier

Pour les deux études, sur quatre des six indicateurs considérés, le média numérique génère globalement moins d'impacts environnementaux que le média papier.

Pour l'indicateur Metal Depletion, l'étude KTH considère plus d'impacts pour la version numérique, car le média papier est modélisé sur des données spécifiques d'une seule usine et les quantités de métaux rares employés dans la tablette sont mieux estimées que dans l'approche « desk-based ». Pour l'indicateur Freshwater eutrophication, la différence s'explique par un scénario de recyclage plus favorable dans le cas de l'étude KTH (contexte suédois). Globalement, les bénéfices environnementaux liés à la fin de vie du papier sont significativement différents entre les deux études, malgré un principe de modélisation similaire à la base (substitution). Ceci s'explique par des scénarios de fin de vie différents entre les deux études.

7. Conclusions et discussions de l'auteur

Les deux études sont basées sur des approches de collecte des données différentes. Les tendances globales sur les impacts environnementaux sont pourtant similaires entre les deux études. En effet, sur la plupart des indicateurs considérés, **la lecture sur tablette génère moins d'impacts environnementaux que la version papier, pour le scénario d'utilisation envisagé**. Cependant, dans le détail (répartition des impacts sur le cycle de vie), des différences majeures sont observées, et ce malgré l'utilisation des mêmes données environnementales.

Les points d'attention suivants sont cités par les auteurs :

- Le niveau d'incertitudes global des deux études est jugé trop élevé pour pouvoir faire une comparaison quantitative ou une analyse d'incertitudes.
- Des analyses de sensibilité sur les différentes hypothèses d'utilisation (temps de consultation, temps d'utilisation par jour, durée de vie de la tablette, taille du magazine en version électronique) permettraient de voir si les résultats varient significativement entre média numérique et média papier.
- Sur l'application lecture papier, une étude considère des données spécifiques à un producteur en Suède, l'autre utilise des données génériques relatives à la Suisse ou l'Europe. Globalement, la localisation des procédés ayant lieu sur le cycle de vie des services étudiés est un paramètre-clé significatif, car le poste « consommation d'électricité » prédomine souvent dans les impacts environnementaux.
- Des hypothèses différentes sur le scénario de fin de vie (taux de recyclage, modes de traitement) entre les deux études amènent des variations significatives des résultats concernant la lecture papier.
- Le pays où ont lieu la production, la lecture et la fin de vie des systèmes étudiés est un paramètre significatif. Cela joue sur les impacts associés aux consommations d'électricité (différent mix électrique). Des analyses de sensibilité sur ce point seraient pertinentes.

8. Limites, points d'attention, besoins de travaux complémentaires

- Les auteurs sont des chercheurs reconnus dans le domaine de l'évaluation des impacts environnementaux des TICs.
- Les ICV relatifs à la production des produits électroniques nécessitent d'être améliorés, les données existantes étant obsolètes et basées que sur un seul modèle (tablette Apple). Ce dernier point n'est pas mentionné par les auteurs.
- Nous insistons sur la nécessité de réaliser des analyses de sensibilité sur les paramètres d'utilisation. Ce point est toutefois déjà soulevé par les auteurs.
- Il n'y a pas d'informations sur la modélisation associée au transfert de données sur la tablette. Par ailleurs, on notera l'importance d'avoir des ordres de grandeur réalistes sur les données (exemple : magazine en version électronique pesant 163 MB).
- Globalement, la publication apporte un regard pertinent sur les différentes façons de collecter des données sur la production des équipements TIC, et sur les difficultés rencontrées pour chaque approche, même si l'exercice de comparaison entre les deux ACV ne permet pas de faire de comparaison quantitative,

III.8. FICHE DE LECTURE N°49

« *Including second order effects in environmental assessments of ICT* », Miriam Börjesson Rivera, Cecilia Håkansson, Åsa Svenfelt⁷⁶, Göran Finnveden, Environmental Modelling & Software, 2014, 11 p.

Revue scientifique, revue indépendante, financements privés.

1. Objectifs et champ de l'étude

Cet article propose une catégorisation des effets indirects (appelés ici de second ordre) induits par les TICs. Les différentes catégories proposées sont illustrées dans le cas de l'étude de l'impact du e-commerce. Cet article ne propose pas une étude en tant que telle du e-commerce, mais cite des articles de la littérature (aux périmètres différents) pour illustrer chacune des catégories proposées d'effets indirects. Quelques pistes méthodologiques sont proposées pour quantifier l'impact des différentes catégories d'effets.

2. Périmètre de l'analyse

L'article propose une analyse uniquement qualitative des différents effets rebonds présents en général dans les TIC. L'exemple illustratif du e-commerce ne comporte pas d'analyse spécifique, mais cite les différents travaux de la littérature qui se sont penchés sur les effets indirects dans ce contexte-là. Il n'y a donc pas de définition du système, ni de ses frontières ou de son périmètre.

- Frontières du système : non applicable
- Périmètre géographique : Monde
- Périmètre géographique des données : non applicable
- **Périmètre temporel** : 2014 (études citées de 2001 à 2014)
- **Impacts environnementaux considérés** : Les effets directs (effets du premier ordre et effets de substitution) sont mentionnés mais ne font pas l'objet de l'article.
- **Types d'effets** : Impacts environnementaux directs -de premier ordre- et indirects –de second ordre- (y compris les effets rebond).
- Effets rebonds :
 - Directs : oui
 - Indirects : oui
 - Macroéconomiques : oui

3. Méthodologie employée

- Type de méthode d'évaluation environnementale utilisée : non applicable
- Méthode de collecte des données d'activité : non applicable

L'article cite des travaux de la littérature utilisant des méthodologies variées suivant les effets étudiés. L'approche utilisée ici est plutôt qualitative et ne fournit pas de détails quantitatifs issus de la littérature.

4. Données utilisées

- Données d'activité utilisées : non applicable
- Données environnementales utilisées : non applicable
- **Fiabilité et robustesse des données** (d'activités, environnementales, ICV, etc.) d'après l'auteur : non applicable
- **Réutilisabilité des données** : l'article présente un intéressant panel de la littérature sur l'étude des effets indirects pour le e-commerce, en exemple d'illustration de la catégorisation proposée.

⁷⁶ Auteur principal : CESC, Centre for Sustainable Communications and Division of Environmental Strategies Research, KTH Royal Institute of Technology, Drottning Kristinas väg 30, 100 44 Stockholm, Sweden.

5. Hypothèses-clés

Cette étude ne contient aucune hypothèse-clé.

6. Principaux résultats et chiffres-clés

Les auteurs insistent sur le fait qu'il n'existe pas de méthodologie standardisée permettant d'établir les impacts des effets indirects dans le domaine des TIC, que ce soit de manière quantitative ou qualitative, bien que ces effets puissent avoir un impact conséquent. Notamment, il n'y a pas de terminologie fixe pour décrire ces différents effets indirects et la catégorisation proposée dans cet article entre en contradiction avec les définitions que l'on peut trouver dans un certain nombre d'articles (cités dans cet article). Ces travaux constituent une première étape vers une meilleure définition et prise en compte des effets indirects des TIC.

L'article propose une catégorisation intéressante des différents types d'impacts environnementaux indirects, y compris de différents types d'effets rebond :

- Re- matérialisation (papier, CDs, etc.).
- Induction : l'achat du service ou produit est facilité grâce aux TIC (e-commerce par exemple), ce qui peut induire une consommation et une production plus grande.
- Effets rebonds économiques directs : coûts de transactions moins élevés qui peuvent entraîner une augmentation et une diversification de la demande.
- Effets rebonds économiques indirects : la diversification de la demande peut conduire le consommateur à obtenir le service à un prix moins élevé et il peut réinvestir cet argent dans d'autres produits ou services.
- Effets rebonds à l'échelle économique : les réajustements de prix et de quantité au niveau macro-économique peuvent générer une augmentation de la consommation en ressources en réponse aux effets directs et indirects.
- Rebonds temporels: le temps à un coût. Economiser du temps peut conduire à consommer plus d'énergie (trajet à pied au lieu de trajet en voiture par exemple). Utiliser une nouvelle technologie TIC nécessite un investissement en temps non négligeable au début, coût qui diminue avec le temps.
- Rebonds spaciaux : l'introduction d'un nouveau produit ou service utilisant les TIC peut conduire à utiliser plus ou moins d'espace qu'avant (modification des stocks, miniaturisation des équipements informatiques, etc.).
- Compréhension de la production et de la consommation : les TIC peuvent fournir des opportunités accrues de transparence et de communication directe entre producteurs et consommateurs (possibilité d'échanges commerciaux directs, de fournir plus d'informations de traçabilité, etc.).
- Effets d'échelle : les fournisseurs de services ou de produits peuvent devenir plus efficaces et réduire leur impact environnemental si leur production augmente grâce au TIC. Les consommateurs peuvent devenir plus efficace (consommer moins d'énergie et de temps) s'ils utilisent plus souvent un service donné (e-commerce par exemple).
- Changements de pratiques : les équipements informatiques sont de plus en plus intégrés à la vie quotidienne, modifiant ainsi nos pratiques.
- Effets rebond structurels : les TICs peuvent changer les préférences des consommateurs et opérer des réorganisations structurelles de la production.

Chaque catégorie fait intervenir des effets qui peuvent être positifs ou négatifs.

7. Conclusions et discussions de l'auteur

Les auteurs proposent de combiner les différentes approches trouvées dans la littérature pour obtenir des résultats plus pertinents ; en particulier, combiner des approches classiques (de type ACV par exemple) avec des approches socio-économiques incluant l'utilisation de scénarios « what-if » ou de modèles de comportement sociétaux individuels et collectifs. L'aspect pluridisciplinaire de la méthode semble indispensable pour produire des résultats intéressants et qui s'attaquent à tous les aspects du problème.

Les auteurs sont conscients qu'effectuer des analyses quantitatives pour chaque effet reste hors de portée à l'heure actuelle (tant d'un point de vue de l'exhaustivité que de la quantification), mais ils suggèrent de définir des méthodes d'analyse qualitative affichant clairement les incertitudes liées aux hypothèses de travail pour une meilleure transparence sur l'évaluation de l'impact de ces effets. En particulier, ils conseillent de présenter les impacts environnementaux d'un point de vue qualitatif en mettant à part les effets rebonds temporels pour souligner leur contribution relative au cours du

temps. Ceci permettrait des discussions plus constructives entre les parties impliquées pour limiter les effets négatifs des TIC.

8. Limites, points d'attention, besoins de travaux complémentaires

Cet article ne fait que proposer d'ouvrir la voie à une standardisation 1) des définitions des différents effets indirects et 2) des méthodologies à mettre en œuvre pour qualifier et quantifier leur impact. Il est nécessaire de poursuivre les recherches dans ce sens pour aboutir à un résultat applicable aux TIC afin d'avoir une vue d'ensemble des facteurs impliqués et de leurs rôles respectifs.

III.9. FICHE DE LECTURE N°51

« Indirect Rebound and Reverse Rebound Effects in the ICT-sector and Emissions of CO₂ », Cecilia Håkansson⁷⁷ and Göran Finnveden⁷⁶ Journal: Advances in Computer Science Research, 2015, 8 p.

Revue scientifique, financements publics, article révisé

1. Objectif et champ de l'étude

Cet article porte sur l'analyse des effets rebonds indirects, considérés comme négatifs, du secteur des TIC ainsi que les effets rebonds indirects inversés (dénomination donnée par les auteurs) considérés comme positifs. Ce dernier point est intéressant dans la mesure où il est rarement traité ailleurs et constitue donc une innovation digne d'intérêt. Les auteurs cherchent à évaluer les effets des changements dans le secteur des TIC comme par exemple les optimisations énergétiques, sur les émissions de CO₂.

2. Périmètre de l'analyse

Les effets suivants ont été caractérisés de façon quantitative ou qualitative :

- L'impact des TIC sur les émissions de CO₂ des ménages: évolution de 1993 à 2008 en fonction de l'augmentation d'achat en produits TIC ;
- Les effets rebonds indirects : l'efficacité énergétique des TIC permet de réduire la facture énergétique des ménages. Les auteurs étudient l'impact d'achats de produits supplémentaires par les ménages, liées aux économies faites par les TIC ;
- Les effets rebonds "inversés" : l'effet rebond n'est pas lié à la réduction de la facture énergétique induite par les TIC mais plus à des changements de services ou de catégories de produits.

Frontières du système	Amont (fabrication)	✓ Uniquement émissions globales de CO ₂
	Utilisation	✓ Pour la consommation des TIC des ménages
	Aval (fin de vie)	X
Périmètre géographique		Suède
Impacts environnementaux considérés	Changement climatique	✓ émissions de CO ₂
	Consommation d'énergie	X
	Multi-indicateurs	X
Types d'effets	1 ^{er} ordre (directs)	✓
	2 nd ordre (indirects)	X
	3 ^{ème} ordre (systémiques)	X
Effets rebonds	Directs	X
	Indirects	✓ positifs et négatifs
	Macroéconomiques	✓ effets sur les achats des ménages en Suède

3. Méthodologie employée

- **Type de méthode d'évaluation environnementale utilisée** : Modèle Input/output étendu : prise en compte des émissions de CO₂ en plus des données économiques

Pour l'analyse des effets rebonds, quatre scénarios ont été étudiés. Chaque scénario part de l'hypothèse que l'argent économisé par les ménages, avec des produits plus efficaces énergétiquement, est tout de suite dépensé. Les scénarios diffèrent sur les hypothèses suivantes:

- 10% de réduction dépensée pour des produits de même type mais moins cher

⁷⁷ KTH Royal Institute of Technology, Centre for Sustainable Communications (CESC), Stockholm, Sweden

- Dépense en accord avec l'évolution des dépenses des ménages en 2006
- Dépense uniquement pour acheter des TIC
- Dépense pour d'autres types de consommation
- **Méthode de collecte des données d'activité** : Données collectées à partir des statistiques fournies par les instances économiques suédoises (Swedish National Accounts, Swedish Environmental Accounts) : consommation des ménages, achat des TIC, évolution du budget des ménages. Ce sont des données globales pour la Suède en fonction de différentes catégories de produits.

4. Données utilisées

- Données d'activité utilisées :

Les données utilisées sont issues de la comptabilité environnementale Suédoise et des comptes nationaux pour le calcul des émissions de CO₂ de la consommation des ménages. À partir de ces données, les auteurs ont mesuré "l'intensité" des émissions CO₂ en combinant les émissions par tonne d'une catégorie de produits donnée en fonction des dépenses d'un ménage.

- **Données environnementales utilisées** : données émissions de CO₂ globales pour la Suède fournies par les différentes instances citées précédemment.
- **Fiabilité et robustesse des données** (d'activités, environnementales, ICV, etc.) d'après l'auteur : Données macro représentatives de la Suède et provenant de sources reconnues
- **Réutilisabilité des données** : Applicable uniquement pour la Suède, par contre méthodologie/type de données adaptable à d'autres pays. Les données utilisées peuvent être récupérées auprès des instances équivalentes dans le pays considéré.

5. Hypothèses-clés

Catégories de produits : 45 sélectionnés (agrégation de 146 catégories initiales présentées par la comptabilité suédoise. Trois catégories concernent les TIC : CO913 Personal computers, CO914 Recording media, CO915 Repair of audio-visual equipment

Les effets rebonds sont définis en pourcentage selon la formule suivante : *Rebound effect (pourcent)* = $(1 - ACE/PCE) * 100$

Avec PCE correspondant à la diminution potentielle des émissions de CO₂ due aux améliorations de l'efficacité (changements potentiels des émissions sans effet rebond) et ACE le changement effectif des émissions de CO₂ en incluant les effets rebonds.

6. Principaux résultats et chiffres-clés

La production des TIC a énormément augmenté entre 1993 et 2008 : 71,6% pour la catégorie des ordinateurs personnels. Pour la même période, les émissions de CO₂ par SEK (unité monétaire suédoise) des TIC n'ont fait que diminuer : réduction de 48,2% pour les ordinateurs personnels. Cependant, si on combine quantité vendue et émissions de CO₂, les émissions liées aux TIC ont augmenté sur cette même période.

Les émissions de CO₂ par SEK générées par les TIC est faible par rapport aux autres postes de dépense des ménages comme par exemple l'électricité. D'autre part, il existe une forte dépendance entre les revenus des ménages et les émissions de CO₂ générées par ces ménages. En effet plus les revenus sont importants, plus les émissions augmentent compte tenu des postes d'achat des ménages et de la typologie de produits achetés.

Les effets rebonds:

- si de grands changements sur les revenus des ménages surviennent, alors il y a des impacts majeurs sur les émissions CO₂ mais également sur les effets rebonds compte-tenu du changement de paradigme d'achat, c'est-à-dire que l'argent économisé va être consacré à l'achat de produits plus émetteurs de CO₂.
- pour le scénario d'effets positifs ou inversés, une réduction d'achats dans une catégorie de produits liée au changement de paradigme des dépenses des ménages peut entraîner une diminution importante des émissions CO₂.

7. Conclusions et discussions de l'auteur

Les auteurs suggèrent que les effets rebonds peuvent être de grande ampleur, surtout s'ils sont liés à la phase de production du matériel numérique :

- mais si l'effet rebond provient de l'électricité consommée à l'usage du matériel il sera plus faible.
- en revanche puisque le pouvoir d'achat est détourné de biens et services polluants grâce à des achats accrus de produits moins polluants, un effet rebond inversé important pourrait survenir.

Les auteurs notent l'importance d'étudier les effets rebonds et inversés sur d'autres indicateurs environnementaux et soulèvent les manques de la littérature sur ce point.

8. Limites, points d'attention, besoins de travaux complémentaires

- **Limite principale de l'étude** : une hypothèse forte a été faite sur les données de production des produits fabriqués dans d'autres pays et importés en Suède. Elles ont été considérées comme si cette production avait eu lieu en Suède. Ceci a un impact fort sur les émissions de CO₂ car les mix énergétiques sont différents selon les pays. Certains mix basés sur la production du charbon (ex : Chine) ont des émissions plus importantes que des mix basés sur la production hydroélectrique (ex : Suède).
- **Autre Limite** : Les effets rebonds ont été focalisés sur un indicateur unique : le CO₂, comme la majorité des études de la littérature. Les émissions de gaz à effet de serre dans leur ensemble ne sont pas considérées.
- **Besoin de travaux complémentaires** :
 - développer un modèle input/output qui inclut des matrices de données pour plusieurs régions; analyser les effets rebonds pour d'autres catégories d'impact; développer des méthodes prenant en compte d'autres effets rebonds indirects que ceux étudiés; développer d'autres méthodologies que les modèles input/output pour comparer les résultats obtenus et augmenter la robustesse des résultats ;
 - La période couverte par l'étude (2006) n'inclut pas les impacts des smartphones/tablettes ;
 - Ancienneté des données ;
 - Certaines conclusions pourraient être sensiblement modifiées ;
 - Améliorer les données sur la phase de fabrication ;
 - Étudier d'autres catégories d'impact ;
 - Combiner avec une ACV.

III.10. FICHE DE LECTURE N°55

“*The Rebound Effect of Information and Communication Technologies Development in the European Union*”, Piotr Werner⁷⁸, *Appl. Spatial Analysis* 8:409–423, 2015, 15 p.

Article publié dans un journal scientifique, revue indépendante, financements publics.

1. Objectifs et champs de l'étude

Cette étude cherche à identifier les facteurs, notamment géographiques, qui favorisent le déploiement des TIC dans les foyers européens et à faire le lien avec les conséquences sur la consommation d'énergie de ces ménages (et d'en déduire un effet rebond -ER- lié aux TIC).

2. Périmètre de l'analyse

Les effets rebond sont estimés à l'échelle des pays de l'Union Européenne (EU-27) à partir des éléments suivants : évolution entre 2006 et 2012 des variables d'accès des ménages à internet, du nombre d'abonnements internet filaire haut débit chez les ménages, et de leur consommation d'électricité.

3. Méthodologie employée

L'objectif est de regarder ce qui se passe entre 2006 et 2012 en matière de consommation d'énergie lorsque les TIC se sont fortement développés en Europe. Selon la conception retenue de l'ER dans l'article, celui-ci apparaît si la consommation d'énergie ne baisse pas suite à la diffusion des TIC dans tous les pays membres. L'auteur semble penser que plus fort est le découplage entre ces deux grandeurs, plus fort est l'ER.

Pour ce faire, l'auteur utilise successivement trois approches méthodologiques destinées à :

- estimer un effet résiduel (régional) qu'ils imputent à un effet rebond : analyse structurelle-résiduelle ;
- identifier les facteurs principaux permettant d'expliquer les variances de l'ensemble des variables analysées : analyse en composantes principales ;
- modéliser les effets rebond pour chaque pays de l'UE et en proposer des représentations graphiques.

Les méthodes sont détaillées ci-dessous (la première notamment).

- L'analyse structurelle-résiduelle (ASR - shift and share technique) est utilisée dans un premier temps.

« L'analyse structurelle-résiduelle consiste à mesurer, dans l'écart observé dans la valeur d'un indicateur au plan local et au plan national, la part attribuable à un « effet structurel » (généralement la structure du tissu économique local par secteurs), afin d'isoler un « effet résiduel » (souvent appelé « effet régional », en ce qu'il est supposé mesurer ce qui est imputable à l'offre spécifique du territoire sur la variable étudiée, source : <http://www.credoc.fr/pdf/Rech/C205.pdf>). L'effet structurel correspond à la part de l'écart à la moyenne sur la variable étudiée imputable à la variable régionale étudiée. fonction du poids relatif de chaque activité. La différence entre cette valeur et la valeur observée constitue l'expression de la dynamique propre de la région, le « fait régional ». Dans le cas de cet article, la consommation énergétique nationale observée est appliquée à chacun des secteurs observés (voir Fig. 1 de l'article, p. 411) : internet filaire à haut débit (indicateur = nombre d'abonnements), services / ménages, industrie, transport.

Pour représenter l'intensité d'utilisation des TIC, les deux variables suivantes sont utilisées (période = 2006-2012) : Part des abonnements internet filaire à haut débit chez les ménages et part des ménages ayant un accès à internet dans l'UE27 (NUTS 0,1,2) ; Une variable proxy est ajoutée pour représenter la croissance attendue de la demande en produits et services TIC (et donc en énergie) : le nombre total de ménages sur la période (il n'y avait pas de données assez détaillées en matière de consommation d'énergie par les ménages de chaque pays).

Suite à l'ASR, l'auteur identifie 9 variables (part nationale, industrielle et régionale) pour l'évolution des accès à internet, l'évolution des larges bandes passantes, et l'évolution de la consommation énergétique. Ces 9 variables sont estimées pour 27 pays (cf. Fig. 1). À partir de ces données, il utilise une **ACP** (analyse en composantes principales) qui lui permet de tirer 3 facteurs expliquant 96% de la variance. Il modélise alors les tendances régionales à partir de ces trois facteurs, auxquels il donne un « sens » à partir des contributions des variables initiales (cf. ses tableaux 1 et 2).

⁷⁸ Faculty of Geography and Regional Studies, University of Warsaw, Krakowskie Przedm.30

4. Données utilisées

- Consommation d'électricité par l'industrie, les transports et les services ménagers : Eurostat data, Eurostat table code : ten00094.
- 9 variables: 3 données de base (accès internet, connexion à large bande, consommation d'énergie) sur 3 types de regroupements différents (tendance au prorata de l'échelle supérieure NS, tendance "sectorielle" IM, tendance régionale "RS" (déduite)).
- Beaucoup de variables proxy, car les données désagrégées ne sont pas disponibles.
- La qualité des données effectivement utilisées n'est pas commentée par l'auteur.

5. Hypothèses-clés

- H1 : la croissance du secteur des TIC (2005-2015) dans les pays membres de l'UE est le principal facteur d'accroissement de la consommation d'électricité.
- H2 : le rapport entre croissance des TIC et l'augmentation de la consommation d'électricité relève plus de l'ER que d'une simple stimulation de la demande en services énergétiques.

6. Principaux résultats et chiffres-clés

- L'auteur donne également une explication du rôle des TIC dans l'ER : elles favorisent le déplacement d'objectif, qui se produit lorsque les moyens mis en œuvre pour atteindre un objectif deviennent plus importants que l'objectif en soi. Cela peut expliquer la forte croissance des 'TIC pour les TIC', par exemple l'acquisition du dernier iPhone visant plus à tenir (ou acquérir) un statut social qu'à téléphoner. En outre, pour l'auteur, les TIC devraient en tant que nouvelles technologies permettre de réduire la consommation d'énergie, mais elles ne le font pas, et cela pour plusieurs raisons:
 - Les TIC sont perçues par les acteurs économiques comme un moyen d'améliorer les performances économiques ;
 - Il existe de nombreuses sociétés de services informatiques qui poussent au déploiement des TIC ;
 - Les TIC contribuent à l'accroissement des flux de connaissance, qui tirent la croissance des économies des pays membres ;
 - En tant que technologies génériques, les TIC sont présentes dans de nombreux secteurs dont elles stimulent la croissance ;
 - Les TIC amplifient les activités humaines, et améliorent aussi les institutions économiques et la manière dont les activités économiques sont réalisées.
- Les données mettent en évidence une claire différenciation spatiale des variables étudiées pour les pays membres de l'UE₂₇, et font apparaître de forts ERs pour des groupes spécifiques de pays.

7. Conclusions et discussions de l'auteur

- Une Cette étude a permis de révéler l'empreinte spatiale des effets rebonds (très forte en France, au RU, et en Allemagne) et leurs caractéristiques. Les auteurs recommandent que les effets rebonds soient pris en compte lorsque l'on évalue les bénéfices environnementaux des TIC.
- Le principal intérêt de cet article est qu'il propose une analyse des ERs macroéconomiques et surtout une représentation graphique des ERs par pays. Mais la méthode comporte d'importantes limites, notamment parce qu'elle exige pour être capable de permettre de formuler des conclusions robustes des données désagrégées qui ne sont pas collectées pour les pays de l'UE₂₇

8. Limites, points d'attention, besoins de travaux complémentaires

L'exploitation de cet article dans un autre travail paraît compromise en l'état, du fait du manque de clarté d'un certain nombre de points essentiels dans l'article, notamment :

- La définition des variables clés utilisées dans l'analyse structurelle-résiduelle ;
- L'utilisation de cette approche pour identifier des effets rebond liés aux TIC ;
- L'interprétation des trois variables explicatives de l'analyse en composante principale.

Par ailleurs, l'hypothèse selon laquelle le résidu régional s'explique uniquement par les effets rebond mériterait d'être validée (d'autant plus que cette période recouvre des événements majeurs comme la crise économique).

- À noter que cela ne signifie pas que les résultats soient incorrects, mais un travail complémentaire serait à conduire avec des données non désagrégées et une analyse plus fine sur la validation des hypothèses.

Soulignons cependant l'originalité de l'approche qui associe plusieurs méthodes statistiques à une représentation graphique par pays de l'effet rebond structurel.

III.11. FICHE DE LECTURE N°69

« *Effects of Internet-based multiple-site conferences on greenhouse gas emissions* », Vlad Coroama⁷⁹, Lorenz M. Hilty^{69,80}, Martin Birtel⁶⁹, Telematics and Informatics, 2011, 13 p.

Article publié dans un journal scientifique, revue non-indépendante, financements publics.

1. Objectifs et champs de l'étude

Cette étude cherche à évaluer les impacts environnementaux de deux conférences (organisées à la suite) entre Davos (Suisse) et Nagoya (Japon). En particulier, un focus est fait entre les impacts de la substitution entre le trajet jusqu'au lieu de conférence et le service de visio-conférence. Enfin, un sondage est réalisé sur la satisfaction des participants vis-à-vis du service afin de s'assurer de l'équivalence du service rendu avec la conférence faite en un seul lieu.

2. Périmètre de l'analyse

Frontières du système	Amont (fabrication)	✗ l'exclusion est justifiée
	Utilisation	✓ Transport
	Aval (fin de vie)	✗ l'exclusion est justifiée
Périmètre géographique		Suisse et Japon
Impacts environnementaux considérés	Changement climatique	✓ CO ₂ uniquement
	Consommation d'énergie	✗
	Multi-indicateurs	✗
Types d'effets	1er ordre (directs)	✗
	2nd ordre (indirects)	✓
	3ème ordre (systémiques)	✗
Effets rebonds	Directs	✓
	Indirects	✗
	Macroéconomiques	✗

Les frontières du système n'incluent que les impacts liés aux déplacements des participants. Des effets rebonds sont comptabilisés via le fait que la conférence multi-sites attire des participants qui n'auraient pas participé autrement. Les impacts des déplacements sont estimés significativement supérieurs aux impacts des autres activités de la conférence, sur la base d'une précédente étude de Hirschler et Hilty (2002)⁸¹. Les frontières du système excluent donc :

- Les impacts associés à l'organisation de la conférence et aux séjours dans les hôtels, par manque de données ;
- Les impacts directs associés aux TICs pour organiser la visio-conférence (logiciel « Telepresence » de Steuer) ;
- Les impacts liés aux autres activités de la conférence (par exemple la pochette de la conférence) ;
- Les effets rebonds liés aux activités autres que celles de déplacement.

3. Méthodologie employée

- **Méthodologie de l'article** : Comparaison d'une situation « AS-IS » représentant le cas effectif (visio-conférence) à deux scénarios alternatifs où les participants se seraient déplacés à Nagoya ou à Davos uniquement. Ceci permet de n'évaluer que les points de différence entre les cas envisagés.
- **Type de méthode d'évaluation environnementale utilisée** : Empreinte carbone focalisée uniquement sur les émissions de CO₂, estimées majoritaires par les auteurs dans le cadre d'une évaluation des impacts du transport.
- **Méthode de collecte des données d'activité** : Réalisation d'un sondage en ligne à l'intention des participants de chaque lieu de conférence.

⁷⁹ EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Technology and Society Lab, St. Gallen, Switzerland

⁸⁰ University of Zürich, Department of Informatics, Zürich, Switzerland

⁸¹ Hirschler, R. Hilty, L.M., 2002. Environmental impacts of an international conference. Environmental Impact Assessment Review 22.

4. Données utilisées

- Données d'activité utilisées :
 - Réponses aux sondages des participants sur les déplacements réalisés (en termes de points d'étapes atteints et de modes de transport utilisés) ;
 - Utilisation de sites internet de calcul du kilométrage réalisé pour estimer les distances parcourues ;
 - Taux de réponse de 59,2% pour Davos et 43,4% pour Nagoya. Extrapolation à l'ensemble des participants pour les calculs environnementaux ;
 - Pour les scénarios alternatifs, utilisation d'hypothèses sur ce que les participants auraient fait si la conférence avait eu lieu à un seul endroit. Notamment, si la conférence avait eu lieu uniquement à Davos (resp. Nagoya), tous les participants de Davos (resp. Nagoya) y auraient participé. Aucun nouveau participant ne se serait joint à la conférence. Pour les participants à moins de 1 000 km du lieu de la conférence, le train aurait été le mode de transport utilisé (hypothèse conservatrice). Enfin, une extrapolation a été faite sur le total des participants sur la base du taux de réponse de la question de ce qu'ils auraient fait sans visio-conférence.
- **Données environnementales utilisées** : Utilisation des facteurs d'émissions de CO2 d'ICV issus d'ecoinvent (version non précisée) pour la voiture, le train, l'avion court-courrier et l'avion long-courrier.
- Fiabilité et robustesse des données d'après l'auteur :
 - Incertitudes mentionnées sur l'évaluation des impacts liés au transport, variable d'un itinéraire à un autre ;
 - Le taux de réponse aux questions est inférieur à 60%, ce qui nécessite d'extrapoler le comportement des participants n'ayant pas répondu ;
 - Mention de trois biais sur les hypothèses relatives au scénario d'utilisation : écart entre les réponses des répondants et les non-répondants au sondage ; écart entre les déclarations des répondants et leur comportement réel ; incertitudes sur les itinéraires et les modes de transport utilisés. Les deux premiers biais n'ont pas pu être évalués. Le dernier est justifié par l'utilisation d'hypothèses conservatrices (favorisant le scénario alternatif) ;
- **Réutilisabilité des données** : Seuls les résultats consolidés des distances parcourues par mode de transport sont disponibles, les données sont donc peu réutilisables directement.

5. Hypothèses-clés

La première hypothèse-clé de cette publication est que les activités de transport représentent la grande majorité des impacts environnementaux associés à une conférence scientifique. Cette hypothèse-clé est justifiée par un travail bibliographique sur des études plus anciennes relatives à la question.

La seconde hypothèse-clé est que la visio-conférence apporte un service équivalent à celui d'une conférence classique. Ceci est d'autant plus difficile à évaluer que les deux services sont multifonctionnels : échanges d'informations, réseautage, liens sociaux, tourisme, etc. Ceci est vérifié via un sondage évaluant le taux de satisfaction des utilisateurs.

6. Principaux résultats et chiffres-clés

Le tableau suivant résume les principaux résultats de l'étude.

Paramètre	Davos	Nagoya	Total
A. Nombre total de participants à la conférence organisée sur les deux sites	372	159	531
B. Dont Nombre de voyages évités grâce à la visio-conférence⁸²	76	79	155
C. Dont Nombre de participants « supplémentaires » grâce à la visio-conférence (effet rebond) (=A-B)⁸³	293	83	376
D. Nombre de participants en l'absence de visio-conférence (scénarios alternatifs)⁸⁴ (=A+B)	448	238	N/A

⁸² Autrement dit, le nombre de personnes qui auraient tout de même fait le déplacement pour assister à la conférence sur l'autre site. Par exemple, en l'absence de visio-conférence, 76 personnes auraient tout de même fait le trajet de Nagoya jusqu'à Davos.

⁸³ Si l'on considère une substitution entre le scénario « AS-IS » et les scénarios alternatifs. Par exemple, 372 personnes ont effectivement participé à la conférence à Davos. 79 d'entre eux auraient fait le déplacement jusqu'à Nagoya si la conférence avait eu lieu là-bas. Il y a donc 372-79=293 participants « induits » par la visio-conférence à Davos.

Paramètre	Davos	Nagoya	Total
Impact des participants (scénario AS-IS) (t CO₂)	84	35	119
Impacts des participants en l'absence de visio-conférence (scénarios alternatifs) (t CO₂)	235	189	-
Gains environnementaux permis par la visio-conférence (t CO₂) <i>(différence entre scénario « AS-IS » et scénarios alternatifs)</i>	-151	-154	-

Comme le montre le tableau ci-dessus, la visio-conférence permet des gains en termes d'émissions de CO₂ significatifs par rapport aux deux cas alternatifs où la conférence n'a lieu qu'à Davos ou à Nagoya. Ces gains sont de respectivement 64% par rapport au scénario alternatif Davos, et de 81% par rapport au scénario alternatif Nagoya.

En ce qui concerne la satisfaction des usagers, le service de visio-conférence est positivement accueilli, non seulement pour la fonction principale (échange d'informations scientifiques), mais également pour les autres fonctions (réseautage et autre).

7. Conclusions et discussions de l'auteur

L'étude est basée sur une approche comparative/relative entre le cas avec visio-conférence et les cas sans visio-conférence. La principale conclusion est que la visio-conférence permet de réduire les émissions de GES, malgré un fort effet rebond en termes de déplacements. Le format permettant d'attirer plus de participants, cela signifie que le ratio d'émissions de CO₂ par tête est d'autant plus amélioré avec la visio-conférence. Malgré les différents biais évoqués par les auteurs, cette conclusion est selon eux univoque.

La généralisation de ce cas d'étude à tous les cas de visio-conférences reste à vérifier. Généraliser les réductions d'impacts globales des visio-conférences multi-continentales n'apparaît pas réalisable, même si on peut faire l'hypothèse que la réduction des trajets aériens permet de générer des gains environnementaux suffisants par rapport aux effets rebonds.

Un autre point de discussion est la faisabilité d'une telle démarche, dans le sens où il faut spécifiquement organiser la conférence en tenant compte des décalages horaires entre les différents lieux d'organisation.

Globalement, on peut estimer que l'expérience est satisfaisante, dans le sens où elle a permis d'élargir le panel de participants, et ce à coût économique et environnemental réduit.

8. Limites, points d'attention, besoins de travaux complémentaires

- Les auteurs sont des chercheurs reconnus dans le domaine de l'évaluation des impacts environnementaux des TICs. Cependant, l'article n'a pas fait l'objet d'une revue indépendante : il a seulement été revu par un collègue des auteurs.
- Dans la mesure où des données ecoinvent sont utilisées, une approche ACV aurait pu être menée. De même, l'analyse a le mérite d'être simple, étant donné son périmètre restreint (impacts du transport uniquement). Cependant, bien que les auteurs argumentent leurs choix méthodologiques, une étude plus exhaustive en termes d'effets et de types d'impacts couverts aurait le mérite d'améliorer la robustesse de l'étude.
- Le facteur d'émission relatif aux trajets en train ne semble pas considérer de spécificité géographique (quid des trains électriques ?).
- Les impacts environnementaux liés à l'effet rebond des participants supplémentaires grâce à la visio-conférence ne sont pas indiqués dans le détail. Cela permettrait de distinguer dans chaque cas d'étude les effets indirects bénéfiques de la visio-conférence (trajets évités entre Davos et Nagoya) des effets rebonds négatifs (plus de participants donc plus de trajets courte-distance).
- Globalement, la publication utilise une méthodologie intéressante et déjà déployée sur d'autres évaluations de gains environnementaux permis par les TIC, appliquée sur un poste d'émissions jusqu'à présent peu abordé par la littérature. Cependant, l'emploi d'une méthodologie environnementale plus exhaustive aurait été souhaitable.

⁸⁴ Les deux valeurs fournies ici indiquent le nombre de participants si la conférence avait eu lieu sur un autre site. Par exemple, si la conférence avait eu lieu à Davos uniquement, 448 personnes auraient participé. Ce chiffre est inférieur au nombre de participants (531) de la conférence organisée en visio-conférence à la fois à Davos et Nagoya.

III.12. FICHE DE LECTURE N°71

« *Business meetings at a distance – decreasing greenhouse gas emissions and cumulative energy demand?* », Clara Borggren⁸⁵⁸⁶, Asa Moberg⁶⁹⁷⁰, Minna Räsänen⁸⁷⁸⁸, Göran Finnveden⁶⁹⁷⁰, Journal of Cleaner Production, 2013, 14 p.

Article publié dans un journal scientifique, revue indépendante, financements publics privés (sociétés de média suédoises).

1. Objectifs et champs de l'étude

Cette publication étudie les impacts environnementaux (énergie et émissions de GES) de différentes configurations de réunion par visioconférence en comparaison de réunions physiques ayant nécessité un déplacement par voiture, train ou avion, en Suède. L'étude adopte une approche cycle de vie complète et emploie une méthodologie ACV attributionnelle « classique » ainsi qu'une approche conséquentielle.

2. Périmètre de l'analyse

Différents cas d'études sont abordés et comparés les uns avec les autres, dans le cas d'une réunion entre Stockholm et Göteborg :

- Visioconférence uniquement avec l'ordinateur personnel, ou avec un écran de 40 pouces, ou avec un logiciel de télé-présence et deux écrans de 65 pouces ;
- Voyage en voiture, en train ou en avion.

Frontières du système	Amont (fabrication)	✓
	Utilisation	✓
	Aval (fin de vie)	✓
Périmètre géographique		Suède
Impacts environnementaux considérés	Changement climatique	✓
	Consommation d'énergie	✓ Consommation d'énergie primaire (CED)
	Multi-indicateurs	✗
Types d'effets	1 ^{er} ordre (directs)	✓
	2 nd ordre (indirects)	✓ Déplacements dans le cas des réunions physiques, Inclusion des impacts liés à l'occupation des salles de réunion
	3 ^{ème} ordre (systémiques)	✗
Effets rebonds	Directs	✓ Augmentation de la fréquence de réunions avec la visioconférence
	Indirects	✗
	Macroéconomiques	✗

3. Méthodologie employée

- **Type de méthode d'évaluation environnementale utilisée** : ACV simplifiée (*screening LCA*) bi-indicateur utilisant dans un premier temps une approche attributionnelle et dans un second temps une approche conséquentielle. Dans cette seconde approche, deux cas d'études d'entreprises fictives sont étudiés afin d'estimer les impacts

⁸⁵ Division of Environmental Strategies Research – fms, Department of Urban Planning and Environment, School of Architecture and the Built Environment, KTH Royal Institute of Technology, Drottning Kristinas Väg 30, 100 44 Stockholm, Sweden

⁸⁶ CESC – Centre for Sustainable Communications, KTH Royal Institute of Technology, 100 44 Stockholm, Sweden

⁸⁷ Department of Media Technology and Interaction Design, School of Computer Science and Communication, KTH Royal Institute of Technology, 100 44 Stockholm, Sweden

⁸⁸ School of Communication, Media and IT, Södertörn University, 141 89 Huddinge, Sweden

environnementaux à grande échelle et les bénéfiques (éventuels) sur une année apportés par les divers systèmes de visioconférence.

- **Méthode de collecte des données d'activité** : Collecte des données achevée via différents moyens :
 - Formulation d'hypothèses et mobilisation de quatre sociétés de média suédoises, pour valider, compléter ou modifier les données ;
 - Utilisation de données bibliographiques, soit issues de publications scientifiques, soit publiées par des entreprises du secteur des TIC (Skype, Cisco, par exemple) ;
 - Reprise de données d'activité issues de la base ecoinvent.

4. Données utilisées

- Données d'activité utilisées :
 - Formulation de scénarios d'utilisation pour chacun des cas d'utilisation des équipements informatiques, validés par un panel d'entreprises du secteur des médias.
 - Différentes typologies de fréquence d'utilisation du système de visioconférence sont distinguées selon les scénarios : 2h/semaine ou 20h/semaine.
 - Constitution des deux scénarios d'utilisation à l'échelle de l'entreprise selon les discussions avec les entreprises impliquées dans l'étude.
 - Pour l'ACV conséquentielle, utilisation de deux mix électriques suédois marginaux (un « CO₂-cap » et un « high-gas price ») datant de 2003.
- **Données environnementales utilisées** : Utilisation des ICV issus d'ecoinvent 2.0, sauf pour certains inventaires d'équipements informatiques (écrans LCD) où les ICV plus récents de la base ecoinvent 2.2 ont été repris. Mix électrique suédois repris d'ecoinvent 2.0 et datant de 2007. Les adaptations suivantes sont également à signaler :
 - Les ICV relatifs à la phase d'utilisation et au déplacement en train, qui génèrent des consommations d'électricité, ont été adaptés selon le mix électrique suédois. En revanche, dans les cas où des consommations d'électricité surviennent en « background », les données n'ont logiquement pas été adaptées.
 - La modélisation de la production des écrans LCD 40 et 65 pouces a été extrapolée selon un ratio de taille avec les écrans 17 pouces.
 - Les impacts des substances autres que le CO₂ sur le changement climatique du transport aérien sont estimés en tant qu'analyse de sensibilité (impacts doublés par rapport à ceux du CO₂ seul).
- Fiabilité et robustesse des données d'après les auteurs :
 - Les résultats de l'étude nécessitent d'être interprétés avec précaution dans la mesure où il s'agit d'une *screening LCA*. Par ailleurs, les bénéfiques et impacts environnementaux liés au recyclage des métaux en fin de vie sont exclus.
 - On pourrait affirmer que les réunions à distance durent moins longtemps, mais les auteurs adoptent une approche conservatrice en les estimant identiques à celles des réunions physiques (3h).
 - Les données suivantes sont particulièrement incertaines : données relatives à la modélisation des écrans LCD (l'ICV de base ne concerne qu'un écran de 17 pouces), consommation d'énergie pour le transit des données par internet.
- **Réutilisabilité des données** : La traçabilité et la transparence des données sont globalement bonnes et pourraient permettre une réutilisation. Cependant, elles sont désormais assez anciennes, en particulier concernant les données environnementales. Certaines données sont spécifiques au contexte suédois.

5. Hypothèses-clés

L'hypothèse-clé de cette étude est que la visioconférence et la réunion en face-à-face rendent un service équivalent.

6. Principaux résultats et chiffres-clés

- Concernant la comparaison entre les différents services de visioconférence

La comparaison est faite selon deux axes d'analyse : l'équipement utilisé et la fréquence d'utilisation. L'équipement le plus simple (visioconférence à l'aide d'un simple ordinateur personnel et un logiciel type Skype) est celui qui comporte le

moins d'impacts environnementaux. Ceci s'explique par la plus faible quantité d'équipements utilisés et par la moindre qualité du service rendu (moindre qualité de vidéo et de son). Les impacts sont d'autant plus importants dans les cas où la fréquence d'utilisation des équipements est faible : les impacts de la production et de la fin de vie des équipements sont alors moins amortis sur la phase d'utilisation.

Globalement, le principal contributeur aux impacts du cycle de vie est la production de l'écran LCD, puis la production des autres équipements de l'ordinateur utilisé. Avec l'augmentation de la fréquence d'utilisation des équipements, l'impact de l'utilisation des équipements et d'Internet devient significatif (surtout pour l'indicateur CED). L'impact associé au chauffage et à l'éclairage des salles de réunion est faible mais non négligeable selon les cas étudiés.

- Concernant la comparaison visioconférence et réunion physique

La comparaison entre avion ou voiture d'un côté, et visioconférence de l'autre, est favorable à la visioconférence dans tous les cas de figure étudiés, pour le changement climatique et la CED. En revanche, pour le cas du train, la comparaison est plus nuancée : les systèmes de visioconférence avec écran séparé (téléprésence) et fréquence d'utilisation faible présentent un moins bon bilan environnemental. Pour une analyse de sensibilité multipliant par 10 la consommation d'électricité associée à l'utilisation d'Internet, la comparaison est encore moins favorable pour les systèmes de visioconférence plus élaborés.

- Concernant la comparaison à l'échelle des deux entreprises fictives

L'entreprise A utilise fréquemment les services de visioconférence (20h par semaine), et pratique même plus de réunions grâce à cela. En comparaison des réunions avec déplacement en avion ou en voiture, les gains environnementaux sont significatifs sur les deux indicateurs considérés (-110 t CO₂ eq. et -45 t CO₂ eq. respectivement). Pour le train, l'écart est toujours favorable à la visioconférence mais moins significatif selon le mix marginal⁸⁹ considéré (différence quasi-nulle dans le cas d'un mix marginal fortement décarboné).

L'entreprise B utilise le système de visioconférence une fois par semaine seulement (2h par semaine), le service étant mal approprié par les employés. La comparaison avec la voiture ou l'avion est toujours favorable à la visioconférence, mais les écarts sont nettement plus faibles (-7 t CO₂ eq. et -9 t CO₂ eq. respectivement). En ce qui concerne le train, les bénéfices environnementaux sont quasi-nuls voire négatifs, en particulier pour le cas du mix marginal fortement décarboné.

7. Conclusions et discussions de l'auteur

Cette étude est l'une des rares à adopter une approche cycle de vie complète, et utilise des données aisément accessibles (ecoinvent). Elle permet de fournir des ordres de grandeur des gains environnementaux potentiels de la visioconférence à l'aide d'étude de cas. Cependant, si des technologies numériques plus avancées sont utilisées les impacts environnementaux augmentent. Dans le cas où un déplacement est envisagé, le train est à privilégier. L'augmentation de la fréquence d'utilisation des équipements permet d'amortir les impacts de la phase de production. Les points suivants sont également discutés :

- La localisation géographique est un paramètre crucial pour l'évaluation. Les résultats de l'étude ne peuvent pas être généralisés car le mix électrique de la Suède est relativement peu carboné. Cette remarque s'applique également à l'impact de l'occupation des salles de réunion.
- Une comparaison est faite avec deux autres évaluations environnementales de 2010 et 1999 de la visioconférence. Les tendances globales sont globalement cohérentes, mais la répartition des impacts change significativement d'une étude à l'autre. L'étude de 2010 utilise un mix électrique mondial moyen, l'étude de 1999 considère l'utilisation d'écrans CRT. Ces hypothèses différentes amènent des écarts significatifs dans l'interprétation des résultats.
- De fortes incertitudes pèsent sur la modélisation de la production des écrans LCD de grande taille, la fréquence d'utilisation ainsi que sur l'allocation des impacts liés à l'utilisation d'Internet, en fonction de la durée de vie des produits.
- Le périmètre et les frontières du système ont également une forte influence sur les résultats. On aurait pu considérer que dans certains cas, la réunion physique nécessite de passer la nuit à l'hôtel. Par ailleurs, l'étude se limite à deux localisations : Stockholm et Göteborg.
- Les auteurs signalent que d'autres types d'impacts environnementaux ne sont pas à négliger dans le secteur des TIC, bien que non considérés dans cette publication.

⁸⁹ Mix qui intervient quand survient une augmentation (ou baisse) marginale de la demande

- Si la visioconférence venait à induire des changements de paradigme des comportements des utilisateurs, des effets rebonds potentiels seraient à attendre, qu'ils soient positifs ou négatifs. Par exemple, l'utilisation de ces solutions dans les entreprises pourrait avoir un effet rétroactif positif sur d'autres entreprises et généraliser le dispositif.

8. Limites, points d'attention, besoins de travaux complémentaires

- Les auteurs sont des chercheurs confirmés dans le domaine de l'évaluation des impacts environnementaux des TICs.
- Le manque d'homogénéité des données environnementales (ecoinvent 2.0 et 2.2) nuit à la consistance de l'étude.
- Une analyse de l'impact spécifique de l'effet rebond inclut dans l'étude aurait permis de voir l'influence de ce dernier sur les résultats d'impacts environnementaux.
- Globalement, la publication a le mérite d'adopter une approche cycle de vie exhaustive. Elle fait aussi partie des rares études utilisant une approche conséquente (même simplifiée).

III.13. FICHE DE LECTURE N°81

« Teleworking Life Cycle Analysis », URS Melbourne pour Telstra, 2008, 118 pages

Rapport d'étude, soumis à revue critique par tierce-partie indépendante, financements privés.

1. Objectifs et champs de l'étude

- ACV comparative entre le télétravail et le travail en bureau pour l'entreprise australienne de télécommunications Telstra. ACV complète de type ISO 14040

Les objectifs de cette étude sont :

- Identifier les impacts environnementaux du télétravail et les comparer à ceux du travail en bureau
- Identifier les principaux contributeurs à ces impacts pour ces deux scénarios à partir de données réelles de l'entreprise
- Fournir des orientations aux entreprises et organisations gouvernementales sur les potentiels bénéfiques environnementaux de leurs actions sur le télétravail.

2. Périmètre de l'analyse

Frontières du système	Amont (fabrication)	✓
	Utilisation	✓ Les processus étudiés ont été rassemblés en trois grands groupes: Le transport, L'équipement de bureau (à la maison et dans l'entreprise), L'environnement de travail (à la maison et dans l'entreprise)
	Aval (fin de vie)	✓ Fin de vie du véhicule et des terminaux des télétravailleurs
Périmètre géographique	Australie (entreprise Telstra)	
Impacts environnementaux considérés	Changement climatique	✓
	Consommation d'énergie	✗
	Multi-indicateurs	✓ Prise en compte de 4 impacts : réchauffement climatique, oxydation photo chimique, potentiel d'épuisement des ressources non renouvelables. toxicité humaine. Le potentiel d'utilisation et d'épuisement de l'eau n'est pas pris en compte dans cette étude car aucune des activités considérées ne sont basées sur un usage direct de l'eau.
Types d'effets	1 ^{er} ordre (directs)	✗
	2 nd ordre (indirects)	✓ Prise en compte des effets en termes de transports Modification du nombre d'équipements informatiques pour télétravailler
	3 ^{ème} ordre (systémiques)	✓ Prise en compte des effets en termes de volumes de bureau
Effets rebonds	Directs	✗
	Indirects	✗
	Macroéconomiques	✗

3. Méthodologie employée

L'ACV comparative s'est focalisée sur l'utilisation de ressources différentes entre les deux scénarios : télétravail et non télétravail. Les processus étudiés ont été rassemblés en trois grands groupes : le transport, l'équipement de bureau (à la maison et dans l'entreprise) et l'environnement de travail (à la maison et dans l'entreprise).

Prise en compte :

- des modèles de transports australiens (34 km par jour en voiture, 75% des travailleurs utilisent leur voiture, etc.
- matériels de bureau ;
- conditions de travail dans bureau : éclairage, chauffage, refroidissement, utilisation d'ordinateur ;
- Fin de vie du véhicule et des équipements informatiques du télétravailleur (ordinateur, etc.) : enfouissement par défaut.

Les auteurs ont suivi les étapes d'une ACV selon la norme iso 140140. C'est une ACV attributionnelle. Les auteurs ont employé la méthodologie suivante :

- Etat de l'art des différentes ACVs existantes a été réalisé afin de mettre en évidence l'existence ou non d'ACV complète sur le sujet et les facteurs clés à considérer. Ceci a permis aux auteurs d'organiser leur périmètre selon trois groupes.
- Collecte de données d'inventaire au sein de l'entreprise, à partir de journaux scientifiques et auprès d'organisations locales. La méthode de collecte est à la fois basée sur des données primaires et secondaires.
- Utilisation du logiciel Simapro v7 et de la méthode de calcul CML 2001
- Comparatif de 3 scénarios : sans télétravail, avec télétravailleurs sur 2 jours par semaine, avec télétravailleurs sur 4 jours par semaine
- Analyse de sensibilité : le nombre d'employés qui vont au travail en voiture, le nombre de km parcourus, énergie consommée au bureau et à la maison
- Une revue critique interne de l'ACV a été réalisée par URS Melbourne. Une revue critique externe de l'ACV a été réalisée par SVEN LUNDIE, GREG PETERS, Centre For Water And Waste Technology School Of Civil And Environmental Engineering Vallentine Annex (H22) Unsw Sydney (Université)

4. Données utilisées

- **Données primaires** : Données internes de Telstra (consommation des bureaux)
- **Données secondaires** : littératures (journaux scientifiques) et sources d'informations australiennes (bureau australien des statistiques). En cas d'absence de données, les bases de données de simapro v7 ont été utilisées avec une priorité donnée aux bases australiennes.
- **Facteurs d'émissions** : les facteurs de toxicité utilisés dans CML 2001 et développés pour l'Europe, ont été adaptés au modèle australien.

5. Hypothèses-clés

- 3 000 salariés sur 40 000 peuvent faire du télétravail (2 (50%) ou 4 (50%) jours par semaine).
- Hypothèse d'une journée de travail par un employé Telstra établie avec les ressources humaines : 8h par jour, 5 jours par semaine, 45 semaines par an (6 semaines de congés et 5 jours d'arrêt).

6. Principaux résultats et chiffres-clés

- **Impacts positifs** en termes de réchauffement climatique, oxydation photochimique, potentiel d'épuisement des ressources non renouvelables.

Pour le changement climatique et l'épuisement des ressources, le principal contributeur est la production d'électricité à partir de charbon. Pour l'oxydation photochimique, c'est le transport. Dans ce cas le bénéfice est directement proportionnel au nombre de km évités.

- **Impacts négatifs** en termes de toxicité humaine

On observe une réduction de l'utilisation de la voiture est moins impactant que l'utilisation du charbon pour la production d'électricité nécessaire au travail à la maison ; le charbon étant la source d'énergie majoritaire dans le mix énergétique australien). Ces résultats sont donc interdépendants de la zone où est pratiqué le télétravail. Cependant, la différence sur la toxicité humaine reste faible.

7. Conclusions et discussions de l'auteur

Le télétravail évite la dispersion de 728 tonnes d'équivalent CO₂ par an ce qui est équivalent aux émissions de CO₂ produites par 168 voitures dans l'état du Victoria (Australie).

L'analyse de sensibilité fait ressortir les conclusions suivantes :

- Plus les distances sont grandes plus le télétravail est positivement impactant.
- Plus les bureaux (compagnie) sont efficaces en termes de consommation énergétique, moins le télétravail est positivement impactant.
- Plus les bureaux (à la maison) sont efficaces en termes de consommation énergétique et utilisent une énergie faiblement carbonée, plus le télétravail est positivement impactant.
- Plus l'espace de travail des télétravailleurs peut être réoccupé et arrangé, plus le télétravail a un impact environnemental positif.
- Les résultats sur la toxicité humaine sont directement liés au type d'énergie utilisée.

Les auteurs donnent quelques recommandations :

- Arrangements des bureaux laissés vacants par les télétravailleurs pour être réorganisés et limiter leur impact énergétique
- Les bureaux à la maison doivent favoriser la lumière naturelle, ampoules basse consommation, climatisation chauffage efficaces
- L'entreprise doit aider les télétravailleurs à faire un audit de leur bureau à la maison et leur fournir un kit d'efficacité énergétique (ampoules, etc.)
- Les employés doivent être sensibilisés aux effets rebonds et encouragés à restreindre la quantité de lumière et de refroidissement en dehors de leur environnement de travail à la maison.

Les auteurs évaluent la complétude et fiabilité des données utilisées. Ils mettent en évidence que certaines hypothèses comme les consommations d'énergie équivalentes entre le bureau et la maison doivent être améliorées compte-tenu de leur influence sur les résultats. Ils vérifient la pertinence des hypothèses en fonction des objectifs de l'étude.

8. Limites, points d'attention, besoins de travaux complémentaires

- L'étude assez ancienne : elle date de 2007. On note également qu'elle est focalisée sur le mode de vie et le marché australien.
- Un point d'intérêt majeur est le fait qu'il s'agisse d'une ACV complète avec revue critique, évaluation de la qualité des données et prise en compte d'effets rebonds/indirects. Cependant, plusieurs manquements sont à signaler
 - en premier lieu, un certain nombre d'hypothèses, notamment celles citées dans les hypothèses clés, sont discutables, même si les auteurs font un *consistency* check et qu'il y a revue critique.
 - Concernant la revue critique, il manque un certain nombre de points normalement présents dans des ACV *iso-compliant*. Manquent par exemple l'analyse quantitative d'incertitudes par exemple, des précisions relatives aux critères de coupure, etc.
 - En termes de modélisation environnementale, la modélisation de la phase de transport est très simplifiée. Le choix d'utiliser des données spécifiques pour les voitures (modèles Holden Commodore ou VW Golf) au lieu de données ecoinvent est curieux, malgré le périmètre géographique différent (européen) des ICV ecoinvent.
 - De plus, exclure les modes de transports autres que la voiture n'est pas forcément conservatif. Il aurait été plus judicieux de les inclure afin de voir si inciter les employés à prendre des modes de transport plus vertueux était aussi un bon levier de réduction des impacts de l'entreprise.
 - Enfin, la quantification des effets rebonds/indirects est appréciable, mais les hypothèses sous-jacentes sont peu robustes (par exemple : même consommation d'énergie entre domicile et lieu de travail, donnée sur l'effet rebond lié aux déplacements datant de 1993).
- L'étude est faite sur le scope de l'entreprise mais il n'y a finalement pas d'enquête auprès des salariés. Un tel sondage aurait vraiment rendu l'approche intéressante pour l'entreprise (à condition qu'elle soit faisable en respect avec la vie privée des salariés), plutôt que des données moyennes pour l'Australie. L'étude s'applique au contexte de l'entreprise Telstra mais les données ne sont pas spécifiques aux employés de cette entreprise.
- Au final, l'approche de base est intéressante mais le résultat est perfectible. L'étude présente une évaluation multicritère, qui inclut notamment des résultats intéressants sur la toxicité. La partie interprétation des résultats est

aussi de bonne facture, mais l'approche globale était facilement améliorable. Enfin, nous jugeons que la robustesse de la modélisation n'est pas digne d'une ACV revue par un tiers-indépendant

III.14. FICHE DE LECTURE N°89-90

« *Books from an environmental perspective – Part 1: environmental impacts of paper books sold in traditional and internet bookshops* » & « *Books from an environmental perspective – Part 2: e-books as an alternative to paper books* », Clara Borggren⁹⁰, Åsa Moberg⁹¹, Göran Finnveden⁶⁹, International Journal of LCA, 2011, 10 p. & 9 p.

Article publié dans un journal scientifique, revue indépendante, financements publics et privés.

1. Objectifs et champs de l'étude

Ce travail en deux parties cherche à établir une comparaison environnementale au moyen d'une ACV multicritère entre :

- Les livres papier achetés en librairie et les livres papier achetés sur internet (partie 1 = e-commerce) ;
- Les livres papier achetés en librairie et les livres dématérialisés achetés sur internet et lus sur une liseuse (partie 2 = dématérialisation).

L'unité fonctionnelle est « un livre acheté et lu par une personne ».

2. Périmètre de l'analyse

Frontières du système	Amont (fabrication)	✓
	Utilisation	✓
	Aval (fin de vie)	✓
Périmètre géographique		Suède
Impacts environnementaux considérés	Changement climatique	✓
	Consommation d'énergie	✓
	Multi-indicateurs	✓
Types d'effets	1 ^{er} ordre (directs)	✓ Impact de la production, de l'acheminement, de l'achat, de l'utilisation et de la fin de vie des médias de lecture (livre papier et/ou modes dématérialisés selon les cas)
	2 nd ordre (indirects)	✗ ⁹³
	3 ^{ème} ordre (systémiques)	✗ ⁹²
Effets rebonds	Directs	✗
	Indirects	✗
	Macroéconomiques	✗

3. Méthodologie employée

- **Type de méthode d'évaluation environnementale utilisée** : ACV attributionnelle, comparative, multicritère, appliquée sur le cycle de vie complet du service étudié. Utilisation de la méthode ACV de caractérisation des impacts environnementaux « CML 2001 ».
- **Méthode de collecte des données d'activité** : Collecte des données réalisée principalement grâce à des données fournies par des industriels du livre et de la vente en ligne, recherches bibliographiques et des dires d'experts.

⁹⁰ KTH Royal Institute of Technology, Division of Environmental Strategies Research – fms, Drottning Kristinas Väg 30, 100 44 Stockholm, Sweden.

⁹¹ Auteur principale de la première partie.

⁹² Auteur principale de la seconde partie.

⁹³ La substitution n'est pas faite en tant que telle, mais une comparaison est faite.

4. Données utilisées

- **Données environnementales utilisées** : utilisation de la base de données ecoinvent 2.0.
- Données d'activité utilisées

Étape du cycle de vie	Type de donnée utilisée	Cas d'étude concernés		
		Livre papier	e-commerce	Dématérialisation
Edition du livre	Données spécifiques fournies par un éditeur de livres ⁹⁴ , y compris concernant les consommations d'énergie des serveurs pour le livre dématérialisé.	x	x	x
Production du papier	Données de production moyennes européennes, sur du papier fin couché sans bois. Analyse de sensibilité sur le type de papier utilisé : données fournies par un papetier suédois pour le papier couché avec bois.	x	x	
Impression	Données spécifiques d'une usine d'impression de Suède.	x	x	
Distribution du livre	Données fournies par un libraire internet suédois et un transporteur, sur les distances et modes de transport, taux de retour et quantités d'emballages des livres (différenciés selon les cas).	x	x	
Production et acheminement de la liseuse	Démantèlement d'un modèle spécifique pour identifier les composants et lien avec des inventaires génériques de la base ecoinvent. Estimations des auteurs sur le scénario d'acheminement de la liseuse depuis la Chine.			x
Achat sur internet	Approximation sur le temps d'usage pour l'achat de l'ordinateur, ainsi que la durée d'utilisation totale de cet équipement, issue d'une précédente publication des auteurs. Donnée bibliographique sur la quantité d'énergie par GB téléchargé datant de 2008. Prise en compte des infrastructures internet (modem et réseaux) selon des données moyennes. Construction, maintenance et fin de vie du réseau internet issue d'une donnée d'industriel.		x	x
Électricité	Mix électrique moyen suédois datant de 2007.	x	x	x
Stockage en librairie	Données sur les consommations d'énergie de la boutique allouée au livre fournie par une chaîne de librairies suédoise.	x		
Usage du livre papier	Estimation d'un transport de 2 km en véhicule particulier pour se procurer le livre (en boutique ou point-relais), ou la liseuse. Des données d'industriels sur les modes de distribution des livres achetés en ligne sont testées en analyse de sensibilité.	x	x	
Usage de la liseuse	Hypothèses faites par les auteurs sur le scénario d'utilisation de la liseuse (étudié plus finement en analyse de sensibilité).			x
Fin de vie des livres	Hypothèse que les livres ne sont lus que par une personne (pas de seconde vie). Incinération estimée sur la base d'information de l'Agence Suédoise de gestion des déchets. Données d'industriels sur le taux de retour des livres et leur destination de fin de vie (recyclage).	x	x	
Fin de vie de la liseuse	Estimation des auteurs sur le taux de collecte des liseuses en fin de vie. Données sur le recyclage fournies par une entreprise de recyclage des DEEE. Les liseuses en fin de vie non collectées sont exclues du système ⁹⁵ .			x

⁹⁴ Les impacts associés au travail de l'auteur sont négligés.

⁹⁵ Ce qui implique l'omission d'impacts positifs et négatifs selon les indicateurs considérés.

5. Hypothèses-clés

Cette étude ne comporte pas d'hypothèse-clé majeure.

6. Principaux résultats et chiffres-clés

- Impacts environnementaux d'un livre papier acheté en librairie

La production du papier et le transport final constituent la majorité des impacts environnementaux pour les indicateurs non relatifs à la toxicité. Sur les indicateurs de toxicité, la fin de vie est également un contributeur important aux impacts du cycle de vie. La distribution et le stockage du livre, ainsi que le temps passé en librairie, contribuent à 5 à 10% des impacts environ, selon les indicateurs. Enfin, la phase d'impression, et le travail éditorial sont négligeables pour la majorité des indicateurs.

- Impacts environnementaux d'un livre papier acheté sur internet

Le profil environnemental du livre papier acheté en e-commerce est globalement similaire à celui du livre acheté en librairie.

- Impacts environnementaux d'un livre dématérialisé et comparaison globale

Le principal contributeur aux impacts environnementaux du livre dématérialisé est la production de la liseuse, à plus de 95% des impacts sur le cycle de vie du livre pour tous les indicateurs considérés. Les circuits imprimés, puis les résistances et enfin les condensateurs électriques sont les composants au plus lourd bilan environnemental. Cependant, la fin de vie de la liseuse (incluant 75% de recyclage) génère des impacts négatifs (i.e. des bénéfiques) significatifs, en particulier sur les indicateurs de toxicité (-50% d'impacts). Les autres phases du cycle de vie (édition du livre, distribution de la liseuse et du livre, utilisation de la liseuse) sont négligeables.

- Comparaison globale

Si l'on compare les trois cas d'utilisation sur les 11 indicateurs considérés, les chiffres sont les suivants⁹⁶.

Type d'impact considéré	Livre acheté en boutique	Livre acheté sur internet	Livre dématérialisé
Réchauffement climatique (kg CO ₂ eq/livre)	1,3	1,1	0,87
Consommation d'énergie primaire (MJ/livre)	56	40	16
Épuisement des ressources abiotiques (kg Sb eq./livre)	0,0085	0,0074	0,0058
Acidification de l'air (kg SO ₂ eq./livre)	0.0057	0.0049	0.023
Eutrophisation (kg PO ₄ ³⁻ eq./livre)	0.0018	0.0016	0.0011
Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC-11 eq./livre)	1,4.10 ⁻⁷	1,2.10 ⁻⁷	2,2.10 ⁻⁷
Toxicité humaine (kg 1,4-DB eq./livre)	0,86	0,78	0,59
Écotoxicité des eaux douces (kg 1,4-DB eq./livre)	0.074	0.061	0.32
Écotoxicité des eaux marines (kg 1,4-DB eq./livre)	526	503	352
Écotoxicité terrestre (kg 1,4-DB eq./livre)	0.012	0.0081	0.0069
Oxydation photochimique (kg C ₂ H ₄ eq./livre)	5,2.10 ⁻⁴	4,5.10 ⁻⁴	0.0010

Les impacts totaux du livre acheté sur internet sont moindres que ceux du livre acheté en librairie pour tous les impacts considérés : les gains sont permis par l'absence de stockage du livre en librairie. Cependant, la magnitude de ces impacts est incertaine, étant donné les incertitudes sur les données d'allocation des impacts de la librairie au livre vendu. Une autre explication du meilleur bilan environnemental des livres achetés en ligne est le plus faible taux de retour (i.e. les invendus) comparé à ceux achetés en boutique. Globalement, l'impact environnemental du livre acheté en ligne est donc légèrement inférieur (entre 10 et 20% suivant l'impact considéré) à celui du livre acheté en magasin.

Concernant le livre dématérialisé, la comparaison est favorable sur 8 des 11 indicateurs considérés. Pour les indicateurs où le livre dématérialisé a des impacts plus importants, cela est dû au palladium contenu dans les composants électroniques : la production de palladium émet de fortes quantités de sulfure non traitées selon l'inventaire ecoinvent utilisé.

- Papier fin couché sans bois ou papier couché avec bois ?

⁹⁶ Le vert indique des impacts moindres par rapport au cas de référence, i.e. livre acheté en boutique le rouge indique des impacts supplémentaires.

Une analyse de sensibilité est faite entre selon le type de papier utilisé pour le livre. L'impact environnemental du papier fin couché sans bois est moindre pour tous les indicateurs environnementaux considérés, comparé à l'autre type de papier⁹⁷.

- Influence du transport final du consommateur dans le cas du e-commerce

En l'absence de données de qualité sur la distribution moyenne des livres en Suède, une analyse de sensibilité est faite sur le mode de transport du consommateur pour se procurer le livre. Une distance de 10 km est considérée. Les valeurs numériques sont fournies pour l'indicateur réchauffement climatique et les écarts sont significatifs (voir ci-dessous). La distribution en librairie, l'utilisation de la voiture jusqu'à un point relais ou la livraison à domicile par courrier rapide sont les modes de distribution les plus importants en termes d'impact. La tendance apparaît similaire pour l'ensemble des indicateurs (cf. tableau 6 partie 2).

Mode d'acheminement final	Émissions de GES (kg CO ₂ eq/livre)
Distribution en librairie classique	1,25
e-commerce - Utilisation de la voiture jusqu'au point relais	1,07
e-commerce – marche jusqu'au point relais	0,70
e-commerce - livraison à domicile en courrier rapide	0,82
e-commerce - livraison à domicile en courrier normal	0,68

- Influence du nombre de lecteurs du livre et du nombre de livres lus

Ces paramètres jouent significativement sur les impacts de la liseuse : le nombre croissant de livres lus sur ce support amortit les impacts de l'appareil sur son cycle de vie, et réciproquement. Le tableau suivant présente le point d'équilibre entre le nombre de livres lus sur la liseuse et de livres papier achetés en boutique, lus par une ou deux personnes⁹⁸.

Type d'impact considéré	Amortissement par rapport au livre papier acheté en librairie (nombre de livres lus par liseuse)	
	Livre papier lu par une personne	Livre papier lu par deux personnes
Réchauffement climatique	25	75
Consommation d'énergie primaire	12	27
Épuisement des ressources abiotiques	32	70
Acidification de l'air	200	?
Eutrophisation	25	60
Appauvrissement de la couche d'ozone	75	170
Toxicité humaine	32	75
Écotoxicité des eaux douces	350	2000
Écotoxicité des eaux marines	30	70
Écotoxicité terrestre	25	57
Oxydation photochimique	95	200

Dans le scénario de référence, le nombre de livres lus sur liseuse est de 48. On observe donc que selon certains indicateurs, le taux d'utilisation de la liseuse doit être particulièrement élevée afin d'obtenir un meilleur bilan environnemental que le livre papier.

7. Conclusions et discussions de l'auteur

Globalement, si l'on considère le cas de référence, le livre papier acheté sur internet a un bilan environnemental légèrement meilleur que le livre acheté en librairie. Le bilan est plus contrasté pour le livre dématérialisé. Statuer de façon unanime est difficile car en plus de la production du papier ou de la liseuse, les impacts liés à la phase d'utilisation du consommateur sont des contributeurs majeurs au bilan environnemental des livres (par exemple : mode de transport du consommateur final pour aller en boutique, taux d'usage de l'équipement électronique). Les points d'attention suivants sont notés par les auteurs :

⁹⁷ On peut supposer que l'écart entre livre acheté en boutique et livre acheté en e-commerce est donc réduit, car la phase de production du papier représente proportionnellement plus d'impacts pour le livre acheté en e-commerce (à cause de l'absence de la phase « bookstore » dans ce scénario).

⁹⁸ Les chiffres suivants sont fournis à titre indicatif, lus à partir des illustrations de la publication (cf. Figure 3 de la publication Part2).

- De fortes incertitudes sont liées aux impacts réels du stockage en librairie, du fait des hypothèses d'allocation des consommations d'énergie globales de la boutique à l'unité fonctionnelle de l'étude, un livre acheté et lu par une personne. Dans un contexte géographique différent, l'impact de cette phase pourrait être plus important (le mix électrique de la Suède est faiblement carboné).
- De fait, étant donné ces incertitudes, on peut estimer que le meilleur bilan environnemental des livres achetés sur internet est d'abord dû à leur plus faible taux de retour (0.5% contre 14% pour les livres achetés en boutique, selon des données d'industriels). Mais cela ne signifie pas forcément qu'il y a dans la réalité un « gaspillage » plus important de livres par les librairies en comparaison d'Internet ; ce point serait à approfondir.
- La comparaison avec d'autres études similaires sur les livres achetés en boutique ou sur internet est globalement cohérente : la production du papier est dans tous les cas le contributeur majoritaire aux impacts environnementaux. Cependant, de fortes variations dans les chiffres absolus existent entre les études. Ceci s'explique par des différences en termes d'hypothèses relatives au scénario d'utilisation des livres ou sur le périmètre géographique considéré. La phase de production du papier est par exemple plus significative dans l'étude de Kozak (2003)⁹⁹, aux États-Unis.
- Concernant la comparaison de publications sur les livres lus sur liseuse, les résultats sont globalement favorables à la liseuse, mais dans l'hypothèse où le taux d'utilisation de cette liseuse est élevé. L'unité fonctionnelle pour la comparaison peut fortement changer le bilan environnemental, selon le temps de lecture ou le nombre de pages considéré. L'analyse de sensibilité sur le nombre de livres lus sur liseuse illustre bien ce point.
- L'impact unitaire de la liseuse comporte de fortes incertitudes, dues à l'utilisation d'inventaires génériques pour modéliser la production des principaux composants. De surcroît, aucune donnée n'a pu être utilisée pour modéliser la phase d'assemblage de l'appareil ainsi que la production de l'écran de la liseuse. Par ailleurs, on considère ici une liseuse, mais les impacts de ce cas d'étude seraient nettement réduits si l'on considérait une tablette électronique, qui possède d'autres fonctions que celle de lire. Les incertitudes sont également élevées en ce qui concerne la phase de fin de vie des appareils : certains sont recyclés, d'autres sont stockés (« effet tiroir ») pendant des années. Globalement, il est probable selon les auteurs que les impacts de la fin de vie aient été sous-estimés dans la publication.
- L'impact environnemental est également fortement relié au type de couverture du livre ainsi qu'au nombre de pages. Les livres plus lourds (reliés et/ou avec beaucoup de pages) entraînent logiquement des impacts environnementaux plus importants. Le type de papier utilisé est également un paramètre significatif, comme vu en analyse de sensibilité. Des données spécifiques ont été utilisées concernant la phase d'impression, mais elles sont vraisemblablement incomplètes en ce qui concerne les impacts en termes de toxicités associés à l'utilisation de substances chimiques. Ceci influence la comparaison avec les deux solutions impliquant l'usage des TICs.
- Concernant la phase de distribution, les analyses de sensibilité ont permis de disposer d'une idée de la répartition des impacts à défaut d'étudier une situation réelle « moyenne » difficile à caractériser. Les auteurs ne savent pas si le transport est plus court jusqu'à un point-relais plutôt qu'en librairie, mais on peut faire remarquer qu'il y a globalement plus de points-relais en Suède. Une étude de la Poste suédoise a montré que la réorganisation des points de collecte de courrier en relais n'a pas fondamentalement changé les habitudes de transport des usagers, d'où le scénario identique entre librairie et e-commerce. La distribution à domicile a un impact moindre en comparaison du relais-colis. Enfin, dans le cas où l'on considère un transport final du consommateur de 10 km alloué uniquement au livre, cette phase prédomine alors le bilan environnemental du livre sur tout son cycle de vie.
- Les recommandations suivantes sont faites afin de réduire les impacts environnementaux des livres papier : choisir du papier moins impactant, minimiser le taux de retour des livres ainsi que le transport des consommateurs. Internet peut permettre de réduire ces derniers impacts, mais la chaîne de distribution doit tout de même être efficace pour ce faire. La lecture par plusieurs usagers permettrait enfin de réduire considérablement les impacts du livre papier.
- Concernant les médias électroniques, les auteurs appellent à plus d'études macroscopiques sur les changements de comportement des usagers associés aux médias numériques, ainsi qu'à une amélioration des connaissances sur les impacts environnementaux de ces nouveaux médias.

8. Limites, points d'attention, besoins de travaux complémentaires

- Les auteurs sont des chercheurs confirmés dans le domaine de l'évaluation des impacts environnementaux des TICs et l'étude a été publiée dans une revue scientifique ACV de référence.

⁹⁹ Kozak, G. 2003. "Printed Scholarly Books and E-book Reading Devices: A Comparative Life Cycle Assessment of Two Book Options." Final Report to the Center for Sustainable Systems, University of Michigan. August.

- La qualité de l'ACV réalisée dans ces deux études est bonne : le niveau de clarté et de transparence des données utilisées et hypothèses faites sont d'excellente facture.
- La discussion des auteurs dans les deux publications est globalement exhaustive et couvre un large panel de faiblesses du modèle ACV ainsi développé. Cette prise de recul est appréciable.
- L'analyse de sensibilité relative aux points de bascule du bilan environnemental de la liseuse selon le nombre de livres lus mériterait d'être reproduite dans un plus large panel d'études environnementales relatives aux TICs. Ce type d'analyse serait particulièrement judicieux afin d'évaluer l'influence de paramètres usagers (taux d'usage, durée de vie des équipements usagers, etc.).
- Une partie des impacts négatifs associés à la fin de vie comportent des incertitudes significatives, au vu de la méthode d'allocation retenue pour la prise en comptes des bénéfices associés au recyclage.
- On peut regretter que la publication n'aille pas au bout de la démarche de comparaison entre les 3 systèmes étudiés. Aucune comparaison n'est faite entre livre « e-commerce » et livre « dématérialisé ». On observe notamment que si les impacts associés à l'usage de la liseuse sont moindres que ceux du livre acheté en librairie, ils sont également moindres que ceux du livre « e-commerce » (plus de 20% d'écart). On peut cependant s'interroger sur la pertinence d'une telle comparaison étant donné les incertitudes associées aux résultats de l'étude

III.15. FICHE DE LECTURE N°110

« *An integrated method for environmental assessment and ecodesign of ICT-based optimization services* », Jérémy Bonvoisin^{100,101}, Alan Lelah⁹⁹, Fabrice Mathieux^{99,102}, Daniel Brissaud⁹⁹, Journal of Cleaner Production, 2014, 11 p.

Article publié dans un journal scientifique, revue indépendante, financements publics.

1. Objectifs et champs de l'étude

Cette publication définit un cadre méthodologique pour évaluer les impacts environnementaux d'un service d'optimisation basé sur les TIC (défini par les auteurs comme « un service visant à fournir des informations sur un système en vue d'améliorer son fonctionnement ») et les comparer avec ceux du système non optimisé, ainsi qu'une méthode pour éco-concevoir les services d'optimisation numérique. Les deux volets de cette méthodologie sont ensuite appliqués sur un cas pratique et réel, à savoir le système de collecte des déchets de verre ménagers dans la ville de Grenoble. Le service d'optimisation se base sur la mise en place de capteurs dans les poubelles afin d'une part d'estimer le moment où la collecte doit s'opérer et d'autre part de définir le trajet optimal du camion de collecte pour effectuer la distance minimale.

Cet article se base sur la thèse de J. Bonvoisin « Analyse environnementale et éco-conception de services informationnels » soutenue le 5 novembre 2012¹⁰³.

2. Périmètre de l'analyse

Frontières du système	Amont (fabrication)	✓
	Utilisation	✓
	Aval (fin de vie)	✓
Périmètre géographique	Méthode applicable au niveau mondial Cas d'étude concernant le système de collecte de déchets de verre de la ville de Grenoble	
Impacts environnementaux considérés	Changement climatique	✓
	Consommation d'énergie	✗
	Multi-indicateurs	✓ Résultats calculés pour 11 indicateurs environnementaux mais uniquement présentés dans la publication pour « changement climatique » (GWP) et « épuisement des ressources non renouvelables » (RMD)
Types d'effets	1 ^{er} ordre (directs)	✓
	2 nd ordre (indirects)	✓
	3 ^{ème} ordre (systémiques)	✗
Effets rebonds	Directs	✗
	Indirects	✗
	Macroéconomiques	✗

3. Méthodologie employée

- **Type de méthode d'évaluation environnementale utilisée** : Méthodologie construite à partir de l'approche d'analyse de cycle de vie attributionnelle appliquée sur l'ensemble du cycle de vie. Les impacts environnementaux du

¹⁰⁰ University Grenoble Alpes, Laboratoire G-SCOP, 46 Avenue Félix Viallet, F-38031 Grenoble Cedex 1, France

¹⁰¹ Institute for Machine Tools and Factory Planning, Technical University Berlin, Production Technology Center, Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin, Germany

¹⁰² European Commission, DG Joint Research Centre, Institute of Environment and Sustainability, Via Enrico Fermi 2749, I-21027 Ispra, VA, Italy

¹⁰³ Disponible à : https://www.researchgate.net/profile/Jeremy_Bonvoisin/publication/281602612_Environmental_analysis_and_ecodesign_of_information_services/links/5624c38108aea35f268699ef.pdf?origin=publication_detail

système non-optimisé (i.e. poubelles sans capteurs et tournées classiques à fréquence régulière des camions poubelles) sont comparés à la somme des impacts environnementaux du service optimisé (i.e. basé sur l'utilisation de capteurs et d'échanges d'informations via un système centralisé), de ceux des équipements numériques et de ceux utilisés pour l'optimisation du service.

Le cas d'étude sur le système de collecte des déchets à Grenoble est basé sur une ACV attributionnelle simplifiée car les données environnementales utilisées pour représenter ces procédés proviennent de bases de données génériques et car l'ensemble du cycle de vie n'a pas pu être pris en compte. En effet, le serveur et le réseau de télécommunication utilisés pour relayer les informations collectées auprès des poubelles n'ont pas été intégrés dans le périmètre de l'évaluation, de même que la consommation d'électricité en phase d'utilisation des capteurs a été exclue (les raisons de ces choix ne sont pas mentionnées dans l'article). Le logiciel EIMETM a été utilisé.

- **Méthode de collecte des données d'activité** : L'article ne précise pas les sources de données d'activités et renvoie au rapport de thèse de J. Bonvoisin. Il semble que les données sur les types d'équipements utilisés, le nombre de poubelles connectées, la logistique (fréquence de ramassage des déchets, type de camion, distances parcourues) aient été transmises par la municipalité de Grenoble.

4. Données utilisées

- **Données d'activité utilisées** : Bien que peu d'informations soient intégrées dans l'article, on peut néanmoins noter les éléments suivants :
 - Sur les équipements (capteurs, répéteurs, *gateway*) : nombre déployés sur la ville, nombre remplacés pour cause de batterie vide sur la base d'un service de 10 ans.
 - Distances parcourues (et consommations de diesel associées) par les camions-poubelles sur la base d'un service de 10 ans : 21 900 km (167 000 litres de diesel) pour un système non optimisé, et 17 800 km (123 000 litres de diesel) pour un service optimisé.
- **Données environnementales utilisées** : Utilisation de la base de données version 10.0 du logiciel d'ACV EIMETM.
- **Fiabilité et robustesse des données** : Pas d'analyse de la robustesse des données, ni d'analyse de sensibilité. La seule réserve faite par les auteurs dans l'article concerne, pour une option d'amélioration visant à réduire les impacts environnementaux engendrés par les capteurs, l'hypothèse de taux de recyclage de 85% pour les capteurs. En effet les auteurs soulignent que ce taux est ambitieux et n'est pour le moment pas représentatif de la réalité.
- **Réutilisabilité des données** : Les données sont spécifiques au système de collecte de la ville de Grenoble et sont donc difficilement réutilisables.

5. Hypothèses-clés

Un système non optimisé et un système optimisé ne pouvant exister en parallèle, l'évaluation environnementale de l'un des deux ne peut se baser sur des mesures réelles mais sur des simulations. L'hypothèse principale est donc que les impacts environnementaux calculés à partir d'une simulation peuvent être comparés à ceux évalués à partir d'un système et de mesures réels.

6. Principaux résultats et chiffres-clés

- Les impacts environnementaux GWP et RMD sont calculés pour un système utilisant un service d'optimisation de référence ainsi que pour 4 scénarios alternatifs utilisant une ou plusieurs pistes d'éco-conception, à savoir :
 - Service d'optimisation alternatif 1 : Les capteurs et répéteurs sont conçus de manière à se passer de résine, permettant d'augmenter la recyclabilité des équipements (79% vs. 16.5% pour les capteurs, et 62% vs. 4% pour les répéteurs).
 - Service d'optimisation alternatif 2 : La sensibilité des capteurs est diminuée afin de limiter le nombre de signaux reçus des autres capteurs et ainsi réduire la consommation d'électricité des capteurs.
 - Service d'optimisation alternatif 3 : Le nombre de mesures effectuées par le capteur pour déterminer le niveau de remplissage de la poubelle est réduit. Cela diminue la quantité des informations à traiter par le système central de 93%, et ainsi la consommation électrique associée.
 - Service d'optimisation alternatif 4 : Les scénarios alternatifs n°1, 2 et 3 sont combinés.
- Impacts environnementaux des équipements :

- En termes de GWP, les impacts pour les capteurs et répéteurs (pour rappel la phase d'utilisation est exclue de l'évaluation environnementale) sont principalement dus à la fabrication (surtout bloc plastique et résine) à hauteur de 40-50%, suivis par l'installation (environ 30-35%) puis la fin de vie (environ 20-25%). Concernant le *gateway* pour lequel la phase d'utilisation est prise en compte, la fabrication représente 35%, la phase d'utilisation 54% et la fin de vie 10%.
- En termes de RMD, 99% des impacts des capteurs et répéteurs sont dus à la fabrication des cartes et composants électroniques. Pour le *gateway*, la phase de fabrication est également largement majoritaire et les contributeurs sont à part égale la batterie et les parties électroniques.
- Service d'optimisation de référence vs. Système non optimisé :
 - En termes de GWP, sur une durée de service de 10 ans, le service d'optimisation de référence permet une réduction de l'ordre de 25% par rapport au système non optimisé. Cela provient de la réduction de 4 100 km, éq. 44 000 litres de consommation de diesel, des camions poubelles.
 - En termes de RMD, sur une durée de service de 10 ans, le service d'optimisation de référence engendre une augmentation de +25% par rapport au système non optimisé. Bien que la distance réduite des trajets des camions poubelles permette une diminution de l'ordre de 20% par rapport au système non optimisé, l'utilisation des TICs fait « exploser » la comparaison.
- Services d'optimisation alternatifs vs. Service d'optimisation de référence :

Service d'optimisation	GWP	RMD
Service d'optimisation de référence	référence	référence
Service d'optimisation alternatif 1	-40%	-85%
Service d'optimisation alternatif 2	-21%	-31%
Service d'optimisation alternatif 3	-36%	-44%
Service d'optimisation alternatif 4	-67%	-83%

- Services d'optimisation alternatifs vs. Système non optimisé : Comparé au système non optimisé, seul le service d'optimisation alternatif 4 permet à la fois une réduction en termes de GWP et RMD.¹⁰⁴

7. Conclusions et discussions de l'auteur

- Un service d'optimisation basé sur l'utilisation de TICs n'engendre pas nécessairement des bénéfices sur tous les indicateurs environnementaux. Dans le cas du scénario de référence étudié, il y a un transfert d'impact (gains sur l'indicateur GWP mais pertes sur l'indicateurs RMD). Une approche multicritère est ainsi indispensable.
- Une approche d'éco-conception d'un service d'optimisation est possible et souhaitable, et permet de limiter voire de supprimer tout transfert d'impacts. Ainsi, les auteurs recommandent de dimensionner au plus juste l'utilisation des TICs et des parties électroniques, principaux contributeurs de l'indicateur RMD.
- L'évaluation des impacts environnementaux, et les pistes d'éco-conception associées, ne doivent pas se limiter aux simples équipements physiques (i.e. capteurs, répéteurs, *gateway*) pris de manière isolée, mais à l'ensemble du système, à la façon dont les équipements collectent et transmettent les informations, et la manière dont ces informations sont compilées et traitées. Le cadre méthodologique présenté dans cet article a ainsi vocation à couvrir ces différents niveaux.

8. Limites, points d'attention, besoins de travaux complémentaires

- Les auteurs sont des chercheurs reconnus dans le domaine de l'évaluation des impacts environnementaux, dont son application au domaine des TICs. L'article a fait l'objet d'une revue indépendante.
- Les auteurs partent du principe qu'on ne peut pas évaluer les bénéfices environnementaux engendrés par l'utilisation des TICs sans considérer les impacts directs de ces mêmes TICs. Par ailleurs, cet article a une approche multicritère

¹⁰⁴ A noter que ni l'article ni le rapport de thèse ne présentent un comparatif chiffré entre tous les services d'optimisations alternatifs et le système non optimisé.

en considérant à la fois le changement climatique et l'épuisement des ressources non renouvelables (le rapport de thèse sur lequel l'article se base présente les impacts environnementaux pour 11 indicateurs). Cette vision exhaustive des choses est louable.

- Les auteurs notent qu'une approche d'éco-conception ne s'applique pas uniquement à un bien physique, mais également à système constitué de plusieurs biens physiques interagissant entre eux. Les auteurs étendent cette conclusion/recommandation au développement de logiciels.
- Le cadre méthodologique pour évaluer les impacts environnementaux d'un service d'optimisation est assez conceptuel, mais présenter dans l'article un cas d'étude permet de faciliter la compréhension, et l'application éventuelle, de cette méthodologie. La méthodologie proposée se base sur les principes de l'ACV et l'appropriation est ainsi facile pour des experts en évaluation environnementale.
- L'article est basé sur un rapport de thèse. Ainsi, bon nombre de données et hypothèses ne sont pas présentées et décrites dans l'article et ceci ne permet pas d'évaluer la représentativité des données et la robustesse des résultats. Le rapport de thèse bien que fournissant de plus amples informations n'inclut pas une discussion sur ces critères. Ceci est regrettable, bien que l'objectif principal de l'article soit l'élaboration d'une méthodologie. Par ailleurs, seuls les résultats pour deux indicateurs environnementaux sont présentés dans l'article alors que l'évaluation a été faite sur 11 indicateurs. Il aurait été intéressant d'inclure des indicateurs de toxicité (de l'eau et dans l'air), bien que la robustesse des résultats sur ces indicateurs est questionnable.
- Les cas d'école étudié est très intéressant car 1) il est basé sur une situation réelle déployée à l'échelle d'une ville de taille importante, Grenoble ; 2) il est appliqué à une problématique environnementale, à savoir la gestion des déchets de verre ménagers ; 3) il engendre, dans le scénario de référence, un transfert de pollution.

III.16. FICHE DE LECTURE N°114

« *Green IT – France 2020 – synthèse verte* », Boston Consulting Group, pour la Fédération Française des Télécoms, l'Alliance TICS et la Fédération des Industries Electriques, Electroniques et de Communication, 2009, 80 p.

Rapport d'étude, pas de revue indépendante, financements privés

1. Objectifs et champs de l'étude

Cette étude cherche à estimer les effets induits générés par les TICs sur les émissions de gaz à effet de serre à horizon 2020, dans différents secteurs d'activité : énergie, mobilité, dématérialisation, bâtiment et industrie. Un travail prospectif est réalisé afin d'établir un scénario d'évolution « Business-as-Usual » (BAU) des émissions de GES en France à l'horizon 2020, en mesurant donc l'influence des TICs.

Une seconde étude (« volet rouge ») réalisée par l'IDATE dresse un bilan des impacts directs (consommations électriques et émissions de GES) en 2008. La combinaison des deux études a vocation à établir un pendant français aux études de type Smart2020 réalisées par le GeSI.

2. Périmètre de l'analyse

Frontières du système	Amont (fabrication)	X
	Utilisation	✓
	Aval (fin de vie)	X
Périmètre géographique		France
Impacts environnementaux considérés	Changement climatique	✓
	Consommation d'énergie	✓ Consommation d'électricité (CED)
	Multi-indicateurs	X
Types d'effets	1 ^{er} ordre (directs)	X (abordé par l'autre étude IDATE)
	2 nd ordre (indirects)	✓
	3 ^{ème} ordre (systémiques)	✓
Effets rebonds	Directs	X
	Indirects	X
	Macroéconomiques	X

3. Méthodologie employée

- **Type de méthode d'évaluation environnementale utilisée** : évaluation environnementale de type « empreinte carbone » (comptabilisant également les consommations d'électricité), appliquée sur la phase d'utilisation du cycle de vie.
- **Méthode de collecte des données d'activité** : Entretiens avec des experts sectoriels et les résultats de projets pilotes ou études théoriques.

4. Données utilisées

- **Données d'activité utilisées** : Collecte des données relatives aux effets induits des TICs sur les différentes applications étudiées par une trentaine d'entretiens avec des experts et les résultats (par ordre de priorité) de :
 - Projets pilotes réalisés en France ;
 - Projets pilotes réalisés à l'étranger ;
 - Des études théoriques.
- **Données environnementales utilisées** : pas de réelle visibilité sur les données environnementales utilisées.
- **Fiabilité et robustesse des données d'après les auteurs** :

- La robustesse des données est mesurée selon l'origine des hypothèses d'effets induits. Par exemple, 84% des impacts mesurés des leviers « verts foncés » (pour lesquels les TICs constituent l'essentiel de la valeur ajoutée) proviennent de résultats de projets pilotes réalisés en France, donc représentatifs de la situation française.
- **Réutilisabilité des données** : La plupart des études ou projets pilotes à partir desquels sont reprises les hypothèses de gains peuvent être réutilisés. Peu de visibilité est en revanche donnée sur les données environnementales utilisées. Qui plus est, l'étude datant de 2009, un certain nombre de données sont aujourd'hui obsolètes.

5. Hypothèses-clés

Cette étude ne comporte pas d'hypothèse-clé.

6. Principaux résultats et chiffres-clés

Globalement, les TIC peuvent permettre de réaliser des réductions d'émissions de GES équivalentes à **7% des émissions totales de la France à horizon 2020**, soit un tiers de l'objectif national. Le tableau suivant résume les gains par secteur.

Thème	Application / Levier	Émissions de GES (Mt CO ₂)	Gain relatif (%)	Origine hypothèse de gain
Systèmes électriques	Compteurs électriques intelligents	- 6,4	1,3%	Pilote étranger
	Véhicules électriques	- 1,4	0,3%	Pilote étranger
	Pilotage des ENR décentralisé	- 0,6	0,1%	Pilote étranger
	Sous-total	- 8,4	1,7%	-
Logistique et transports	Optimisation des réseaux de logistique	- 3,1	0,6%	Pilote français
	Péages urbains	- 2,6	0,5%	Pilote étranger
	Éco-conduite	- 2,1	0,5%	Pilote étranger
	Aide à la conduite	- 3,3	0,7%	Pilote étranger
	Pay as you drive	- 3,5	0,7%	Étude théorique
	Auto-partage	- 0,6	0,1%	Pilote étranger
Sous-total	- 15,2	3,1%	-	
Bâtiments	Amélioration du design des bâtiments	Non quantifié		-
	Automatisme de gestion HVAC	- 1,5	0,3%	Pilote français
	Automatisation de l'éclairage	- 0,1	< 0,1%	Pilote français
	Building Management System	- 2,7	0,5%	Pilote français
	Variation de la vitesse des moteurs	- 0,1	< 0,1%	Pilote français
Sous-total	- 4,4	0,8%	-	
Dématérialisation	Vidéo et télé-conférence	- 0,6	0,3%	Pilote étranger
	Télétravail	- 1,2	0,3%	Pilote français
	e-commerce	- 1,3	0,3%	Pilote français
	eGovernment / ePaper	- 0,2	0,3%	Pilote étranger
Sous-total	- 3,3	0,7%	-	
Industrie	Variation de la vitesse des moteurs	- 1,4	0,3%	Pilote français
	Automatisation de process industriels	Non quantifié		-
Sous-total	- 8,4	1,7%	-	
TOTAL		-32	7%	-

- Systèmes électriques

Un levier majeur de réduction des impacts consiste à réduire les pointes quotidiennes de consommation, afin de réduire le recours aux modes de production d'électricité d'origine thermique. Pour ce faire, les auteurs préconisent l'utilisation de solutions TICs permettant le report des consommations d'heures pleines vers les heures creuses : compteurs intelligents, pricing dynamique, passage à des équipements énergétiquement plus efficaces, décalage ou effacement de l'usage de certains équipements (usage spécifiques et chauffage en particulier).

- Logistique et transports

Sur le transport de marchandises, l'utilisation systématique de GPS sur les camions, ainsi que l'utilisation d'étiquetage RFID sur les marchandises, peut permettre de réduire les distances parcourues et de privilégier la multi-modalité.

Sur le transport de passagers, le péage urbain est vu comme une solution pertinente pour réduire le trafic en ville. L'aide à la conduite permet de réduire les consommations de carburant, tandis que l'auto-partage et les tarifs d'assurances adaptés au kilométrage permettent de réduire les kilomètres effectués.

- **Dématérialisation**

Une politique de voyage adaptée avec la généralisation des systèmes de réunion à distance permettrait une réduction de 20% des déplacements professionnels. Plusieurs cas d'études mesurés par des entreprises (Vodafone, BT) montrent des gains en termes d'émissions de GES significatifs.

Sur le télétravail, l'étude cible environ 16 millions de personnes éligibles au télétravail. Des cas d'études chez BMW, Sun Microsystems, Renault et HP montre des gains non négligeables en termes d'empreinte carbone. Enfin pour le e-commerce, une étude de la FEVAD (Fédération du E-commerce et de la Vente A Distance) datant de 2009 est reprise et cite une réduction de 75% des émissions de GES par livraison (environ 20% des achats en 2020).

- **Bâtiments**

Au-delà de l'amélioration de la performance énergétique de l'enveloppe et des systèmes, les TICs peuvent permettre des gains significatifs. L'automatisation des systèmes thermiques et d'éclairages permettent le plus de gain dans le résidentiel : environ 10% de gain sur le chauffage et 50% de réduction de la consommation électrique pour l'éclairage par ce biais. Pour le tertiaire, la maquette numérique et la gestion centralisée informatisée de la consommation énergétique des bâtiments permettent 20% et 40% de gains sur le chauffage et l'éclairage.

- **Industrie**

Pour l'industrie, seule la variation de vitesse des moteurs industriels selon la charge imposée a été quantifiée, grâce à des cas d'études pratiques (Étude ZVEI, ABB), avec 30% de réduction de la consommation électrique des moteurs par ce biais.

- **Confrontation des résultats à d'autres études prospectives et/ou généralistes TIC**

Les résultats sont confrontés aux études Smart 2020 Global [9], Etats Unis [26] et Portugal [28], ainsi qu'à l'étude BIO IS « Impacts of Information and Communication Technologies on Energy Efficiency » de 2008 [18]. Une analyse des écarts avec l'étude « SMART2020 Global » [9] montre deux sources principales d'écart : soit un contenu carbone plus faible pour le mix électrique français, soit des hypothèses de chiffrage des gains différentes (plus agressives dans les études SMART2020). Enfin, des éléments de réponse sont apportés par rapport à l'étude « TCI et Développement Durable » du CGEDD [7] et aux limites.

7. Conclusions et discussions de l'auteur

Globalement, les TICs permettent des réductions d'émissions de GES significatives, avec des gains importants dans le secteur des transports, la dématérialisation et l'optimisation des consommations électriques. Mis à part la comparaison avec les résultats d'autres études comparables pour juger de la robustesse des chiffres produits ici, l'étude ne fait pas l'objet de discussions particulières.

8. Limites, points d'attention, besoins de travaux complémentaires

- L'étude a le mérite de décliner le concept des études SMART2020 au périmètre français et à ses spécificités (mix électrique peu carboné notamment). Un important travail de synthèse a été fait pour identifier des gains potentiels des TICs selon les applications. Le fait de distinguer les hypothèses de gain selon leur provenance (donnée empirique ou théorique) est appréciable, de même que la confrontation à d'autres études préexistantes. Un certain nombre d'experts sectoriels ont également été mobilisés. Cependant, le fait de prendre les résultats de projets pilotes isolés a ses limites et beaucoup de données sont reconstituées indépendamment du contexte socio-économique dans lesquelles elles ont été produites. L'homogénéité des différents chiffres est donc relativement faible. Le fait de prendre les résultats de ces projets pilotes comme projections directement atteignables en 2020 est également critiquable.
- Cependant, l'impartialité de l'étude est discutable : elle est financée par l'industrie et ne fait apparaître les TICs que comme solution aux impacts environnementaux. Aucune mention n'est faite des effets rebonds. L'empreinte directe des TICs est évoquée dans l'autre étude faite par l'IDATE, mais les impacts directs et indirects des TICs ne sont pas confrontés, ce qui aurait pourtant permis d'aller au bout du raisonnement lancé par les deux études.
- Le périmètre méthodologique de l'étude n'est pas satisfaisant : l'évaluation environnementale n'est pas multicritère, et ne couvre pas tout le cycle de vie des solutions étudiées. Ceci se voit notamment en diapositives 19 et 49, où l'on voit que l'intensité carbone des filières énergétiques non carbonées est nulle, ou que les émissions de GES du train par km parcourue sont nulles. Plus de transparence, de rigueur et d'homogénéité aurait été souhaitable sur la

quantification environnementale des impacts, qui consiste en une agrégation hétérogène de données de seconde main (obligatoire vu l'exercice).

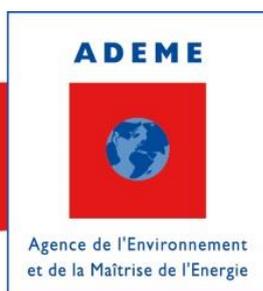
- Globalement, l'étude a une approche intéressante et dégage des enseignements enrichissants au regard du contexte français. Cependant, elle mériterait d'être actualisée, en adoptant une méthodologie plus robuste. Ceci passerait en premier lieu par l'inclusion de tous les types d'effets des TICs, et l'adoption d'une méthodologie environnementale plus fidèle aux principes de l'ACV, c'est-à-dire multi-étapes et multicritère

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

www.ademe.fr



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr