

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION :

ORDRES DE GRANDEURS ET RECOMMANDATIONS METHODOLOGIQUES

RAPPORT FINAL

Février 2021

Responsables scientifiques :

Etienne Lees-Perasso, Julie Orgelet, Georges Ouffoue
CONSORTIUM NEGAOCTET



L'association SCORE LCA est une structure d'étude et de recherche dédiée aux travaux relatifs à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et à la quantification environnementale. Elle vise à promouvoir et à organiser la collaboration entre entreprises, institutionnels et scientifiques afin de favoriser une évolution partagée et reconnue, aux niveaux européen et international, de la méthode d'Analyse du Cycle de Vie et de sa mise en pratique.

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr
- ✓ Les points de vue et recommandations exprimés dans ce document n'engagent que les auteurs et ne traduisent pas nécessairement, sauf mention contraire, l'opinion de l'ensemble des membres de SCORE LCA.
- ✓ Les informations et les conclusions présentées dans le présent document ont été établies au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Comité de suivi pour SCORE LCA : Camille Jeandaux – ENGIE ; Denis Le Boulch, Anne Grau, Pierre-Loup Dumas – EDF; Jean-Paul Cazalets, Marion Pasquier – Total ; Séverine Méhier – Veolia R&I ; Yves Babian, Ibrahim Khalid, Olivier Mahe – Renault ; Rafaele Desplats, Fanny Fleuriot, Erwan Autret – ADEME ; Bénédicte Couffignal – RECORD - Jade Garcia, Philippe Osset – SCORE LCA.

A. SOMMAIRE

A. SOMMAIRE	2
B. Rappel	6
a. Contexte de l'étude	6
b. Objectifs de l'étude	6
c. Vocabulaire et périmètre de l'étude	6
C. Phase 1 – Etat de l'art – Bibliographie - Methodologie de travail	8
a. Objectifs	8
b. Période d'intervention	8
c. Méthodologie d'élaboration de l'échantillon	8
Principes généraux	8
Processus	9
Etape 1 – Identification des publications	9
Etape 2 - Screening	9
Etape 3 – Analyse de l'échantillon	9
d. Référentiel d'analyse des publications	10
Sous-groupe renseigné à l'étape 2 : Screening	10
Sous-groupe renseigné à l'étape 3 : Etude échantillon restreint	11
D. Phase 1 – Description de l'échantillon initial & enseignements	12
a. Répartition temporelle des publications	12
b. Type de documents identifiés	12
c. Thématique (Catégorie 1) & Méthode d'analyse (Catégorie 2)	13
d. Périmètres d'études (Catégorie 3)	13
e. Secteurs d'activité	15
f. Synthèse	15
E. Phase 1 – Analyse de l'échantillon	17
a. Publications sélectionnées	17
b. Principaux apports	21
Axe - Internet des objets	21
Complétude	21
Cycle de vie	21
Périmètre	21
Méthodes, Outils et base de données, Indicateurs	21
Méthodes	21
Outils et bases de données utilisés :	22
Sources des données	22
Sélection d'indicateurs	22
F. Phase 1 – Axes thématiques à développer en priorité	23

Empreinte environnementale – De l’Approche monocritère à l’approche multicritère	23
Unité fonctionnelle, Scénario d’usage et méthode d’allocation	23
Représentativité temporelle & Gestion de l’obsolescence et de la maturité	23
Représentativité géographique & Gestion de la chaîne de valeur	23
Représentativité technologique & Disponibilité des données	23
De l’ACV attributionnelle à l’ACV conséquentielle – Traitements des effets indirects	23
G. Phase 2 – Proposition de publications	25
a. Publications proposées	25
b. Pourquoi cette proposition ?	30
Transverse :	30
IoT	30
Vidéo en ligne :	30
Pratiques professionnelles	30
Autre	30
c. Sélection finale	31
Méthodologie :	31
Etudes retenues :	31
H. Phase 2 – Analyse approfondie des documents - Méthodologie	31
I. Phase 2 – Analyse approfondie des documents - Résultats	32
a. Analyse approfondie des études	32
#94 – « Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects »	32
#167 – “An Integrated Method for Environmental Assessment and Ecodesign of ICT- based Optimization Services”	33
#79 – “Integrative approaches to environmental life cycle assessment of consumer electronics and connected media”	35
#80 - “Lessons learned – Review of LCAs for ICT products and services”	36
#19 - CLIMAT : L’INSOUTENABLE USAGE DE LA VIDÉO EN LIGNE - Un cas pratique pour la sobriété numérique	38
#166 – “Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review”	40
b. Conclusions générales	42
Manque d’hypothèses communes	43
Manque de données primaires et secondaires	43
Il n’existe pas d’étude idéale pouvant servir de référence	43
Difficulté de prise en compte des effets indirects	44
J. Phase 3 – Préconisation d’utilisation de données robustes	44
Données sur les services numériques dans leur globalité	45
Données sur les équipements utilisés dans les services numériques	47

Données techniques sur les équipements utilisés dans les services numériques au sein des organisations	49
K. Phase 3 – Etablissement de recommandations - PCR	50
Introduction	50
Méthode d'élaboration des recommandations	50
Recommandations issues du ILCD handbook	50
Prise en compte des effets indirects	50
Provisions: 5.3 Classifying the decision-context	50
Classification du niveau d'ACV	50
Provisions: 6.2.1 Consistency of methods, assumptions and data	50
Unité fonctionnelle	51
Provisions: 6.4 Function, functional unit, and reference flow	51
Règle de coupure	52
Provisions: 6.6 Deriving system boundaries and cut-off criteria (completeness)	52
Sélection des indicateurs d'impact	52
Provisions: 6.7 Preparing the basis for the impact assessment	52
Comparaison	53
Provisions: 6.10 Comparisons between systems	53
Provisions: 7.3 Planning data collection	53
Provisions: 7.4.2.3 Describing what the unit process represents	54
Modélisation du système	54
Provisions: 7.8 Modelling the system	54
Allocations	54
Provisions: 7.9.3 Solving multifunctionality by allocation	54
Identification des aspects environnementaux significatifs	54
Provisions: 9.2 Identification of significant issues	54
Contrôle de complétude	55
Provisions: 9.3.2 Completeness check	55
Recommandations additionnelles	55
1. Provisions: Effets indirects	55
2. Provisions: Coût environnemental de possession et coût environnemental d'usage	58
3. Provisions: Coût environnemental moyen et coût environnemental marginal	58
4. Usages multiples d'un service numérique :	59
L. Phase 3 – Ouverture	61
1. Niveau de distribution des services numériques	61
2. Caractère programmatique	61
3. Fin de vie des équipements électriques et électroniques	61
4. Acculturation vs. greenwashing	62
5. Evolutions réglementaires	62

6. Multiplication des objets connectés	62
7. Intelligence artificielle, blockchain, cryptomonnaies	62
8. Sauts techniques	62
9. Formation des nouveaux ingénieurs à l'ACV et intégration des pratiques.	63
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	64

B. RAPPEL

a. Contexte de l'étude

La transition numérique permet de répondre en partie aux enjeux de la transition écologique. Néanmoins, si le secteur du logiciel et des services numériques est perçu comme un secteur de l'immatériel (dont les impacts ne sont pas locaux et donc souvent oubliés), la démultiplication des services connectés n'est pas exempte d'impact environnemental [1] [2] et leur développement peut conduire à des effets rebonds indésirables [3] [4]. Dans ce contexte, l'évaluation de l'impact environnemental du numérique reste néanmoins un sujet émergent [5].

Ce sujet commence cependant à être pris en compte dans la réglementation. C'est le cas notamment de la loi relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire qui impose aux opérateurs télécom de fournir à leur client la quantité de données consommée, et les équivalent d'émission de gaz à effet de serre associés. Cette loi nécessite cependant l'élaboration de la méthode de calcul, ce qui s'inscrit pleinement dans les travaux prévu par le projet ScoreLCA.

b. Objectifs de l'étude

Afin de s'assurer que la transition numérique ne se fera pas au détriment de la transition environnementale, il est nécessaire de disposer de méthodes de détermination des impacts environnementaux consolidés. Cela passe premièrement par la montée en compétence des acteurs, et à l'élaboration de règles sectorielles permettant à la fois de traiter les spécificités des services numériques et des objets connectés, d'harmoniser et de fluidifier les pratiques.

Pour réaliser ce travail, il est essentiel de mener un état des lieux bibliographique afin de déterminer l'avancée actuelle des travaux sur le sujet, l'état des connaissances et les pratiques, et les éventuels consensus ou points de divergence entre les méthodes.

La présente étude a donc pour objectif de :

- Faire un état des lieux et une analyse méthodologique des évaluations environnementales des objets connectés et des services basés sur leur utilisation
- Analyser les choix méthodologiques et les résultats d'impacts obtenus pour ces objets et services
- Proposer des recommandations et bonnes pratiques pour les évaluations environnementales des objets connectés et des services basés sur leur utilisation
- Préconiser des données robustes à utiliser
- Proposer une première version de PCR
- Identifier les tendances futures

L'étude a été réalisée par le consortium Negaoctet, composé du LCIE Bureau Veritas, APL Datacenter, DDemain et GreenIT.fr.

c. Vocabulaire et périmètre de l'étude

En préambule et afin de répondre aux objectifs ci-dessus, il est nécessaire de préciser un certain nombre de notions, ainsi que le périmètre d'étude.

En première approche, deux définitions sont essentielles à déterminer :

- Service numérique : il n'existe pas une définition unique et standardisée des services numériques, cependant le recul de l'industrie sur le sujet a permis de dégager des consensus dans le contexte environnemental :
 - o Définition *Alliance GreenIT* : « Un service numérique est constitué d'un ensemble de logiciels, matériels, réseaux et infrastructures, et d'autres services numériques. Un service numérique permet de réaliser une unité fonctionnelle telle que « réserver un siège dans un train », « prendre rendez-vous chez un médecin », « envoyer un e-mail à des amis », « relever un compteur intelligent », etc. ». [6]

On retrouve ainsi la notion d'unité fonctionnelle au sens de l'ACV : le service répond à une fonction à travers un ensemble de produits (physiques ou virtuels).

- Il convient cependant de noter que l'unité fonctionnelle, si elle reste un axe incontournable de l'analyse environnementale des services numériques, doit également être remise en question dans le cas d'une approche conséquentielle avec la prise en compte des effets rebonds. En effet, l'apparition de nouveaux services rendus possible par les outils numériques, ainsi que le déploiement très large des équipements entraînent des impacts qui ne sont pas tant induit par un service unitaire, mais par la multiplicité, la densification de l'utilisation de ce service.

Une façon de voir les services numériques est selon une architecture en quatre briques : les ressources humaines, les terminaux, le réseau et les datacenters. Ces trois éléments physiques étant orchestrés via une couche logicielle.

- La couche logicielle a une influence sur les impacts de ces trois briques, à travers notamment la modulation de la consommation d'énergie, mais ne génère pas directement d'impact.
- Chacun des éléments matériels constituant les briques physiques, dispose de son propre cycle de vie dont tout ou partie est comptabilisée pour le service numérique concerné à travers une ou plusieurs règles d'allocation.

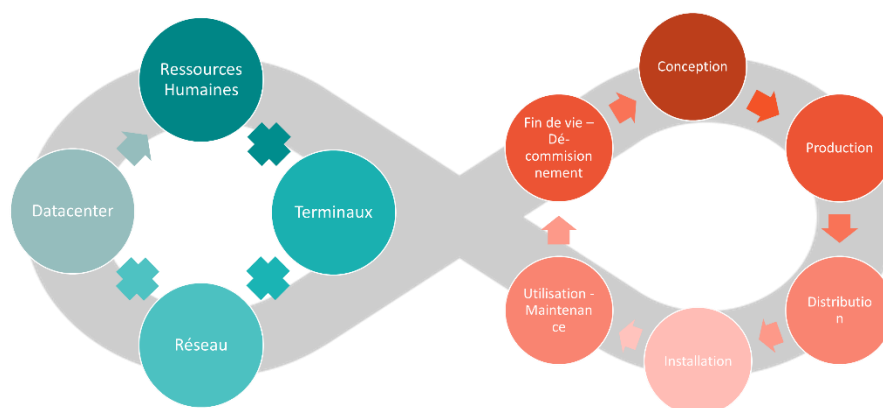


Figure 1 – Intégration du cycle de vie de bien dans les services numériques (extrait de [5] mis à jour)

- Objet connecté (ou de manière plus large, l'internet des objets, IoT) : Ce terme est beaucoup employé, y compris de plus en plus dans le grand public, mais il n'existe pas de définition standardisée. Plusieurs notions émergent cependant :
 - Interconnexion d'objets physiques ou virtuels interopérables à travers le réseau internet
 - Mise à disposition de services numériques associés à ces objets, même pour des objets dont la fonction première n'est pas associée aux enjeux du numérique

Une définition reprenant ces aspects est celle de l'*Union internationale des télécommunications (UIT) du 4 juillet 2012* : « une infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets (physiques ou virtuels), grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables existantes ou en évolution ». [7]

Au sens de l'ACV, L'IoT peut être vu comme la « systémisation » de l'ACV produit dans un système global plus large, via sa connectivité et son service numérique, qui en devient indissociable. Ainsi, l'ACV d'un objet connecté devient une ACV de système numérique.

Ces définitions pourront être complétées au besoin, lors de l'étude.

C. PHASE 1 – ETAT DE L'ART – BIBLIOGRAPHIE - METHODOLOGIE DE TRAVAIL

a. Objectifs

Cette première partie de l'analyse bibliographique a pour objet :

- d'identifier, de classer et d'analyser les études publiées en fonction de différents critères (voir figure 1 + référentiel d'analyse)

Afin de :

- Etablir une cartographie des objets et services couverts ou non.
- Identifier le niveau de maturité de l'évaluation environnementale des services numériques
- Identifier les méthodes d'analyse utilisées
- Identifier les points forts et faibles des études sélectionnées.
- Identifier les disparités méthodologiques et éventuellement les divergences d'opinions et de résultats.
- Identifier des publications qui feront l'objet d'analyses approfondies

b. Période d'intervention

L'analyse bibliographique a eu lieu entre octobre 2018 et mai 2020 :

- La période d'octobre 2018 à janvier 2020 correspond à l'évaluation de l'état de l'art réalisé dans le cadre du projet NegaOctet relatif aux services numériques au sens large et à la prise en considération des impacts environnementaux de chaque tiers du service numérique : terminaux, réseaux et datacenters.
- La période de janvier à mai 2020 a permis de se concentrer plus particulièrement sur :
 - o L'évaluation de l'impact environnemental des IoT
 - o L'évaluation de l'impact environnemental des services numériques au complet.

c. Méthodologie d'élaboration de l'échantillon

Le processus d'élaboration de l'analyse de la bibliographie est itératif et pourra être poursuivi jusqu'à la fin du projet (à savoir fin 2020).

Principes généraux

Les principes généraux permettant l'identification et la sélection des sources analysées dans le cadre de cette étude sont décrits dans le tableau ci-après :

Sujet	Quels sont les impacts environnementaux des objets connectés et des services numériques ?
Questions de recherche	Quels objets connectés et services numériques font l'objet d'une analyse environnementale ? Quelle méthodologie d'évaluation de l'impact environnemental est considérée ? Quels indicateurs sont considérés ? Quel périmètre d'évaluation est couvert (tiers et phase du cycle de vie) ? A quels objectifs répondent ces études ?
Mots clés	(1) IoT et/ou ICT et/ou digital services* (2) Environmental impact assessment et/ou environnemental Impact et/ou Carbon footprint et/ou LCA
Processus de recherche	- Processus de recherche itératif - Processus de recherche (voir Figure 2) : - o Etablissement de la grille de recherche - o Identification des sources de données - o Validation de l'intérêt des sources : lecture titre + abstract

	○ Sélection des sources à considérer pour une analyse approfondie. ○ Etude de l'échantillon consolidé ○ Sélection des articles pour la phase 2 - 2 équipes de recherches : ○ Services numériques et tiers de l'infrastructure ○ IoT
Critères de sélection	- Scope : ○ Méthodologies et normes (en vue des travaux PCR mais non analysé à ce stade) ayant permis d'établir le référentiel d'analyse ○ Etude d'impact environnemental de services 3 tiers : IoT ou Services numériques ○ Etude d'impacts incluant effets directs et/ou effets indirects - Type de travaux : cas concrets ou travaux prospectifs ou revue documentaire ou outils - Sources : ○ Publication scientifique avec revue ○ Etude/Rapport ACV avec revue critique ○ Thèse ○ Norme ○ Article de conférence ○ Livre blanc et référentiels technique ○ Rapport sans revue critique - Validité temporelle : 2009-2020 - Langue : Anglais, Français
Critères d'exclusion	- Scope : Pas d'aspect environnemental, méthode qualitative, focalisé sur 1 seul tiers du service numérique (terminal ou réseau ou datacenter) - Type de travaux : Aucun - Sources : articles de presse, publication internet grand public, ... - Date de publication : Avant 2009 - Langue : Toutes les autres langues

Figure 1 – Champ de l'analyse bibliographique

Processus

Etape 1 – Identification des publications

Sur la base des mots clés précédemment identifiés, plus de 750 publications susceptibles d'alimenter les travaux de recherche en cours ont été identifiées. Une analyse de premier ordre (réalisée dans le cadre de NegaOctet et du présent projet) a permis de réduire cet échantillon à 170 publications.

Etape 2 - Screening

Dans un second temps (Screening), les abstracts ont été lus et référencés pour retenir 48 publications.

Etape 3 – Analyse de l'échantillon

Une analyse plus approfondie sur la base du référentiel présenté dans le paragraphe suivant a été menée afin de :

- Obtenir un premier niveau de réponse aux questions de recherche identifiées précédemment
- Sélectionner les publications qui feront l'objet d'une analyse approfondie en phase 2 du présent projet
- Alimenter la réflexion quant à la rédaction d'un PCR répondant aux enjeux de l'évaluation des impacts environnementaux des services numériques

Le processus d'élaboration de l'échantillon est présenté dans la figure ci-dessous :

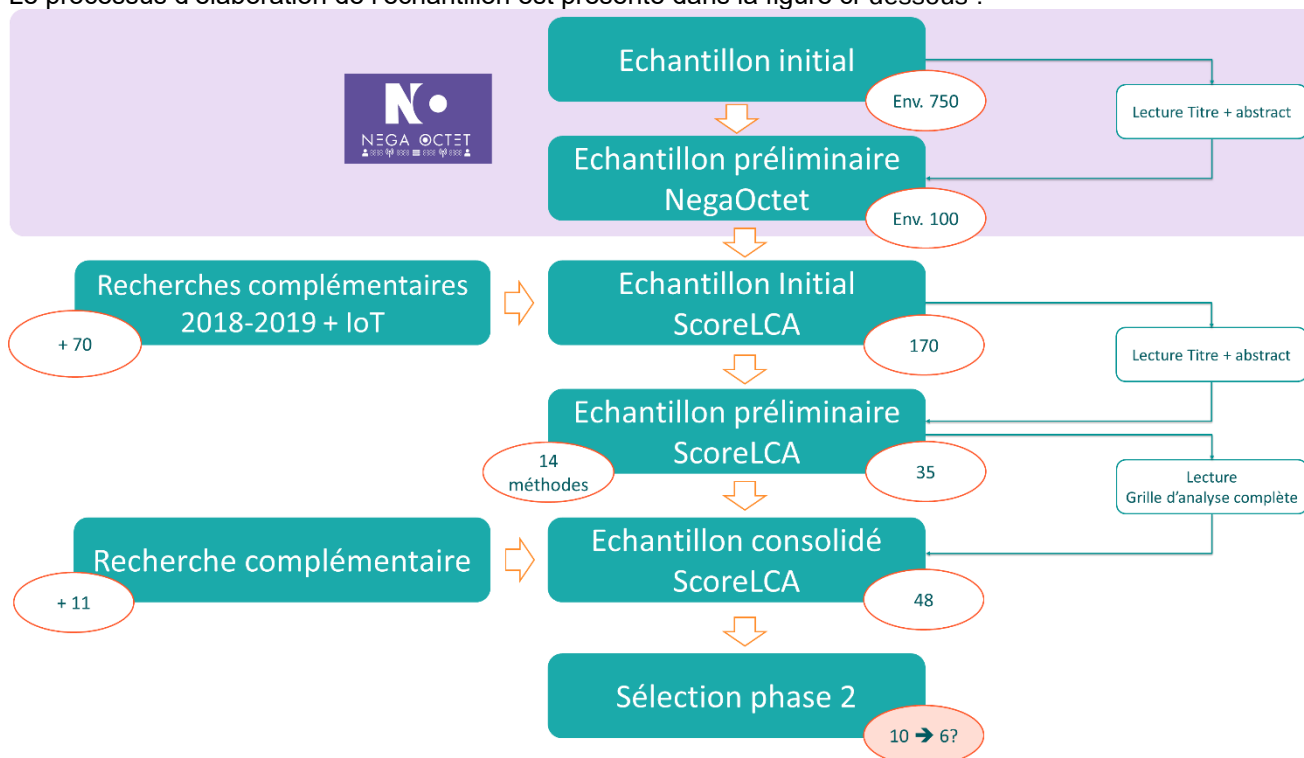


Figure 2 - Méthode – Définition de l'échantillon et méthode d'identification de sélection des sources pertinentes

L'ensemble de l'échantillon initial ScoreLCA est présenté dans la grille d'analyse : Etude biblio_grille d'analyse_200527_V3

d. Référentiel d'analyse des publications

Le référentiel d'analyse correspond à la grille d'analyse (sous format excel) qui a permis à l'équipe projet de travailler en sous-groupe de manière homogène. Les paramètres considérés sont les suivants :

Sous-groupe renseigné à l'étape 2 : Screening

- Date de publication du document
- Date de collecte des données : Elle est différente de la date de publication et donne une idée plus fine de la représentativité temporelle de l'étude
- Langue : Anglais ou français
- Titre
- Auteurs
- Sponsor/Commanditaire de l'étude
- Journal/Editeur : Editeur de l'étude
- Type de document : Publication scientifique, Référentiel / Méthodes / Normes / PCR, Publication privée, Rapport RSE, Livre, Outil/Calculateur, Rapport d'Analyse du Cycle de Vie, Méthode, Livre blanc, Thèse, Edito, Thèse de Master / Projet étudiant, Conference Paper, Revue documentaire,

- Catégorie 1 : Etude d'impact environnemental; Documentation technique; Méthode; Prospective/Trajectoire; Etude préparatoire; Enquête; Référentiel
- Catégorie 2 : Mono-critère - bilan carbone; Mono-critère - énergie; Multi-critère - ACV; Multi-critère - ACV simplifiée; MFA - Material Flow Analysis; I/O - Input/Output; Méthode qualitative; Généraliste IT; Mesure d'énergie; Ecoconception; Définition; Sobriété numérique;
- Catégorie 3 : Equipement; Equipement périphérique; Réseau; Service numérique; Composants électroniques; Secteur/Domaine d'activité; Système d'information; IoT; Logiciel; Data center
- Mots-clef : Mots clefs proposés par l'auteur

Sous-groupe renseigné à l'étape 3 : Etude échantillon restreint

- Notes du reviewer *
 - o Remarques/Commentaire général
 - o Forces – Faiblesses : relatives aux sources des données, développement méthodologique, transparence de l'étude
- Type d'ACV – (inspiration) : ACV Attributionnelle / ALCA; ACV conséquentielle / CLCA; ACV-IO / IO-LCA; Integrated LCA; Scenario based LCA; Hybrid LCA; Screening LCA; A+C LCA
- Référentiel normatif (inspiration) - Dans certains cas, les études d'impacts sont réalisées en conformité ou en s'inspirant de référentiels existants (ISO, ETSI, GHG protocol)
- Identification des produits et services couverts / secteurs d'activités
- Unité fonctionnelle
- Objectifs - famille et description :
 - o Famille : Evaluer/diagnostiquer, Comparer des résultats, Comparer des méthodes, Comparer des technologies, Prospective, Cadrer la méthodologie d'évaluation, Comparer des solutions, Sensibiliser, Mettre en œuvre des bonnes pratiques (Ecogestes, ...)
 - o Description : commentaire libre
- Scope :
 - o Secteur/Domaine d'activité ; Service complet ; Terminal (Terminal de consultation/Objet/capteur) ; Réseau ; Datacenter ; Plateforme IoT (entre équipement et DC - gateway applicatif...); Logiciel ; Equipement périphérique ; Composant électronique ; Système d'information
- Identification des produits et services substitués
- Périmètre géographique
- Catégories d'impact couvertes :
 - o les études sélectionnées peuvent permettre d'évaluer différentes catégories d'impact, et pour chaque catégorie suivre plusieurs méthodes de calcul. Il est nécessaire d'identifier ces aspects afin d'avoir une vision correcte des ACV réalisées.
 - o Certaines études peuvent appliquer des méthodes de normalisation et de pondération, cela sera décrit dans cet item.
- Comment est prise en compte la fin de vie ?
 - o Exclue ; Inclue en méthode des stocks – incinération ; Inclue en méthode des stocks - scénario DEEE (% incinération, %recyclage, ...) ; Inclue en intégrant des bénéfices - incinération avec récupération d'énergie ; Inclue en intégrant des bénéfices - scénario DEEE avec bénéfice en fin de vie ; Inclue 50/50 - incinération avec récupération d'énergie ; Inclue 50/50 - scénario DEEE avec bénéfice en fin de vie
- Identification des bénéfices associés aux services numériques
- Facteurs d'allocation – Terminaux - Réseau - Data center

* Champ obligatoire

D. PHASE 1 – DESCRIPTION DE L'ÉCHANTILLON INITIAL & ENSEIGNEMENTS

a. Répartition temporelle des publications

Les publications identifiées sont réparties sur la période 2001 – 2020. On constate une forte concentration des publications en 2014. En revanche, malgré son essor et la prise de conscience récente autour des enjeux de l'impact environnemental du numérique, le sujet ne semble pas d'avantage traité dans les 3 dernières années.

Exclusion / Réduction de l'échantillon

Dans le cadre de notre analyse, les publications datant de plus de 10 ans (publication antérieures à 2010), ont été exclues soit 25 publications. En effet, compte tenu de l'évolution technologique rapide et de la mutation des usages, ces études peuvent être considérées comme obsolètes.

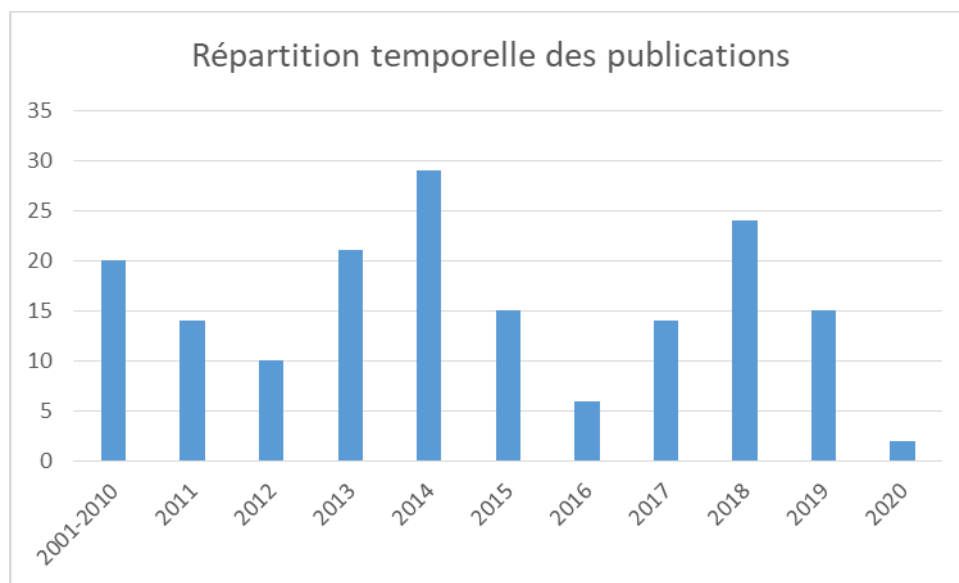


Figure 3 - Répartition temporelle des publications

b. Type de documents identifiés

L'objectif de l'étude étant de disposer d'ordres de grandeurs et de formuler des recommandations méthodologiques, il est donc nécessaire de disposer d'un échantillon de publications dont les résultats sont fiables et dont la plupart ont fait l'objet d'une revue ou d'un travail de concertation. Ainsi, plus de 79% des documents étudiés sont des publications issues de journaux scientifiques.

Conference Paper – Editio	2	1%
Livre	1	1%
Livre blanc	3	2%
Méthode - Norme - Référentiel - PCR	14	8%
Outil	6	4%
Publication	132	77%
Publication - Revue documentaire	3	2%
Publication privée	2	1%
Rapport RSE	1	1%
Thèse	6	4%
Projet étudiant	1	1%

Figure 4 - Répartitions de publications étudiées

Exclusion / Réduction de l'échantillon

Les documents (14) portant sur des méthodes ou des outils n'ont pas été étudiés en première approche. Ils alimenteront la phase 3 de cette étude.

c. Thématique (Catégorie 1) & Méthode d'analyse (Catégorie 2)

Compte tenu de l'objectif de l'étude et des mots clés ayant permis la recherche initiale, un large panel d'étude d'impact environnemental (69% du panel considéré) a été identifié.

Parmi ces études d'impact environnemental, plusieurs approches ont été identifiées : Approche qualitative, MFA - Material Flow Analysis, Monocritère - empreinte carbone, Monocritère – Energie, Multicritère – ACV, Multicritère - ACV simplifiée, Multicritère - Energie/Carbone, Multicritère - Energie/ressources. Pour la majorité, les études sélectionnées sont quantitative et mono ou multicritère (voir tableau ci-dessous)

On note que la méthode ACV est largement plébiscitée aussi bien au niveau produit que service. Lorsque la méthode ACV ne peut être mise en œuvre en totalité, elle est substituée par une analyse multicritère énergie/carbone ou la réalisation d'une empreinte carbone.

	Nombre de Titre
Analyse initiale - Exclu	25
Analyse préliminaire ScoreLCA – exclu après screening	80
Documentation technique	5
Enquête	2
Etude d'impact environnemental	54
<i>Méthode qualitative</i>	4
<i>Monocritère - empreinte carbone</i>	10
<i>Monocritère - Energie</i>	9
<i>Multicritère - ACV</i>	29
<i>Multicritère - Energie/Carbone</i>	1
<i>Multicritère - Energie/ressources</i>	1
Etude préparatoire	4
Méthode	5
Outil	4
Prospective/Trajectoire	4
Référentiel de bonnes pratiques	2
Analyse préliminaire ScoreLCA – retenu après screening	48
Documentation technique	3
Etude d'impact environnemental	39
<i>Méthode qualitative</i>	2
<i>Monocritère - empreinte carbone</i>	6
<i>Monocritère - Energie</i>	3
<i>Multicritère - ACV</i>	17
<i>Multicritère - ACV simplifiée</i>	4
<i>Multicritère - Energie/Carbone</i>	7
<i>Multicritère - Energie/ressources</i>	1
Prospective/Trajectoire	6
Echantillon - Méthode - Phase 3	17

Figure 5 – Répartitions des publications par thématique et méthode d'analyse.

Exclusion / Réduction de l'échantillon

Les référentiels de bonnes pratiques, les méthodes (voir phase 3), les enquêtes, les études préparatoires, les outils ont été exclues

d. Périmètres d'études (Catégorie 3)

Compte tenu de notre objectif initial, les études portant sur les services complets ou l'IoT au sens large ont été sélectionnées.

Comme anticipé, seulement 10% des publications portent sur l'IoT. L'approche consistant à élargir le périmètre de l'étude aux services numériques au sens large est validée. A ce stade, 24% des publications identifiées (hors méthode) portent sur l'IoT et les services numériques.

Ainsi, l'analyse bibliographique approfondie porte à 52% sur des études de services numériques et à 29% sur des études ayant pour objet l'IoT.

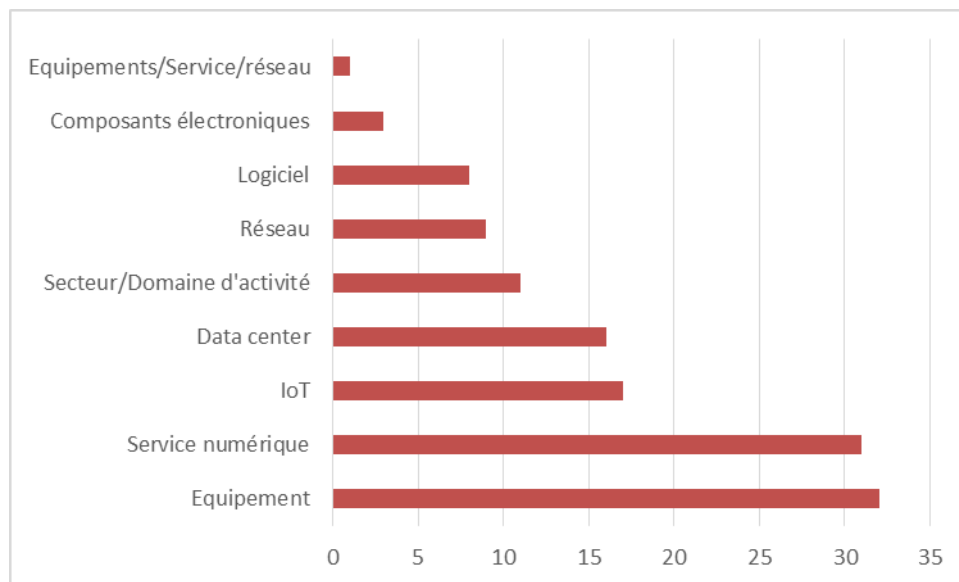


Figure 6 – Graphique - Répartitions des publications par famille

Étiquettes de lignes	Nombre de Titre	Répartition en % sur la totalité de l'échantillon	Répartition en % sur l'échantillon final
Analyse initiale – Exclu	25		
Analyse préliminaire ScoreLCA – exclu après screening	80		
Composants électroniques	3	2%	
Data center	16	9%	
Equipement	31	18%	
Equipements/Service/réseau	1	1%	
IoT	3	2%	
Logiciel	5	3%	
Réseau	9	5%	
Secteur/Domaine d'activité	6	4%	
Service numérique	6	4%	
Analyse préliminaire ScoreLCA - retenu	48		
Equipement	1	1%	2%
IoT	15	8%	29%
Logiciel	3	2%	6%
Secteur/Domaine d'activité	5	3%	10%
Service numérique	25	15%	52%
Echantillon - Méthode - Phase 3	17		

Figure 7 – Répartitions des publications par famille

Exclusion / Réduction de l'échantillon

Les études portant a priori sur un seul tiers du service numérique soit équipement, soit réseau, soit datacenter ont été exclues.

e. Secteurs d'activité

Alors que l'Internet des objets est présenté comme un axe majeur de la transition écologique dans de nombreux secteurs tel que le bâtiment, l'énergie, l'agriculture, la santé, etc. Peu d'études académiques sont menées sur le sujet des impacts environnementaux associés au développement de l'Internet des objets et des services numériques dans ces secteurs.

On remarque que le secteur d'activité pour lequel le plus d'études d'impact environnemental a été mené est le secteur des médias.

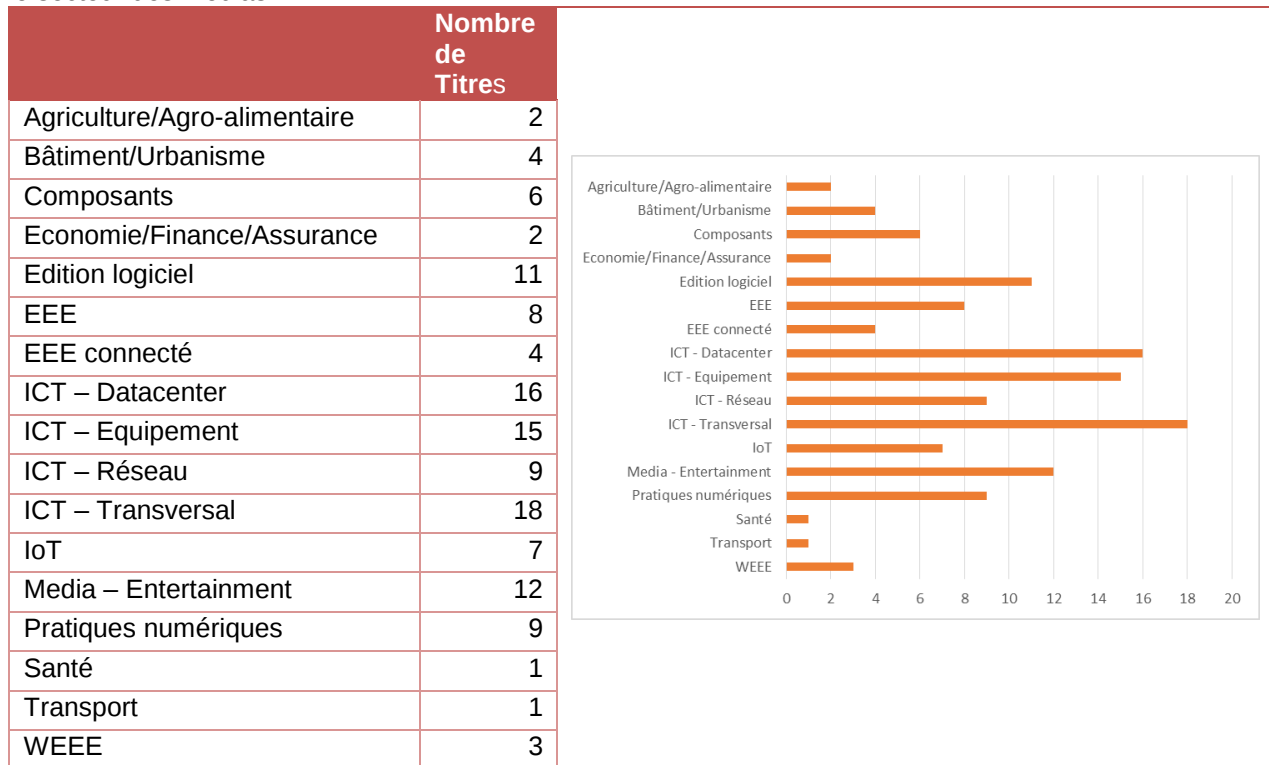


Figure 8 – Répartitions des publications par secteurs

f. Synthèse

Le nuage de mots composés à partir des mots clés issus des études identifiées présenté ci-après permet d'avoir une bonne vision des enjeux soulevés par cette analyse bibliographique :

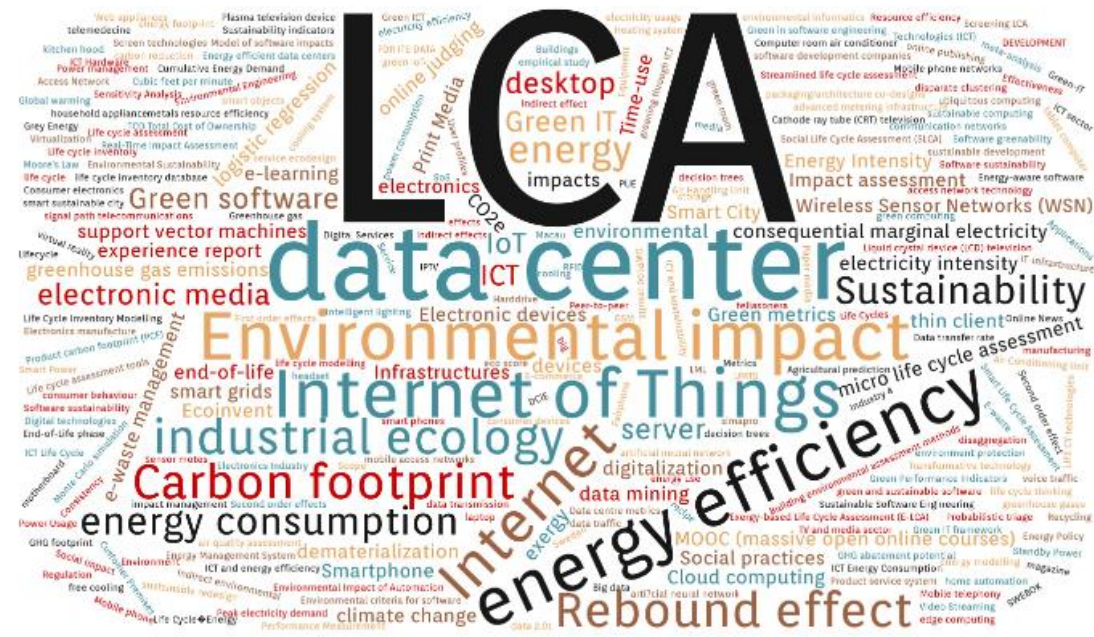


Figure 2 - Nuage de mots – Mots clés articles sélectionnés

En synthèse, grâce à la compilation de 170 publications datant de 2001 à 2020, les éléments suivant émergent :

- Des documents méthodologiques (17 identifiés) ont été développés pour chaque tiers de l'infrastructure numériques et certains portent sur les services numériques dans leur ensemble. (source pour la phase 3 du projet)

Logiciel	1
Equipement	5
Data center	3
Secteur/Domaine d'activité	2
Equipements/Service/réseau	2
Service numérique	4

Figure 9 – Répartitions des méthodes par tiers de l'infrastructure d'un service numérique

- Il existe des études portant indépendamment sur chaque tiers (logiciel, équipement, réseau, datacenter) d'un service numérique. Ces apports sont rarement articulés pour évaluer l'impact environnemental d'un service ou d'un usage numérique sur l'ensemble de la chaîne de transmission, réception de l'information. Seul 10% des études portent sur l'internet des objets pourtant présenté comme l'un des piliers de la transition environnementale. Le champ de l'étude a donc été élargi à l'internet des objets et aux services numériques.
- La méthode d'évaluation la plus utilisée est la méthode d'analyse du cycle de vie complète ou réduite à l'évaluation du potentiel de changement climatique et à la consommation d'énergie primaire.

Après avoir réduit notre champ d'analyse à 48 publications, il s'agit désormais d'identifier :

- Les apports des études identifiés
- Les écueils rencontrés par les auteurs
- les choix méthodologiques adoptés
- les principaux résultats obtenus et de confronter ceux-ci entre eux.

E. PHASE 1 – ANALYSE DE L'ÉCHANTILLON

a. Publications sélectionnées

Les publications présentées dans le tableau ci-dessous ont fait l'objet d'une lecture plus approfondie (elles sont présentées de manière approfondie dans le tableur Excel associé à cette étude :

Index	Date de publication	Titre	Auteurs	Journal/Editeur
18	2014	Carbon Footprint of Telemedicine Solutions - Unexplored Opportunity for Reducing Carbon Emissions in the Health Sector	Asa Holmner; Kristie L. Ebi; Lutfan Lazuardi; Maria Nilsson	Plosone
19	2019	CLIMAT : L'INSOUTENABLE USAGE DE LA VIDÉO EN LIGNE - Un cas pratique pour la sobriété numérique	The Shift Project - Maxime Efoui-Hess	The shift project
22	2020	DÉPLOYER LA SOBRIÉTÉ NUMÉRIQUE	The Shift Project	The shift project
23	2019	Empreinte environnementale du numérique mondial	Frédéric Bordage	GreenIT.fr
25	2019	How LCA contributes to the environmental assessment of higher order effects of ICT application: A review of different approaches	Johanna Pohl, Lorenz M. Hilty, Matthias Finkbeiner	Journal of cleaner production
36	2018	Environmental impact assessment of online advertising	M. Pärssinen, M. Kotil, R. Cuevas, A. Phansalkar, J. Manner	Environmental Impact assessment review
37	2018	Environmental Issues in Internet of Things: Challenges and Solutions	Laura-Diana Radu	ACTA UNIVERSITATIS DANUBIUS
41	2018	Life-cycle greenhouse gas emissions of e-books vs. paper books: A Japanese case study	Kiyotaka Tahara, Hirokazu Shimizu, Katsuhito Nakazawa, Hiroyuki Nakamura, Ken Yamagishi	Journal of Cleaner Production
42	2013	Impact of Office Productivity Cloud Computing on Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions	Daniel R. Williams, Yinshan Tang	Environmental Science and Technology
43	2018	Neutreo by APL, LCIE, GreenIT.fr; Outil GreenConcept + rapport ACV - The case of ITK	Caroline VATEAU, Damien Prunel	Rapport d'accompagnement
45	2018	The Cost & Sustainability of Bitcoin	HassMcCook	no
49	2017	Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations	Lotfi Belkhir, Ahmed Elmeligi	Journal of cleaner production
55	2017	Life Cycle Assessment of a Virtual Reality Device	Anders S. G. Andrae	Challenges 2017, 8, 15; doi:10.3390/challe8020015 www.mdpi.com/journal/challenges
59	2017	Sustainable software products—Towards assessment criteria for resource and energy efficiency	Eva Kern, Lorenz M. Hilty, Achim Guldner, Yuliy V. Maksimov, Andreas Filler, Jens Gröger, Stefan Naumann	Future Generation Computer Systems

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

Index	Date de publication	Titre	Auteurs	Journal/Editeur
64	2015	Green Software. Final report of the project: Establishing and exploiting potentials for environmental protection in information and communication technology (Green IT)	Prof. Dr. Lorenz Hilty, Dr. Wolfgang Lohmann, Dr. Siegfried Behrendt, Michaela Evers-Wölk, Prof. Dr. Klaus Fichter, Dr. Ralph Hintemann	Future Generation Computer Systems
72	2015	On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030	Anders S. G. Andrae and Tomas Edler	Challenges
75	2014	Evaluating the Sustainability of electronic Media: Strategies for Life Cycle Inventory Data Collection and their Implications for LCA Results	Roland Hischer, Mohammad Ahmadi Achachlouei, Lorenz M. Hilty	Environmental Modelling & software
76	2015	Redefining scope: the true environmental impact of smartphones?	James Suckling & Jacquetta Lee	Springer
79	2014	Integrative approaches to environmental life cycle assessment of consumer electronics and connected media	Paul Teehan	The University of British Columbia
80	2014	Lessons learned – Review of LCAs for ICT products and services	Yevgeniya Arushanyan, Elisabeth Ekener-Petersen, Goran Finnveden	Computers in Industry
91	2015	Environmental Impacts and Benefits of Smart Home Automation: Life Cycle Assessment of Home Energy Management System	Jean-Nicolas Louis, Antonio Calo, Kauko Leiviska, Eva Pongracz	8th Vienna International Conference on Mathematical Modelling (2015)
94	2018	Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects	James H. Gawron, Gregory A. Keoleian, Robert De Kleine, Timothy J. Wallington, and Hyung Chul Kim	ACS Publications
101	2013	A green-IT case study for the swedish social insurance agency	Caspar Willem Honée	Thesis
104	2016	IoT for Smart City Services: Lifecycle Approach	Ahmed Hefnawy, Abdelaziz Bouras, Chantal Cherif	2nd IEEE International Conference on Cloud Computing and Internet of Things (CCIOT 2016)
105	2016	Life Cycle Assessment in an IoT Environment	Xinbao Liu, Jun Pei, Lin Liu, Hao Cheng, Mi Zhou, Panos Pardalos	Optimization and Management in Manufacturing Engineering
106	2013	Carbon footprint of movie distribution via the internet: a Swedish case study	Elisabeth Hochschorner, György Dán, Åsa Moberg	Journal of cleaner production
107	2013	Climate Change Impact of Electronic Media Solutions : Case Study of the Tablet Edition of a Magazine	Mohammad Ahmadi Achachlouei, Åsa Moberg, Elisabeth Hochschorner	
108	2013	Comparative life cycle assessments: The case of paper and digital media	Justin G. Bull, Robert A. Koza	Environmental Impact Assessment Review
111	2013	Environmental Impacts of Electronic Media: A Comparison of a Magazine's Tablet and Print Editions	MOHAMMAD AHMADI ACHACHLOUEI	
115	2017	Green IoT: An Investigation on Energy Saving Practices for 2020 and Beyond	Rushan Arshad ; Saman Zahoor ; Munam Ali Shah ; Abdul Wahid ; Hongnian Yu	IEEE Access

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

Index	Date de publication	Titre	Auteurs	Journal/Editeur
121	2013	Modeling and Assessing Variability in Energy Consumption During the Use Stage of Online Multimedia Services	Daniel Schien, Paul Shabajee, Mike Yearworth, and Chris Preist	Journal of Industrial Ecology
126	2012	Comparative Micro Life Cycle Assessment of Physical and Virtual Desktops in a Cloud Computing Network with Consequential, Efficiency, and Rebound Considerations	Anders S. G. Andrae	Journal of Green Engineering, Vol. 3, 193–218.
131	2018	Life Cycle Assessment of Home Smart Objects: Kitchen Hood Cases	Vincenzo Castorani, Marta Rossi, Michele Germani, Marco Mandolini, Alessio Vita	Elsevier
134	2018	State of the Software Development Life-Cycle for the Internet-of-Things	JOÃO PEDRO DIAS, Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal HUGO SERENO FERREIRA	ACM
139	2018	Understanding IOT Systems: A life cycle Approach	Leila Fatmasari Rahman, Tanir Ozcelebi, Johan Lukkien	The 8th International Symposium on Internet of Ubiquitous and Pervasive Things (IUPT 2018)
141	2011	Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique - clé USB	Yannick Le Guern, Laura Farrant, Edith Martin, Bio Intelligence Service	ADEME
142	2011	Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique - e-commerce	Yannick Le Guern, Laura Farrant, Edith Martin, Bio Intelligence Service	ADEME
144	2011	Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique - requête web	Yannick Le Guern, Laura Farrant, Edith Martin, Bio Intelligence Service	ADEME
145	2011	Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique - Volet courrier électronique	Yannick Le Guern, Laura Farrant, Edith Martin, Bio Intelligence Service	ADEME
156	2019	STREAMLINED ASSESSMENT TO ASSIST IN THE DESIGN OF INTERNET-OF-THINGS (IOT) ENABLED PRODUCTS: A CASE STUDY OF THE SMART FRIDGE	Dekoninck, Elies; Barbaccia, Francesca	INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, ICED19
157	2019	The Internet-of-Things: Reflections on the past, present and future from a user-centered and smart environment perspective	Chin, Jeannette; Callaghan, Vic Allouch, Somaya Ben	Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments
158	2020	Life Cycle Assessment Summary Samsung Galaxy Watch	Vo Huynh, Kattelus Joel, Karki Sunil, Shopneel Shahid	NA
163	2013	Comparative Micro Life Cycle Assessment of Physical and Virtual Desktops in a Cloud Computing Network with Consequential, Efficiency, and Rebound Considerations	Anders S.G. Andrae	Journal of Green Engineering
164	2015	Life Cycle Assessment of a Magazine, Part II: A Comparison of Print and Tablet Editions	Mohammad ahmadi, Achachlouei, Asa Moberg	Journal of industrial Ecology
165	2014	Life cycle assessment of RFID implementation in the fresh food supply chain	Eleonora Bottani, Michele Manfredi, Giuseppe Vignali, Andrea Volpi	International Journal of RF Technologies

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

Index	Date de publication	Titre	Auteurs	Journal/Editeur
166	2018	Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review	Jan C. T. Bieser and Lorenz M. Hilty	MDPI
167	2014	An Integrated Method for Environmental Assessment and Ecodesign of ICT-based Optimization Services	Jeremy Bonvoisin, Alan Lelah, Fabrice Mathieux, Daniel Brissaud	Journal of Cleaner Production
170	2018	Energy consumption of Internet of Things applications and services	Chrispin Gray	
173	2020	Estimation de l'empreinte carbone d'une heure.coeur de calcul	Francoise Berthoud, Bruno Bzeznik, Nicolas Gibelin, Myriam Laurens, Cyrille Bonamy, Maxence Morel, Xavier Schwindenhammer	

Figure 10 - Présentation des publications sélectionnées pour l'étape 2 de la phase 1

b. Principaux apports

Axe - Internet des objets

- **Peu d'études traitent le sujet des ACV des objets connectés.**

Les sources qui traitent des impacts des objets connectés sont les suivantes #91 (Maison connectée), #122 (smart industry) #170 (Applications et services IOT), #131 (hotte connectée), #156 (réfrigérateur connecté) #165 (RFID). Bien que ces études apportent quelques éléments méthodologiques pour la réalisation des ACV des objets connectés, la dernière citée est la plus complète des études. Les analyses de cycle effectuées prennent en compte la globalité du cycle de vie de ces objets et sont conformes aux normes ISO 14 040/44. Les auteurs évaluent également les impacts sur plus d'une dizaine d'indicateurs.

- **L'IoT au service de la collecte des données - Des nouvelles méthodologies d'ACV de service numériques**

Des approches sont développées dans le but d'automatiser la phase d'inventaire de cycle de vie (ICV) afin d'en réduire le temps d'exécution. Certaines utilisent des objets connectés pour collecter les informations (#138). Des capteurs astucieusement placés sur les différentes machines ou processus élémentaires remontent les informations environnementales de chacun de ces équipements. Ce monitoring permettrait de connaître les impacts environnementaux plus précis d'une entité donnée.

Par ailleurs les autres approches se basent sur les techniques d'apprentissage (machine Learning) #68. A partir de la nomenclature des composants élémentaires constituant le produit, par différents algorithmes, les auteurs arriveraient à associer les impacts environnementaux de chacun de ces composants. Les auteurs déterminent également la quantité de chacun des composants (capacité, diodes...).

Même si ces approches semblent prometteuses, leur mise en œuvre reste difficile d'un point de vue technique et les transferts de pollution associés à ces méthodologies doivent être analysés pour s'assurer de leur efficacité environnementale.

Complétude

Cycle de vie

La majorité des études portant sur les 3 tiers d'un service numérique se concentre :

- Soit uniquement sur la phase d'usage (#42, #36, #156)
- Soit sur la phase de fabrication et la phase d'usage, la phase de fabrication pouvant être modélisée uniquement à partir des intrants énergétiques (#36, #19, #42)
- Seules les études (#141, #142 ; #144, #145) intègrent la phase de fin de vie.

Périmètre

De prime abord, certaines publications semblent traiter le sujet d'un service numérique dans son ensemble mais après lecture, elles se concentrent uniquement sur les terminaux ou le réseau local, n'intégrant ni la partie réseau ni le traitement des données dans les datacenters. (#167, #164, #55)

Pour les cas où les 3 tiers du service sont considérés, les auteurs ont des niveaux de maîtrise différents pour chacun des tiers de l'infrastructure (terminaux, réseaux, datacenter) ce qui induit des différences de traitements entre chaque tiers. On retrouve donc des approches différentes et complémentaires qui devraient être synthétisées dans une méthode opérationnelle. Un travail de synthèse pourrait être fait entre les publications.

La partie développement logiciel et ressources humaines n'est jamais traitée au sein d'une étude de service numérique. Elle peut être traitée au sein d'une étude spécifique, mais n'est pas combinée avec les impacts des architectures techniques. Les approches portant sur le logiciel se concentrent majoritairement sur la consommation d'énergie des terminaux (#59, #64, #134).

Méthodes, Outils et base de données, Indicateurs

Méthodes

La majorité des études dites ACV sont en réalité des ACV screening ou des études mono-critères.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

Une trentaine d'étude fait référence à l'ISO 14040 sans pour autant appliquer cette dernière dans sa totalité. 2 études font référence au GHG protocole et 3 études à la norme ETSI 103 199 ou ETSI 203 199.

Outils et bases de données utilisés :

16 études sont basées sur l'utilisation d'outil d'ACV et de bases de données consolidées (type Ecoinvent, EIME ou ELCD). Les autres études d'impacts se réfèrent à des facteurs d'émissions issus de la littérature.

Sources des données

La majorité des études se basent sur des sources de données hétérogènes et peu documentées.

Sélection d'indicateurs

Les analyses d'impacts sont de différents types. Les indicateurs retenus sont disparates.

Type de méthode	Nombre de publications	Type d'indicateurs
Mono-critère - empreinte carbone	7	1 indicateur – facteurs d'émissions parfois hétérogènes
Monocritère – Energie	5	1 indicateurs – énergie finale
Multi-critère – ACV	17	4 indicateurs – méthode CML, RECIPE, ...
Multi-critère - ACV simplifiée	3	4 indicateurs max
Multi-critère - Energie/Carbone	7	2 indicateurs – conversion de la consommation d'énergie en GES dans 50% des cas
Multi-critère - Energie/ressources	1	2 indicateurs

Figure 11 - Méthode et indicateurs

Empreinte environnementale – De l'Approche monocritère à l'approche multicritère

- ⇒ Nécessité de développer des bases de données pour faciliter la prise en considération de plusieurs indicateurs environnementaux pour éviter les transferts de pollution
- ⇒ L'aspect épuisement des ressources naturelles est peu/pas traité alors qu'il représente un enjeu important pour le secteur. Quel type d'indicateurs devra-être développé ?
 - Potentiel d'épuisement des ressources naturelles ? en g eq Sb ?
 - MIPS
 - Occupation des sols
- ⇒ L'aspect de la fin de vie des équipements devra être réintégré sous la forme d'un indicateur d'impact environnemental ou sous la forme d'un indicateur de flux de déchet DEEE.

Unité fonctionnelle, Scénario d'usage et méthode d'allocation

- ⇒ La notion d'unité fonctionnelle est traitée différemment selon les études : année de fonctionnement d'un service, impact de l'acte réalisé, Une réflexion approfondie devra être menée pour proposer des pistes en fonction des objectifs
- ⇒ Les scénarios d'usage sont peu présentés et développés. Quelle donnée sont fondamentales et doivent impérativement être documentées ? flux de données, PUE, ...
- ⇒ La méthode d'allocation est source de grandes variations dans les études. Les services numériques sont des exemples de système combinés d'équipements dédiés et mutualisés :
 - Les équipements dédiés présentant souvent un impact prépondérant. Cette prépondérance est-elle liée au type d'allocation choisie ou à une réalité ? La méthode d'allocation admise est une méthode au prorata de l'usage, une méthode au prorata de l'amortissement pourrait-être pertinente ?
 - Actions : Réfléchir et recommander des types d'allocations en fonction du tiers, traiter la multifonctionnalité et la mutualisation

Représentativité temporelle & Gestion de l'obsolescence et de la maturité

- ⇒ Le numérique se caractérise par un développement rapide et un taux de renouvellement accéléré. Hors il y a peu de données ou des données datant de plusieurs années. Quelle pertinence ? Comment traiter cet écueil ?
- ⇒ L'innovation est le quotidien du secteur du numérique. Nouvelle offres, nouvelles structures, création de besoins.... Les technologies sont peu matures à leur déploiement puis évoluent rapidement. Comment traiter la problématique de la maturité et de la charge d'un service ? De l'efficacité à court ? moyen ? long terme ?

Représentativité géographique & Gestion de la chaîne de valeur

- ⇒ Le numérique se caractérise par une architecture distribuée et des impacts diffus et internationalisés. Comment intégrer les parties prenantes ? traiter la question des données secondaires ?
- ⇒ Les routes des données, la redondance des datacenter, ... font de n'importe quel système un système international ? Comment traiter la représentativité géographique ?

Représentativité technologique & Disponibilité des données

- ⇒ Avec le développement du cloud, comment accéder à la matérialité et aux données techniques ?

De l'ACV attributionnelle à l'ACV conséquentielle – Traitements des effets indirects

- ⇒ L'ACV peut intégrer deux dimensions : la quantification des effets directs : base de données et calculs des indicateurs ainsi que la quantification des effets indirects (higher order effect): effets attendus et effets non attendus. Ces effets indirects sont légions dans le cadre des nouveaux usages numériques. On intègre dans ces effets indirects : l'optimisation, la substitution, l'effet rebond, l'effet d'induction (lié au changement de comportement du consommateur face aux multiples options qui

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

lui sont proposées) et les effets bénéfiques. Compte tenu des espoirs placés dans le numérique comme vecteur de la transition écologique, cet aspect devrait être traité de manière plus régulière.

- ⇒ A noter, à ce jour, il n'existe pas d'ACV de services numériques intégrant les effets indirects dans le secteur industrie, agriculture et transport (#25)

G. PHASE 2 – PROPOSITION DE PUBLICATIONS

a. Publications proposées

Ind.	Date	Titre	Auteurs	Notes du reviewer / Remarques	Forces	Faiblesses
19	2019	CLIMAT : L'INSOUTENABLE USAGE DE LA VIDÉO EN LIGNE - Un cas pratique pour la sobriété numérique	The Shift Project - Maxime Efoui-Hess	Rapport beaucoup relayé qui a permis la prise de conscience grand public des impacts environnementaux du numérique. Il a fait l'objet de polémique et de remise en cause.	- Rapport porté par le think tank The Shift Project avec une forte capacité de communication - Segmentation par type de vidéos - Etudes des leviers pour favoriser la sobriété dans les usages vidéo en ligne - Transparence des données	- Référentiel généraliste basé sur le modèle "1byte" développé au cours du travail présenté dans le rapport sur la sobriété numérique (The Shift Project, 2018). Ne prend donc pas en compte les spécificités des services de VOD (CDN, DC, compression etc ...). - Base de calcul ("1 byte") d'Efficacité Energétique très défavorable (0,43 kWh/Go pour FAN Wired et 0,88 pour Mobile) - Ne prends pas en compte la partie fabrication des équipements des utilisateurs alors que les données sont dans le REN du Shift
36	2018	Environmental impact assessment of online advertising	M. Pärssinen, M. Kotil, R. Cuevas, A. Phansalkar, J. Manner	- Mix de méthodes Bottom Up (quand les données sont disponibles: équipement) et de Top Down (réseau) - Cette étude interroge le mode même de financement d'internet - L'auteur fait une distinction entre LCA, IA et EIA intéressante. Il qualifie son étude de "Impact assessment"	- Méthode d'analyse développée, claire et transparente. - Intègre les flux non désirés - intègre les 3 tiers : Terminal, réseau, DC - Analyse quantitative et qualitative du trafic réseau selon différents protocoles - Publication développant la méthodologie et l'illustration par un cas d'étude - Prise en compte de l'ensemble des formats de publicités: depuis le tracker jusqu'à la vidéo. - Accent développé sur la partie allocation - Fourniture de Données détaillées en Annexe: -- énergie consommée, trafic de donnée par type de device et/ou par type d'infrastructure ou par classes de données -- calculs d'incertitude	- Critères limités à l'énergie et traduit en émission de GES - Empreinte carbone calculée uniquement pas une traduction de la consommation d'énergie en des émissions de GES moyenne selon un mix énergétique mondiale - Valeurs de consommations issues de la littérature. Aucune mesure effectuée. - Pas de prise en compte de la production (équipement) ni de la fin de vie

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

Ind.	Date	Titre	Auteurs	Notes du reviewer / Remarques	Forces	Faiblesses
42	2013	Impact of Office Productivity Cloud Computing on Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions	Daniel R. Williams, Yinshan Tang	Plus de 92% des impacts en phase d'usage sont portés par l'équipement utilisateur quel que soit le terminal et le logiciel étudié. Une étude que ne va pas dans le sens de la communication habituelle sur le cloud - L'intérêt des solutions Cloud n'est pas démontré dans l'ensemble des situations : Word est moins performant avec O365 alors que Excel et Outlook le sont plus. Tout dépend des ressources nécessaires (la force de cette étude est la définition des scénarios de mesure) L'étude date de 2012. Il serait intéressant de la refaire maintenant avec un service mature. Le constat que l'on trouve souvent sur la partie réseau est que l'efficacité énergétique progresse plus vite quand ce sont les fournisseurs qui en supportent le coût (réseau "internet" vs réseau "home/office"). Peut-on appliquer le même raisonnement pour le software/service numérique ?	- Etudes basées sur des cas réels - Dispose de données primaires provenant de chez Microsoft - Se base sur des mesures réalisés avec un protocole documenté. - Unité fonctionnelle claire et approche par les - intègre les 3 tiers - analyse de sensibilité sur le nombre de sessions dans les DC.	- Impact concentré uniquement sur la phase d'usage - Seul consommation d'électricité et émission de GES sont considérées. - Seul une connexion en Wifi est considérée - l'étude date de 2012 soit seulement 1 an après le lancement de la V1 d'Office 365. Il aurait été intéressant de mesurer les équivalents G Suite qui sont des "cloud natifs" et qui existent depuis 2006. Ou bien de refaire l'étude maintenant, avec un Office 365 mature et optimisé. - comme l'étude se focalise sur le Run, la durée de vie des devices n'est pas traitée: on peut penser qu'un device "léger" peut durer plus longtemps qu'un device classique.
79	2014	Integrative approaches to environmental life cycle assessment of consumer electronics and connected media	Paul Teehan	Cette étude est intéressante pour la caractérisation des impacts des services numériques qu'elle propose équipement réseau DC. De plus les facteurs d'allocation sont intéressants à regarder si on ne dispose pas de suffisamment de données pour les allocations classiques. Méthodologie top down	Méta analyse des sources, ACV à toutes les étapes du cycle de vie sauf fin de vie. La partie état de l'art est très fournie avoir un aperçu des ACV des services numériques et/ou des technologies numériques. De plus, le chapitre 5 évalue les impacts environnementaux de la vidéo selon des scénarios différents (diffusion TV, streaming Netflix, video la demande, video hors ligne)	Cette étude ne considère les impacts qu'en termes d'émissions de GES et très rarement en termes d'énergies primaires. De plus les valeurs des données utilisées sont basées en général sur des données moyennes
80	2014	Lessons learned – Review of LCAs for ICT products and services	Yevgeniya Arushanyan, Elisabeth Ekener-Petersen,	Article intéressant pour moyen pour les services IOT	Méta analyse des sources, ACV à toutes les étapes du cycle de vie cette étude est intéressante car elle fait des résumés d'autres études.	Article intéressant pour moyen pour les services IOT

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

Ind.	Date	Titre	Auteurs	Notes du reviewer / Remarques	Forces	Faiblesses
			Goran Finnveden			
121	2013	Modeling and Assessing Variability in Energy Consumption During the Use Stage of Online Multimedia Services	Daniel Schien, Paul Shabajee, Mike Yearworth, and Chris Preist	Méthode d'allocation des impacts des serveurs. Nombreuses données de conso Met en avant l'intérêt bottom-up quand les détails du service sont étudiés.	Solidité des références UF bien définie Variabilité en fonction des natures de données, device ou réseau	Mono-critère (energie/carbone) Conclusions "intuitives"
126	2012	Comparative Micro Life Cycle Assessment of Physical and Virtual Desktops in a Cloud Computing Network with Consequential, Efficiency, and Rebound Considerations	Anders S. G. Andrae	L'étude date de 2012. Aujourd'hui, nous ne constatons pas l'essor des tablettes ni des clients légers, la puissance des ordinateurs ne cessent d'augmenter. Il serait intéressant de refaire ces études à 10 ans d'intervalle. Andrae développe un modèle en kWh/GByte et gCO2eq/Gbyte utilisé dans le rapport du Shift. Intégration de l'ensemble des tiers. Des résultats en ligne avec ce que nous avons pu constater jusqu'alors! Une prépondérance de l'impact des terminaux et notamment de la production des écrans.	- étude comparative basée sur les principes de l'ACV - un périmètre d'étude très bien décrit intégrant les n tiers infra: poste de travail (classique vs client léger), intranet, réseau local, datacenter, ... - intégration des impacts de la production des équipements même pour les "unspecified electronic equipment". - des facteurs d'émissions transparents pour l'ensemble des équipements considérés. - Intégration de la production des climatiseurs, UPS, batteries, ... - évaluation de l'incertitude (notamment sur la durée de vie) - création d'un modèle de réseau externe sur la base de la littérature - prise en considération de l'effet rebond - contextualisation des résultats à l'échelle mondiale. - consolidation du modèle kgCO2eq/Go - analyse de sensibilité : sur le type de terminal, sur l'évolution du mix énergétique, datacenter green, intégration de l'effet rebonds - Utilisation des normes ETSI comme référence de travail - proposition de pistes d'écoconception	- une étude déjà ancienne qui prend en compte un développement fort du client léger - étude monocritère - l'électronique non spécifiée modélisée par une équivalent (cradle to use : 30kgeqCO2/kg)

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

Ind.	Date	Titre	Auteurs	Notes du reviewer / Remarques	Forces	Faiblesses
131	2018	Life Cycle Assessment of Home Smart Objects: Kitchen Hood Cases	Vincenzo Castorani, Marta Rossi, Michele Germani, Marco Mandolini, Alessio Vita	Les auteurs comparent les impacts environnementaux de trois variantes d'hottes: les hottes traditionnelles (A), les hottes intelligentes (B) et les hottes intelligentes avec filtration d'air (C). Les résultats sembleraient indiquer qu'on a une réduction des impacts environnementaux globaux de 40% du système A au B puis de 30 % du B au C. Cependant le faible impact environnemental des hottes connectées est contrebalancé par la qualité de l'air dans les cuisines selon certaines conditions telles que la vitesse de filtration d'air.	Les données collectées sur les équipements proviennent des mesures directes sur ces équipements et des données de la base ecoinvent. Cette étude est intéressante dans la mesure où elle ne se contente pas que d'identifier les gains mais également les potentiels impacts des objets connectés.	Les effets rebonds n'ont pas été suffisamment analysés. Cela fait l'objet notamment des futurs travaux.
145	2011	Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique - Volet courrier électronique	Yannick Le Guern, Laura Farrant, Edith Martin, Bio Intelligence Service	Hypothèses de modélisation réseau et datacenter	1/Description de la composition des routeurs/serveurs/Switch retenus en grande masse 2/ choix de taux de charge et de capacité de transport	1/réalité de l'unité fonctionnelle 2/ modélisation grosse maille des parties électroniques
165	2014	Life cycle assessment of RFID implementation in the fresh food supply chain	Eleonora Bottani, Michele Manfredi, Giuseppe Vignali, Andrea Volpi	L'objet connecté étudié est composé essentiellement d'un puce et d'une antenne le tout faisant au total 200mg	Les analyses de cycle effectuées sont très complètes et sont conformes aux normes ISO et européennes. Les auteurs évaluent les impacts sur plus d'une dizaine d'indicateurs. Le logiciel d'ACV utilisé est SimaPro. Les données sont très bien fournies.	L'une des insuffisances de l'étude est relative à la disponibilité de données (pour réaliser l'inventaire) plus fine pour évaluer rigoureusement les antennes RFID. Des hypothèses qui selon les auteurs n'impacteront pas les résultats ont donc été réalisées. Les données ont été obtenues pour des produits similaires mais non complètement équivalents
166	2018	Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review	Jan C. T. Bieser and Lorenz M. Hilty	Très intéressant sur le traitement des effets de rebonds	Etudes de 54 publications Méta-analyse des enjeux sectoriels Etudes récentes bien documentées	Pas de méthodologies spécifiques étudiées
167	2014	An Integrated Method for Environmental Assessment and Ecodesign of ICT-	Jeremy Bonvoisin, Alan Lelah, Fabrice Mathieux, Daniel Brissaud	Etude complète d'un système de capteur en vue d'une optimisation d'énergie. Réalisée par G-Scop avec EIME	- développement d'une méthodologie mais intégration d'un cas d'étude ayant permis de la mettre en application. - Etude comparative ACV	- n'intègre pas l'impact du réseau WAN et des terminaux utilisateurs (smartphone) ni la partie DC

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

Ind.	Date	Titre	Auteurs	Notes du reviewer / Remarques	Forces	Faiblesses
		based Optimization Services			- Basée sur une collecte de données terrains en ce qui concerne l'optimisation - Comparaison de scénario avant et après écoconception - Proposition de pistes d'écoconceptions	
173	2020	Estimation de l'empreinte carbone d'une heure.coeur de calcul	Francoise Berthoud, Bruno Bzeznik, Nicolas Gibelin, Myriam Laurens, Cyrille Bonamy, Maxence Morel, Xavier Schwindenham mer	Etude très détaillée sur le périmètre, les éléments pris en compte et ceux manquants. Prise en compte intéressante de la partie RH en charge de la maintenance directe du service de calcul.	Paramètres et hypothèses de l'étude sont très détaillés Introduction de l'empreinte liée aux collaborateurs (notamment trajets) Scénarisation en fonction des paramètres clefs (PUE, durée de vie, localisation, taux d'usage)	-Quelques éléments manquants, notamment sur la partie réseau - Scope de l'étude restreint. Pas de généralisation. - Approche monocritère - Inhomogénéité des facteurs d'impacts possible - Absence de revue du rapport

Figure 12 - Publications proposées

b. Pourquoi cette proposition ?

Transverse :

#80 - “Lessons learned – Review of LCAs for ICT products and services”. → Etude de synthèse très complète et bien documentée des études ACV déjà réalisées sur des produits ou services numériques.

IoT

#165 - Life cycle assessment of RFID implementation in the fresh food supply chain → Etude couplant robustesse méthodologique, multicritères, cycle de vie et traitant de l'évaluation environnementale des objets connectés

#131 - Life Cycle Assessment of Home Smart Objects: Kitchen Hood Cases

Cette étude est intéressante dans la mesure où elle ne se contente pas que d'identifier les gains mais également les potentiels impacts environnementaux des objets connectés. La méthodologie utilisée est robuste et les données sont relativement de bonne qualité.

Vidéo en ligne :

#79 - Integrative approaches to environmental life cycle assessment of consumer electronics and connected media. Cet article a été sélectionné pour la caractérisation des impacts des services numériques et des allocations (équipement, réseau et DC) pertinentes qu'il propose. Par ailleurs, l'état de l'art est relativement bien fourni en étude ACV des services numériques. Les impacts environnementaux de la vidéo selon des différents scénarii (diffusion TV, streaming Netflix, vidéo à la demande, vidéo hors ligne) sont également mis en lumière.

Possibilité de compléter, comparer et avoir un argumentaire critique grâce aux publications complémentaires suivantes :

- ⇒ **#19 - CLIMAT : L'INSOUTENABLE USAGE DE LA VIDÉO EN LIGNE - Un cas pratique pour la sobriété numérique**
- ⇒ **Factcheck: What is the carbon footprint of streaming video on Netflix?** Carbonbrief - 25 février 2020 - <https://www.carbonbrief.org/factcheck-what-is-the-carbon-footprint-of-streaming-video-on-netflix>
- ⇒ **#121 - Modeling and Assessing Variability in Energy Consumption During the Use Stage of Online Multimedia Services”** (#121) pour la qualité de ses références et une mesure intéressante par nature de données (bottom-up)
- ⇒ **NegaOctet – Projet Expo Bioinspirée**

Pratiques professionnelles

#145 - Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique - Volet courrier électronique. Cette étude est proposée parce qu'elle fait partie des études conformes ISO 14040, pour sa transparence en termes de collecte et d'allocation des données d'entrées et sa conformité au BP-X-30-323 (affichage environnemental français)

#121 - Comparative Micro Life Cycle Assessment of Physical and Virtual Desktops in a Cloud Computing Network with Consequential, Efficiency, and Rebound Considerations. Cette étude est proposée pour l'originalité de son sujet, l'intégration des notions d'efficacité et d'effet rebonds. A noter qu'elle est publiée par Andrae, du service R&D de Huawei

#42 - Impact of Office Productivity Cloud Computing on Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions. Une étude sur l'impact environnemental du passage des applications en mode SaaS avec une réflexion non binaire. Dans quel cas, le cloud est-il plus pertinent ? Dans quel cas non ? [Mise en garde – étude réalisée avant la maturité du service

Autre

#36 - Environmental impact assessment of online advertising pour l'utilisation d'une méthodologie “mixte” (top-down et bottom up) et un partage de données détaillées.

#94, #167 & #173 - Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects, An Integrated Method for Environmental Assessment and Ecodesign of ICT- based Optimization Services et Estimation de l'empreinte carbone d'une heure.coeur de calcul pour l'originalité et la pertinence du sujet qu'elle traite

c. Sélection finale

Méthodologie :

La sélection finale a été réalisée par les membres de SCORELCA, sur la base des recommandations du consortium en charge de la première étape. Les membres ont également souhaité réintégrer certaines études qui n'avaient pas été retenues ou analysées à la suite de la première phase.

Etudes retenues :

#19 - CLIMAT : L'INSOUTENABLE USAGE DE LA VIDÉO EN LIGNE - Un cas pratique pour la sobriété numérique : La question de la vidéo en ligne a fait l'objet de nombreuses discussions. Il s'agit ici d'une des études les plus détaillées, qui a également fait l'objet d'un factchecking par Carbon Brief / l'IEA, et a fait une réponse. Cela permet d'envisager la confrontation des hypothèses et des points de vue à travers trois études documentées.

#79 – “Integrative approaches to environmental life cycle assessment of consumer electronics and connected media”. Cet article a été sélectionné pour la caractérisation des impacts des services numériques et des allocations (équipement, réseau et DC) pertinentes qu'il propose. Par ailleurs, l'état de l'art est relativement bien fourni en étude ACV des services numériques. Les impacts environnementaux de la vidéo selon des différents scénarii (diffusion TV, streaming Netflix, vidéo à la demande, vidéo hors ligne) sont également mis en lumière.

#80 - “Lessons learned – Review of LCAs for ICT products and services” : Etude de synthèse très complète et bien documentée des études ACV déjà réalisées sur des produits ou services numériques.

#94 – « Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects » pour l'originalité et la pertinence du sujet qu'elle traite, qui est en ligne avec les attentes des membres de ScoreLCA, notamment dans le secteur automobile

#166 – “Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review” : cette étude permet de mettre en avant l'état de l'art concernant les effets indirects (effets rebonds et effets induits). Intuitivement, ces effets indirects représentent une grosse partie des impacts et des bénéfices environnementaux liés aux services numériques, mais sa prise en compte constitue un challenge. L'analyse de cette étude doit permettre d'apporter des éléments sur le sujet.

#167 – “An Integrated Method for Environmental Assessment and Ecodesign of ICT- based Optimization Services” pour l'originalité et la pertinence du sujet qu'elle traite

H. PHASE 2 – ANALYSE APPROFONDIE DES DOCUMENTS - METHODOLOGIE

Le format de l'analyse approfondie reprend le fichier Excel du référentiel d'analyse élaboré en phase 1, et le complète avec des catégories complémentaires permettant de mettre en lumière les enseignements et les limites, et de mieux appréhender l'intérêt de chaque document.

Ces catégories sont les suivantes :

- Documentation des limites, incertitudes : il s'agira de lister les limites indiquées dans l'étude, ainsi que d'identifier les limites complémentaires en portant un regard critique sur les ACV. Nous identifierons à la fois les limites méthodologiques (écart aux normes, choix des hypothèses, manque de données, limitation de la collecte), et les limites en termes de périmètre et d'interprétation (comment peuvent, ou ne peuvent pas, être utilisés les résultats).
- Adéquation entre les objectifs et les résultats : nous identifierons les objectifs des études, et déterminerons si les analyses réalisées permettent in fine de répondre aux objectifs, et dans le cas contraire si des actions complémentaires ont été envisagées pour combler ce manque.
- Enseignements de l'étude / conclusion : au-delà du respect des objectifs, nous identifierons quels sont les enseignements pouvant être tirés de l'étude, de manière individuelle, mais également en replaçant l'étude dans son contexte global.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

- Evaluation globale : il s'agira de faire le bilan de l'étude pour répondre à la question de savoir si l'étude peut être utilisée comme référence, de par sa robustesse et son homogénéité par rapport aux normes en vigueur, et de préciser les éléments qui justifient ce choix.
- Spécificité par étude : chaque étude retenue a une spécificité, de par sa nature, le sujet de son étude ou le domaine couvert. Cette catégorie permet de réaliser l'analyse de cette spécificité. Pour les études retenues, celles-ci sont :
 - o #19 - *CLIMAT : L'INSOUTENABLE USAGE DE LA VIDÉO EN LIGNE - Un cas pratique pour la sobriété numérique* : question de l'incertitude autour du sujet des analyses environnementales des services numériques - cas sur les impacts CO2 de la vidéo - analyse du fact-checking de l'IEA/Carbon Brief et de la réponse du ShiftProject
 - o #79 – *“Integrative approaches to environmental life cycle assessment of consumer electronics and connected media”* : question sur l'hétérogénéité des données : de quels éléments s'assurer pour avoir une bonne homogénéité ? Y sommes-nous à l'heure actuelle ? Qu'est-ce qui explique ces différences ? D'une manière générale, qu'est-ce qui limite la comparaison entre deux ACV de services numériques ?
 - o #80 - *“Lessons learned – Review of LCAs for ICT products and services”* : question sur le choix des indicateurs et des phases du cycle de vie des ACV d'équipements, avec l'enjeu de savoir à partir de quel moment il est possible de prendre une décision en se basant sur une étude ACV (quels indicateurs sont nécessaires, quelles phases du cycle de vie ?), notamment pour l'intégration dans les ACV de services numériques
 - o #94 – « *Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects* » : revue critique selon les normes ISO 14040-44
 - o #166 – *“Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review”* : Réflexion sur les effets indirects : que peut-on dire à l'heure actuelle ?
 - o #167 – *“An Integrated Method for Environmental Assessment and Ecodesign of ICT- based Optimization Services”* : revue critique selon les normes ISO 14040-44

I. PHASE 2 – ANALYSE APPROFONDIE DES DOCUMENTS - RESULTATS

Cette partie présente les résultats de l'analyse approfondie pour chaque document, et les conclusions qu'il est possible d'en faire.

L'analyse complète des études est disponible en annexe dans le fichier « Analyse ACV_grille d'analyse_200918.xlsx ».

a. Analyse approfondie des études

#94 – « Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects »

Critère d'analyse	Analyse
Documentation des limites, incertitudes	Dans ce document les incertitudes ou limites n'ont pas été documentées en tant que tel mais une réflexion active et intéressante sur les paramètres sensibles a été menée. Aucune évaluation de la qualité des données d'entrée n'a été menée.
Adéquation entre les objectifs et les résultats	L'objectif premier de l'étude est de disposer d'une vision cycle de vie de l'impact du véhicule autonome et cet objectif est tout à fait rempli.
Enseignements de l'étude / conclusion	Les enseignements principaux de l'étude sont:

	- en premier lieu, le fait que la marge d'amélioration de l'impact environnemental d'un véhicule vers un véhicule autonome n'est pas suffisamment importante pour que l'on puisse affirmer à 100% que ce nouveau système est vertueux quoiqu'il arrive. - l'importance du mix énergétique considéré: malgré un mix très carboné (voir d'ailleurs si la donnée considérée est la bonne) les gains de consommation ne suffisent pas toujours à générer des gains. - l'importance de l'impact de la consommation et du traitement des données - l'importance de la consommation de l'ordinateur de bord - l'importance de la limitation du surpoids et la gestion de l'aérodynamisme
Évaluation globale	Cette étude donne une bonne première vision non orientée de l'impact environnemental du véhicule connecté et propose différents scénarios qui permettent de balayer de nombreuses problématiques et de poser des points de vigilances par rapport à ce type de véhicule. Elle a le mérite de poser la question : - du suréquipement en terme d'électronique et de la compensation des impacts de production par rapport aux gains escomptés. - de la transmission et du traitement des données numériques qui ne présentent pas un impact négligeable à l'échelle de la vie du véhicule. Elle ne constitue en revanche pas une ACV au sens de la norme ISO 14040 mais plutôt une évaluation simplifiée de l'impact carbone et énergie du véhicule. Les impacts tels que l'épuisement des ressources naturelles ou la production de déchet devraient être considérés. La partie donnée pourrait être traitée de manière plus approfondie. Les données sur la consommation /Go et de mix énergétique devrait être mieux documentées et challengées.
Spécificité par étude	Revue critique selon les normes ISO 14040-44 Voir fichier annexe "Revue critique ISO 14040-44_200918.xlsx" En résumé, l'étude ne respecte pas les normes ISO 14040-44 pour plusieurs raisons : - Plusieurs manques méthodologiques (pas de règles de coupure, pas de validation des données, pas de traitement des données manquantes, etc.) - Non prise en compte des maintenances, des équipements liés aux services numériques au-delà du véhicule - Le facteur d'émission du mix électrique semble très faible - Source des données hétérogènes et de méthodologies différentes - Indicateur d'impact unique : changement climatique

Figure 13 - Analyse de l'étude #94

#167 – “An Integrated Method for Environmental Assessment and Ecodesign of ICT- based Optimization Services”

Documentation des limites, incertitudes	Certaines limites sont présentés mais surtout concernant les pistes d'écoconception. Les incertitudes et la qualité des données ne sont pas documentées MAIS pour rappel, l'objectif de la publication n'est pas l'ACV mais la validation d'une méthode d'écoconception.
Adéquation entre les objectifs et les résultats	Les résultats obtenus présentent bien la pertinence de la mise en œuvre d'une telle étude et la nécessité de quantifier les impacts cycles de vie et multicritères des solutions numériques d'optimisation.
Enseignements de l'étude / conclusion	Les enseignements sont les suivants - Présentation du service en 3 niveaux : équipement, infrastructure et information - Nécessité d'évaluer de manière comparative un scénario avec et sans pilotage intelligent ==> les impacts intrinsèque des capteurs et système de communication ne sont pas négligeables. - Nécessité d'évaluer l'impact selon plusieurs catégories d'impacts et notamment épuisement des ressources naturelles abiotiques pour éviter le transfert de pollution - Possibilité d'écoconcevoir les solutions de manière assez simple en déployant une démarche de sobriété numérique : gestion de la donnée - quantité et qualité
Evaluation globale	La présente publication a pour objet la présentation d'une méthode d'écoconception des services numériques d'optimisation basée sur l'analyse du cycle de vie. La présentation de la méthode puis son application à un cas concret mettent en évidence l'intérêt d'une telle démarche pour éviter les transferts de pollution. En effet, les impacts environnementaux directs liés au déploiement des capteurs, de l'infrastructure et de l'information qu'elles génèrent peuvent être à l'origine de forts transferts de pollution, ce que révèle le cas pratique présentés dans l'étude. La méthode pourrait être généralisée à d'autres types de services numériques. Pour être complète, l'analyse du cycle de vie pourrait être complétée et sa documentation renforcée. Le périmètre devrait être élargi en intégrant : - la partie post-traitement des données : PC ou GPS des camions de transport - la partie réseau de communication WAN
Spécificité par étude	Revue critique selon les normes ISO 14040-44 Voir fichier annexe "Revue critique ISO 14040-44_200918.xlsx" En résumé, l'étude ne respecte pas les normes ISO 14040-44 pour plusieurs raisons : - Plusieurs manques méthodologiques (pas de règles de coupure, pas d'analyse de sensibilité, pas de définition des catégories d'impact considérés, etc.) - L'ISO 14040 est une base mais l'étude n'a vocation uniquement à illustrer la mise en application d'une méthode d'écoconception

Figure 14 - Analyse de l'étude #167

#79 – “Integrative approaches to environmental life cycle assessment of consumer electronics and connected media”

Critère d'analyse	Analyse
Documentation des limites, incertitudes	Les limites de l'étude sont les suivantes: - Prise en compte de données moyennes pour la modélisation des impacts environnementaux des services numériques en raison de l'insuffisance des infos (vidéo en ligne). - Les indicateurs GES et énergie primaires considérés. - La limitation du nombre d'études significatives. - Pas de prise en compte de toutes les étapes du cycle de vie dans certaines parties. - Contexte US (mix énergétique) uniquement. - Les hypothèses sur les estimations en 2017 ne sont pas très précises. - L'aspect réglementaire et méthodologique (ISO 14040/44) est très peu voire pas du tout mis en avant (cela peut-être dû à l'antériorité de l'étude).
Adéquation entre les objectifs et les résultats	Par rapport aux objectifs fixés et à la question de recherche, l'auteur a produit des résultats signifiant.
Enseignements de l'étude / conclusion	Les principales questions de recherche abordées dans cette thèse sont les suivantes: - Pourquoi des études d'ACV différentes réalisées sur les mêmes services numériques et équipements (ici les ordinateurs de bureau sans écran) n'ont pas les mêmes résultats et quelles sont les étapes du cycle de vie qui impactent le plus ? - Quels sont les impacts des équipements d'ancienne génération en comparaison à ceux de nouvelle génération? - Quels sont les impacts des nouveaux services numériques (Vidéo en ligne par exemple)? Pour répondre à la première question l'auteur a utilisé une approche de méta-analyse ou méthode du point de la revue des études de la littérature. La méta-analyse consiste à réaliser une synthèse objective selon un protocole précis et ainsi reproductible des résultats de plusieurs données (articles dans cette thèse). La méta-analyse commence par la décomposition: les résultats rapportés sont d'abord divisés en composantes phases du cycle de vie et deuxièmement, dans les plus grandes sources d'impacts pour chaque phase (c'est-à-dire décomposer les phases de fabrication dans une liste de composants clés tels que la carte mère, les circuits intégrés, etc.); et troisièmement, dans un inventaire des impacts environnementaux (en kWh pour l'électricité, en MJ pour l'énergie et en kg eqCO_{2e} pour l'impact climat). Les hypothèses de chaque étude sont comparées en mettant en évidence les différences clés dans le résultat total. La méta analyse étudie donc l'état de l'art et attribue une note de qualité à chaque article.

	A l'issue de cette étape, l'auteur a identifié les sources de variation des résultats des ACV étudiées. Il en ressort que les différences méthodologiques, les UF... sont les principales raisons de la variation des résultats. Par ailleurs, d'après l'analyse, ce sont les étapes de fabrication et d'utilisation qui impactent le plus. Toutefois, la méthode de méta-analyse des analyses de cycle de vie bien qu'intéressante semble difficile à mettre en œuvre en raison des hypothèses souvent pas très explicites et l'exactitude des données peut être difficile à déterminer. De plus, une autre limite de cette méthodologie est sa faisabilité essentiellement liée à l'existence (et en nombre suffisant) d'études pouvant être incluses. Le nombre d'études doit être suffisant pour conclure et également exclure les études biaisées. Elle a néanmoins le mérite d'être une méthode robuste. En ce qui concerne la seconde question, l'auteur estime que les équipements de nouvelle génération ont moins d'impact que ceux des anciennes générations (50 à 60% moins). Finalement l'auteur a réalisé des ACV de quelques services numériques (vidéo en ligne) pour combler le vide de l'état de l'art. Il propose des modèles assez génériques de quantification des impacts de ces services en utilisant des hypothèses en raison de l'insuffisance des données dans la littérature. Vu que la comparaison entre des études d'ACV de services numériques qui est tributaire de plusieurs biais, les professionnels de l'ACV doivent prêter attention aux résultats et données issues de la bibliographie. Pour réutiliser ces résultats, une analyse rigoureuse en se basant par exemple la méthode de méta-analyse est requise. Pour réduire ces biais et favoriser une meilleure qualité des données, il faudrait mettre sur pied des techniques de reporting des impacts environnements standardisées réalisées de concert avec les fabricants d'équipements électroniques.
Evaluation globale	Cette étude met en lumière la difficulté de comparer objectivement deux études d'ACV pour un même équipement et/ou service numérique. Elle a le mérite d'analyser en profondeur les raisons pour lesquelles les résultats d'ACV sont différents. L'auteur propose des pistes visant à réduire ces variations. La méthodologie d'analyse comparative d'ACV basée sur la méta-analyse semble assez robuste pour être envisagée. En outre l'auteur propose des méthodologies de modélisation des impacts des services numériques qui sans doute peuvent alimenter les réflexions sur la caractérisation (facteurs d'allocations par exemple) des services numériques. Par contre, les ACV réalisées dans cette étude ne sont pas rigoureusement conformes aux normes de référence et les données utilisées ne sont pas suffisantes et peuvent être obsolètes à ce jour. Il va sans dire que les résultats de ces dernières doivent être pris avec précautions.
Spécificité par étude	Question sur l'hétérogénéité des données : de quels éléments s'assurer pour avoir une bonne homogénéité ? Y sommes-nous à l'heure actuelle ? Qu'est-ce qui explique ces différences ? D'une manière générale, qu'est-ce qui limite la comparaison entre deux ACV de services numériques ? Voir fichier annexe "ScoreLCA-Résumé-Etude-biblio.pdf"

Figure 15 - Analyse de l'étude #79

#80 - "Lessons learned – Review of LCAs for ICT products and services"

Critère d'analyse	Analyse
-------------------	---------

Documentation des limites, incertitudes	L'étude conclut que la principale limite de l'évaluation d'un ACV réside dans le manque de transparence de ces études au niveau de notamment les frontières du système, du périmètre géographique, des types et sources des données et finalement des effets rebond qui ne sont pas toujours pris en compte (le cas de la comparaison entre une solution papier et sa digitalisation).
Adéquation entre les objectifs et les résultats	Par rapport aux objectifs fixés et à la question de recherche, l'auteur a produit des résultats signifiant.
Enseignements de l'étude / conclusion	Les questions principales auxquelles les auteurs ont tenté d'apporter des réponses sont les suivantes: - Quels sont les équipements/services les plus étudiés dans la littérature? - Quels sont les impacts environnementaux les plus envisagés? - Quelles sont les causes des variations des résultats des ACV de service numériques? Après analyse approfondie de plusieurs sources, il en ressort que les éléments les plus étudiés sont les terminaux utilisateur (laptop, ordinateur, TV, téléphone). Pour ce qui concerne les phases du service numérique qui impactent le plus, les auteurs estiment que pour les terminaux utilisateur, ce sont les phases de fabrication et d'utilisation qui impactent le plus; et pour les téléphones mobiles la phase de fabrication. Pour les serveurs, c'est la phase d'utilisation. De plus, pour les équipements électroniques (ordinateur bureau, laptop, server), la carte mère et les circuits imprimés apparaissent comme les principaux contributeurs aux impacts environnementaux. Les indicateurs de potentiels de réchauffement climatique et de consommation d'énergie sont les indicateurs les plus utilisés pour réaliser les ACV de services numériques. Par ailleurs, les auteurs ont identifiés plusieurs limites qui rendent la comparaison de deux ACV différentes une tâche complexe à réaliser. Cette variation est due essentiellement au manque de transparence de ces études au niveau notamment des frontières du système, du périmètre géographique, des types et sources des données et finalement des effets rebond qui ne sont pas toujours pris en compte (le cas de la comparaison entre une solution papier et sa digitalisation). Il est important que les professionnels de l'ACV communiquent clairement les hypothèses de leurs études afin que la communauté puisse s'approprier les résultats de ces études. De plus pour les ACV comparatives entre les versions papier et les versions digitales de certaines solutions (journaux), il convient de tenir compte des effets rebonds dans les évaluations environnementales.
Evaluation globale	Cette revue de la littérature sur les ACV des équipements électroniques met également en évidence la difficulté de comparer objectivement deux études d'ACV pour un même équipement et/ou service numérique. Elle analyse les raisons pour lesquelles les résultats d'ACV sont différents. En outre, les résultats obtenus permettent par exemple de savoir quelles sont les phases du cycle de vie et les composants des équipements informatiques qui impactent le plus. Ces informations peuvent être utiles pour des personnes peu ou expérimentées dans la thématique des ACV services numériques.
Spécificité par étude	

Question sur le choix des indicateurs et des phases du cycle de vie des ACV d'équipements, avec l'enjeu de savoir à partir de quel moment il est possible de prendre une décision en se basant sur une étude ACV (quels indicateurs sont nécessaires, quelles phases du cycle de vie ?), notamment pour l'intégration dans les ACV de services numériques

Voir fichier annexe "ScoreLCA-Résumé-Etude-biblio.pdf"

Figure 16 - Analyse de l'étude #80

#19 - CLIMAT : L'INSOUTENABLE USAGE DE LA VIDÉO EN LIGNE - Un cas pratique pour la sobriété numérique

Critère d'analyse	Analyse
Documentation des limites, incertitudes	L'impact calculé porte uniquement sur l'indicateur de réchauffement climatique et le calcul de la consommation énergétique, alors que les problématiques des services numériques recouvrent d'autres catégories d'impact (ressources, toxicité, etc.) Seule la consommation d'énergie est prise en compte, et pas le cycle de vie complet des équipements. Ce point est problématique dans la mesure où l'impact de la vidéo en ligne est supposé proportionnel au flux de données, ce qui n'est pas une hypothèse évidente. Certaines hypothèses sont contestées par l'étude de factchecking
Adéquation entre les objectifs et les résultats	Cette étude met en avant les impacts CO2 liés à l'usage de la vidéo en ligne, et les replace dans le contexte des émissions mondiales pour montrer la place de la vidéo en ligne dans la problématique du changement climatique. Elle questionne différents leviers de sobriété, comme la modèle économique (accès illimité, indicateurs de performances construits sur la quantité de contenu visionné), légal (neutralité du net) ou le design (autoplay, scrolling ininterrompu, phénomènes addictifs) ou encore les usages (choix des usages prioritaires) comme leviers d'action pour réduire ces impacts.
Enseignements de l'étude / conclusion	Cet article interroge sur l'usage que l'on a de la vidéo en ligne, et plus largement des usages du numérique, en faisant la distinction entre usages nécessaires ou prioritaires, et usages de divertissement. Sans prendre position, l'article indique que pour atteindre la sobriété numérique, il faudra être amené à déterminer les priorités des usages. L'article ne détaille pas précisément la méthode de calcul des impacts CO2 des usages numériques, se reposant sur des études précédentes et de la bibliographie, point qui a été remis en question par d'autres études (voir colonne AP).
Evaluation globale	Cette étude représente une analyse poussée des impacts liés à la consommation d'énergie de la vidéo. Si elle n'est pas aboutie en termes de périmètre (approche consommation d'énergie de la phase d'usage uniquement), elle est exhaustive sur son périmètre technologique, prenant en compte l'ensemble des flux vidéo. Sa méthodologie et les chiffres avancés sont cependant challengés.
Spécificité par étude	Analyse : question de l'incertitude autour du sujet des analyses environnementales des services numériques - cas sur les impacts CO2 de la vidéo - analyse du fact-checking de l'IEA/Carbon Brief et de la réponse du ShiftProject Fact-checking: The carbon footprint of streaming video: fact-checking the headlines, George Kamiya, 2020, IEA

Constat de départ :

TSP a surestimé les émissions de regarder 30 minutes de Netflix d'un facteur 30 à 60, soit 3,2kg CO₂ eq./heure pour un total mondial (300 MT CO₂/an, soit les émissions de l'Espagne), largement surestimé.

Arguments :

- 8 fois plus élevé qu'une étude de 2014 (The energy and greenhouse-gas implications of internet video streaming in the United States, Arman Shehabi, Ben Walker and Eric Masanet, 2014) qui indique 0,42 kg CO₂/heure, et 0,36 kg CO₂/heure aux Etats-Unis sur un périmètre équivalent. Considérant que l'efficacité énergétique des datacenters double tous les 2 ans, la donnée actualisée devrait être plus basse encore.
- Remise en contexte des émissions indiquées du streaming par rapport à des usages courants (conduire une Tesla, alimenter une lampe à LED, etc.) qui montre une forte importance de ces impacts qui paraissent trop élevés.
- Comparaison de la consommation électrique nécessaire pour Netflix impliqué par les calculs TSP (370 TWh par an), aux informations communiquées par Netflix (0,45 TWh/an, soit un ratio de 800), et à la consommation estimée de l'ensemble des datacenters (198 TWh, soit un ratio de 2).

Identification des problèmes :

- Bitrate Netflix trop élevé : 24Mb/s (3Mo/s) contre 4,1Mb/s (0,51Mo/s) (moyenne Netflix pour 2019)
- Surestimation des intensités énergétiques des centres de données (0,07 kWh/Go contre 0,01 kWh/Go), du réseau (0,49 kWh/Go contre 0,06 kWh/Go) et sous-estimation des terminaux (0,01 kWh/h contre 0,06 kWh/h)
- Utilisation d'une donnée CO₂ pour l'électricité des datacenters surestimée. En effet une donnée monde a été utilisée alors que beaucoup de datacenters utilisent des certificats verts (green bonds) pour environ la moitié de l'énergie utilisée. *Ce point est cependant sujet à discussion sur sa pertinence pour l'ACV de par la prise en compte ou non des green bonds dans le périmètre [NDLR]*

Réponse du Shift Project: The Shift Project a-t-il vraiment surestimé l'empreinte carbone de la vidéo ?, Maxime Efoui Hess et Jean-Noël Geist, 2020

Eléments :

- Le chiffre de 1,6 kg eq. CO₂ est faux, mais est tiré d'une interview et pas du rapport, et concerne la vidéo en ligne en général et pas Netflix
- Ce chiffre vient effectivement principalement d'une erreur dans le bitrate. Une fois celui-ci corrigé, l'écart n'est plus que d'un facteur 4 à 7 (au lieu de 28 à 57), mais cette erreur n'a pas d'effet sur le rapport
- Reste des écarts dus notamment aux différences d'hypothèses sur la consommation électrique du réseau, qui est incertaine
- Une fois ces corrections effectuées, le ratio de 4 à 7 n'est pas éloigné de l'incertitude relevée par l'auteur (entre 2 et 32)
- Accord sur les constats macroscopiques
- Le doublement de l'efficacité énergétique des serveurs et du réseau n'est valable que pour le nouveau matériel. Avec le taux de renouvellement actuel, l'amélioration de l'efficacité est plutôt de 10% à 15% par an
- A l'inverse, la résolution, et donc le volume des vidéos augmente également avec des sauts de résolution

- Concernant la consommation totale des datacenters, le chiffre de 198TWh est challengé par d'autres études (donnant entre 300 et 500 TWh)
- De la même façon, concernant la consommation des réseaux, les chiffres sont discutés
- La répartition de l'usage des terminaux est une moyenne globale, et n'est pas adaptée au cas Netflix

Analyse Negaoctet :

Au-delà des erreurs factuelles sur les hypothèses (bitrate), l'ensemble des études soulèvent qu'il reste de fortes incertitudes liées :

- Au périmètre et aux hypothèses (mix électrique, prise en compte ou non des équipements, etc.)
- Aux évolutions technologiques très rapides (amélioration de l'efficacité énergétique d'un facteur 2 tous les 2 ans, sauts technologiques, etc.)

Cela entraîne une prudence quant aux constats pouvant être faits sur les ACV et analyses environnementales portant sur les services numériques :

- Le degré de précision des résultats n'est pas pertinent, seul compte l'ordre de grandeur
- La comparaison entre plusieurs solutions ne peut se faire qu'au sein d'une même étude ou d'un même référentiel
- Sortir des chiffres de leur contexte est délicat et doit être fait avec prudence, en lien avec les auteurs des études
- Les données primaires comme secondaires ont une obsolescence très rapide par rapport à d'autres secteurs
- Les effets rebonds et l'évolution rapide des équipements et des offres (HD, 4K, 8K par exemple) doit être intégrée.

Par ailleurs, et employant une méthode différente, le consortium Negaoctet a calculé l'impact du visionnage vidéo comme étant :

- **Hypothèses maximisantes (visionnage sur télévision, mix électrique chinois, 4K) : 204 g eq. CO₂ / heure de vidéo incluant la fabrication des équipements, 125 g eq. CO₂ sur la consommation énergétique**
- **Hypothèses minimisantes (visionnage sur smartphone, mix français, SD) : 23 g eq. CO₂ / heure de vidéo incluant la fabrication des équipements, 1,9 g eq. CO₂ sur la consommation énergétique**
- **Ces résultats (sur la partie consommation énergétique) sont en ligne avec les données des rapports (même ordre de grandeur pour la France et pour la Chine (comparaison avec l'Australie).**
- **Le ratio entre la valeur maximisante et minimisante est de 66**
- **Les impacts de la fabrication des équipements est importante, de l'ordre de 50% à 90% des impacts totaux**
- **Sur d'autres catégories d'impact (ressources naturelles notamment), ce ratio peut être encore plus important**

Figure 17 - Analyse de l'étude #19

#166 – “Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review”

Critère d'analyse	Analyse
Documentation des limites, incertitudes	Les auteurs ne font pas état d'une proposition sur la ou les meilleures méthodes existantes. La présente étude ne présente pas de Pas de taxonomie des effets rebonds et est non exhaustive sur les effets rebonds Pour chaque méthode, l'étude n'explique pas quelle méthode est utilisée pour déterminer les effets indirects La définition des effets indirects est limitée ("Indirect environmental effects of information and communication technology (ICT) are those effects of ICT that change patterns of production or consumption in domains other than ICT, or more precisely, the environmental consequences of these changes" : il peut y avoir des effets indirects dans le même domaine (effets rebonds, ex : augmentation du nombre de messages envoyés avec l'arrivée des emails))
Adéquation entre les objectifs et les résultats	L'état des lieux est bien établi et met en évidence les limites actuelles (non exhaustivité de l'identification des effets indirects notamment). Cependant, l'état de l'art au sens de : De quelle manière, les méthodes existantes sont appliquées pour déterminer les effets indirects ? ne sont pas suffisamment détaillées pour en permettre une analyse et une application pratique.
Enseignements de l'étude / conclusion	Cet article est l'un des seuls traitant des questions sur les effets environnementaux indirects dans le secteur des TIC, alors même que ceux-ci sont loin d'être négligeables, de part notamment l'évolution rapide des pratiques que le développement de ces technologies entraînent. L'article souligne d'ailleurs que les effets indirects sont considérés comme plus importants que les effets directs par beaucoup d'études. S'il n'apporte pas de solution complète sur la façon de traiter les effets indirects, il permet de qualifier et de catégoriser les études et méthodes existantes. L'approche est nécessairement incomplète, puisque beaucoup de produits et d'effets ne sont pas couverts. Les études prenant en compte les effets indirects sont souvent les études "IT for green" dont le but des services numériques est de réduire l'utilisation de biens physiques. Identification de 7 domaines d'activités étudiés principalement : - Virtual mobility, smart transport, virtual goods, smart buildings, smart energy, smart production, shared goods Ajout de 3 domaines complémentaires : - Smart agriculture, smart water, or smart waste management L'article présente une séparation des effets indirects en schémas de production (approche orientée produit comme l'ACV, comparatif de 2 situations), et schémas de consommation (orienté études sociologiques et psychologiques sur le comportement utilisateur). Liste des méthodes de prise en compte des impacts environnementaux indirects utilisés dans les études : - Agent-based modeling (ABM), - system dynamics (SD), - life cycle assessment (LCA), - partial footprint, - the "ICT enablement method" (ICTem), - regression analysis, - descriptive statistics,

	- material input per service unit (MIPS), - transport models, - vehicle drivetrain models, - scenario analysis, - literature review, - meta-analysis, - interviews, and surveys.
Evaluation globale	Cette étude est utile pour s'en servir comme synthèse d'une analyse bibliographique et regarder les articles cités lorsqu'on est dans un cas similaire, mais elle apparaît insuffisante pour en extraire une méthodologie de prise en compte des impacts indirects globale.
Spécificité par étude	Réflexion sur les effets indirects : que peut-on dire à l'heure actuelle ? La prise en compte des effets indirects, rebonds comme induits, reste difficile. Si des tentatives ont déjà été menées, la principale difficulté reste dans le caractère exhaustif de l'identification des effets indirects. Deux niveaux de granularité sont envisagés : - Approche globale, macro, à l'échelle d'un territoire qui permet de considérer l'ensemble des impacts liés à l'intégration de nouvelles technologies, de manière exhaustive, mais sans discernement fin entre différents services numériques, ni séparations effets directs/indirects ; - Approche service numérique, micro, se concentre sur les effets d'un service numérique particulier, et de ses effets indirects, mais sans certitude d'être exhaustif. De même, deux approches existent, séparation des effets indirects en : - Schémas de production (ex : changement de procédés de fabrication) ; - Schémas de consommation (ex : changement de mode de consommation). Les principaux domaines d'activité couverts par des études concernant les effets indirects sont identifiés, ce qui permet de se référer à des études équivalentes dès que les produits couverts ou les domaines sont similaires. Différentes méthodes, au-delà de l'ACV, permettent la prise en compte des impacts des effets indirects. De manière générale, la quantification de ces impacts est une étude pluridisciplinaire intégrant des domaines liés aux sciences humaines et à l'économie. Le développement de méthode d'analyse du cycle de vie conséquente dédiée aux services numériques apparaît comme une nécessité.

Figure 18 - Analyse de l'étude #166

b. Conclusions générales

Suite à cette analyse, des enseignements génériques se dégagent. Si certains étaient déjà confirmés par l'analyse bibliographique de l'état de l'art (manque de référentiels communs ou de données), d'autres ont pu

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

être identifiés grâce aux analyses approfondies (il n'existe pas d'étude de référence, et les effets indirects sont difficiles à quantifier).

Ces enseignements permettent de diriger le travail à mener dans la phase 3 – recommandations, qui prévoit les trois sujets suivants :

- Etablissement de recommandations
- Préconisation d'utilisation de données robustes
- Proposition d'un projet de PCR

Manque d'hypothèses communes

Chaque document analysé se base sur ses propres hypothèses et règles méthodologiques, sans s'appuyer sur des référentiels communs.

Par exemple, l'étude #19 (*CLIMAT : L'INSOUTENABLE USAGE DE LA VIDÉO EN LIGNE - Un cas pratique pour la sobriété numérique*), se base sur une méthode développée par le Shift Project (méthode 1byte).

L'étude #94 (*Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects*) quant à elle se base sur les normes ISO 14040-44, sans pour autant pouvoir les appliquer complètement.

Enfin, l'étude #167 (*An Integrated Method for Environmental Assessment and Ecodesign of ICT- based Optimization Services*) exclue du périmètre tout ce qui nécessitait l'usage de règles d'affectation.

Au-delà des problèmes de compréhension des résultats et d'interprétation, cette hétérogénéité des sources entraîne l'impossibilité de réaliser des comparaisons ou des analyses macroscopiques à partir des études publiées sans reprendre les modélisations et les hypothèses.

Cela renforce le besoin de disposer de règles sectorielles aux services numériques pour homogénéiser autant que possible les hypothèses principales.

Manque de données primaires et secondaires

Comme identifié lors de l'analyse bibliographique, les ACV de services numériques souffrent d'un manque de données primaires comme secondaires. Les ACVistes et les industriels du secteur comme les utilisateurs ne disposent pas d'informations complètes sur l'ensemble de la chaîne de valeur des services numériques (terminaux, réseaux, datacenter).

Ils sont donc amenés à réaliser des hypothèses et utiliser des données secondaires pour estimer les informations et les impacts des données manquantes. Cependant, ces données secondaires sont également manquantes, ou ne font pas l'objet de consensus.

Par exemple, l'étude #19 (*CLIMAT : L'INSOUTENABLE USAGE DE LA VIDÉO EN LIGNE - Un cas pratique pour la sobriété numérique*) se base sur une hypothèse de bitrate du visionnage de vidéo qui a été remis en question par l'étude de factchecking.

Au-delà de l'hétérogénéité des résultats qui s'ajoute à celles des hypothèses, l'essentiel des études choisi de rétrécir le périmètre d'étude en limitant aux indicateurs et phases du cycle de vie pour lesquelles des données sont plus accessibles, et notamment la phase d'utilisation, la consommation d'énergie, et l'indicateur de potentiel de réchauffement climatique.

Cela constitue une forte limite pour la méthodologie ACV en sortant du cadre de deux de ses caractéristiques constitutives :

- Multi-étapes
- Multi-critères

Les résultats ainsi publiés ne permettent pas de donner une image exhaustive des impacts, même directs, des services numériques, et entraînent le risque de ne pas identifier d'éventuels transferts de pollution.

Il n'existe pas d'étude idéale pouvant servir de référence

Les études ACV ayant fait l'objet d'une analyse approfondie dans cette étude ont trop de limitations pour être utilisées comme référence.

En élargissant au périmètre de l'analyse bibliographique réalisé lors de la tâche 1, les études identifiées les plus poussées sont les études ADEME [7] [8] [9] [10]. En effet, elles sont parmi les seules à respecter les normes ISO 14040-44, dont notamment la prise en compte de l'ensemble du cycle de vie, et un calcul d'impact multi-indicateur

Cependant, elles ont été publiées en 2011. Comme le montre l'analyse sur l'étude #19 (*CLIMAT : L'INSOUTENABLE USAGE DE LA VIDÉO EN LIGNE - Un cas pratique pour la sobriété numérique*), les données primaires et secondaires, et donc les ACV réalisées, deviennent très rapidement obsolètes du fait du renouvellement technologique.

- Au niveau résultats d'impact, ces études ne peuvent pas être utilisées comme références à l'heure actuelle.
- Au niveau hypothèses et choix des données primaires et secondaires, ces études ne peuvent pas être utilisées comme référence à l'heure actuelle.
- Au niveau méthodologique ACV, elles restent les études les plus abouties couvrant des services numériques dans leur globalité et conformes ISO 14040-44.

De ce fait, il est indispensable de recouper les sources et de se référer au plus grand nombre d'ACV et d'études environnementales de services numériques, globaux ou partiels, avant d'utiliser des sources comme références.

Pour cela, les études comme #166 (*Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review*) permettent d'avoir une vision large sur les études existantes pouvant être prises en compte, en l'occurrence sur la question des effets indirects.

Difficulté de prise en compte des effets indirects

Les deux études analysées portant sur les effets indirects ne concluent pas sur une méthode spécifique pour prendre en compte les effets indirects.

- L'étude #167 (*An Integrated Method for Environmental Assessment and Ecodesign of ICT- based Optimization Services*) indique que les effets indirects sont généralement considérés non pas comme une résultante des services numériques, mais comme une cause : les services numériques sont créés pour réduire un besoin de ressources physiques, dans une logique IT for green (smart building, smart grid, etc.). De ce fait, les effets indirects considérés sont souvent considérés comme des effets directs et il n'y a donc pas de méthodologie spécifique mise en place. Cela entraîne souvent une non-prise en compte des autres effets indirects (notamment les effets rebonds).
- L'étude #166 (*Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review*) offre une analyse et une classification des études prenant en compte les effets indirects. Sans préconiser de méthode en particulier, cela permet d'identifier les études portant sur des domaines et des biens similaires et de pouvoir ainsi bénéficier des travaux déjà menés sur le sujet.

S'il est difficile de les quantifier, il paraît essentiel de pouvoir au minima les qualifier. L'étude #166 (*Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review*) propose des axes de classification des effets indirects.

Cette classification fait l'objet d'une analyse plus approfondie dans l'étude « *Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology* »[11]. Différentes méthodes de classifications provenant de différents articles sont présentées, illustrées et commentées.

De par l'importance liée aux effets indirects, il est essentiel de pouvoir avancer sur la prise en compte de ces effets. Ce point est discuté en détail dans la phase 3 du projet concernant les recommandations. **Le développement de l'analyse du cycle de vie conséquentielle dans le secteur du numérique pourrait être une réponse.**

J. PHASE 3 – PRECONISATION D'UTILISATION DE DONNEES ROBUSTES

Le terme de données est à définir. Dans notre cas, on appelle donnée toute information environnementale ou toute information technique relative à tout ou partie d'un service numérique pouvant servir de sources

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

pour l'évaluation de l'impact environnemental d'un service numérique. Ces données peuvent, entre autres, être qualifiées par :

- Leur périmètre : territoire, service, usage, tiers, équipements, ...
- Leur type :
 - o données techniques : consommation d'énergie, puissance, ...
 - o données d'inventaires du cycle de vie ou ICV
 - o données d'impacts ou AICV
- Leur origine : données primaires (mesurées, calculées) ou secondaires (évaluées, extrapolées)
- Leur représentativité géographique
- Leur représentativité temporelle.

Comme indiqué au chapitre précédent et dans la bibliographie, il y a pour les services numériques un manque de données primaires et secondaires sur l'ensemble de la chaîne de valeur. Il est actuellement impossible de réaliser une étude en se basant sur un ensemble homogène de données d'ICV. Les études disponibles combinent donc :

- Données d'ICV
- Données d'impact
- Grandeurs techniques ou flux (ex : consommation d'énergie) traduite en émission de GES.

Cela a pour effet direct de limiter le nombre de catégories d'impacts pouvant être prises en compte : potentiel de réchauffement climatique majoritairement, épuisement des ressources naturelles, énergie primaire et consommation d'eau parfois.

Passé ce constat, les données robustes identifiées sont de trois types :

- Données à l'échelle des services numériques dans leur globalité : certains services numériques type, ou plus généralement l'utilisation des services numériques à l'échelle d'un pays ou d'une région, ont fait l'objet d'études environnementales qui permettent de mettre à disposition certaines données pouvant faire l'objet de réutilisation.
- Données sur les équipements utilisés dans les services numériques : les services numériques font appel à une large quantité de produits physiques, dont un certain nombre sont couverts par des données environnementales dans les bases de données existantes : à savoir, les terminaux utilisateurs (ceux-ci ayant notamment fait l'objet d'affichage environnemental) et les serveurs ainsi que les équipements supports (onduleurs, climatiseurs...). Les équipements de stockage sont hors champ.
- Données techniques sur les équipements utilisés dans les services numériques au sein des organisations : les organisations disposent d'informations concernant certains matériels et mesures relatives aux services numériques qu'il est possible de recueillir.

Sur cette base, les différentes sources de données identifiées sont détaillées suivant les critères suivants :

- Périmètre : Territoire, Usage/Service ou Equipement
- Donnée gratuite ou payante
- Type de donnée : données de collecte, résultat d'impact monocritère, AICV / ICV
- Statut de développement : donnée développée ou en développement

Données sur les services numériques dans leur globalité

Source	Etudes GreenIT.fr	The Shift Project – modèle 1byte	Etudes The Shift Project	Etudes Négaoctet
Lien / référence	https://www.greenit.fr/empreinte-environnementale	https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/20	https://theshiftproject.org/article/pour-une-sobriete-	https://negaoctet.org/

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

	-du-numerique-mondial/ https://www.greenit.fr/impacts-environnementaux-du-numerique-en-france/	18/10/Lean-ICT-Materials-1byte-Model-2018.xlsx	numerique-rapport-shift/ https://theshiftproject.org/article/climat-insoutenable-usage-video/	
Commentaires	GreenIT.fr publie des études environnementales basées sur l'ACV sur les services numériques, et notamment le calcul de l'empreinte environnementale du numérique mondial et en France	Modèle de calcul de la consommation d'énergie en phase d'usage uniquement des datacenters, du réseau et des terminaux.	Le Shift Project publie des rapports portant sur des services numériques dans leur globalité (à l'échelle française ou mondiale). Axées principalement sur la consommation d'énergie.	Le consortium a réalisé différentes études pilote dans le cadre du projet Négaoctet, sur des services variés. La communication des études dépend de la volonté des industriels concernés. Certaines études internes seront publiées à l'issue du projet.
Conditions de mise à disposition	Gratuites	Gratuit	Gratuites	Dépendamment des études
Type de données	AICV (réchauffement climatique, énergie primaire, consommation d'eau, consommation de ressources abiotiques)	Données de collecte	Monocritère (énergie)	AICV (indicateurs EN15804+A2/PEF)
Périmètre	Territoire	Usage/Service	Usage/Service	Usage/Service
Statut de développement	Développées	Développées	Développées	En développement

Source	Etude ADEME-ARCEP
Lien / référence	
Commentaires	Suite à une lettre de mission du gouvernement l'ADEME et l'ARCEP ont commandité une étude sur les impacts environnementaux des services numériques en France. Il s'agira de l'étude la plus complète à ce jour.
Conditions de mise à disposition	A déterminer
Périmètre	Territoire – Ménage
Type de données	AICV (indicateurs EN15804+A2/PEF)
Statut de développement	En développement, finalisation 2022

Figure 19 – Préconisations d'utilisation de données sur les services numériques dans leur globalité

Source	Données fabricants	EIME	Ecodiag	Programmes de déclarations environnementales – PEP ecopassport
Lien / référence	https://www.dell.com/learn/us/en/uscorp1/corp-comm/environment_t_carbon_footprint_products https://h22235.www2.hp.com/hpinfo/globalcitizenship/environment/productdata/ProductCarbonFootprintnotebooks.html https://www.apple.com/environment/ https://www.cfp-japan.jp/english/list/ https://csr.lexmark.com/env-epd.php https://www.seagate.com/fr/fr/global-citizenship/life-cycle-assessment/	https://demo.bveime.com/	https://ecoinfo.cnrs.fr/ecodiag/	http://www.pep-ecopassport.org/fr/consulter-les-pep/
Commentaires	Données des fabricants d'équipement DELL, HP, Apple, Fuji, Lexmark, Seagate. La qualité et les indicateurs calculés sont dépendants de chaque fabricant	Logiciel d'ACV possédant une base de données d'ICV sur le secteur électrique et électronique, aux niveaux composants et équipements, leur transport, leur utilisation et leur fin de vie	Calculateur des impacts environnementaux d'un service IT basé sur la liste des équipements et leurs consommations d'électricité. Donne des valeurs carbone pour la fabrication et le transport des terminaux	Programme de déclarations environnementales spécifique sur les produits électriques, électroniques et de génie climatique. Contient des déclarations sur certains produits reliés aux services numériques.
Conditions de mise à disposition	Gratuites	Sous licence	Gratuites	Gratuites
Périmètre	Equipements	Composants - Equipements	Equipements	Equipements
Type de données	AICV (indicateurs dépendant de chaque fabricant, souvent monocritère sur le réchauffement climatique)	ICV	Monocritère (réchauffement climatique)	AICV (indicateurs EN15804+A1)

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

Statut de développement	Développées	Composant : Développées – Equipement : en développement	Développées	Développées
--------------------------------	-------------	---	-------------	-------------

Source	Etudes ADEME	Négaocet	PAIA	GaBi
Lien / référence	https://www.ademe.fr/modelisation-evaluation-impacts-environnementaux-produits-consommation-biens-dequipement	https://negaocet.org/	https://paia-tool.com/	http://www.gabi-software.com/data-bases/gabi-databases/electronics/
Commentaires	L'ADEME a réalisé ou commandité différentes études sur le numériques, ou sur des équipements numériques. La plus récente présente les impacts de nombreux équipements grand public sur l'ensemble de leur cycle de vie	Réalisation d'une base de données d'ICV sur les équipements et systèmes des services numériques, et sur certains services numériques, conforme au format et à la nomenclature EF 3.0	Base de données réalisée en 2009 par Quantis, IBM, et un consortium d'industriels du secteur des équipements numériques. Permet de réaliser des ACV d'équipements numériques.	Une des bases de données d'ACV les plus reconnues, qui dispose de données concernant les composants électroniques utilisés dans les services numériques
Conditions de mise à disposition	Gratuites	A déterminer	Sous licence	Sous licence
Périmètre	Equipements terminaux	Equipements terminaux, datacenter, architectures/tiers types.	Composants - Equipements	Composants
Type de données	AICV (indicateurs ILCD)	AICV (indicateurs EN15804+A2/PEF)	AICV	ICV
Statut de développement	Développées	En développement, finalisation 2021	Développées	Développées

Source	Base Impacts	Base PEF/OEF
Lien / référence	http://www.base-impacts.ademe.fr/	http://lcdn.thinkstep.com/Node/
Commentaires	Base de données développée pour l'affichage environnemental français. Dispose de données sur des composants électroniques.	Base de données développée pour l'affichage environnemental européen (PEF/OEF) et dont l'usage est limité à cet effet. Dispose de données sur des composants électroniques.
Conditions de mise à disposition	Gratuites	Gratuites, mais utilisation limitée
Périmètre	Composants	Composants
Type de données	AICV (indicateurs EN15804+A2/PEF) partiels	ICV
Statut de développement	Développées	Développées

Figure 20 – Préconisations d'utilisation de données sur les équipements utilisés dans les services numériques

Données techniques sur les équipements utilisés dans les services numériques au sein des organisations

Source	CMDB entreprise	Datasheets	Méthode BOAVIZTA	
Lien / référence	Dépend des organisations	Site des fabricants	Disponible Q1 2021	
Commentaires	La configuration management database (abrégé CMDB), ou base de données de gestion de configuration, est une base de données unifiant les composants d'un système informatique. Elle permet d'en comprendre l'organisation et d'en modifier la configuration.	Il n'existe pas de format de datasheet standard. Ainsi, le niveau de qualité et les possibilités d'usage des données est disparate. On y retrouve généralement : la configuration technique, la masse et la puissance des équipements.	Méthodologie pas à pas de mesure d'empreinte environnementale d'un Système d'Information qui agrège les données accessibles et/ou disponibles (constructeurs, mesurées, approximées)	
Conditions de mise à disposition	Privées	Publics/Document commercial et technique	Publics	
Périmètre	Equipement	Composant - Equipement	Equipement	
Type de données	Type d'équipements, Nombre, Virtualisation, Configuration, utilisation, localisation, ...	Puissance – Masse – Composition - Configuration	Méthodologie Type d'équipements, Puissance (on, off et idle), Profils d'utilisation, Localisation, ...	
Statut de développement	Fonction des entreprises	//		

Figure 21 – Préconisations d'utilisation de données sur les équipements utilisés dans les services numériques

Introduction

Cette partie a pour objectif de préciser une liste de recommandations propres à la réalisation d'ACV des services numériques. Cette liste de recommandations représente la vision du consortium Negaocet, complétée et discutée avec les membres de ScoreLCA et ouvre des perspectives de travaux sur l'ensemble des sujets afin d'arriver à des positions communes. A cet effet, elle peut être utilisée comme base pour la rédaction de règles sectorielles (RCP / PCR).

Méthode d'élaboration des recommandations

Afin d'établir les recommandations, le document « *General guide for Life Cycle Assessment – Provision and action steps* », *ILCD handbook, EUR 24378 EN – 2010 [12]* a été utilisé comme base de travail.

Ce document liste, pour un ensemble large de sujets relatifs à la création et la vérification d'ACV, des dispositions (appelées « provisions ») permettant de déterminer ce qui est obligatoire (« SHALL »), recommandé (« SHOULD ») et optionnel (« MAY ») lors de la réalisation d'une ACV.

Dans le présent rapport, cette liste a été reprise, adaptée au contexte des ACV des objets connectés et des services numériques et complétée.

La numérotation du ILCD handbook a été renseignée pour chaque recommandation afin de permettre de faire un lien entre les deux documents.

Les recommandations du ILCD handbook qui ne sont pas abordées dans ce rapport ne font pas l'objet de compléments relatifs aux services numériques.

Recommandations issues du ILCD handbook

Prise en compte des effets indirects

Provisions: 5.3 Classifying the decision-context

Identique au ILCD handbook.

Pour la prise en compte des effets indirects (situations B ou C), voir chapitre « Recommandations additionnelles ».

Classification du niveau d'ACV

Provisions: 6.2.1 Consistency of methods, assumptions and data

Complément : Du fait de la nature diffuse et distribuée des équipements matérialisant les services numériques (nombreux acteurs et nombreuses localisations géographiques), il est complexe de disposer d'une bonne homogénéité des hypothèses et des données. Les recommandations suivantes doivent donc être prises :

- **SHALL / OBLIGATOIRE** : pour chaque tiers ou sous-partie du service numérique considéré, documenter le niveau de granularité des données de collecte ainsi que les données d'ICV utilisées, et qualifier l'écart avec les objectifs de l'étude dans le rapport d'ACV. L'évaluation de chaque tiers ou sous-partie doit également être qualifiée considérant trois niveaux :
 - **Screening : évaluation de cadrage** pour identifier rapidement les enjeux environnementaux pour l'aide à la décision. Utilisation de données hétérogènes, et/ou au niveau AICV.
 - **Simplifié : évaluation simplifiée** intégrant des données secondaires et des voies de simplifications encadrées. Utilisation de données ICV ou UPR principalement génériques.
 - **Complet : évaluation complète** intégrant des données primaires obtenues après plusieurs itérations et une collecte sur le terrain à plusieurs niveaux de la chaîne de valeur. Utilisation de données ICV ou UPR principalement spécifiques.

Au global, **le niveau de l'ACV correspond au niveau du tiers ou de la sous-partie le plus faible.**

Exemple : ACV d'un service numérique dans un but d'écoconception, selon une vision développeur de service.

Tiers	Terminaux	Réseau	Datacenter	Ressources humaines
Granularité des données de collecte	Niveau équipements	Niveau réseau dans sa globalité	Niveau machines virtuelles	Nombre de jours.hommes
Type de données utilisées dans les calculs d'impacts	ICV	Facteurs d'impacts	ICV	ICV
Données d'ICV utilisées	Données spécifiques des constructeurs	Donnée d'un opérateur français, extrapolée pour le réseau européen (changement du mix électrique)	Donnée générique d'un datacenter, extrapolée pour une machine virtuelle (allocation au nombre de machines virtuelles moyen par datacenter)	Donnée générique : impacts moyen d'un employé de bureau en France (hypothèse : impacts homogènes entre les différentes fonctions des employés)
Ecart avec les objectifs de l'étude	En ligne avec les objectifs.	Non aligné, pas de connaissances sur l'utilisation effective du réseau par les utilisateurs, et différentiation impossible par rapport au type de réseau (fixe ou mobile)	Non aligné, information partielle sur l'usage réel des ressources serveur et stockage (dimensionnement selon le pic de consommation uniquement), donc mauvaise vision sur les impacts exacts de ce tiers	En ligne avec les objectifs
Niveau	Complet	Screening	Simplifié	Simplifié
Niveau global	ACV screening			
Conclusion	Le niveau de granularité et les données d'ICV utilisées permettent d'avoir un premier niveau d'interprétation dans une logique d'écoconception, qui pourra être prolongé par une étude plus poussée			

Figure 22 – Exemple de documentation de l'homogénéité des données et hypothèses

Unité fonctionnelle

Provisions: 6.4 Function, functional unit, and reference flow

Modifications :

- **III) SHALL/OBLIGATOIRE** : complément : pour un service numérique considéré, la(les) service(s) rendu(s) par le service sont notamment dépendantes des objectifs de l'étude et du public cible qui aura une utilisation différente du service. La(Les) fonction(s) doit(vent) être identifiées en lien avec les parties prenantes concernées et le public cible.

Exemple : service numérique considéré : réseau social

⇒ Acteur concerné/cible : grand public

Fonction 1 : communiquer avec ses contacts et partager des informations sous formes de textes, d'images ou de vidéo.

⇒ Acteurs concernés/cibles : gestionnaire du réseau social et publicitaires

Fonction 2 : permettre le visionnage de contenu publicitaire par le grand public.

⇒ Acteurs concernés/cibles : gestionnaire du réseau social et publicitaires

Fonction 3 : collecter des données sur les habitudes de consommation des utilisateurs.

- IV) SHALL/OBLIGATOIRE

- **IV.c)** la durée d'étude doit être précisée spécifiquement en fonction des cas de figure. Concernant les catégories de services pour lesquels la notion de durée de vie est pertinente, il est nécessaire de, dans l'ordre de priorité :
 - Caractériser la durée de vie fonctionnelle ou normative du service numérique. Correspond à un service numérique dans sa globalité.
 - Si cela n'est pas possible, définir une durée d'usage. Correspond à un compte utilisateur
 - Si cela n'est pas possible, la durée de vie n'est pas prise en compte. Correspond à un acte métier.

Complément : la notion de flux de référence ne représente pas complètement les biens mobilisés pour le service, est parfois difficilement applicable par le praticien ACV, et son application difficilement compréhensible par le lecteur, en l'état du fait de la complexité des services numériques. Il est nécessaire d'y adjoindre les informations suivantes :

- **SHALL/OBLIGATOIRE** : afin de déterminer les biens mobilisés par le service numérique, il est nécessaire de procéder en trois étapes :
 - Détermination du parcours utilisateurs (workflow) : le parcours utilisateurs détaille toutes les opérations réalisées pour permettre la bonne tenue de l'unité fonctionnelle.
 - Détermination du schéma fonctionnel correspondant : le schéma fonctionnel détaille les ensembles constitutifs du service numérique étudié permettant la mise en œuvre du parcours utilisateur, incluant notamment les différents tiers, et utilisés selon l'ensemble des scénarios d'usage. Il doit avoir une granularité adaptée aux objectifs de l'étude.
 - Détermination du diagramme de flux : le diagramme de flux se base sur le schéma fonctionnel et le parcours utilisateurs. Il indique le cheminement des actions successives se déroulant lors de l'usage.

Règle de coupure

Provisions: 6.6 Deriving system boundaries and cut-off criteria (completeness)

Modification : le principe des règles de coupure, massiques, énergétiques ou sur les impacts environnementaux, sont difficiles à appliquer dans le cadre des services numériques. En effet, la multiplicité des équipements considérés et des règles d'allocation rend difficile toute comptabilité de complétude. Il est cependant nécessaire de s'assurer de la bonne prise en compte d'un pourcentage important des impacts des services numériques étudiés.

- **SHOULD/RECOMMANDE** : Dans le cas où la règle de coupure ne peut pas porter sur les critères de masse, d'énergie ou d'impact, il est recommandé d'utiliser un critère de consommation énergétique en phase d'utilisation des éléments modélisés par rapport à la consommation énergétique de l'ensemble des éléments associés au service numérique considéré, pour chaque tiers (terminaux, réseau, datacenter).

Sélection des indicateurs d'impact

Provisions: 6.7 Preparing the basis for the impact assessment

Complément : dans le cadre des services numériques, les catégories d'impact environnementales les plus significatives pour le secteur sont similaires à celles sur les équipements électriques et électroniques. En effet, les services numériques se composent principalement d'une somme d'équipements électroniques. Aussi il est possible de lister un certain nombre de catégories environnementales importantes, au vu du recul dont nous disposons sur le secteur électronique, et notamment les PEFCR IT equipment, photovoltaïque, battery et UPS.

A noter pour la catégorie d'impact d'épuisement des ressources naturelles, elle constitue un enjeu important pour les services numériques. De plus, il existe une grande variété des méthodes, ce qui engendre des importances relatives de chaque ressources très différentes (approches stock techniquement accessible, ou économiquement accessible, ou encore réserves totales par exemple, qui modifie fortement l'importance des

terres rares). Il est donc conseillé de calculer plusieurs méthodes différentes pour cette catégorie. Il est notamment possible de considérer des méthodes relatives à l'extraction des ressources qui ne sont pas basées sur la criticité, comme la méthode MIPS.

- **SHOULD/RECOMMANDE** : les catégories d'impact recommandées pour les services numériques sont :
 - o L'épuisement des ressources naturelles (minérales et métaux)
 - o Le changement climatique
 - o L'acidification
 - o Les émissions de particules fines
 - o Les radiations ionisantes
 - o L'épuisement de la ressource en eau

Complément : de manière spécifique pour les objets connectés, ceux-ci peuvent et sont généralement inclus dans des systèmes classiques basés sur des objets physiques dans des secteurs qui ne sont pas des secteurs du numériques. Ceux-ci ont des catégories d'impact prépondérantes différentes. Afin de disposer d'une vision d'ensemble des problématiques environnementales sur les systèmes étudiés, il est nécessaire que les catégories étudiées incluent également celles des systèmes physiques.

- **SHOULD/RECOMMANDE** : afin d'éviter des transferts de pollution significatif, il est recommandé que les catégories d'impact pertinentes des objets physiques reliés aux services numériques, et notamment aux objets connectés, soient prises en compte au niveau du service numérique

Comparaison

Provisions: 6.10 Comparisons between systems

Complément : Considérant les objets connectés, ceux-ci sont généralement inclus dans des systèmes classiques basés sur des objets physiques issus d'autres secteurs d'activités (textile, bâtiment, distribution). Ceux-ci ont des catégories d'impact prépondérantes différentes.

De même, les solutions numériques viennent parfois en substitution de solutions dites classiques (par exemple, le mail peut substituer un courrier papier) devant être caractérisés par des catégories différentes. Dans le cadre d'une comparaison, et afin de disposer d'une vision d'ensemble des problématiques environnementales sur les systèmes étudiés et de faire des choix éclairés, il est nécessaire que les catégories étudiées incluent également celles des systèmes physiques et/ou des solutions dites « classiques ».

- **VII) SHALL/OBLIGATOIRE** : Les catégories d'impact étudiées dans le cadre d'une comparaison entre plusieurs systèmes doivent couvrir les enjeux pertinents pour l'ensemble des secteurs, notamment concernant les services numériques d'une part, et les services physiques de l'autre.

Collecte des données

Provisions: 7.3 Planning data collection

Complément : la collecte de données engendre quelques spécificités complémentaires au cadre général concernant les services numériques

- **SHALL/OBLIGATOIRE** : Les données primaires doivent être collectée sur une période d'un an afin d'éviter les variations saisonnières.

Dans le cas où le service numérique considéré a une durée totale de moins d'un an, la période de collecte doit comprendre l'ensemble de la durée du service numérique.
- **SHOULD/RECOMMANDE** : Les impacts des services numériques ont la particularité d'être généralement dépendant de la maturité du service, notamment en termes de dimensionnement par rapport au nombre d'utilisateurs : un service peut être surdimensionné dans certaines parties de sa vie. Ainsi, il convient d'évaluer les variations d'impacts liés aux variations d'usage et de dimensionnement du service.

Les deux approches retenues sont les suivantes :

- Approche au réel : le taux d'usage est déterminé en se basant sur la collecte de données réalisés. Il doit être indiqué
- Approche par hypothèse : le taux d'usage est déterminé par hypothèse. Dans ce cas il doit être précisé, et plusieurs hypothèses de taux d'usage doivent être calculées en analyse de sensibilité afin de présenter la variation d'impact liée à cette hypothèse.

Provisions: 7.4.2.3 Describing what the unit process represents

Complément : les services numériques étant très généralement conçus et opérés par de nombreux acteurs, l'usage de données portant sur des éléments non maîtrisés par le praticien ACV est important.

Compte tenu de la complexité du diagramme de flux des services numériques et de l'incertitude sur le périmètre de responsabilité de chaque acteur, des manques ou les doubles comptages peuvent survenir.

- **SHALL/OBLIGATOIRE** : la définition du périmètre couvert par les données doit être détaillée.
- **SHOULD/RECOMMANDE** : En se basant sur le diagramme de flux établi au préalable (voir Provisions: 6.4 Function, functional unit, and reference flow), il est recommandé que les données précisent le périmètre couvert (quels sous-ensembles du diagramme), ainsi que les acteurs concernés. Si les données ne précisent pas le périmètre, le praticien ACV doit les estimer en privilégiant une approche conservatrice.

Modélisation du système

Provisions: 7.8 Modelling the system

Complément : les services numériques étant très généralement conçus et opérés par de nombreux acteurs, l'usage de données portant sur des éléments non maîtrisés par le praticien ACV est important.

Compte tenu de la complexité du diagramme de flux des services numériques et de l'incertitude sur le périmètre de responsabilité de chaque acteur, des manques ou les doubles comptages peuvent survenir.

- **SHALL/OBLIGATOIRE** : En se basant sur le diagramme de flux établi au préalable (voir Provisions: 6.4 Function, functional unit, and reference flow), il est recommandé que les données précisent le périmètre couvert (quels sous-ensembles du diagramme), ainsi que les acteurs concernés. Si les données ne précisent pas le périmètre, le praticien ACV doit les estimer en privilégiant une approche conservatrice.

Allocations

Provisions: 7.9.3 Solving multifunctionality by allocation

Complément : la liste des services pour lesquels il est indiqué quelles peuvent être les paramètres physiques pertinents servant de base à l'élaboration de règles d'allocation ne comprend pas les services numériques. De par leur complexité, ils peuvent être séparés en différents sous-éléments. De manière non exhaustive :

- **III.b.i) SHALL/OBLIGATOIRE** : ajout des points suivants :
 - Services numériques :
 - Objets connectés : bande passante, temps d'utilisation, nombre d'opérations
 - Terminaux : usage CPU, usage GPU, usage ROM, usage RAM, temps d'utilisation
 - Réseaux : bande passante
 - Datacenters : usage CPU, usage GPU, usage ROM, usage RAM, nombre d'opérations

Identification des aspects environnementaux significatifs

Provisions: 9.2 Identification of significant issues

Complément : L'identification des aspects environnementaux significatifs est une étape importante de l'ACV. Elle permet notamment de déterminer les leviers d'action dans le cadre d'une démarche d'écoconception et de focaliser les efforts là où les résultats sont les plus importants en termes de réduction des impacts. Pour les services numériques plus que pour tout autre secteur, la multiplicité des acteurs entraîne une répartition des leviers d'actions diffuse sur toute la chaîne de valeur. Il est donc nécessaire de déterminer, pour chaque aspect, le ou les acteurs ayant une possibilité d'action ou intervenant sur les causes.

- **I.d) SHALL/OBLIGATOIRE** : ajout : les parties intéressées doivent être identifiées pour chaque aspect significatif relevé, ainsi que les actions et influences qu'elles peuvent avoir sur le sujet.

Contrôle de complétude

Provisions: 9.3.2 Completeness check

Modification : le principe des règles de coupure, massiques, énergétiques ou sur les impacts environnementaux, est difficile à appliquer dans le cadre des services numériques. En effet, la multiplicité des équipements considérés et des règles d'allocation rend difficile toute comptabilité de complétude. Il est cependant nécessaire de s'assurer de la bonne prise en compte d'un pourcentage important des impacts des services numériques étudiés.

- **SHOULD/RECOMMANDE** : Dans le cas où la règle de coupure ne peut pas porter sur les critères de masse, d'énergie ou d'impact, il est recommandé d'utiliser un critère de consommation énergétique en phase d'utilisation des éléments modélisés par rapport à la consommation énergétique de l'ensemble des éléments associés au service numérique considéré, pour chaque tiers (terminaux, réseau, datacenter).

Recommandations additionnelles

Ces recommandations concernent des sujets n'étant :

- soit pas nécessairement abordés dans le ILCD handbook,
- soit disséminés dans différentes catégories et qu'il est important de traiter spécifiquement.

1. Provisions: Effets indirects

La prise en compte des effets indirects est essentielle, de par l'importance relative de ceux-ci, aussi bien concernant le potentiel de réduction d'impact (IT for green) que le risque d'effets indésirables d'augmentation des impacts. L'ordre de grandeur de ces effets indirects est peu connu à l'heure actuelle, mais certaines études l'estiment supérieur aux effets directs.

A titre d'illustration, l'étude « Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail » de l'ADEME [13] montre que les effets rebonds et la façon de gérer la mise en place de services physiques et numériques autour du télétravail peut faire varier les impacts fortement jusqu'à rendre le télétravail bénéfique, ou au contraire empirant les impacts environnementaux.

Ces impacts sont cependant difficiles à quantifier dans des délais et des ressources abordables pour la plupart des praticiens ACV, et demandent l'intervention d'experts de domaines variés (économistes, sociologues, comportementalistes, etc.). D'autre part, ils génèrent une forte incertitude du fait de leur caractère prévisionnel, dans un domaine comme les services numériques soumis à de fortes évolutions et des sauts technologiques.

Il est cependant possible de les identifier et de les catégoriser. Pour cela, différentes classifications sont possibles. L'étude « Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology » [11] est à ce jour l'étude la plus poussée sur la classification des impacts indirects des services numériques. Si elle se concentre sur une approche énergétique, sa méthodologie est applicable pour la réalisation d'ACV. Cette partie reprend en grande partie les travaux menés par Nathaniel C Horner et al.

Y sont introduits différents niveaux d'effets indirects, positifs comme négatifs, en fonction de leur portée par rapport à l'écosystème socio-économique, depuis les effets directs jusqu'aux transformations systémiques :

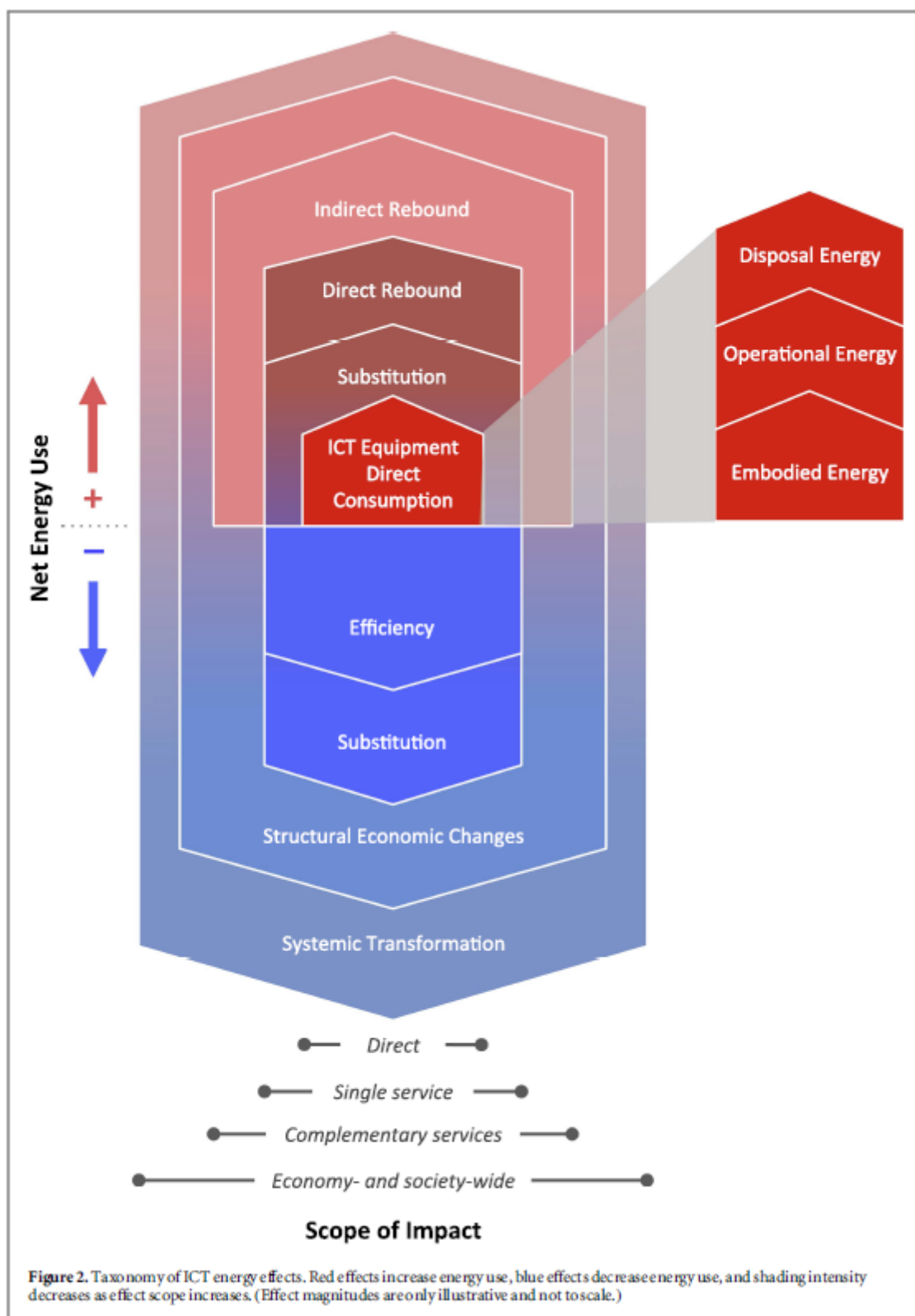


Figure 23 – Présentation de la classification des effets indirects, extrait de [11]

Les catégories sont détaillées ci-dessous et dans les recommandations plus bas :

Effet	Portée	Explication	Exemple (système considéré : GPS)
Impacts de la fabrication et du transport	Directe	Effet négatif	Production et transport du GPS

Impacts de l'utilisation		Effet négatif	Consommation d'énergie et de données du GPS
Impacts de la fin de vie		Effet négatif	Traitement en fin de vie du GPS
Efficienne	Indirecte – sur le service considéré	Effet positif, réduction de l'utilisation de ressources liées à l'optimisation de la consommation permise par le service numérique	Trafic plus efficace du fait de la recherche de la route la plus courte par le GPS
Substitution		Effet positif ou négatif, remplacement d'un service par un autre	Remplacement des cartes papier
Effet rebond direct		Effet négatif, augmentation de la consommation d'un service lié à la réduction de son coût ou à une utilisation facilitée	Plus de trajets liés à l'amélioration des temps de déplacement et à la réduction de la congestion
Effet rebond indirect	Indirecte – sur d'autres services	Effet négatif, augmentation de la consommation d'autres services liée aux économies dégagées par la réduction du coût du service étudié	Utilisation du temps économisé par la réduction des trajets et utilisation de l'argent économisé par la réduction de l'usage de carburant
Changements économiques structurels	Indirecte – niveau économique	Effet positif ou négatif, modifications macroéconomiques liées à l'introduction de nouveaux services et l'ajustement des secteurs existants	Les GPS permettent l'arrivée des véhicules autonomes
Transformation systémique	Indirecte – niveau sociétal	Effet positif ou négatif, modification des comportements humains et des institutions économiques et sociales	Les véhicules autonomes modifient les schémas et habitudes de choix de lieux de vie et de travail

Figure 24 – Détail de classification des effets indirects, adapté de [11]

Il faut également considérer qu'un effet indirect peut concerner un secteur d'activité différent de celui du service numérique étudié. Par exemple, un service de e-commerce aura des effets indirects sur les secteurs de l'emballage (augmentation de l'emballage des produits), des déchets (réduction des déchets si amélioration du commerce de produits de seconde main), du transport (augmentation du fret) et des bâtiments (réduction de la surface de points de ventes).

- **SHOULD/RECOMMANDE** : Il est recommandé que les effets indirects potentiels générés par le service numérique soient identifiés et catégorisés. La catégorisation peut se faire selon la classification suivante :
 - Efficienne : effet positif, réduction de l'utilisation de ressources liées à l'optimisation de la consommation permise par le service numérique.
Exemple : optimisation du chauffage d'un bâtiment, réduction de pertes en ligne
 - Substitution : effet positif ou négatif, remplacement d'un service par un autre.
Exemple : remplacement de transports par un service de vidéoconférence

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

- Effet rebond direct : effet négatif, augmentation de la consommation d'un service lié à la réduction de son coût ou à une utilisation facilitée.

Exemple : augmentation de la température d'un logement suite aux économies liées à la gestion intelligente du chauffage

- Effet rebond indirect : effet négatif, augmentation de la consommation d'autres services liée aux économies dégagées par la réduction du coût du service étudié.

Exemple : achat de matériel grâce aux économies liées à la gestion intelligente du chauffage

- Changements économiques structurels : effet positif ou négatif, modifications macroéconomiques liées à l'introduction de nouveaux services et l'ajustement des secteurs existants.

Exemple : effets du e-commerce sur le secteur de la logistique

- Transformation systémique : effet positif ou négatif, modification des comportements humains et des institutions économiques et sociales

Exemple : impacts du développement d'internet sur le système mondial

D'autre part, il est recommandé d'indiquer quels secteurs économiques ou d'activités sont impactés, positivement ou négativement, par les effets indirects.

2. Provisions: Coût environnemental de possession et coût environnemental d'usage

Comme vu ci-dessus, les services numériques sont souvent utilisés en substitution de services classiques. Leurs profils d'impact sont différents, avec des causes et des conséquences spécifiques. Parmi ces différences, il y a notamment un report des impacts depuis les phases de production, distribution, installation et fin de vie, vers la phase d'utilisation. En effet, les services numériques font appel à des équipements consommateurs d'électricité et de données qui génèrent des impacts environnementaux.

Cela produit une modification d'une partie des causes d'impact, depuis un coût de possession (les impacts sont conditionnés à l'acquisition du produit) vers un coût d'usage (les impacts sont conditionnés à l'usage du produit).

Si cette modification est à relativiser (une partie importante, voire majoritaire, des impacts, reste associée à la fabrication des terminaux), l'usage détermine également le dimensionnement des infrastructures réseaux (de manière cumulative pour l'ensemble des consommations) et serveurs (de manière ciblée sur le service numérique concerné).

Cette vision revient à considérer la consommation et l'usage de données (réseau et serveurs) comme une ressource générant des impacts, au même titre que la consommation d'électricité. Ressource dont il convient de limiter l'usage dans une démarche d'écoconception.

- **SHOULD/RECOMMANDE** : Lors de l'identification des axes d'écoconception, il est recommandé d'identifier les impacts causés par l'acte d'acquisition des équipements (coût de possession) et ceux causés par leur utilisation (coût d'usage). Le coût d'usage inclus le cycle de vie des équipements réseau et datacenter permettant le transport, le traitement et le stockage des données déporté.

3. Provisions: Coût environnemental moyen et coût environnemental marginal

Les services numériques sont généralement interconnectés de par l'utilisation d'équipements partagés. Ces équipements sont parfois présents de manière indépendante au service étudié. Par exemple, un service de mail utilise des équipements terminaux (ordinateurs, tablettes, smartphones) mais n'est pas directement la cause de leur production. Ces équipements seraient acquis et produits de toute façon.

Deux visions sont ainsi possibles :

- Calcul du coût moyen : il correspond au calcul classique réalisé en ACV : les impacts liés à la production des équipements déjà utilisés sont alloués au service par rapport à une clé d'allocation qui dépend de chaque situation (provisions 7.9.3).

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

- Calcul du coût marginal : il correspond au coût lié à l'accroissement des impacts environnementaux suite à la mise en place du service par rapport à la situation précédente. Il exclut la production des équipements déjà utilisés.

A noter que dans le cadre du calcul du coût marginal, un équipement peut avoir une partie des impacts associés au service (consommation d'électricité en mode actif), et d'autres non (fabrication, consommation d'électricité en mode veille, etc.)

Se pose ainsi la question de la responsabilité des parties prenantes par rapport aux impacts des équipements partagés et des leviers d'actions envisageables dans le cadre d'une démarche d'écoconception :

- Si l'infrastructure n'est pas installée préalablement au service, ou si elle est dédiée intégralement à celui-ci sur une période donnée, le coût marginal et le coût moyen sont confondus. La réduction des impacts implique de limiter la nécessité de nouveaux équipements, et peut entraîner la recherche de mutualisation des fonctions sur des équipements déjà existants, par exemple en favorisant un affichage déporté sur smartphone plutôt qu'un afficheur dédié.
- Si l'infrastructure est installée et non dédiée intégralement au service sur une période donnée, le praticien doit déterminer s'il choisit une approche de coût marginal ou de coût moyen. Idéalement, il peut calculer les impacts selon les deux approches pour disposer de prismes de lecture complémentaire. La réduction des impacts implique d'optimiser le service afin que celui-ci limite l'utilisation de ressources de bande passante, de calcul et/ou de stockage sur les équipements utilisés afin de réduire la consommation d'énergie et de limiter l'obsolescence des équipements et ainsi leur remplacement.
- **SHOULD/RECOMMANDE** : il est recommandé d'identifier les équipements mutualisés avec d'autres services ou fonctions et de déterminer si les impacts de ces équipements doivent être alloués à ces différents services (coût moyen) ou attribués intégralement à l'un ou plusieurs des services autre que le ou les services remplissant la fonction considérée dans l'étude (coût marginal). Dans une démarche d'écoconception, les deux approches permettent des interprétations spécifiques et peuvent être prises en compte.

4. Usages multiples d'un service numérique :

Comme tout bien couvert par une ACV, les services numériques peuvent couvrir plusieurs fonctions, ou plusieurs scénarios d'usages relatifs à une fonction commune. Cependant, la multiplicité des acteurs œuvrant autour d'un même service numérique entraîne une forte variété d'usages potentiels par rapport à un bien classique.

La compréhension de ces différents usages effectifs et fonctions est essentielle afin de déterminer les impacts environnementaux de ces services de manière pertinente. Plus encore, identifier les acteurs impliqués dans ces usages permet d'identifier les leviers d'action permettant de réduire les impacts avec plus de précision.

Deux éléments sont à différencier :

- Usage différent : un même service numérique remplit une fonction via plusieurs scénarios d'usage différent. Exemple : un service de vidéo à la demande peut être utilisé via un ordinateur, une tablette, un smartphone, grâce à un réseau filaire ou mobile, et sur différentes architectures serveur.
- Fonction différente : un même service numérique peut remplir plusieurs fonctions. Exemple : un réseau social peut avoir pour ses utilisateurs une fonction d'échange d'informations au format texte, photo ou vidéo, et pour son gestionnaire une fonction de collecte de données et de maximisation des revenus publicitaires.

Ces éléments ne sont pas spécifiques aux services numériques, mais l'explosion des usages dont beaucoup sont très spécifiques (ex : ACV de la lecture du journal sur le smartphone avec le wifi du train), ainsi que parfois l'impossibilité de séparer les fonctions à travers des règles d'allocation entraîne une importance accrue à la prise en compte de cet aspect.

- **SHALL/OBLIGATOIRE** : Dans le cas où une même fonction peut être couverte par plusieurs usages, il est nécessaire d'identifier
 - o Les différents usages possibles
 - o Leur probabilité de réalisation.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

L'ACV peut porter sur un scénario moyen devant être justifié, ou sur un scénario type. Ce point doit être indiqué clairement dans le scénario d'utilisation décrit dans le rapport d'ACV. Une analyse de sensibilité doit être menée pour les usages non couverts.

- **SHOULD/RECOMMANDE** : Dans le cas où une même fonction peut être couverte par plusieurs usages, les ACV réalisées doivent inclure des possibilités de paramétrisation des données d'entrée permettant de couvrir un large panel d'usages avec un effort réduit.
- **SHALL/OBLIGATOIRE** : Dans le cas où un même service répond à plusieurs fonctions, il est nécessaire de déterminer si la multifonctionnalité peut être traitée via une sous-division ou une sous-division virtuelle (provisions 7.9.2), ou par une allocation (provisions 7.9.3). Si cela n'est pas possible, il est nécessaire de déterminer :
 - L'ensemble des fonctions couvertes (provisions 6.4)
 - Les acteurs et parties prenantes concernées par ces fonctions (provisions 6.4)

Ce travail peut être mené en lien avec le diagramme de flux (provisions 6.4).

Ces choix doivent être indiqués de manière transparente dans le rapport d'ACV.

L. PHASE 3 – OUVERTURE

Les services numériques sont un secteur encore non mature, en croissance économique, technique et fonctionnelle rapide. Les configurations de services ont fortement évoluées ces trois dernières décennies, passant notamment de logiciel *on premise* avec un équipement servant d'interface homme/machine ou machine/machine, de calcul et de stockage, vers une architecture distribuée sur des réseaux complexes et un nombre d'équipements connectés de plusieurs milliards.

Ces évolutions ont fortement modifié la réalisation d'ACV de ces services. Ces méthodes n'ont pas évolué à une vitesse suffisante pour suivre les services numériques, ce qui entraîne une faible connaissance environnementale sur le cycle de vie de ces services. Le retard méthodologique accumulé entraîne une latence de réaction du monde de l'ACV dans la quantification des impacts environnementaux à l'heure d'une prise de conscience forte des enjeux liés à ce secteur.

Afin de limiter l'écart entre les services numériques et les méthodologies ACV dans le futur, il est nécessaire de disposer d'une vision proactive des évolutions à venir, et des enjeux associés.

Dans cette partie sont listés les points de vigilance identifiés à surveiller à court et moyen terme. Cette liste ne saurait être exhaustive du fait de la vision nécessairement parcellaire dont disposent les acteurs.

D'autres points de vigilance concernent des problématiques actuelles dont le traitement ne concerne pas directement la réalisation des ACV, mais qui limite la faisabilité, la portée ou la pertinence de celles-ci.

Certains enfin présentent des évolutions estimées comme bénéfiques pour la réalisation des ACV et la prise en compte des impacts environnementaux des services numériques.

Ces points de vigilance sont les suivants :

1. Niveau de distribution des services numériques

Les services numériques sont de plus en plus distribués, depuis une installation logicielle sur un poste unique (*on premise*), vers une interconnexion globale via les réseaux. Cette distribution va augmenter dans les prochaines années avec la multiplication des solutions cloud : SaaS (*software as a service*, logiciel installé sur un serveur distant), PaaS (*platform as a service*, plateforme d'exécution sur serveur distant) et IaaS (*infrastructure as a service*, infrastructure sur serveur distant).

Cela va entraîner une plus grande imbrication des services numériques entre eux : un service numérique faisant appel à d'autres services numériques, potentiellement géré par un tiers. Les impacts globaux seront donc plus difficiles à déterminer.

Action palliative envisageable : il est nécessaire de réaliser des ACV sur les services existants et d'améliorer la transparence des impacts environnementaux de ces services, pour arriver à avoir une base de données d'ICV de services homogènes.

2. Caractère programmatique

Les services numériques cherchent à être de plus en plus optimisés en termes de consommation de ressources de calcul, dans une logique de réduction des coûts. Cela implique un choix dynamique des serveurs effectuant les tâches de calcul ou de stockage en fonction de la charge des différents serveurs. Ceux-ci pouvant être répartis sur l'ensemble du globe.

Ce caractère dynamique limite la possibilité d'avoir une vision complète de l'utilisation de ressources numériques actuelles, et *a fortiori* prévisionnelle, et ainsi des impacts associés.

Action palliative envisageable : mettre en place des trackers permettant d'identifier les ressources utilisées par chaque service numérique et disposer de données statistiques.

3. Fin de vie des équipements électriques et électroniques

Malgré la mise en place de réglementations contraignantes (par exemple la directive 2012/19/UE, dite directive DEEE, en Europe), une grande partie des flux de DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques) a une fin de vie qui sort des filières conventionnelles (70% environ). Cela génère des impacts environnementaux, sanitaires et sociaux importants, et fait perdre des ressources rares présentes dans les produits en fin de vie. Il est difficile de comptabiliser ces impacts à l'aide d'une ACV par manque de données.

Avec la généralisation des objets connectés, la proportion et le volume de ces déchets sortant des filières classique va augmenter. En effet, un nombre très important d'équipement électronique va se retrouver en mélange avec les déchets d'autres filières (textile, emballage, bâtiment, etc.) dans une proportion faible. Ces DEEE diffus représenteront une part importante qu'il sera difficile d'isoler et de traiter, et qui pourront rendre le traitement de fin de vie des autres filières plus complexe en intégrant des matériaux nouveaux.

Action palliative envisageable : renfort de la législation pour mieux connaître et contrôler et réduire les flux de DEEE, en lien avec l'arrivée des objets connectés. Amélioration de la démontabilité des produits pour séparer les parties électronique du reste. Renfort de la sensibilisation du grand public et des entreprises et administrations.

4. Acculturation vs. greenwashing

Les impacts environnementaux des services numériques constituent une problématique qui s'est renforcée auprès du grand public au cours de ces dernières années. Si cela permet une meilleure prise en compte des impacts environnementaux de par le besoin des entreprises et administrations de répondre à ces attentes, cela entraîne également un risque de greenwashing.

En effet, en l'absence de méthode concertée et partagée, ou de réglementation contraignante, les possibilités de communications environnementales se concentrent essentiellement sur de la communication de type 2 (auto déclaration, ISO 14021). Celle-ci laisse une grande marge de manœuvre aux déclarants et entraîne un risque de greenwashing, ou de baisse de qualité des études.

Action palliative envisageable : création de méthodes communes et partagées, renfort de la législation.

5. Evolutions réglementaires

Les pistes d'évolutions réglementaires discutées actuellement (hormis celles déjà adoptées dans la loi 2020-05 dite loi AGECE) sont les propositions de la Convention Citoyenne pour le Climat, et les propositions de loi du Sénat. Elles comportent notamment des mesures pour rendre obligatoire l'écoconception des services, sites web et logiciels.

La traduction de ces propositions de loi dans la réglementation ne doit pas faire oublier la nécessité de se ramener à un niveau d'analyse d'acte métier (par exemple « consulter une page »), et pas uniquement au niveau global (le site, ou le service). En effet, les notions de fonctionnalité et d'usage doivent être au cœur des travaux de réduction des impacts. Ainsi, les deux prismes de lecture sont essentiels, afin de mieux maîtriser les effets indirects.

Action palliative envisageable : réaliser une veille réglementaire et alerter les pouvoirs publics lorsque nécessaire.

6. Multiplication des objets connectés

Le nombre et la variété des flux d'objets connectés, aux filières de fabrication très complexes et diverses (domotique, textile, hygiène, etc.) rend difficile la généralisation des études, du fait du besoin de modélisations très variées par des acteurs qui ne maîtrisent que la partie numérique, ou que la partie produit.

Action palliative envisageable : renfort des compétences des développeurs de solutions numérique sur les ACV et les impacts environnementaux dans leur globalité.

7. Intelligence artificielle, blockchain, cryptomonnaies

Ces sujets sont amenés à se développer. Cependant il n'y a pas de définition unique, il existe à l'heure actuelle de nombreuses technologies, protocoles et architectures différents, pour lesquels la prise en compte des impacts environnementaux présente de nouvelles contraintes et difficultés.

Action palliative envisageable : travailler en collaboration avec des acteurs des secteurs concernés

8. Sauts techniques

Les services numériques ont bénéficiés d'avancées technologiques et fonctionnelles importantes (passage de l'écran cathodique à l'écran plat, du téléphone portable au smartphone, du serveur au cloud, évolution des processeurs, Disque dur HDD vs SSD, etc.).

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES OBJETS CONNECTES ET DES SERVICES BASES SUR LEUR UTILISATION

Si ces évolutions ne posent pas de difficulté particulière sur la méthode ACV, elles modifient les données de collectes et d'ICV nécessaires. Au vu des secrets de fabrication qui entourent le développement de ces nouvelles technologies, la comptabilisation des impacts associés dans les ACV a un temps de latence par rapport à l'émergence de ces technologies. Il y a donc évaluation environnementale précise a posteriori, une fois que la technologie est diffusée et que les choix de conceptions, fonctionnels et marketing sont définis.

Action palliative envisageable : améliorer la transparence et la communication sur les impacts environnementaux des nouvelles technologies par les fabricants, au niveau AICV si nécessaire.

9. Formation des nouveaux ingénieurs à l'ACV et intégration des pratiques.

L'acculturation des ingénieurs, développeurs et concepteurs de services numériques à la réalisation d'ACV est un axe qui est amené à se développer. En effet, les écoles d'ingénieurs et les universités comprennent de plus en plus des cours sur l'ACV et les impacts environnementaux. Si ces cours sont actuellement peu développés dans les écoles d'informatique, ce point est amené à se développer au vu de la prise de conscience des entreprises et du grand public sur le sujet.

Cela permettra de disposer d'acteurs sensibilisés sur la question et de faciliter le dialogue entre le secteur des services numérique et celui de l'ACV.

Action envisageable : proposer des formations dans les écoles informatiques, mener des partenariats sur des projets de recherche.

- [1] Jens Malmmodin and Dag Lundén ; The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015 ; 2018
- [2] Lotfi Belkhir, Ahmed Elmeligi ; Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations ; 2017
- [3] Hanna Pihkola, Mikko Hongisto, Olli Apilo and Mika Lasanen ; Evaluating the Energy Consumption of Mobile Data Transfer—From Technology Development to Consumer Behaviour and Life Cycle Thinking ; 2018
- [4] Johanna Pohl, Lorenz M. Hilty, Matthias Finkbeiner ; How LCA contributes to the environmental assessment of higher order effects of ICT application: A review of different approaches ; 2019
- [5] Julie Orgelet, Etienne Lees-Perasso, Caroline Vateau et Frédéric Bordage ; Evaluation de l'impact environnemental des services numériques – Etat de l'art ; avniR ; 2019
- [6] Alliance GreenIT
- [7] Yannick Le Guern, Laura Farrant, Edith Martin, Bio Intelligence Service ; Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique - clé USB ; 2011
- [8] Yannick Le Guern, Laura Farrant, Edith Martin, Bio Intelligence Service ; Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique - e-commerce ; 2011
- [9] Yannick Le Guern, Laura Farrant, Edith Martin, Bio Intelligence Service ; Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique - requête web ; 2011
- [10] Yannick Le Guern, Laura Farrant, Edith Martin, Bio Intelligence Service ; Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique - Volet courrier électronique ; 2011
- [11] Nathaniel C Horner et al 2016 Environ. Res. Lett. 11 103001 ; Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology ; 2016
- [12] JRC – European Commission ; General guide for Life Cycle Assessment – Provisions and action steps ; 2010 ; EUR 24378 EN – 2010
- [13] ADEME – greenworking ; Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail ; 2020