

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du Master en Ingénieur de
Gestion, finalité spécialisée

La pollution numérique, la face cachée de la dématérialisation

Par Maxime Schurmans

Directeur: Professeur Nicolas van Zeebroeck
Assesseur: Professeure Martine George

Année académique 2019 - 2020



Remerciements

C'est non sans excitation que j'écris ces dernières lignes de ce travail personnel qui marque la fin d'une des plus belles aventures de ma vie : mes études universitaires. Le mémoire que vous vous apprêtez à lire est le résultat de plusieurs centaines d'heures de recherches, de rassemblement d'informations, de rédaction, de doutes, de corrections mais également d'apprentissage. En effet, étant un utilisateur aguerri des services numériques (mes parents et mes proches confirmeront ce qu'on pourrait appeler une utilisation à la limite de l'addiction...), je ne m'étais jamais questionné sur l'impact environnemental de mes soirées à visionner des vidéos sur Youtube ou autres séries sur Netflix. C'est donc un sujet dont je ne connaissais absolument rien que j'ai choisi pour clôturer un chapitre important de mon existence. Par conséquent, il me doit de remercier et d'adresser toute ma gratitude aux personnes m'ayant aidé dans la réalisation de ce travail.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon promoteur de mémoire M. VAN ZEEBROECK, professeur à la Solvay Brussels School Economics & Management, pour la liberté qu'il m'a accordée, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui m'ont sorti de phases d'hésitation que je n'aurais pu surmonter seul.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'Université Libre de Bruxelles et les intervenants professionnels responsables de ma formation à la faculté Solvay, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

Je tiens de plus à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur contribution, de loin ou de près, à la réalisation de ce mémoire :

Mes parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements, sans qui je n'aurais sans aucun doute jamais pu finir de telles études.

Ma famille et mes proches, sur qui j'ai toujours pu compter peu importe la situation.

Ma petite amie, Elisa D'ALIMONTE, rencontrée sur les bancs de l'université et sans qui je ne serais sûrement pas l'homme que je suis aujourd'hui.

Madame Françoise VERHEUGEN, qui m'a beaucoup appris sur les défis à relever dans le monde des études et dont les cours de mathématiques me laisseront des souvenirs impérissables.

Messieurs Hubert LEURQUIN et Thomas KOUNTOURGIANNOS, mes professeurs de Latin de secondaire, pour avoir éveillé ma curiosité à vie grâce à leurs cours passionnants.

Mon chien, Pipper, qui m'aura sauvé de la solitude et permis de prendre du recul pendant les pauses-ballades prise durant cette période particulière de Covid-19.

Executive summary

Depuis quelques années, la transition numérique s'est rapidement développée et affecte maintenant tous les secteurs de notre société. En effet, le numérique est devenu un facteur important de croissance et d'innovation pour les entreprises qui proposent toujours plus de services et de biens numériques. Les raisons de cette évolution croissante sont multiples : la constante disponibilité des services permettant des échanges d'informations instantanés et ce partout dans le monde. De plus, grâce aux progrès technologiques réalisés, les utilisateurs peuvent profiter de services de qualité comme le visionnage de vidéos en streaming. Néanmoins, les impacts environnementaux liés à cette digitalisation intensive ne sont que très peu étudiés et les seules informations que les utilisateurs ont à leur disposition sont communiquées quasi uniquement par les entreprises fournisseuses des services et appareils numériques, ce qui laisse planer certains doutes sur la fiabilité de celles-ci. De plus, l'aspect dématérialisé du numérique donne l'illusion que son utilisation est sans conséquences pour le monde physique. Pourtant les impacts sur notre planète sont bien réels mais encore trop peu connus des consommateurs.

Afin d'informer les utilisateurs sur ces impacts négatifs, ce mémoire étudie l'impact environnemental du système numérique mondial en procédant à des répartitions de ces impacts selon les usages, les acteurs majeurs du numérique ainsi que les phases du cycle de vie des appareils numériques. Enfin, un calculateur d'impacts environnementaux suivant la méthodologie d'analyse de cycle de vie a été développé pour évaluer les impacts relatifs aux appareils numériques utilisés pour effectuer des actions numériques de la vie de tous les jours.

Le système numérique mondial est constitué de trois acteurs principaux : les utilisateurs, les centres de données et les infrastructures de réseau. Après avoir étudié les usages faits par les utilisateurs des services numériques, nous observons que, selon la composition des flux de données échangés, c'est le visionnage de vidéos qui est l'usage le plus courant : 80% des flux de données générés en 2018 sont liés à la lecture de vidéos. Les 20% restants sont liés aux usages hors vidéo tels que l'envoi d'emails, les jeux vidéo en ligne et la consultation de sites web (The Shift Project, 2019).

Pris ensemble, ces trois acteurs génèrent des impacts sur l'environnement comparables à ceux générés par les pays les plus développés. En effet, si le système numérique mondial était un pays, il serait le troisième plus grand consommateur d'électricité derrière la Chine et les États-

Unis, consommant environ 10% de l'électricité mondiale (Laure Cailloce, 2018). De plus, lorsque nous répartissons les impacts globaux selon les trois acteurs, il apparaît que ce sont les utilisateurs qui génèrent la majorité des impacts environnementaux. En effet, lorsque chaque facteur environnemental est étudié séparément, c'est toujours la catégorie des utilisateurs qui concentre la majorité des impacts du numérique (Bordage F. et GreenIT.fr, 2019).

Néanmoins, bien que les effets négatifs sur l'environnement du numérique soient évidents, la transition numérique appliquée à certains secteurs comme l'agriculture, les réseaux électriques (*smart grids*) et les infrastructures d'une ville (*smart cities*) peuvent contribuer positivement à la lutte contre le changement climatique en permettant d'intégrer plus facilement des sources d'énergies renouvelables, de responsabiliser les consommateurs en leur fournissant des informations concernant leur consommation énergétique ou en permettant de prendre des décisions mieux adaptées basées sur des informations plus complètes et communiquées en temps réel. Cependant, il reste des barrières à franchir afin de profiter pleinement de la numérisation de certains secteurs, comme par exemple l'hétérogénéité des données provenant de sources différentes, l'acceptation de tels systèmes par les utilisateurs qui craignent que certaines informations personnelles soient divulguées à des fins néfastes ou encore le manque de collaboration entre les différentes organisations et entreprises qui considèrent leurs données comme des avantages compétitifs et par conséquent refusent de les partager avec des concurrents (Keeso, A., 2014) (Wogan, D., 2014).

Ensuite, afin de mieux comprendre les causes et les sources de ces impacts, nous étudions plus en détails les centres de données possédés par les GAFAM, qui représentent l'offre du marché du numérique. De plus, nous procédons à une répartition des impacts générés par ceux-ci selon leurs phases de fabrication et d'utilisation, en suivant la méthodologie d'analyse de cycle de vie qui sera utilisée pour réaliser le calculateur d'impacts. Grâce à cette analyse, nous arrivons à la conclusion que les centres de données génèrent la majorité des impacts de leur cycle de vie lors de leur phase d'utilisation, reflétant le fait que ces infrastructures sont constamment en activité afin d'assurer en permanence la continuité et la qualité des services numériques (Bordage F. et GreenIT.fr, 2019). En outre, les centres de données sont équipés de systèmes de secours leur permettant d'être quasiment toujours actifs en plus d'être équipés de systèmes de ventilation et de refroidissement des serveurs puissants afin d'éviter qu'ils ne tombent en panne (Abdur, 2019).

Par après, nous réalisons une répartition similaire des impacts du côté de la demande du marché du numérique, représentée par les utilisateurs. Grâce à l'analyse effectuée, nous arrivons à la

conclusion que c'est la phase de fabrication des appareils numériques qui concentre la majorité des impacts générés par cet acteur sur l'environnement (Bordage F. et GreenIT.fr, 2019). Malgré cela, il s'avère également que la phase d'utilisation, et par conséquent le comportement de l'utilisateur, est déterminante pour réduire les impacts globaux des appareils numériques. C'est ce que confirme l'étude de cas réalisée comparant un *e-reader Kindle* à un livre en papier : en effet, nous arrivons à la conclusion qu'utiliser un appareil numérique peut être bénéfique pour l'environnement par rapport à sa version traditionnelle si son propriétaire adopte un comportement d'utilisation particulier. Par exemple, il devient plus avantageux environnementalement parlant d'acheter un *e-reader Kindle* à partir du moment où son propriétaire lit plus de 36 *e-books* par an, ce qui correspond à 23 livres traditionnels en termes d'impacts (Goleman & ; Norris, 2010).

Enfin, afin d'apporter notre pierre à l'analyse des impacts environnementaux du numérique, nous proposons un calculateur d'impacts environnementaux suivant la méthodologie d'analyse de cycle de vie, qui consiste à répartir les impacts globaux d'un appareil numérique sur quatre étapes de sa vie : la phase de fabrication, la phase de distribution, la phase d'utilisation et la phase de fin de vie. L'objectif principal de ce calculateur est de conscientiser les utilisateurs des conséquences de leur utilisation de services dématérialisés et également de pallier le manque d'outils d'évaluation complets et faciles d'utilisation. En effet, après avoir étudié les outils d'évaluation existants, nous sommes arrivés à la conclusion que ces outils n'étaient soit pas destinés aux utilisateurs mais plutôt aux entreprises, soit qu'ils étaient trop peu élaborés ou encore trop difficiles à utiliser par un utilisateur moyen. En outre, la phase d'utilisation de notre calculateur est représentée par une série d'actions numériques du quotidien comme par exemple le visionnage de vidéos en ligne ou regarder son fil d'actualité sur un réseau social. Grâce à cet outil, nous espérons pouvoir responsabiliser les utilisateurs des services numériques et les encourager à modifier leur comportement lors de l'achat de nouveaux appareils ou lors de l'utilisation de services numériques.

Table des illustrations

Graphiques

GRAPHIQUE I : COMPOSITION DE L'USAGE DU SYSTEME NUMERIQUE MONDIAL SELON LES FLUX DE DONNEES EN 2018.....	18
GRAPHIQUE II : ÉVOLUTION DU NOMBRE D'EMAILS ENVOYES ET REÇUS PAR JOUR (EN MILLIARDS).	20
GRAPHIQUE III: ÉVOLUTION DU NOMBRE D'ABONNEMENTS A NETFLIX (EN MILLIONS).....	25
GRAPHIQUE IV: ÉVOLUTION DU NOMBRE D'UTILISATEURS FACEBOOK (EN MILLIONS).	26
GRAPHIQUE V : ÉVOLUTION DU NOMBRE DE VUES PAR JOUR SUR UNE SEMAINE EN 2020 SUR YOUTUBE (EN MILLIONS).....	27
GRAPHIQUE VI: ÉVOLUTION DU NOMBRE DE VISITES ANNUELLES SUR LE SITE PORNHUB.COM (EN MILLIARDS).....	28
GRAPHIQUE VII : COMPOSITION DES APPAREILS UTILISATEURS DU SYSTEME NUMERIQUE MONDIAL EN 2019.	88

Figures

FIGURE 1 : RELATION ENTRE LE PUE ET LE REGIME DE TRAVAIL (IT LOAD) DE L'EQUIPEMENT INFORMATIQUE.	68
FIGURE 2: ÉVOLUTION DU PUE SELON LA PERIODE DE L'ANNEE DE DEUX CENTRES DE DONNEES SITUES A SAN FRANCISCO ET CHICAGO.	69
FIGURE 3: RELATION ENTRE LA TEMPERATURE DE REFROIDISSEMENT, LA CHARGE ELECTRIQUE TOTALE ET LA CHARGE ELECTRIQUE DE L'EQUIPEMENT INFORMATIQUE.....	71
FIGURE 4: LES CINQ NIVEAUX DE MATURITE DES OUTILS D'ÉVALUATION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES SERVICES ET PRODUITS NUMERIQUES.	101
FIGURE 5: EXEMPLE DE MATRICE MET.....	102
FIGURE 6: EXEMPLE DE MATRICE ERPA POUR UN PRODUIT FICTIF.....	103
FIGURE 7: DIAGRAMME DE TYPE CIBLE DE LA MATRICE ERPA DE LA FIGURE 6.....	103
FIGURE 8: LISTE (NON EXHAUSTIVE) DES IMPACTS EVALUES DANS LA MATRICE MECO.	104
FIGURE 9: EXEMPLE DE MATRICE MECO.....	104
FIGURE 10: EXEMPLE DE LISTE DE CONTROLE POUR L'OPTIMISATION DE LA FIN DE VIE DU PRODUIT.....	105
FIGURE 11: ROUE DE STRATEGIE DE BREZET.	106
FIGURE 12: LISTE (NON EXHAUSTIVE) DES AXES DE LA ROUE DE STRATEGIE AINSI QUE DES AMELIORATIONS ENVIRONNEMENTALES.	107
FIGURE 13: EXEMPLE D'UNE GRILLE D'ÉVALUATION QUALITATIVE POUR UN PRODUIT FICTIF.	109
FIGURE 14: CALCUL DU SLI POUR LES DIFFERENTES VERSIONS DU SYSTEME D'EXPLOITATION WINDOWS.	116
FIGURE 15: RESULTATS OBTENUS LORS DU VISIONNAGE DE 10 MINUTES DE VIDEO YOUTUBE DE QUALITE 1080P	119

Tableaux

TABLEAU 1 : REPARTITION DES IMPACTS GLOBAUX SUR L'ENVIRONNEMENT DU SYSTEME NUMERIQUE MONDIAL SELON LES TROIS ACTEURS DU NUMERIQUE ET LE CRITERE DE POLLUTION ETUDIE.	33
TABLEAU 2 : NIVEAUX DE CENTRES DE DONNEES SELON L' <i>UPTIME INSTITUT</i>	60
TABLEAU 3 : REPARTITION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES CENTRES DONNEES EN 2019.	63
TABLEAU 4 : PUE MOYEN DES CENTRES DE DONNEES DES GAFAM EN 2018 ET 2019.	65
TABLEAU 5 : CUE MOYEN DES CENTRES DE DONNEES DES GAFAM EN 2018 ET 2019.	72
TABLEAU 6 : WUE MOYEN DES CENTRES DE DONNEES DES GAFAM EN 2018 ET 2019.	74
TABLEAU 7 : <i>GEC</i> MOYEN DES CENTRES DE DONNEES DES GAFAM EN 2018 ET 2019.	74
TABLEAU 8 : REPARTITION DES UTILISATEURS DU SYSTEME NUMERIQUE MONDIAL DANS LE MONDE PAR REGION EN JANVIER 2020.	85
TABLEAU 9 : REPARTITION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES APPAREILS NUMERIQUES UTILISATEURS.	90
TABLEAU 10 : TABLEAU RECAPITULATIF DE L'ANALYSE DES OUTILS D'EVALUATION D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX.	122
TABLEAU 11 : MATERIAUX COMPOSANT UN ORDINATEUR PORTABLE.	127
TABLEAU 12 : MATERIAUX COMPOSANT UN SMARTPHONE.	128
TABLEAU 13 : RESULTAT DE LA PHASE DE DISTRIBUTION D'UN ORDINATEUR PORTABLE.	133
TABLEAU 14 : RESULTAT DE LA PHASE DE DISTRIBUTION D'UN SMARTPHONE.	134
TABLEAU 15 : RESULTAT DE LA PHASE DE DISTRIBUTION D'UNE TELEVISION CONNECTEE.	134
TABLEAU 16 : RESULTAT DE LA PHASE DE DISTRIBUTION D'UN APPAREIL DE RESEAU.	135
TABLEAU 17 : RESULTAT DE LA PHASE D'UTILISATION D'UN ORDINATEUR PORTABLE.	136
TABLEAU 18 : RESULTAT DE LA PHASE D'UTILISATION D'UN SMARTPHONE.	137
TABLEAU 19 : RESULTAT DE LA PHASE D'UTILISATION D'UNE TELEVISION CONNECTEE.	139
TABLEAU 20 : RESUME DES HYPOTHESES ET RESULTATS POUR LA PHASE D'UTILISATION D'UN CENTRE DE DONNEES.	141
TABLEAU 21 : RESULTATS DE LA PHASE D'UTILISATION D'UN APPAREIL DE RESEAU.	142
TABLEAU 22 : RESULTATS DE LA PHASE DE FIN DE VIE D'UN ORDINATEUR PORTABLE.	144
TABLEAU 23 : RESULTATS DE LA PHASE DE FIN DE VIE D'UN SMARTPHONE.	145
TABLEAU 24 : RESULTATS DE LA PHASE DE FIN DE VIE D'UNE TELEVISION CONNECTEE.	146
TABLEAU 25 : RESULTATS POUR L'ACTION « ECOULER UN MORCEAU DE MUSIQUE ».	147
TABLEAU 26 : RESULTATS POUR L'ACTION « REGARDER UNE VIDEO EN LIGNE ».	148
TABLEAU 27 : RESULTATS POUR L'ACTION « PASSER UN APPEL VOCAL ».	149
TABLEAU 28 : RESULTATS POUR L'ACTION « REGARDER SON FIL D'ACTUALITE SUR UN RESEAU SOCIAL ».	149
TABLEAU 29 : RESULTATS POUR L'ACTION « PASSER UN APPEL VIDEO ».	151

TABLEAU 30 : RESULTATS POUR LE CAS 1.....	153
TABLEAU 31 : RESULTATS POUR LE CAS 2.....	154
TABLEAU 32 : RESULTATS DU CAS 3.....	155
TABLEAU 33 : RESULTATS POUR LE CAS 4.....	156

Table des abréviations

ACV	Analyse de cycle de vie
CVC	Chauffage, Climatisation et Ventilation
GES	Gaz à Effet de Serre
TIC	Technologies de l'Information et des Communications

Table des matières

Introduction	13
Partie 1 : L'impact numérique	15
Introduction	15
Chapitre 1 : Le numérique : acteurs, usages et évolution	15
1.1 Les trois acteurs du numérique	16
1.2 L'usage du numérique dominé par le visionnage de vidéos	17
1.3 Croissance et évolution des usages du numérique	19
Chapitre 2 : Les méfaits du numérique	29
2.1 La pollution numérique	31
Chapitre 3 : Les bienfaits du numérique	35
3.1 La transition numérique au service de l'environnement	35
3.2 Barrières à la transition numérique	49
Conclusion	52
Partie 2 : Analyse du cycle de vie de l'offre et la demande du système numérique mondial	53
Introduction	53
Chapitre 4 : Du côté de l'offre	53
4.1 Présentation des GAFAM	54
4.2 Présentation d'un centre de données	57
4.3 La pollution d'un centre de données	61
4.4 L'efficacité énergétique d'un centre de données	64
4.5 Les avantages du <i>PUE</i>	66
4.6 Les limites du <i>PUE</i>	67
4.7 Quelques indicateurs de performance énergétique complémentaires au <i>PUE</i>	71
4.8 Les actions prises par les GAFAM pour réduire les impacts de leurs centres de données	75
4.9 Étude de cas : enquête réalisée par Arte (2020) : « Data centers : une pollution méconnue »	81
Chapitre 5 : Du côté de la demande	84
5.1 Présentation des utilisateurs et des tendances mondiales	84
5.2 Présentation des appareils numériques	86
5.3 L'impact des phases de fabrication et d'utilisation des appareils numériques	88
5.4 Description des impacts liés à chaque étape du cycle de vie des appareils numériques	91
5.5 Étude de cas : livre traditionnel vs <i>e-reader Kindle</i>	94
Conclusion	98
Partie 3 : Présentation du calculateur d'impacts	100
Chapitre 6 : Revue des outils d'évaluation existants	100
Conclusion	121
Chapitre 7 : Méthodologie du calculateur d'impacts environnementaux	123

7.1 Définitions	123
7.2 Description de la méthodologie appliquée et des hypothèses	126
7.3 Actions numériques : présentation et mesures	146
7.4 Présentation du calculateur d'impacts et de résultats expérimentaux.....	151
7.5 Prochaines étapes	157
Conclusion générale.....	158
Annexe I : Ordres de grandeur des données	160
Annexe II : Ordres de grandeur des masses	160
Annexe III : Facteurs environnementaux étudiés	160
Annexe IV : Types d'émissions de GES	161
Bibliographie	162

Introduction

Le réchauffement climatique est un des plus grands défis du XXI^{ème} siècle auquel doit faire face notre société, qui s'est développée et a évolué au cours du temps en se basant sur l'utilisation intense d'énergies fossiles, responsables en majeure partie des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les dégâts infligés à la planète sont déjà visibles : fonte des glaces, augmentation des températures, catastrophes naturelles, ... Tous ces signes indiquent qu'il est temps de repenser notre système de production d'énergie en réalisant la transition vers une société basée sur l'emploi d'énergies renouvelables et à faible taux d'émissions de CO₂.

De plus, le XXI^{ème} a vu l'avènement du numérique et des technologies de l'information et des communications, qui sont devenus de véritables piliers du développement de l'économie mondiale et de notre société moderne, si bien que les experts parlent de troisième révolution industrielle. En effet, toutes nos interactions, qu'elles concernent le monde des affaires, notre divertissement ou nos relations personnelles, sont caractérisées par un échange d'informations, qui s'expriment par un transfert de données. En outre, le marché du numérique s'étend toujours de plus en plus : dans les pays développés, il stimule la croissance, la création d'emplois et de services, permettant aux entreprises d'innover et de poursuivre leur développement. La situation est identique pour les pays en voie de développement dans lesquels les investissements dans le numérique sont devenus aussi essentiels que les investissements dans les infrastructures électriques ou de transport. Pourtant, le système numérique mondial est aussi un important consommateur d'énergie et, bien que l'industrie du numérique se base sur la dématérialisation des biens et services, son empreinte environnementale est bien réelle.

Toutefois, la pollution générée par le numérique, véritable face cachée de ce système, est comparable à celle générée par les plus grandes nations mondiales. Cette information surprenante nous amène à nous interroger sur l'utilité réelle d'une transition numérique intégrale. Certes, certains secteurs économiques pourraient grandement bénéficier de cette transition, à un tel point qu'ils pourraient même réduire leur impact environnemental global. Mais la question se pose pour l'utilisation de services numériques destinés à nous divertir : regarder une vidéo en ligne de qualité élevée sur son smartphone connecté au réseau mobile ne pose, a priori, aucun problème par rapport à l'environnement. Pourtant, lorsque nous nous intéressons à tous les acteurs du numérique mettant à disposition ce simple service, nous nous rendons compte que l'impact issu de la production de l'appareil numérique à l'utilisation du serveur situé dans un centre de données est loin d'être négligeable.

C'est pour mettre en lumière ce côté si peu connu du grand public que ce mémoire a été réalisé et pour aussi conscientiser les utilisateurs sur le fait que la dématérialisation des biens et des services permise par le numérique entraîne des dégâts sur notre planète qui sont bien réels. Dans ce but, nous commencerons par décrire le système numérique mondial en présentant les acteurs principaux qui le composent et en analysant l'évolution de son utilisation dans le monde. Ensuite, nous étudierons l'empreinte environnementale du numérique selon différents facteurs de pollution comme les émissions de gaz à effet de serre ou la consommation d'eau. Par après, nous présenterons plusieurs initiatives et projets de transition numérique qui peuvent aider à réduire les impacts environnementaux de certains secteurs, et les barrières que ces projets rencontrent au cours de leur développement et de leur mise en fonction.

Afin d'identifier les sources de pollution du système numérique mondial, nous étudierons en détails le segment de l'offre du marché du numérique, représentée par les GAFAM et leurs centres de données, ainsi que la demande, représentée par les utilisateurs et leurs appareils numériques. Pour ce faire, nous appliquerons une méthodologie d'analyse de cycle de vie permettant d'identifier quelles phases d'un appareil ou centre de données concentrent la majorité des impacts sur l'environnement.

Enfin, l'objectif ultime de ce travail est la réalisation d'un calculateur d'impacts environnementaux, suivant la méthodologie appliquée précédemment, dont le but est de conscientiser ses utilisateurs des effets négatifs de l'utilisation intense de services numériques devenus des gestes du quotidien comme envoyer un email ou passer un appel vidéo.

Partie 1 : L'impact numérique

Introduction

Dans le domaine de l'informatique et des télécommunications, le terme numérique est défini comme « *la représentation d'informations ou de grandeurs physiques au moyen de caractères, tels que des chiffres, ou au moyen de signaux à valeurs discrètes* » ou encore comme « *les systèmes, dispositifs ou procédés employant ce mode de représentation discrète, par opposition à analogique* » (Larousse, s.d.). La numérisation d'un document désigne la représentation d'un document physique par un document numérique, conservé dans le *Cloud* ou sur un appareil informatique. De plus, le terme numérique est un synonyme du terme digital qui caractérise une utilisation de données numériques et regroupe les appareils électroniques qui génèrent, stockent, échangent et traitent les données binaires (0 ou 1).

Nous commençons cette partie par une présentation des différents acteurs du numérique avant de nous intéresser aux différents usages qui en sont faits dans le monde pour ensuite analyser leurs évolutions. Ensuite, nous analysons les impacts environnementaux relatifs au système numérique mondial et les répartissons selon chacun de ses acteurs. Le chapitre 3 se concentre sur les bienfaits de la digitalisation et donc ce que le numérique peut apporter dans la lutte contre le réchauffement climatique. Enfin, en guise de conclusion, nous aborderons les barrières rencontrées lors d'une transition numérique.

Chapitre 1 : Le numérique : acteurs, usages et évolution.

Ce chapitre a pour objectif de décrire l'environnement numérique mondial en présentant ses trois catégories d'acteurs : les utilisateurs, les centres de données et les infrastructures de réseau. Ensuite, nous analyserons l'usage qu'il est fait du numérique en fonction de la composition des flux de données mondiaux, qui sont majoritairement générés par la lecture de contenu vidéo en ligne. Enfin, nous concluons ce chapitre par une analyse de l'évolution croissante de l'utilisation des services numériques dans le monde.

1.1 Les trois acteurs du numérique.

Le système numérique mondial est constitué de trois acteurs différents, tous les trois interagissant entre eux : les utilisateurs, les infrastructures réseau et les centres de données¹.

1. Les utilisateurs : cette catégorie inclut les personnes utilisant des services et possédant des équipements numériques. En 2019, le nombre d'utilisateurs dans le monde s'élevait à environ 4,1 milliards (Bordage & GreenIT.fr, 2019) et a atteint un total de 4,54 milliards d'utilisateurs en janvier 2020 selon Kemp (2020). En ce qui concerne les appareils numériques², leur nombre s'élevait en 2019 à environ 34 milliards (Bordage & GreenIT.fr, 2019). Les appareils les plus courants sont les équipements classiques comme les smartphones, les ordinateurs portables et fixes, les tablettes et autres équipements tels que les consoles de jeux vidéo et les objets connectés (enceintes Bluetooth, télévisions, montres, thermostats, systèmes d'éclairage, etc.). Pratiquement inexistant il y a 10 ans, leur nombre s'élevait à environ 20 milliards en 2019 (Bordage & GreenIT.fr, 2019) ;
2. Les infrastructures de réseau : les réseaux forment le lien entre les appareils des utilisateurs et les centres de données. Ils sont composés des appareils suivants : les antennes de relais (2G à 5G) et les autres équipements tels que les routeurs Internet. Selon le rapport établi par GreenIT.fr, il y avait en 2019 environ 10 millions d'antennes relais et environ 1,3 milliards d'autres équipements dans le monde (Bordage & GreenIT.fr, 2019) ;
3. Les centres de données : ce sont les infrastructures qui collectent, stockent, traitent et échangent les données. Ils hébergent tout l'équipement informatique et de réseau nécessaires pour leurs activités. En 2019, les centres de données qui se comptent par milliers dans le monde et dont font partie 504 centres de données à hyper échelle (Sverdlik, 2019), hébergent au total environ 67 millions de serveurs et presque autant d'appareils informatiques (Bordage & GreenIT.fr, 2019).

¹ Traduit de l'anglais *data center*.

² Hors accessoires comme les chargeurs d'ordinateurs, claviers, souris, clés USB, etc.

1.2 L'usage du numérique dominé par le visionnage de vidéos.

Maintenant que nous avons identifié les trois grands acteurs du système numérique mondial, nous allons nous pencher sur les principaux usages de celui-ci, selon la composition des flux de données générés.

Chaque quantité de données échangée ou stockée implique l'utilisation d'équipements et d'infrastructures consommant de grandes quantités d'énergie et ce trafic augmente de plus de 25% par an (Cisco, 2018 cité par The Shift Project, 2019). C'est d'ailleurs le visionnage de vidéos qui est le responsable principal de notre utilisation intense de services numériques (The Shift Project, 2019).

Lorsque nous nous intéressons à la composition de ces flux de données et l'usage qu'il en est fait en 2018, nous remarquons, d'après le rapport de The Shift Project (2019), que le visionnage de vidéos représente 80% des flux de données mondiaux. Parmi ces 80%, la vidéo en ligne représente 60% des flux de données vidéo mondiaux et environ 1,05 zetta-octets (Zo) de données. Les 20% restants sont attribués aux usages hors vidéo tels que les sites web, les emails, les jeux vidéo, la messagerie instantanée, le stockage en ligne de documents et de photos, les réseaux d'entreprise, etc. (The Shift Project, 2019).

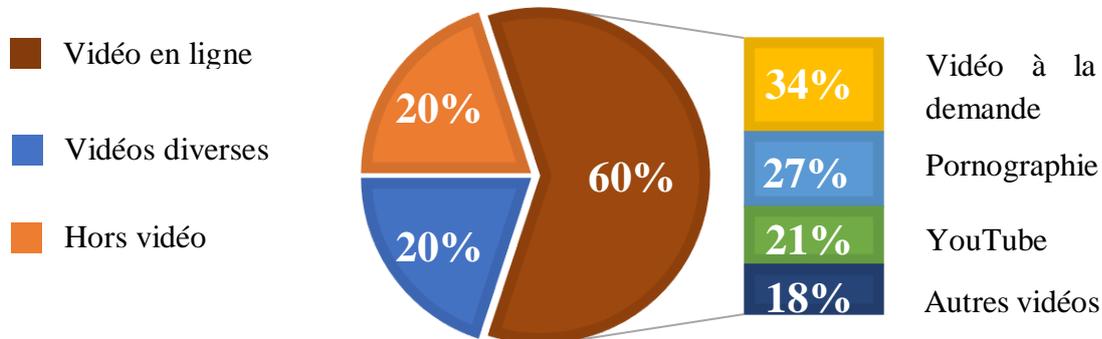
À elle seule, la lecture de vidéos en ligne a émis environ 306 millions de tonnes de carbone en 2018, ce qui représente près d'1% des émissions de gaz à effet de serre (GES) mondiales (The Shift Project, 2019). Cette catégorie regroupe différents types d'utilisations :

- Les plateformes de vidéos à la demande, films et séries : cette sous-catégorie regroupe les vidéos hébergées sur les plateformes streaming telles que Netflix et Amazon Prime. Représentant 34% de la consommation de vidéos en ligne, les services de vidéos à la demande sont responsables de 7% des émissions totales GES du système numérique mondial et émettent des émissions de GES s'élevant à plus de 100 mégatonneCO₂eq (MtCO₂eq) par an (The Shift Project, 2019). En comparaison, c'est la même quantité de CO₂ qu'a émise la Belgique en 2018 (Gilfillan et al. (2019), UNFCCC (2019) et BP (2019), cités par Global Carbon Project (s.d.) ;
- Les plateformes de vidéos à contenu pornographique (hors streaming en direct) représentent 27% de l'usage de vidéos en ligne et 5% des émissions totales de GES du système numérique mondial (plus de 80 MtCO₂eq par an) (The Shift Project, 2019) ;

- Les plateformes d'hébergement de vidéos à contenu divers telles que YouTube ou Dailymotion représentent 21% de l'usage de vidéos en ligne et 4% des émissions totales de GES du système numérique mondial (The Shift Project, 2019) ;
- Enfin, la catégorie « autres vidéos » est constituée des vidéos hébergées sur les réseaux sociaux (Facebook, Instagram, etc.) ou directement sur des sites web. Cette dernière sous-catégorie représente 18% de l'usage de vidéos en ligne et 4% des émissions totales de GES du système numérique (The Shift Project, 2019).

Les 20% de flux de données relatifs au visionnage « Vidéos diverses » représentent les flux générés par la lecture d'autres formes de vidéos telles que le streaming télévision, les vidéo conférences (Skype par exemple), la télémédecine ou encore la vidéosurveillance. Afin de faciliter la compréhension du lecteur, le graphique I résume la composition des flux de données engendrés par l'utilisation mondiale des services numériques (The Shift Project, 2019).

Graphique I : Composition de l'usage du système numérique mondial selon les flux de données en 2018.



Source : Illustration personnelle sur base des données de Sandvine (2018), Cisco (2018) et SimilarWeb (2019), cités dans *The Shift Project* (2019).

En conclusion de cette section, le contenu vidéo fait partie de notre quotidien : les centres de données les hébergent sur leurs serveurs d'où elles sont ensuite acheminées via les infrastructures réseau jusqu'à nos appareils utilisateurs. C'est de plus un domaine où il existe une course à l'innovation motivée par la volonté de visionner les contenus vidéo avec la meilleure résolution possible. L'arrivée de la 8K en est une parfaite illustration bien que l'intérêt d'une telle technologie reste questionnable : avons-nous réellement le besoin d'une technologie 8K nécessitant plus de bande passante (car le volume de pixels transmis par la « 8K » est multiplié par 4 par rapport à la 4K actuelle) et une connexion plus puissante et rapide comme la 5G pour en fin de compte juste le plaisir et le confort de nos yeux alors qu'une vidéo de format 1080p possède une résolution plus que satisfaisante ? C'est le type de réflexions qui seront abordées dans la section relative à la présentation des résultats expérimentaux du calculateur d'impacts développé.

1.3 Croissance et évolution des usages du numérique

Afin d'illustrer la croissance de l'utilisation des services numériques dans notre société, nous allons observer l'évolution de certains usages décrits précédemment.

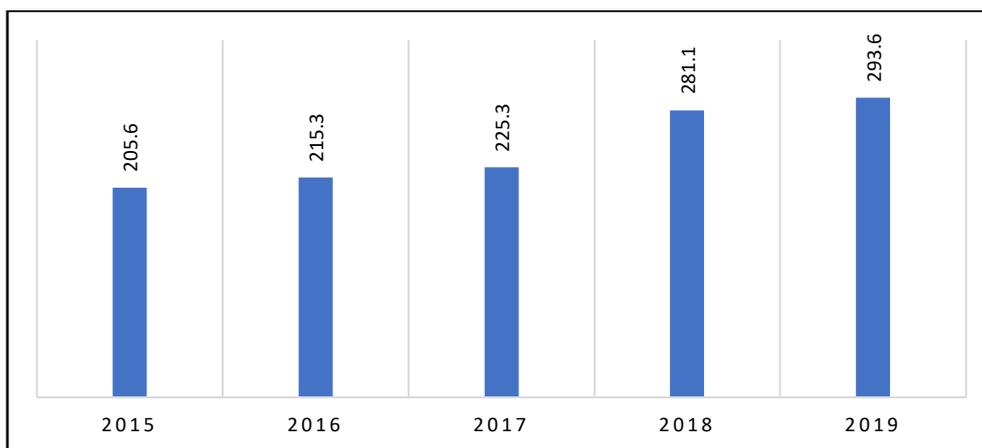
I. L'usage « Hors vidéo »

Comme expliqué précédemment dans cette section, l'usage « Hors vidéo » du système numérique mondial représente 20% des flux de données dans le monde et est principalement constitué de l'envoi et la réception de mails, la consultation et l'hébergement de sites web, le stockage en ligne de photos ou autres documents, l'utilisation de jeux vidéo en ligne, la messagerie instantanée et les réseaux d'entreprises internes. Nous allons analyser dans cette sous-partie les tendances concernant l'évolution des usages relatifs à cette catégorie.

A. *Évolution du nombre d'emails envoyés et reçus par jour dans le monde*

L'évolution du nombre d'emails est une belle illustration de la croissance de l'usage numérique dans notre vie de tous les jours : entre 2015 et 2018, le nombre d'emails envoyés et reçus par jour a augmenté de 36,72 % selon les rapports de The Radicati Group (2015) (2018). Une croissance qui s'explique probablement par le fait que l'envoi d'un email est un geste simple, rapide et peu coûteux.

Graphique II : Évolution du nombre d'emails envoyés et reçus par jour (en milliards).



Source : Illustration personnelle sur base des données de The Radicati Group Inc. (2015 & 2018).

Il y aurait donc eu au total en 2019, comme le montre le graphique II, environ 293 milliards d'emails envoyés et reçus par jour en moyenne dans le monde selon les prévisions du rapport de 2018 : cela représenterait une augmentation de 4,45% par rapport à 2018. Les rapports établis par The Radicati Group Inc. renseignent aussi sur la proportion d'emails envoyés par les entreprises : environ la moitié (52,25%) des emails envoyés par jour en 2018 se rapportait à un contexte d'entreprise (emails envoyés entre collègues et sociétés notamment). La portion restante (47,75%) a été envoyée par des utilisateurs dans le cadre de leur vie quotidienne (The Radicati Group Inc., 2018).

B. Évolution du stockage en ligne de photos et autres documents

Véritable phénomène de mode de notre société, le stockage en ligne (traduit de l'anglais *cloud storage*) permet d'accéder à ses documents personnels depuis tous les appareils connectés à Internet. Cette pratique, comme l'envoi d'emails, démontre à nouveau le caractère dématérialisé typique associé au numérique. Malgré l'augmentation évidente de l'utilisation de ces services au cours des années, il n'y a que très peu d'informations mises à disposition par les entreprises sur leurs plateformes de stockage en ligne (Dropbox et Google Drive pour ne citer que les plus répandues) permettant de quantifier cette évolution. Néanmoins, d'après les rapports annuels des résultats fiscaux de Dropbox, le nombre d'utilisateurs payants utilisant le service est passé de 11 millions en 2017 (Dropbox Inc., 2019) à 14,3 millions en 2019 (Dropbox Inc., 2020).

À noter que le nombre d'utilisateurs payants ne reflète en rien le nombre d'utilisateurs total étant donné qu'une version gratuite du service existe, limitée en termes de capacité de stockage. Néanmoins, Dropbox estime que plus de 600 millions d'utilisateurs ont créé un compte pour profiter du service en ligne de stockage (Dropbox Inc., s.d.).

Concernant les autres services de stockage en ligne, très peu d'informations relatives à leur utilisation sont disponibles. Google a cependant annoncé en juillet 2018 durant sa conférence annuelle Google Cloud Next présentant toutes les avancées et progrès réalisés concernant leurs plateformes cloud que le nombre d'utilisateurs quotidiens de Google Drive s'élevait à plus de 800 millions (G Suite, 2018).

C. Évolution de l'utilisation des jeux vidéo en ligne

L'industrie du jeu vidéo est un secteur en continuelle croissance qui comptait environ 2,5 milliards de joueurs dans le monde en 2019 ce qui représente une croissance de 36% par rapport à 2014 (Statista, 2019). Bien que la majorité des joueurs ne jouent pas en ligne, les jeux vidéo ont un impact important sur le trafic de données dans le monde : d'après l'étude réalisée par Cisco, le jeu vidéo en ligne représentait 1% du trafic global de données en 2017, ce qui correspond à environ 1 Exabyte (EB) par mois et devrait atteindre 4% d'ici 2022 (Cisco, 2018). Cette croissance s'explique par la montée en popularité des jeux vidéo en ligne nécessitant une connexion Internet pour jouer avec ou contre ses amis et d'autres joueurs dans le monde couplée à la possibilité d'acheter ses jeux en version digitale et de les télécharger directement sur sa console ou son ordinateur sans quitter son domicile. Cisco indique que 74% des jeux vidéo vendus dans le monde en 2017 l'ont été en version digitale (Cisco, 2018), ce qui pèse énormément sur le trafic de données mondiale étant donné que les fichiers à télécharger continuent à être toujours plus volumineux. Par exemple, le célèbre jeu « Call of Duty : Modern Warfare » d'Activision joué par environ 50 millions de joueurs (Statista, 2020a) nécessite 175 GigaBytes (GB) d'espace libre pour être téléchargé.

D. *Évolution des réseaux d'entreprises*

Les *Enterprise IT* (ou réseaux d'entreprises) sont des systèmes intégrés dans les entreprises et aident à centraliser les informations de la société pour que les employés y aient accès plus facilement. De plus, ils aident à augmenter les performances des entreprises grâce aux données qui sont récoltées dans chaque secteur et ensuite analysée afin de perfectionner les activités. Ce type de réseau combine la technologie (les supports physiques et virtuels), les données, les processus ou flux d'activités de l'entreprise et les utilisateurs (généralement les employés). Ce n'est donc pas simplement un système d'emails interne mais une dématérialisation de l'entreprise en elle-même.

D'après l'étude réalisée en 2019 par TechRepublic et citée par le magazine américain Forbes, 70% des entreprises dans le monde ont commencé à implémenter ou ont implémenté leur transformation digitale³ (TechRepublic, 2019 cité par Forbes & Morgan, 2019). Selon le rapport réalisé par PTC en 2018, les bénéfices qu'offre une transformation digitale bien menée se composent d'une amélioration des opérations, d'une entrée sur le marché plus rapide et d'une meilleure capacité à satisfaire les besoins des clients (PTC, 2018 cité par Forbes & Morgan, 2019).

D'un point de vue environnemental, la transformation digitale d'une entreprise, comme nous le verrons plus loin dans la section consacrée à la transition au bénéfice de l'environnement, permet d'avoir une vision globale de ses impacts écologiques mais aussi et surtout de sa chaîne d'approvisionnement, ce qui lui permet d'évaluer et encourager ses fournisseurs à réduire leur empreinte sur l'environnement.

II. L'usage « Vidéos diverses »

Comme mentionné précédemment, 20% des flux de données engendrés par le visionnage de vidéos est causé par l'utilisation de la catégorie appelée « Vidéos diverses ».

³ La transformation digitale ou e-transformation consiste à intégrer des technologies digitales dans chaque secteur et domaine de l'entreprise et provoque des changements structurels et profonds dans la manière dont les opérations de l'entreprise sont réalisées et la façon dont elles apportent de la valeur à leurs clients. (Définition personnelle)

Celle-ci inclut principalement l'utilisation des services de vidéo conférence tels que Skype, Microsoft Teams ou encore Zoom Video Communication ainsi que la télémédecine.

A. Évolution de l'utilisation des programmes de vidéo conférence

L'utilisation des services de vidéo conférences s'est renforcée au cours des dernières années de manière exponentielle principalement dans le monde du travail : en effet, les entreprises internationales commencent à privilégier ce type de réunion aux voyages d'affaires pour leurs employés, soucieuses de réduire leurs coûts et invoquant aussi une conscientisation des impacts environnementaux négatifs provoqués par ces nombreux voyages. Dans le domaine de l'éducation, les programmes vidéo permettent de suivre les cours à distance et donc de faciliter la vie des étudiants et des professeurs. Durant la période de crise du Covid-19, l'utilisation de ces programmes (Zoom et Microsoft Teams principalement) a explosé : la population étant confinée à domicile, ces outils ont permis de travailler ou suivre les cours dans des conditions presque normales. Ainsi, les nouvelles méthodes de travail et d'éducation sont donc les facteurs majeurs de la croissance de l'utilisation de ces programmes.

Le nombre d'utilisateurs inscrits sur Skype était estimé à 1,55 milliards en 2019, ce qui représente une croissance d'environ 53% par rapport à 2014 (Statista, 2018b). Concernant Microsoft Teams, son CEO Satya Nadella a annoncé en avril que la plateforme comptait 75 millions d'utilisateurs quotidiens alors que leur nombre s'élevait à 44 millions un mois auparavant, ce qui indique que la crise du Coronavirus aura eu un effet bénéfique pour l'entreprise avec une augmentation d'environ 30 millions d'utilisateurs quotidiens en a peine un mois (Zaveri, 2020).

La plateforme Zoom est aussi une des grandes gagnantes du confinement général imposé dans les pays touchés par le Covid-19 : elle ne comptait qu'approximativement 10 millions d'utilisateurs quotidiens (gratuits et payants) en décembre 2019 alors que ce nombre s'élevait à 200 millions en mars 2020 (Yuan, 2020). De plus, le programme, originellement conçu pour les entreprises, l'enseignement et la télémédecine, s'est amélioré à partir du moment où il a servi d'outil social, de travail et d'étude pour la majorité de la population, permettant d'identifier des faiblesses jusque-là insoupçonnées.

Certes, la crise du Covid-19 a largement contribué à la croissance exponentielle de l'utilisation de ces services de vidéo conférence et rien ne permet de garantir que nous observerons une telle croissance lorsque la situation reviendra à la normale. Mais il serait irrationnel de négliger la possibilité que certaines entreprises ou institutions continuent à employer ce genre d'outils numériques en raison de leurs côtés pratiques et peu coûteux.

B. Évolution de la télémédecine

La pratique de la télémédecine implique l'utilisation des technologies de l'information et des communications (TIC) pour augmenter l'accès aux soins et aux informations médicales pour les patients. Un des objectifs principaux de la télémédecine est d'enlever la barrière géographique afin de connecter le personnel soignant mais aussi les pharmaciens aux personnes vivant dans des zones géographiques isolées et éloignées (World Health Organization, 2010).

De nos jours, la télémédecine est utilisée principalement dans les zones en voie de développement et fortement isolées telles que l'Afrique et l'Asie. En termes d'évolution, seulement 28 pays dans le monde avaient implémenté une stratégie de développement de la télémédecine en 2009 contre 69 pays en 2018, le service le plus utilisé étant le service cardiologique (World Health Organization, 2010) (World Health Organization, 2018).

De par sa dépendance vis-à-vis des avancées technologiques dans les domaines de la communication et de l'information, la télémédecine est susceptible de se répandre encore plus et de couvrir de nouvelles zones géographiques afin de prodiguer des services de santé à un nombre de personnes le plus élevé possible. Malheureusement, à cause du manque de données disponibles concernant l'utilisation de la télémédecine, il est très difficile de donner plus de précisions sur son usage global.

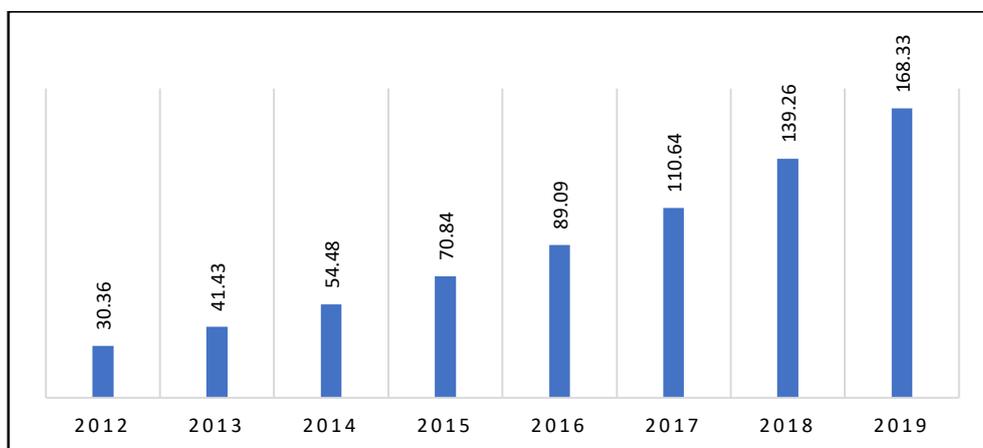
III. L'usage « Vidéo en ligne »

Enfin, l'usage « Vidéo en ligne », qui représente 60% des flux de données relatifs à la lecture de vidéos, est principalement composé du visionnage en streaming, des vidéos publiées sur les réseaux sociaux, de la pornographie en ligne et des plateformes d'hébergement de contenu vidéo comme Youtube.

A. Évolution de l'utilisation des plateformes de streaming

Le visionnage en streaming est une pratique de plus en plus répandue dans notre société et de nombreuses plateformes ont vu le jour ces dernières années (Netflix, Amazon Prime Video, Disney +, ...) confirmant le succès de ce type de consommation. Cette technique de diffusion en ligne et en continu de données vidéo permet la transmission en direct ou en léger différé. Remplaçant progressivement les magasins de location de DVDs, le streaming est une parfaite représentation du phénomène de dématérialisation qui est associé au numérique.

Graphique III: Évolution du nombre d'abonnements à Netflix (en millions).



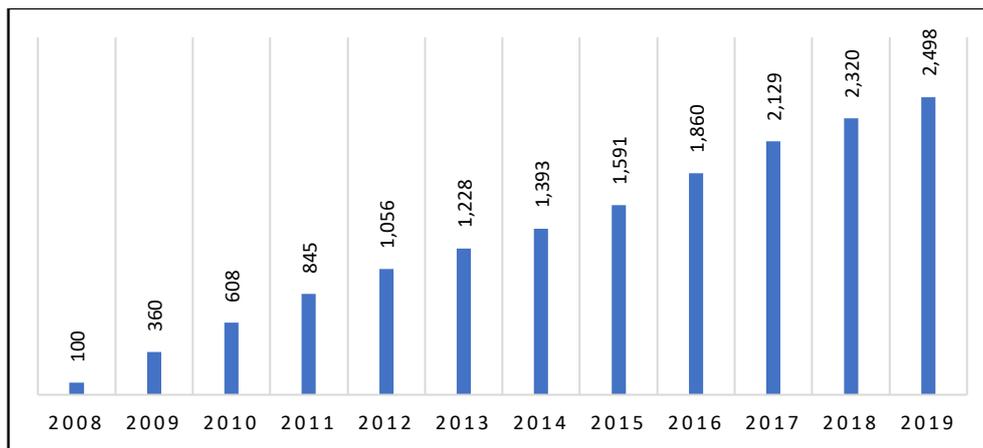
Source : illustration personnelle sur base des données du Financial Statements Netflix (2019).

La plateforme de vidéo à la demande Netflix est sûrement la plus célèbre et la plus utilisée dans le monde et a vu le nombre de ses abonnements plus que tripler entre 2012 et 2017, comme indiqué sur le graphique III, pour atteindre 168 millions d'abonnements en décembre 2019 (Netflix, 2019). Pour rappel, un abonnement à Netflix peut être utilisé par plusieurs personnes. Par conséquent, le nombre d'abonnements ne représente pas le nombre d'utilisateurs de la plateforme. D'après le site eMarketer spécialisé dans les tendances liées aux médias et services numériques, chaque jour environ 165 millions d'heures de contenu sont visionnées par les utilisateurs de Netflix dans le monde en 2019. Cette consommation est équivalente à 13.000 années d'utilisation et consommerait presque 500 millions de GB, c'est-à-dire environ 15% de la bande passante mondiale (eMarketer, 2019). De plus, il a été démontré que le visionnage d'un film en haute définition pendant 10 heures sur Netflix représente un volume de données plus important que l'entièreté des articles de l'encyclopédie en ligne Wikipédia en version anglaise réunis (The Shift Project, 2019).

B. Évolution de l'utilisation des réseaux sociaux

Les réseaux sociaux font partie intégrante de notre quotidien et se sont imposés comme outils sociaux mais aussi marketing et professionnels dans notre société. Facebook, le plus répandu mondialement, comptait environ 2,5 milliards d'utilisateurs en 2019, comme indiqué sur le graphique IV (Statista, 2020b).

Graphique IV: Évolution du nombre d'utilisateurs Facebook (en millions).



Source : Illustration personnelle sur base des données du rapport Statista (2020b).

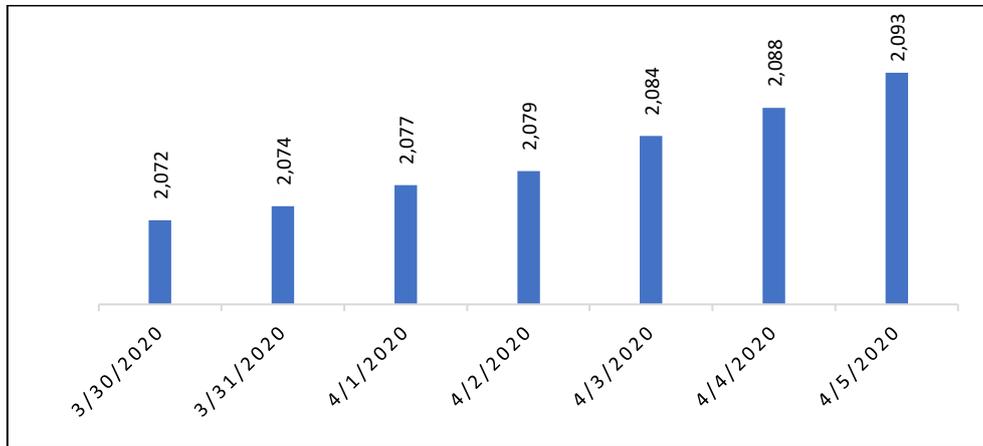
Avec 317.000 statuts actualisés et 147.000 photos postées par minute dans le monde, le réseau social est devenu un moyen de communication très prisé au même titre que WhatsApp et a remplacé progressivement le SMS traditionnel grâce à ses fonctionnalités supplémentaires (conversations de groupe, accusé de lecture, personnalisation de l'interface de conversation, etc.). En moyenne, chaque utilisateur Facebook passe 38 minutes par jour sur la plateforme et environ 100 millions d'heures de vidéo sont visionnées par jour. En d'autres termes, 4 millions d'années de vidéo sont visionnées chaque année sur Facebook par tous les utilisateurs (Omnicores Agency, 2020b).

C. Évolution de l'utilisation des plateformes d'hébergement de vidéos

La plateforme de vidéos en ligne Youtube est la plus utilisée de sa catégorie et trône à la deuxième place des sites les plus consultés sur Internet, juste derrière Google. Avec 30 millions d'utilisateurs actifs par jour, Youtube est même devenu le deuxième moteur de recherche le plus utilisé dans le monde.

Plus d'1 milliard d'heures de contenu vidéo sont visionnées par jour et chaque utilisateur passe en moyenne 40 minutes par jour sur la plateforme (Omnico Agency, 2020a).

Graphique V : Évolution du nombre de vues par jour sur une semaine en 2020 sur Youtube (en millions).



Source : Illustration personnelle sur base des données analytiques de la base de données Social Blade (2020).

Nous observons sur le graphique V ci-dessus que la croissance quotidienne du nombre de vues par jour est de 3 millions en moyenne. Cette croissance s'explique probablement par la gratuité du service, par le système de recommandation permettant de proposer à l'utilisateur du contenu basé sur ses derniers visionnages et recherches, son large catalogue ainsi que la variété du contenu posté.

D. Évolution de l'utilisation de sites à contenu pornographique

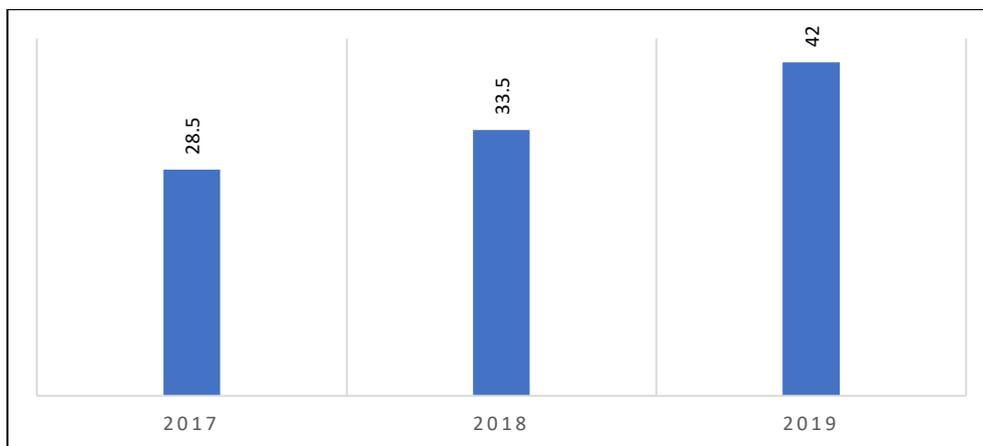
Afin d'analyser l'évolution de la consommation de la pornographie en ligne, nous prenons comme base le site Pornhub.com, le site le plus visité en 2019 avec 42 milliards de visiteurs en 2019.

Représentant 27% des flux de données relatifs à la lecture de vidéos en ligne, la pornographie sur Internet s'est popularisée dans notre société et ce dans chaque catégorie d'âge : bien que la majorité des visiteurs (34% de l'ensemble des visiteurs) soient âgés de 25 à 34 ans, la catégorie des personnes âgées de plus de 65 ans représente 4% des visiteurs annuels de Pornhub (Pornhub.com, 2019). La gratuité des sites web à caractère pornographique ainsi que la diversité de contenu semblent être les facteurs majeurs permettant d'expliquer la hausse de popularité de ce type de consommation dans notre société.

Nous observons sur le graphique VI ci-dessous que le nombre de visites annuelles sur le site Pornhub.com a connu une croissance de 47% du nombre de visites annuelles en seulement 2 ans, passant de 28,5 milliards en 2017 à 42 milliards en 2019 (Pornhub.com, 2018) (Pornhub.com, 2019). En termes de volumes de données, la tendance est similaire : en 2017, ce sont plus de 3.732 PetaBytes (PB) de données qui ont été échangées sur le site contre 6.597 PB en 2019, ce qui représente 209 GB par seconde (Pornhub.com, 2018) (Pornhub.com, 2019). Si Pornhub stockait l'entièreté des données diffusées en 2019 par son site sur des disques durs externes classiques et décidait d'empiler ces appareils, la tour construite atteindrait 100 kilomètres de hauteur et donc la frontière de l'atmosphère terrestre avec l'espace serait franchie (Pornhub.com, 2019).

De plus, plus de 6,83 millions de vidéos ont été chargées sur le site Pornhub.com en 2019, c'est environ 2 millions de plus par rapport à 2017 (Pornhub.com, 2018) (Pornhub.com, 2019). Il apparaît donc que la pornographie en ligne pèse aussi énormément dans la balance environnementale du numérique et que sa consommation a tendance à encore augmenter.

Graphique VI: Évolution du nombre de visites annuelles sur le site Pornhub.com (en milliards).



Source : illustration personnelle sur base des données de Pornhub.com (2019).

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les trois acteurs du système numérique mondial : les utilisateurs, les centres de données et les infrastructures de réseau. Ensuite, nous avons classé les usages du numérique en fonction des flux de données générés sur le réseau mondial et nous avons découvert que le visionnage de vidéos en ligne représentait 80% de ces flux. Enfin, l'évolution croissante de l'utilisation des services numériques a été illustrée par une série d'exemples basés sur les usages principaux du numérique par les utilisateurs.

Nous verrons au chapitre suivant que l'utilisation du système numérique mondial engendre des impacts négatifs sur l'environnement qui, au contraire de l'aspect dématérialisé du numérique, sont bien réels et matériels.

Chapitre 2 : Les méfaits du numérique

Les enjeux liés au réchauffement climatique ainsi que leurs impacts sur notre société n'ont jamais été aussi importants qu'à l'heure actuelle. En effet, la croissance des émissions de GES ainsi que de leur concentration dans l'atmosphère contribuent au réchauffement climatique qui s'accélère dangereusement : entre 1876 et 2017, environ 2.220 Gigatonnes (Gt) de CO₂ ont été émises dans l'atmosphère ayant pour conséquence d'entraîner un réchauffement de 1°C au-dessus du niveau préindustriel. Pourtant, si cette croissance se maintient, le réchauffement global des températures devrait être de l'ordre de 1,5°C d'ici 2040 (Giec, 2018 cité par The Shift Project, 2020a).

Par ailleurs, notre consommation croissante d'énergie primaire, la forme d'énergie présente dans la nature et ce avant une quelconque transformation, accompagnée de l'augmentation des flux physiques sous-tendant les activités de production ont grandement contribué à l'accroissement de la productivité industrielle et du travail ainsi qu'à l'expansion économique, sociale et démographique de notre société. Expansion économique qui s'est accélérée globalement au XIV^{ème} siècle suite à la découverte puis l'utilisation massive des énergies fossiles dans tous les secteurs économiques : agriculture, industrie, transport, ... Par conséquent, l'énergie possède une place centrale dans la problématique actuelle climatique et a toujours été et restera un paramètre essentiel du développement de notre société (The Shift Project, 2018).

La problématique climatique actuelle est intimement liée à l'usage des énergies fossiles qui ont permis le développement de notre économie moderne. Cette interaction rend en effet la problématique climatique particulièrement complexe vu que notre société peut être perçue comme un système extrayant, transformant, travaillant et déplaçant des ressources naturelles puisées de l'environnement pour produire des biens et services que chaque personne consomme pour satisfaire ses besoins (The Shift Project, 2018).

Depuis 200 ans environ, notre société a fondé son développement sur l'abondance d'énergies fossiles car cette abondance inédite a rendu possible la production d'électricité, l'activité industrielle (métallurgie et chimie lourde entre autres), l'amélioration du commerce en réduisant les distances et les délais, l'augmentation des rendements agricoles mais aussi des avancées sociales telles que l'augmentation du confort matériel, les progrès effectués dans le domaine de la santé, de l'éducation, de la sécurité, du tourisme et tout récemment l'émergence du numérique. Les experts s'accordent d'ailleurs à dire que cette économie dématérialisée du numérique, forte consommatrice de ressources transformées, n'est possible que dans un monde énergivore (The Shift Project, 2018).

Étant donné que la réduction de notre consommation d'énergies fossiles implique de profondes transformations de notre société (consommation énergétique, système de production, réaménagement du territoire, etc.), un engagement public accompagné d'un apport de ressources de la part des états pour soutenir cette transformation seront très probablement requis. L'Accord de Paris signé en décembre 2015 résulte de cette mobilisation croissante, largement motivée par la volonté de réduire ce risque climatique. Les pays signataires se sont donc engagés à prendre des actions visant à limiter l'augmentation de la température moyenne planétaire en-dessous de 2°C par rapport à la période préindustrielle et de poursuivre les efforts pour la limiter à 1,5°C. Cet objectif s'est progressivement ancré dans les discussions internationales (The Shift Project, 2020a).

De plus, cet Accord a donné naissance au principe de « budget carbone » qui représente la quantité totale de GES qu'il est possible d'émettre pour stabiliser leur concentration dans l'atmosphère en-dessous d'un certain taux représentant la limite de réchauffement visée. Les experts du GIEC ont estimé dans leur rapport de 2018 que le budget carbone qui permettrait de maintenir l'augmentation de la température de 2°C avec 66% de chances s'élevait en 2018 à 1.170 Gt de CO₂ et que le budget carbone qui permettrait de maintenir l'augmentation en-dessous de 1,5°C avec 66% de chances s'élevait à 420 Gt de CO₂ (Giec, 2018 cité par The Shift Project, 2020a).

Mais de nombreux doutes planent sur la transition vers une société émettant moins de carbone, certains la craignant désordonnée et incertaine. En outre, les risques climatiques ne sont pas encore perçus comme matériels par les différents acteurs économiques de notre société et par conséquent, cela retarde la prise de décision des politiques de réduction d'émissions de carbone et de GES plus strictes et radicales pour compenser le retard accumulé.

Malheureusement, nombreux sont ceux qui craignent que le combat contre le changement climatique et l'élévation des températures de notre planète se heurtent à la « tragédie des horizons » qui caractérise l'écart entre l'horizon d'occurrence perçu des risques climatiques et l'horizon de mise en place d'actions visant à réduire les émissions de GES par les gouvernements et les organisations (The Shift Project, 2020a).

Au cours de ce deuxième chapitre, nous analysons les impacts globaux du système numérique mondial sur l'environnement pour ensuite les répartir selon chaque acteur présenté au chapitre 1. Par après, afin d'expliquer les raisons pour lesquelles le numérique possède une telle empreinte environnementale, nous détaillons certaines de ses caractéristiques comme son « hyperdisponibilité ». Enfin, nous expliquons grâce au paradoxe de Jevons (ou effet rebond) pourquoi, malgré une meilleure conception des appareils numériques ou de leurs composants, il est fort peu probable de voir une réduction de cette empreinte sur l'environnement sans repenser notre utilisation des services numériques.

2.1 La pollution numérique

Selon Juliette Boulet, porte-parole de Greenpeace Belgique, si Internet était un pays, il serait le troisième plus gros consommateur d'énergie de la planète, derrière les États-Unis et la Chine (RTL Info, 2019). L'impact sur l'environnement du web et du secteur numérique est donc significatif. Pourtant, les médias en parlent beaucoup moins par rapport à l'impact du tourisme de masse, de la surconsommation mondiale, des transports, etc. Cet impact s'explique par l'omniprésence du digital dans notre quotidien ainsi que par la quantité des données que les utilisateurs, via les appareils connectés, génèrent, stockent et traitent. Selon Françoise Berthoud⁴, la consommation électrique du digital varie entre 6 et 10% de la consommation électrique mondiale selon les paramètres pris en compte, soit près de 4% des émissions de (-)GES, avec une tendance à la hausse de 5 à 7% par an (Laure Cailloce, 2018).

⁴ Françoise Berthoud est la fondatrice du groupement de services EcoInfo – pour une informatique plus respectueuse de l'environnement créé en 2006 et ingénieur de recherche en informatique au CNRS, Rennes, France.

En 2019, la consommation électrique du système numérique mondial se situait à environ 10%, c'est-à-dire 1.300 TWh, si nous tenons compte de l'énergie requise pour (Laure Cailloce, 2018) :

- La fabrication des serveurs, ordinateurs, téléphones et autres appareils connectés ;
- La fabrication et la pose des câbles et autres composantes nécessaires pour connecter le réseau aux centres de données dans le monde entier ;
- Les opérations effectuées sur toutes les données dans les centres de données ;
- La diffusion des données dans le réseau ;
- L'alimentation de nos appareils : téléphones, tablettes, montres connectées, etc.

De plus, lorsque les autres facteurs de pollution sont pris en compte, l'empreinte globale du système numérique mondial se décomposait en 2019 comme suit (Bordage F. et GreenIT.fr, 2019) :

- 6.800 térawattheures (TWh) d'énergie primaire, ce qui correspond à 4,2% de la consommation mondiale ;
- 1.400 millions de tonnes de CO₂ (3,8% des émissions mondiales).
- 7,8 millions de mètres cube d'eau douce (0,2% de la consommation mondiale) ;

En d'autres termes, l'impact du système numérique mondial en 2019 représente (EDF, s.d.) (Bordage F. et GreenIT.fr, 2019) :

- 968 milliards de bouteilles d'eau d'1,5 litres ;
- 116 millions tours du monde en voiture au niveau des émissions de CO₂⁵ ;
- 13.600 milliards de kilomètres parcourus en Smart électrique.

De plus, les impacts globaux du système numérique mondial, lorsqu'ils sont répartis par catégorie d'acteurs, sont illustrés au tableau 1⁶.

⁵ Selon l'hypothèse qu'un tour du monde en voiture représente une distance de 42.000 kilomètres.

⁶ Tous les facteurs de pollution sont expliqués en détails en annexe III.

Tableau 1 : Répartition des impacts globaux sur l'environnement du système numérique mondial selon les trois acteurs du numérique et le critère de pollution étudié.

	Émissions de GES	Consommation électrique	Consommation d'eau	Épuisement des ressources	Énergie primaire
Utilisateurs	63%	44%	83%	75%	60%
Centres de données	15%	24%	8%	9%	17%
Infrastructures de réseau	22%	32%	9%	16%	23%

Source : Bordage F. et GreenIT.fr, 2019

Nous observons dans le tableau ci-dessus que c'est la catégorie des utilisateurs qui est à l'origine de la majorité des impacts environnementaux relatifs au numérique.

Une des caractéristiques du numérique est son « hyperdisponibilité », c'est-à-dire sa capacité à être constamment disponible au maximum de ses performances : en effet, toutes les infrastructures sont conçues pour gérer les flux de données lors des pics d'utilisation (seulement quelques heures par jour) et restent sous-utilisées en dehors de ces pics. Pourtant, d'après Anne-Cécile Orgerie⁷, les appareils tels que les routeurs et les centres de données restent très énergivores même lorsqu'ils sont inactifs : un serveur sous tension mais inactif consomme en moyenne 100 Watts (W) tandis qu'à plein régime, il consomme 200W (Laure Cailloce, 2018). Pourtant, très peu de personnes songent à éteindre ce genre d'équipement pendant les heures creuses et d'inutilisation : « *malgré de nombreuses recherches qui affirment que cela n'affecterait pas la performance du service, les data centers continuent d'être à 100 % de leur capacité jour et nuit* » (Laure Cailloce, 2018).

Mais comment expliquer cette volonté de la part des opérateurs des centres de données de les maintenir à 100% de leur capacité de façon constante ? Ils craignent probablement que les utilisateurs souffrent de problèmes de temps de latence et donc d'un décalage de quelques secondes ou pire encore, d'un débit saccadé qui rend l'expérience du visionnage en streaming très inconfortable.

⁷Anne-Cécile Orgerie est chercheuse en informatique à l'Irisa (Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires).

De plus, le problème n'est pas uniquement matériel : les logiciels qui nous permettent d'utiliser les appareils connectés sont également mal conçus à cause des avancées technologiques réalisées en matière de mémoires des appareils. En effet « *lorsque la mémoire était comptée, les développeurs informatiques avaient l'habitude d'écrire du code synthétique et efficace. Aujourd'hui, ces préoccupations ont disparu et l'on assiste à une véritable inflation des lignes de code, ce qui signifie des calculs plus longs et plus gourmands en électricité* », explique Anne-Cécile Orgerie (Laure Cailloce, 2018). Un mot a même été inventé pour décrire ces logiciels : les « obésiciels », en relation avec l'obésité. Le problème est similaire pour les applications développées à la hâte pour être disponibles le plus rapidement possible mais qui consomment beaucoup d'énergie étant donné qu'elles sont toujours actives en arrière-plan, même lorsqu'elles ne sont pas utilisées.

Enfin, les scientifiques cherchent des solutions pour optimiser la consommation énergétique du numérique mais sont aussi inquiets du fait que chaque avancée dans ce domaine peut avoir des effets non anticipés : c'est ce qu'ils appellent « l'effet rebond » (Laure Cailloce, 2018) ou encore paradoxe de Jevons (Alcott, B.,2005). *Ce paradoxe explique que lorsque l'emploi d'une ressource est amélioré, la consommation globale de cette ressource a tendance à augmenter au lieu de logiquement diminuer* (Alcott, B.,2005).

Pour illustrer ce paradoxe, prenons l'exemple de la batterie des smartphones : nous possédons un smartphone dont la batterie requiert d'être chargée une fois par jour en moyenne pour pouvoir utiliser les applications installées. Imaginons qu'un ingénieur découvre un moyen de réduire la consommation énergétique de ces applications par cinq, cela permettrait de soit fabriquer des batteries à capacité réduite de plus petite taille et donc d'utiliser moins de matériaux pour leur fabrication, ou alors de ne pas modifier la structure des batteries afin qu'elles soient actives cinq fois plus longtemps et donc de diminuer sa consommation électrique. C'est malheureusement quasiment tout le temps la deuxième option qui est adoptée. Mais étant donné que l'être humain a horreur de la sensation de vide (ici la portion de batterie encore disponible), il a tendance à plus utiliser son appareil et donc augmenter sa consommation énergétique. Et par conséquent, les bénéfices générés par l'avancée technologique sont gommés par l'augmentation de l'utilisation (Alcott, B., 2005) (Cailloce, L., 2018).

Nous pouvons donc conclure d'après ce qui a été vu dans ce chapitre que le système numérique mondial génère des impacts sur l'environnement non négligeables et comparables à certains pays, selon le critère de pollution étudié.

De plus, les utilisateurs semblent être les acteurs responsables de la majorité des impacts sur l'environnement, peu importe le critère de pollution étudié, ce qui laisse sous-entendre que c'est bien la consommation des services et appareils numériques qui engendre la majorité des impacts, c'est ce que nous vérifierons au chapitre consacré aux utilisateurs. Après avoir parlé des impacts négatifs que le numérique a sur l'environnement, nous allons présenter au chapitre suivant les impacts positifs de celui-ci.

Chapitre 3 : Les bienfaits du numérique

Dans ce chapitre, différentes actions et propositions de projets (de la surveillance en temps réel à la prise de meilleures décisions en passant par l'optimisation énergétique), sont décrites et illustrées. Il est à noter que notre intention n'est pas de dédouaner le système numérique mondial de ses impacts environnementaux négatifs mais d'aussi montrer que, lorsqu'utilisés à bon escient, certains systèmes numériques peuvent aider la population mondiale à faire face à la problématique environnementale actuelle. Ensuite, nous présentons les différentes barrières rencontrées lors de la mise en place d'une transition numérique.

3.1 La transition numérique au service de l'environnement

Le changement climatique est un des défis les plus grands de l'humanité et les *Big Data* environnementales nous aident à comprendre toutes ses interrelations complexes. Ces registres de données utilisés pour lutter contre le réchauffement climatique sont appelés *Green Data* et contribuent à la transition vers une société durable de différentes façons et pour de nombreux secteurs.

En effet, la transition numérique permet, dans de nombreux domaines, de réaliser de meilleures évaluations des impacts environnementaux générés par une organisation, une entreprise ou une ville grâce à une visualisation complète et centralisée permettant de prendre des mesures plus adaptées et par conséquent plus efficaces pour réduire leur empreinte environnementale. De plus, grâce à ce partage d'informations, des économies d'énergie peuvent être réalisées en tenant compte de nombreux facteurs qui n'étaient pas intégrés auparavant, comme le comportement des consommateurs ou le prix de l'énergie pour les réseaux électriques et de distribution des eaux.

I. Une meilleure évaluation de la consommation énergétique pour les entreprises

L'implémentation de systèmes numériques par les entreprises dans leurs activités leur a permis de générer et de collecter de grands volumes de données concernant chaque aspect et domaine de leurs opérations. Ces données récoltées (concernant par exemple les ventes mais aussi des informations sur leurs différents processus de production, leurs fournisseurs, etc.) permettent d'optimiser le fonctionnement de la société et de réaliser de meilleures performances grâce notamment à une augmentation de leur productivité.

Depuis que les entreprises ont pris conscience des enjeux climatiques actuels et se servent des outils de collecte et d'analyse des Big Data, elles ont commencé à s'intéresser à l'impact écologique de leurs processus industriels. Cela comprend l'évaluation de l'impact des facteurs sur lesquels elles n'ont pas ou presque pas de contrôle, à savoir : les fournisseurs, l'utilisation des produits ou services par leurs clients, la gestion des déchets ainsi que les investissements réalisés dans des projets externes. Avant l'introduction des outils de stockage et d'analyse de données, les entreprises éprouvaient de grandes difficultés à visualiser précisément l'impact écologique de leurs opérations : en effet, les informations nécessaires à l'évaluation de facteurs simples comme la consommation énergétique d'un processus étaient stockées dans des documents séparés et souvent de formats différents.

Par conséquent, une société peut donc récolter et traiter autant d'informations qu'elle le souhaite, ce qui lui permet aussi d'améliorer sa durabilité, de mieux visualiser son impact environnemental afin de mettre en place des actions plus efficaces pour réduire son empreinte écologique et accélérer sa transition écologique. Par exemple, lorsque la firme pharmaceutique GlaxoSmithKline (GSK) a commencé à étudier l'impact de sa chaîne d'approvisionnement sur l'environnement, l'entreprise a découvert que seulement 8% de son empreinte carbone concerne ses émissions directes (scope 1 et 2)⁸ alors que les 92% restants proviennent d'émissions indirectes (scope 3) (GlaxoSmithKline, 2020). De plus, 48% de ses émissions de GES sont issues de celle-ci (achats de matières premières et de services en particulier), ce qui représente 8,6 millions de tonnes de CO₂ par an (GlaxoSmithKline, 2020).

⁸ Les différents types d'émissions de GES sont détaillés à l'annexe IV.

À la suite de cette étude, l'entreprise a décidé d'orienter ses efforts vers ses fournisseurs et à les encourager à prendre des mesures écologiques : GSK évalue chaque année l'impact des parties tierces avec lesquelles l'entreprise travaille et lorsque l'un des fournisseurs ne respecte pas les standards d'écologie imposés, GSK l'encourage à réduire son impact sur l'environnement (GlaxoSmithKline, 2020).

En conclusion, l'implémentation de systèmes numériques permet aux entreprises d'évaluer leur impact environnemental direct mais aussi indirect sur lequel elles ont plus de difficultés de contrôle car issu de l'ensemble de leur chaîne de valeur. De plus, ces systèmes numériques leur offrent aussi une vision globale de leur empreinte afin de pouvoir agir efficacement sur la durabilité de leurs activités. Enfin, la collecte de données par les entreprises sur leurs chaînes d'approvisionnement peut aussi encourager les petits fournisseurs à devenir plus responsables dans leurs opérations et donc avoir un effet domino.

II. Une agriculture intelligente et connectée

La hausse constante de la population mondiale génère un besoin croissant et urgent pour une production alimentaire toujours plus efficace malgré les contraintes climatiques et le manque d'espace. Afin de satisfaire ce besoin, un des concepts les plus en vue est l'agriculture de précision qui repose sur une surveillance permanente des cultures et une réaction rapide et précise en temps réel en cas d'évènement imprévu. D'après le dictionnaire d'agroécologie de Bricout et al. (s.d.), le concept d'agriculture de précision désigne l'« *ensemble de techniques et de pratiques limitant l'utilisation d'intrants dans les parcelles agricoles. Elle prend en compte l'hétérogénéité intra parcellaire afin d'ajuster la dose d'intrants en quantité, en temps et en lieu (modulation) pour améliorer le bilan économique, agronomique et environnemental des exploitations agricoles* ».

De plus, d'après Budaev, D. et al. (2018), la qualité et l'efficacité de l'agriculture de précision peuvent être augmentées de manière significative grâce à l'implémentation d'outils numériques tels que :

- Un modèle de reconnaissance des situations anormales basé sur les observations réalisées par des satellites et des drones en temps réel. Ce modèle utilise l'imagerie hyperspectrale (technique combinant l'imagerie et la spectroscopie) pour détecter les maladies, les insectes et autres nuisances ;
- Une gestion des ressources automatisée en temps réel, s'adaptant aux événements, pour les machines, les pesticides et autres outils (véhicules sans conducteur).

Ceci mène au concept de *smart farming* (agriculture intelligente) qui est un système numérique utilisant l'Intelligence Artificielle (IA) pour augmenter l'efficacité de l'agriculture de précision. Ce concept se présente comme un écosystème numérique⁹ de services intelligents basé sur le traitement et le partage d'informations et dans lequel chaque service est aussi considéré comme un système intelligent et autonome capable de réagir aux événements, de prendre des décisions et de se coordonner avec les autres services ou humains (Budaev, D. et al., 2018).

Dans un tel écosystème, les images prises par les satellites sont constamment traitées et fournissent une vision globale des champs, ce qui permet d'identifier les zones problématiques et par après, d'avoir des images plus détaillées prises par des drones ou autres machines. Lorsqu'une situation problématique est identifiée, le système soumet une liste d'actions à mettre en place pour résoudre la situation sur base des informations collectées en temps réel et dans le passé : il travaille donc avec une base de données fournie par les agriculteurs (lorsqu'elle existe) contenant des informations comme les différents problèmes en agriculture et leurs relations avec les cultures, les pesticides et aussi un historique de l'évolution des champs ainsi que des informations sur l'état des cultures, des machines et des autres ressources. Ensuite, il procède à une replanification des machines adaptée aux actions mises en place (Budaev, D. et al., 2018).

⁹ Un écosystème numérique est un système ouvert, basé sur le partage et le traitement d'informations, décentralisé, évolutif, composé de services intelligents (« système de systèmes ») et capable de s'auto-gérer. (Budaev, D. et al., 2018)

En résumé, la clé de ce système est le partage et le traitement des informations ainsi que le travail d'équipe des agents ayant chacun un comportement adaptatif et coopératif. De plus, ce système permet d'intégrer aussi des parties d'informations sur l'agriculture spécifiques à l'environnement de la parcelle agricole, permettant de déployer l'agriculture de précision dans n'importe quelle région du monde. Ces informations concernent les types de sols, les types de céréales cultivées, les engrais, les maladies locales, le type de machines et de mécanismes employés, les pesticides autorisés, etc. (Budaev, D. et al., 2018).

Un système de *smart farming* similaire à celui décrit dans cette section a été testé dans la région de Rostov en Russie par le groupe agricole Peschanokopskaya possédant plus de 30.000 hectares de champs et dont les spécialistes agronomes parcourent en moyenne 700 kilomètres par jour pour surveiller ces parcelles agricoles (Budaev, D. et al., 2018).

Les résultats observés sont (Budaev, D. et al., 2018) :

- Une augmentation de la productivité tout en améliorant la qualité des cultures en réduisant la dégradation du sol grâce au système de surveillance des champs ;
- Une réduction de l'impact sur l'environnement grâce aux calculs des quantités optimales d'engrais et de pesticides à utiliser basés sur les informations concernant la végétation et la faune locales.

En conclusion, la transition numérique de l'agriculture, en plus d'assurer une offre en nourriture suffisante et ce partout dans le monde, permet de réduire son impact sur l'environnement en la rendant plus efficace au niveau du rendement des cultures et en optimisant les quantités de pesticides et d'engrais utilisées.

III. Les villes intelligentes

Les Nations Unies ont estimé en 2014 que 66% de la population mondiale vivra dans un milieu urbain d'ici 2050 (United Nations, 2014). De plus, en 2016, les villes consommaient 75% de l'énergie totale dans le monde (Mohanty, S. et al., 2016 cité par Silva, B. et al., 2018) et cette consommation d'énergie perpétuelle était responsable d'environ 80% des émissions de GES (An, T. et Pardo, T., 2011 cité par Silva, B. et al., 2018).

Considérant ces faits, les experts s'accordent à dire que le concept de ville intelligente est une solution envisageable pour relever les défis imposés par l'urbanisation de masse, la croissance de la population et leurs impacts sur l'environnement (Silva, B. et al., 2018).

Selon Harrison, C. et al. (2010) cité par Silva, B. et al. (2018), une ville intelligente est un environnement urbain utilisant les TIC et autres technologies pour améliorer l'efficacité des opérations quotidiennes de la ville et la qualité des services fournis aux citoyens. Une autre définition proposée par Kondepudi, S. (2014) cité par Silva, B. et al., (2018) décrit une ville intelligente comme une ville moderne qui utilise les TIC et autres technologies pour améliorer la qualité de vie, l'efficacité opérationnelle de ses services urbains tout en assurant la disponibilité de ressources pour les générations actuelles et futures d'un point de vue social, économique et environnemental.

Communauté, gestion de l'énergie et des transports, services de santé, ... Tous ces services sont les éléments de base d'une ville intelligente. Néanmoins, la composition d'une ville intelligente varie selon les centres d'intérêt de ses habitants. Par exemple, une ville intelligente en particulier pourrait décider d'implémenter un système de gestion des catastrophes naturelles tandis qu'une autre pourrait se focaliser sur un système de gestion des déchets. La situation géographique et politique de la ville joue donc aussi un rôle majeur quant à la composition des services offerts.

Grâce à l'indicateur Cities In Motion (CIMI) il est possible de déterminer le niveau d'intelligence d'une ville en fonction de 77 indicateurs urbains classés en dix catégories différentes : économie, technologie, capital humain, cohésion sociale, portée internationale, environnement, mobilité et transport, planification urbaine, gestion publique et gouvernance. En utilisant cet indicateur, Berrone, P. et al. (2019) ont évalué 174 villes dans le monde pour les classer selon leur degré d'intelligence : les villes de Londres (Royaume-Uni), de New-York (Etats-Unis) et d'Amsterdam (Pays-Bas) constituaient dans l'ordre le podium des villes les plus intelligentes en 2019. Bruxelles (Belgique), capitale de l'Europe, pointe quant à elle à la 48^{ème} position de ce classement (Berrone, P. et al. 2019). Intéressons-nous aux fonctionnalités qui ont permis à Londres et Amsterdam de réduire leur empreinte environnementale.

Trônant à la première place des villes les plus intelligentes, Londres est reconnue pour son système performant de gestion des transports.

En effet, la ville a adopté un système de gestion du trafic basé sur la reconnaissance des plaques d'immatriculation, ce qui a considérablement réduit la congestion du trafic durant les heures de pointe en indiquant des itinéraires alternatifs aux conducteurs et a donc permis de réduire ses émissions de GES. De plus, Londres est la ville qui abrite le plus grand nombre de startups dans le monde et met à disposition des particuliers, des sociétés, des chercheurs et développeurs une base de données (*London Datastore*) utilisée par plus de 50.000 personnes mensuellement (Berrone, P. et al. 2019).

Capitale des Pays-Bas, Amsterdam s'est élevée à la troisième place du classement grâce notamment à la combinaison de technologies financières et sa stratégie d'optimisation énergétique. Comme 90% des ménages à Amsterdam possèdent au moins un vélo, la ville a développé un système avancé de services automatisés pour l'utilisation publique de vélos partagés. Grâce à sa stratégie favorisant la mobilité douce, Amsterdam compte bannir les voitures à essence et diesel d'ici 2025 et donc devenir la première ville européenne à zéro émission (Berrone, P. et al., 2019).

En résumé, intégrer les TIC dans l'organisation d'une ville permet, de façon similaire aux entreprises, de faciliter la visualisation des sources d'émissions de GES afin de prendre des actions visant à les réduire.

IV. Les réseaux électriques intelligents

Le secteur des énergies fait actuellement face à de nombreux défis tant au niveau des performances opérationnelles et environnementales que sur l'amélioration des services fournis aux consommateurs. Afin de relever ces défis environnementaux actuels et assurer le futur de la planète, il est urgent de concevoir un réseau électrique moderne dont la stabilité ainsi que la fiabilité seraient améliorées et qui intégrerait plus efficacement les sources d'énergies renouvelables.

Or, la majorité du réseau de distribution d'électricité mondial a été construite lorsque l'énergie était peu coûteuse et opère encore de la même manière qu'il le faisait il y a cent ans : un système hiérarchique dans lequel l'électricité est transmise par les centrales électriques constituant le début de la chaîne aux consommateurs situés en fin de chaîne (Dileep, G. 2020).

Dans ce type de configuration, la source d'électricité ne possède aucune information sur l'utilisation finale faite par les consommateurs : le système ne va donc que dans un sens. Par conséquent et afin de pouvoir supporter les pics de demande, le système est conçu comme s'il était constamment à 100% de ses capacités. Cependant, les périodes de pics ne sont pas fréquentes, ce qui rend un système basé sur les pics de demande inefficace. De plus, un tel système est très polluant car il repose principalement sur les énergies fossiles à fort taux d'émission de GES (charbon et pétrole principalement) (Dileep, G. 2020).

Néanmoins, les avancées réalisées dans les TIC permettent d'avoir plus de contrôle sur la production et la consommation d'électricité, de mieux surveiller l'entièreté du système électrique afin d'opérer plus efficacement avec des coûts moins élevés (IBM, 2014 cité par Zhou, K. et al., 2016) (Momoh, J. A., 2009 cité par Zhou, K. et al., 2016). Les opportunités de tirer avantage des progrès réalisés dans le secteur des technologies de communication appliquées au réseau électrique sont donc évidentes.

D'où le concept du *smart grid* décrit comme un système de distribution d'énergie et d'informations à deux sens permettant à l'industrie électrique de mieux gérer la distribution d'énergie et de permettre aux utilisateurs d'avoir plus de contrôle sur leurs décisions en matière de consommation (Dileep, G. 2020). Le *smart grid* emploie donc les TIC pour transmettre les informations en temps réel et permettre l'ajustement entre l'offre et la demande du réseau aussi en temps réel. Par exemple, dans un réseau électrique intelligent, un thermostat intelligent peut recevoir un signal informant sur un changement des prix de l'électricité et répondre à ce changement en ajustant la température ambiante afin de réaliser des économies pour le consommateur (Dileep, G. 2020).

Mais cet échange d'informations n'est pas seulement bénéfique pour le portefeuille du consommateur : lors d'une hausse des prix de l'électricité causée par une période de pic de la demande, le compteur intelligent¹⁰ informe le consommateur final que l'électricité est plus chère et lui offre deux choix : soit reporter les tâches gourmandes en électricité ou alors payer plus cher l'électricité. Certains consommateurs ont aussi le choix de se tourner vers une source alternative comme les panneaux solaires placés sur le toit de leur domicile ou lieu de travail.

¹⁰ Le compteur intelligent (*smart meter*) remplace le compteur mécanique traditionnel et permet l'échange d'informations entre le réseau intelligent et le consommateur final.

Nous observons donc qu'un rationnement volontaire est exercé grâce à une modification des prix, en offrant des prix plus bas en échange d'une réduction de la consommation durant les périodes de pics. Ce concept est appelé *Demand Side Management* (gestion de la demande) (Dileep, G. 2020) et vise à ajuster la demande et non l'offre d'électricité. Tout le monde y gagne dans ce concept étant donné qu'il est une solution moins coûteuse, plus rapide, plus écologique et plus fiable que d'ajouter une centrale électrique en plus dans le réseau. Enfin, une meilleure gestion de la demande en électricité permet de réduire la consommation et le gaspillage (Dileep, G. 2020).

Par ailleurs, le *smart grid* intègre et soutient aussi la micro-génération résidentielle d'électricité ainsi que la distribution et le stockage des énergies renouvelables, réduisant considérablement l'impact environnemental du système de distribution électrique (Dileep, G. 2020). En intégrant ces énergies propres dans le réseau, le *smart grid* fournit par conséquent plus d'options aux consommateurs quant à leur choix de source d'énergie et plus d'informations leur permettant de prendre part à l'optimisation des opérations du système (Rahman, G. et al. 2013).

Enfin, une des applications les plus révolutionnaires du *smart grid* est appelée *Plug in Hybrid Electric Vehicles smart charging* (Dileep, G. 2020) et concerne les véhicules électriques hybrides plug-in. Ils possèdent de meilleures batteries que les véhicules hybrides traditionnels leur permettant de stocker de l'électricité (idéalement issue de sources renouvelables) mais aussi de rendre cette électricité au réseau lors de périodes de pics de demande, servant de source de secours d'électricité au réseau électrique. Chaque véhicule se transforme alors en batterie ayant une capacité allant de 20 à 50 kWh selon le modèle de voiture (Dileep, G. 2020).

En résumé, d'un point de vue environnemental, l'économie et l'optimisation de l'énergie rendues possibles par le *smart grid* réduisent de manière significative les émissions de CO₂ : selon le rapport d'étude réalisé par le Laboratoire National du Pacifique Nord-Ouest en 2010 estime les réductions d'émissions de carbone engendrées par l'utilisation de compteurs intelligents s'élèvent à 12% (Pacific Northwest National Laboratory, 2010 cité par Dileep, G. 2020).

V. Un système de gestion des déchets intelligent

Les déchets produits par la surconsommation mondiale sont un problème croissant pour notre société ainsi que pour l'environnement. En effet, la génération de déchets est exponentielle notamment à cause de l'urbanisation et l'industrialisation de masse. Dès lors, surveiller le cycle de vie des déchets est important pour plusieurs raisons : réduire les risques épidémiologiques, améliorer la qualité de vie des citoyens mais aussi faciliter le recyclage (Silva, B. et al., 2018).

La gestion intelligente des déchets est donc devenue une composante à intégrer impérativement dans chaque ville intelligente pour assurer sa durabilité car une mauvaise gestion des déchets entraîne de lourdes conséquences sur la santé et l'environnement (Silva, B. et al., 2018). Un tel système intelligent s'occupe de gérer les déchets générés par la population, les services publics et les entreprises privées en étant actif dans quatre étapes clés (Neirotti, P. et al., 2014 cité par Giacobbe, M. et al., 2018) :

- La collecte des déchets ;
- L'élimination des déchets ;
- Le recyclage ;
- La récupération.

Dans cette section, nous analysons un exemple de système de gestion des déchets proposé par l'Université de Messine en 2018 appelé *Big Bucket* (Giacobbe, M. et al., 2018).

Le projet *Big Bucket* est une proposition de système de collection sélective des déchets basé sur les TIC et qui vise à résoudre les problèmes d'inefficacité des systèmes de collecte des déchets traditionnels. Plus particulièrement, il intègre des bennes à ordures intelligentes comme unités intelligentes : chacune consiste en une benne à ordures automatisée et équipée de différents capteurs destinée à collecter les déchets. Ces bennes sont essentiellement fabriquées à partir de plastiques et métaux recyclés (Giacobbe, M. et al., 2018).

Le système *Big Bucket* est destiné à être utilisé pour deux types de collections de déchets : la collecte communautaire (placées dans des espaces publics, on n'y dépose que certains types de déchets) et la collecte traditionnelle (en trottoir) des déchets domestiques. Chaque type de collecte possède sa propre version de benne *Big Bucket* (Giacobbe, M. et al., 2018).

Les deux types de bennes diffèrent en termes de capacité et de connectivité WIFI. Elles possèdent toutes deux les mêmes types de capteurs : des capteurs ultrasoniques et lasers pour le niveau de remplissage des bennes, des détecteurs d'émissions de fumée, de méthane et d'ammoniac pour contrôler la quantité de produits chimiques placés à l'intérieur des bennes et des capteurs de contrôle de la qualité de l'air (température, humidité, bruit, émissions de CO₂ principalement). Tous ces capteurs différents sont placés sur la paroi extérieure des bennes, les transformant en unités de contrôle ambiant capables d'identifier les types de déchets produits et les possibles risques épidémiologiques (Giacobbe, M. et al., 2018).

En résumé, grâce à la surveillance à distance du niveau de chaque benne à ordures de chaque zone de la ville, il est possible d'optimiser la planification du service et de la gestion de la flotte de véhicules et des opérateurs afin de choisir le véhicule le plus adapté à chaque situation pour chaque zone. De plus, la collection de données en temps réel est utile pour fournir des informations sur la qualité de l'air et d'autres facteurs au public. L'analyse du contenu des bennes permet en outre d'optimiser leur gestion de fin de vie et par conséquent augmenter l'efficacité du traitement de recyclage ou de récupération des matériaux (Giacobbe, M. et al., 2018).

VI. Un système de distribution d'eau intelligent

Avec la croissance exponentielle de la population mondiale, les réseaux de distribution d'eau doivent être prêts à répondre à la demande croissante tout en restant en bon état afin de garantir la qualité de l'eau fournie aux consommateurs. L'implémentation d'TIC dans l'industrie de l'eau permet de collecter et stocker de grands volumes de données pour réaliser des analyses complètes afin de créer des modèles de prédiction permettant d'augmenter l'efficacité de la gestion du réseau de l'eau.

Un système *smart water grid* intègre donc les technologies d'information et de communication dans la gestion du système de distribution : capteurs, compteurs et outils de contrôle et d'analyse numériques sont employés pour surveiller et contrôler la transmission et la distribution de l'eau, veillant à ce qu'elle soit livrée au moment et à l'endroit où elle est réellement requise et demandée et assurant aussi sa bonne qualité.

De plus, l'implémentation d'un *smart water grid* transforme aussi les processus opérationnels en automatisant certaines tâches : en effet certains processus de surveillance (contrôles des fuites d'eau, de la qualité de l'eau et relevés des compteurs notamment) sont encore réalisés manuellement (Public Utilities Board Singapore, 2016).

En 2016, le département de distribution des eaux à Singapour a mis en place un *smart water grid* pour assurer l'approvisionnement en eau en continu à ses 1,4 millions d'habitants et améliorer son réseau de distribution d'eau qui achemine plus de 1,6 millions de m³ d'eau par jour dans un réseau totalisant environ 6.000 kilomètres de canalisations (Public Utilities Board Singapore, 2016).

Grâce à l'implémentation de ce système intelligent, Singapour a amélioré l'efficacité de distribution ainsi que la qualité de l'eau grâce aux trois fonctionnalités clés d'un *smart water grid* (Public Utilities Board Singapore, 2016).

Premièrement, grâce à la surveillance en temps réel de l'état des infrastructures et des installations pour prévoir les entretiens nécessaires, le réseau de distribution d'eau planifie et programme plus efficacement ses opérations de maintenance et de remplacement de façon à ce que les canalisations soient remplacées au bon moment et au bon endroit (Public Utilities Board Singapore, 2016).

Ensuite, la surveillance en temps réel de la pression et la qualité de l'eau permet d'améliorer la planification des opérations sur le réseau : les données générées par les capteurs et les compteurs en temps réel permettent de surveiller la qualité de l'eau sur tout le réseau. Par ailleurs, les fuites et la pression dans les canalisations sont détectées rapidement pour éviter les risques d'explosion de celles-ci et minimiser les pertes d'eau. De plus, cette surveillance continue de la qualité de l'eau fournit des avertissements rapides en cas de contamination de l'eau. Enfin, les valves automatisées du réseau réagissent de façon autonome et se ferment pour éviter les risques d'inondations, de pertes d'eau ou de propager la contamination (Public Utilities Board Singapore, 2016).

Dernièrement, le *smart water grid* aide les consommateurs à économiser l'eau et réduire leur consommation en leur fournissant des informations en temps réel sur celle-ci : les technologies comme les relevés automatiques des compteurs et autres appareils intelligents de gestion de l'eau placés chez les consommateurs leur permettent d'avoir un rapport en temps réel sur la consommation en eau. Cela leur offre la possibilité de prendre de meilleures décisions concernant la conservation de l'eau dans leurs domiciles et entreprises.

De plus, ces données générées par les compteurs intelligents permettent de mieux prévoir et anticiper la demande pour optimiser l'utilisation des pompes, la réalimentation d'eau dans les réservoirs de service, et la quantité d'eau à traiter (Public Utilities Board Singapore, 2016).

En résumé, implémenter les TIC dans un réseau de distribution d'eau permet d'augmenter non seulement son efficacité et sa résilience grâce aux différents capteurs placés dans les canalisations mais aussi de réaliser des économies d'eau et de réduire la consommation excessive chez les consommateurs en leur fournissant en temps réel des informations et en les sensibilisant par rapport à leur utilisation.

VII. Surveillance de la planète

Le visionnage des vidéos diffusées sur les réseaux sociaux représente, comme expliqué précédemment, 18% de la consommation de vidéos en ligne. Souvent pointés du doigt de manière négative, les réseaux sociaux ont néanmoins un rôle à jouer dans la lutte contre le réchauffement climatique : sensibilisation et diffusion d'informations permettant de sensibiliser les consommateurs quant à leurs choix de consommation quotidienne. De plus, grâce aux avancées réalisées dans les domaines de collecte et d'analyse des données numériques, les scientifiques mettent en place de plus en plus d'actions et projets se basant sur l'analyse de données provenant des réseaux sociaux (vidéos, photos, publications, etc.).

Comme par exemple ce projet lancé par l'université de Griffith en Australie en 2016 (Griffith Institute for Tourism, 2016) qui utilise des techniques d'intelligence artificielle comme l'apprentissage par processus naturel (*natural process learning*) et le *machine learning* afin de tester la possibilité d'évaluer la santé des écosystèmes à partir des *tweets* de touristes. Ces touristes jouent donc le rôle de « capteurs humains ». En effet, les scientifiques combinent les données collectées à partir du réseau social Twitter avec d'autres registres de données (données météorologiques, statistiques du tourisme, rapports sur la qualité des eaux et sur la couverture corallienne, etc.) pour surveiller l'état de la Grande Barrière de Corail (Griffith Institute for Tourism, 2016) (Griffith University, 2018).

L'algorithme en question réalise une analyse de sentiments afin d'extraire les informations écologiques de chaque *tweet* posté. Afin d'entraîner son algorithme, les scientifiques ont montré une série d'images de la barrière de corail, certaines contenant des traces de pollution (sac plastique, bouteille en plastique et autres déchets), et ont demandé à des participants de les classer selon leur niveau beauté. Les photos classées comme les plus jolies étant celles où il n'y a pas de traces de pollution, l'algorithme a pu identifier les facteurs déterminant la beauté de chaque photo (clarté de l'eau, abondance de poissons, topographie du corail, ...) et donc aussi son taux de pollution. Grâce à la localisation de chaque *tweet*, les scientifiques identifient les endroits où la pollution est plus intense ce qui leur permet de concentrer leurs efforts sur ces zones (Griffith University, 2018).

L'algorithme collecte aussi des informations issues de sources de données non structurées comme les blogs et les pages touristiques sur Facebook. Même si la pertinence des données issues des réseaux sociaux peut être encore débattue de nos jours, Susanne Becken, directrice de l'Institut du Tourisme de Griffith, assure que ces registres de Big Data sont très utiles dans les domaines peu étudiés. *« Dans les régions où il y a peu de ressources pour assurer une surveillance professionnelle, typiquement les pays en voie de développement (par exemple le Parc National du Komodo en Indonésie), les données provenant des « observations » des personnes pourraient être très utiles. Même si elles ne sont pas d'excellente qualité, cela reste mieux que rien et elles peuvent au moins fournir une sorte d'avertissement. Cela aiderait à mieux cibler les actions ou les missions de surveillance »* (Rejcek, P., 2017).

En résumé, grâce au système numérique mondial, il est potentiellement possible d'implémenter des projets de surveillance de l'état de santé de la planète afin de prendre de meilleures décisions et de mettre en place plus rapidement et plus efficacement des actions pour lutter contre la pollution et plus largement le réchauffement climatique et la dégradation de la biodiversité.

Nous avons présenté dans cette section plusieurs initiatives et projets s'appuyant sur l'utilisation d'appareils et/ou services numériques visant à réduire l'impact environnemental de certains secteurs ou à lutter contre la pollution de manière générale. Mais ces projets rencontrent de nombreuses barrières, que nous allons présenter au cours de la section suivante, qu'il faut absolument arriver à franchir sans quoi la transition numérique risquerait d'être désorganisée voire inefficace.

3.2 Barrières à la transition numérique

Nous avons vu de nombreux exemples de projets et initiatives pour lesquels la transition numérique a un rôle positif à jouer dans la lutte contre le réchauffement climatique : *smart cities*, *smart grids*, *smart farming* ... Pourtant, il reste encore de nombreuses barrières à l'implémentation de tels systèmes dans les secteurs mentionnés précédemment.

Premièrement, les systèmes numériques collectent et génèrent d'énormes quantités de données sous des formats différents par des capteurs et des appareils variés : données météorologiques, données sur la consommation électrique des habitants... Par conséquent, l'hétérogénéité des données et des appareils engendre des incompatibilités entre les différentes plateformes des TIC et empêche l'interopérabilité et une bonne communication entre les différents systèmes. Pourtant afin d'optimiser au mieux les services numériques et faire en sorte de recevoir des résultats d'analyses les plus complets possibles pour mettre en place des actions efficaces, il est nécessaire de récolter le maximum d'informations provenant de plusieurs sources : par exemple, afin d'optimiser au mieux un parc éolien ou de panneaux photovoltaïques, il est essentiel de combiner des données météorologiques comme la direction et la force du vent ou encore l'angle solaire avec des informations concernant la consommation électrique des habitants pour répondre à la demande de manière efficace tout en réduisant l'impact environnemental de cette génération d'électricité.

Par ailleurs, la protection des données sensibles est devenue la préoccupation majeure des populations. La numérisation des services traditionnels a parallèlement offert plus d'options aux pirates informatiques. C'est pourquoi les projets de transition numérique doivent donner la priorité à la sécurité de leurs infrastructures et de leurs données, quitte à réaliser des investissements coûteux. Si la population n'est pas convaincue à propos de la qualité de la sécurité des données sensibles, elle aura tendance à simplement éviter d'utiliser les plateformes TIC. D'autre part, les entreprises et les organisations générant leurs propres données craignent aussi que le partage de celles-ci pose un risque pour l'image de leur société et leurs profits. En effet, les entreprises et organisations déclarent souvent que leurs données sont une propriété intellectuelle et que rendre leur accès disponible à tous est une atteinte à cette propriété intellectuelle. Cela a pour effet de réduire les possibilités de collaboration entre organisations scientifiques et publiques dans la lutte contre le réchauffement climatique. Bien que certaines initiatives de partage aient été mises en place, la majorité de ces organisations conservent secrètement leurs registres de données (Keeso, A.,2014).

Ensuite, les coûts élevés d'implémentation et opérationnels font aussi partie des barrières majeures à relever pour l'intégration de services intelligents. Les coûts d'implémentation concernent le capital financier à apporter pour déployer les *smart services* tandis que les coûts opérationnels sont constitués des coûts nécessaires pour assurer l'exécution des opérations jour et nuit et des coûts de maintenance. De plus, les coûts liés aux *Big Data* sont perçus comme des investissements à réaliser pour générer des bénéfices financiers (en optimisant les campagnes de marketing selon les envies et caractéristiques de chaque client par exemple) et moins comme des coûts requis pour assurer la durabilité. Par conséquent, il n'existe pas de marché propre au secteur des données environnementales car il manque d'intérêt de la part du modèle capitaliste (Keeso, A.,2014).

De plus, il subsiste un réel problème de manque d'expertise et de compétences dans le domaine du traitement de données (Keeso, A.,2014). Cette barrière à l'implémentation attire l'attention sur le problème du manque de *data scientists* (scientifiques de données) en général dans le monde du travail. En effet, les personnes possédant les compétences requises sont très généralement déjà employées dans d'autres secteurs, comme le secteur du commerce. Et sont très demandées dans le monde du travail ce qui les rend coûteuses en termes de salaires. Par conséquent, les organisations environnementales ayant des budgets plus réduits ne peuvent généralement pas recruter ces scientifiques (Keeso, A.,2014).

En résumé, les défis à relever lors de la mise en place de services numériques dans les domaines énoncés sont nombreux et repris ci-dessous :

- L'absence de standards pour les *Big Data* constitue un problème global dans le sens où il n'y pas de règles précises concernant l'uniformité, l'harmonisation et la centralisation des données, rendant les types de données incompatibles selon les industries, les secteurs et les pays (Keeso, A.,2014). Il faut donc mettre en place des stratégies de gouvernance, d'organisation et des procédures de contrôle étant donné les quantités astronomiques de données qui sont collectées et le fait que ces données ne sont pas toujours standardisées, de qualité ou de formats uniformes (Keeso, A. 2014) ;

- Une réévaluation des tâches des employés doit être réalisée étant donné que l'implémentation de services numériques rend certaines tâches redondantes (relevés de compteurs dans un *smart water grid* par exemple) mais en crée aussi de nouvelles (maintenance, traitement des données, ...) ;
- L'acceptation de la technologie par le grand public, particulièrement en matière de confidentialité et de sécurité. En effet, les mécanismes de sécurité des infrastructures IT doivent être améliorés pour protéger les données des consommateurs et utilisées avec leur consentement, étant donné qu'elles leur appartiennent ;
- Il y a encore trop peu d'intégration et de partage des données provenant de sources différentes car les entreprises et organisations utilisent leurs propres modèles de collecte, de stockage et de traitement. Ce manque d'accès aux données empêche les experts et les scientifiques de travailler de manière optimale lors de leurs analyses des données environnementales. Il existe néanmoins des initiatives de partage telles que WikiEnergy, fondé en mars 2014 par un consortium de chercheurs d'universités et d'ONGs, qui est un outil de recherche en ligne incluant la plus grande base de données au monde sur l'utilisation de l'énergie et de l'eau par les consommateurs. Les données sont disponibles gratuitement pour les chercheurs des universités et des ONGs qui mènent des recherches scientifiques et d'intérêt public (Wogan, D., 2014).

Conclusion

En conclusion, le numérique et son caractère dématérialisé ont une empreinte sur l'environnement qui elle est physique et tangible : que ce soit au niveau de sa consommation énergétique ou des autres facteurs environnementaux, la pollution engendrée par l'environnement digital est comparable à celle des plus grandes nations mondiales. De plus, malgré des impacts observables sur l'environnement, la tendance générale de l'utilisation intensive est à la hausse comme observé dans la section consacrée à l'évolution des usages et de l'environnement numérique. En parallèle de cette évolution de l'utilisation de services numériques, nous observerons une augmentation des impacts environnementaux qui, d'après le rapport de GreenIT.fr de 2019, seront en moyenne doublés d'ici 2025 selon le facteur environnemental observé.

Pourtant, comme nous l'avons vu dans la partie sur la transition digitale, les services et appareils numériques peuvent aussi contribuer de manière positive dans la lutte contre le réchauffement climatique et donc participer à réduire l'empreinte environnementale mondiale si les barrières présentées précédemment sont franchies.

En présentant les trois acteurs du système numérique mondial, nous avons pu procéder à une première répartition de ses impacts globaux et observer que c'est la catégorie des utilisateurs qui concentre la majorité des impacts sur l'environnement. Cette répartition a aussi permis d'introduire la méthodologie du calculateur d'impacts qui est présentée au chapitre 7 : en effet, la calculatrice environnementale développée dans le cadre de ce mémoire se base prioritairement sur la décomposition des impacts globaux du numérique selon chaque acteur qui le compose.

Dans la partie 2, nous nous intéresserons plus en détails aux impacts relatifs à l'offre du marché du secteur numérique, les GAFAM et leurs centres de données, ainsi que les impacts relatifs à la demande représentée par les utilisateurs et leurs appareils numériques. Nous effectuerons à nouveau une répartition des impacts mais cette fois selon une méthodologie identique à celle appliquée aux analyses de cycle de vie (ACV) et sur laquelle le calculateur de la partie 3 se base également.

Partie 2 : Analyse du cycle de vie de l'offre et la demande du système numérique mondial

Introduction

Comme expliqué dans la première partie, les utilisateurs sont les principaux responsables des impacts environnementaux relatifs au système numérique mondial, laissant sous-entendre que l'utilisation d'appareils et services numériques génère la majorité de la pollution numérique. Afin de vérifier cette supposition, la partie 2 introduit le concept d'analyse de cycle de vie qui consiste à répartir les impacts globaux d'un appareil ou service sur chacune de ses phases de cycle de vie, de la fabrication à la fin de vie. Dans cette partie, nous nous intéresserons aux acteurs du marché du numérique et des services digitaux en appliquant cette méthodologie d'analyse de cycle de vie. Nous commencerons en analysant l'impact du côté de l'offre, représentée par les GAFAM et leurs célèbres centres de données, souvent pointés du doigt comme étant les plus grands responsables de la pollution numérique. Ce segment concentre la majorité de ses impacts lors de sa phase d'utilisation, conséquence de l'« hyperdisponibilité » du numérique mondial. Ensuite, nous analysons en détails les utilisateurs qui représentent le côté de la demande et dont les appareils numériques concentrent la majorité des impacts lors de leur phase de fabrication, comme expliqué au chapitre 5.

Chapitre 4 : Du côté de l'offre

Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur les principales entreprises fournisseuses de services digitaux et/ou proposant des appareils numériques aux consommateurs : les GAFAM. Ensuite, nous étudierons l'architecture des centres de données, principaux moteurs du système numérique mondial afin de comprendre pourquoi ces infrastructures particulières sont fortement énergivores. Par après, certaines mesures d'efficacité énergétique et d'évaluation de la consommation énergétique propres aux centres de données seront présentées et d'autres calculées pour permettre de comparer les entreprises entre elles. Enfin, nous expliquerons les actions prises par les GAFAM visant à réduire la consommation énergétique de leurs centres de données.

4.1 Présentation des GAFAM

Le terme GAFAM désigne les principales entreprises du système numérique mondial : Google, Amazon, Facebook, Apple et Microsoft. Chacune d'entre elles propose des services digitaux tels que des plateformes de stockage et de traitement de données ou des appareils numériques tels que des tablettes, des smartphones et des ordinateurs.

Google : « *Notre objectif est d'organiser les informations à l'échelle mondiale pour les rendre accessibles et utiles à tous* » tel est le slogan de cette entreprise fondée en 1998 par Sergey Brin et Larry Page et actuellement filiale de la société Alphabet Inc. (Google, 2019). L'entreprise qui proposait seulement un moteur de recherche en ligne propose aujourd'hui plus de 50 services Internet et une série d'appareils numériques : les services proposés varient de l'envoi d'un simple email à la création de logiciels pour smartphones et autres tablettes en passant par la création de documents en ligne. Pourtant, malgré le vaste choix de produits proposé par Google, l'entreprise continue à générer la majorité de ses profits grâce à son système de publicité et de liens sponsorisés présent sur son moteur de recherche : presque 50% des revenus d'Alphabet Inc. en 2016 sont issus de ce système de publicité (Hosch, W. L., & Hall, M., 2020). En plus de ce moteur de recherche en ligne, Google offre de nombreux services numériques tels que *Google Video*, *Youtube*, *Google Books* (service digital de mise à disposition de livres scannés sous format PDF proposant plus de 15 millions de livres en 2012) (Hosch, W. L., & Hall, M., 2020), *Google Earth* et *Google Chrome*, qui est le navigateur web le plus utilisé mondialement en 2020. (Hosch, W. L., & Hall, M., 2020). En plus de ces services numériques, Google propose également le service *G Suite* qui permet de stocker en ligne 15 GB de fichiers, d'emails et de documents de toutes sortes gratuitement à tous ses utilisateurs et inclut les applications telles que *Google Drive*, *Gmail*, *Google Docs*, *Google Agenda*, etc. Enfin, Google possède le système d'opération *open-source Android* présent sur une majorité de smartphones et dont le service *Google Play* propose un vaste choix d'applications téléchargeables.

Afin de stocker et traiter cette immense quantité de données, Google possède et exploite quinze centres de données dans le monde contenant chacun plusieurs centaines de milliers de serveurs fonctionnant de manière constante (Google, 2019).

Amazon : L'entreprise fondée par Jeff Bezos en 1994 était au début de ses activités une société de vente en ligne de livres, musiques, d'appareils électroniques et autres produits (Hall, M., 2020). C'est en 2002 qu'Amazon décide de lancer l'*Amazon Web Services (AWS)*, un service *Cloud* qui permet à ses utilisateurs de stocker des données et d'utiliser les ressources informatiques d'Amazon pour les traiter. L'objectif principal de ce service est de populariser l'idée que chaque entreprise ou particulier ne doit pas forcément posséder lui-même ces ressources informatiques pour en bénéficier des avantages, il peut simplement les louer « dans le *Cloud* » (Hall, M., 2020). En plus des services proposés concernant le stockage et d'analyse de données, *AWS* propose aussi des services d'intégration d'applications, des outils intelligents de gestion de budgets, de *machine learning*, d'outils pour les développeurs et bien d'autres (Amazon., s. d.). Afin de rendre son service *Cloud* le plus performant et réactif que possible, Amazon s'appuie sur 116 centres de données dans le monde. Ce nombre comprend les centres de données possédés par l'entreprise Amazon mais également ceux qu'elle exploite en colocation avec d'autres entreprises¹¹.

Facebook : La société américaine fondée en 2004 par Mark Zuckerberg, Eduardo Saverin, Dustin Moskovitz et Chris Hughes est devenue le réseau social le plus utilisé au monde avec environ 2,5 milliards d'utilisateurs en 2019 (Hall, M., 2019) (Statista, 2020a). Sur cette plateforme sociale, les utilisateurs peuvent publier des photos, des vidéos et des articles sur leur profil en plus d'envoyer des messages à leurs amis. De plus, Facebook encourage les développeurs de programmes à utiliser son service : en 2006, Facebook a développé une interface de programmation d'applications (*application programming interface* ou *API*) pour que les programmeurs puissent développer des applications (majoritairement des jeux) disponibles et utilisables instantanément sur la plateforme en ligne (Hall, M., 2019). Enfin, Facebook a aussi développé son propre système de vente en ligne pour les particuliers : *Marketwatch*. Afin de stocker et traiter toute cette masse de données générées par ses utilisateurs, Facebook possède quinze centres de données dans le monde (Peterson R., 2019).

Apple : L'entreprise fondée le 1^{er} avril 1976 par Steve Jobs et Stephen Wozniak a commencé à se développer grâce à la vente de micro-ordinateurs ainsi que d'ordinateurs personnels (Levy, 2020). La société fut la première à développer une interface graphique pour l'utilisateur (*graphical user interface* ou *GUI*) qui comprend un écran, un outil de sélection (la souris) et l'utilisation d'icônes ou d'images. En 2001, Apple a lancé *iTunes*, un programme informatique

¹¹ Les différents types de centres de données seront étudiés plus en détails dans la partie 2 de ce chapitre.

permettant d'écouter et d'acheter des morceaux de musique en format digital pour être joués sur n'importe quel appareil numérique connecté au même compte *iTunes* (Levy, 2020). Durant la même année, Apple a commencé à vendre l'*iPod*, un lecteur portable MP3, qui devint rapidement le plus vendu du marché. Mais le produit le plus emblématique de la société, l'*iPhone*, fut lancé en 2007 : ce téléphone portable tactile possédait toutes les caractéristiques des téléphones portables de l'époque avec en plus la possibilité d'écouter de la musique, de regarder des vidéos et de se connecter à Internet (Levy, 2020). Au fil du temps, la gamme *iPhone* a évolué et reste aujourd'hui encore un des leaders du marché des smartphones grâce à ses technologies performantes et son design particulier. De plus, Apple a continué à lancer de nouveaux appareils innovants tels que les tablettes *iPad* ainsi que les montres connectées *Apple Watch* (Levy, 2020).

Pour les services *Cloud*, Apple a introduit en 2011 *iCloud*, un service informatique dématérialisé dans lequel chaque application, photographie, document, événement et titre de musique est stocké et automatiquement synchronisé sur tous les autres appareils Apple de l'utilisateur (Levy, 2020). L'objectif étant à nouveau de proposer un lieu de stockage en ligne pour les clients d'Apple. Pour cela, Apple possédait en 2019 cinq centres de données situés en Amérique du Nord, en Europe et en Asie (Apple, 2019).

Microsoft : Cette entreprise spécialisée dans le domaine du numérique a été fondée en 1976 par Bill Gates et Paul Allen (Zachary & ; Hall, 2020). Microsoft Corporation est devenue au fil des années un leader dans les logiciels et systèmes d'exploitation pour ordinateurs ainsi que dans la vente d'appareils numériques tels que des périphériques pour ordinateurs, des systèmes de jeux électroniques (*Xbox*) et le service d'email *Outlook*. De plus, Microsoft a aussi développé des services *Cloud* tels que *Microsoft Azure* qui permet aux développeurs et autres entreprises de construire des infrastructures informatiques en ligne et ensuite proposer leurs services aux utilisateurs. Microsoft a aussi lancé la suite *Office 365*, une version *Cloud* de sa célèbre série de programmes Office (incluant *Word*, *Excel*, *PowerPoint* et *Access*) afin d'être compétitif face à la série de services inclus dans *G Suite* de Google (Zachary & ; Hall, 2020). Microsoft est aussi très présent dans le domaine des télécommunications comme le montre l'acquisition de la société Skype en 2011 et le développement du programme *Microsoft Teams* (Zachary & ; Hall, 2020). Pour assurer un service de qualité à ses utilisateurs dans plus de 140 pays, Microsoft dirige plus de cent centres de données en colocation avec d'autres entreprises (Microsoft, 2019).

4.2 Présentation d'un centre de données

Après avoir présenté les différentes entreprises qui s'appuient principalement sur les centres de données pour offrir leurs services aux utilisateurs, nous présentons en détails dans cette section la structure basique d'un centre de données ainsi que ses quelques variantes en précisant les spécificités de chacune.

D'après Cisco (2019), la structure de base d'un centre de données est constituée de routeurs, pare-feux, systèmes de stockage, serveurs et de dispositifs effectuant les tâches comme celles effectuées par les sites web pour éliminer la charge de travail des serveurs web. Assemblés, ils fournissent :

- Une infrastructure réseau : afin de connecter les serveurs physiques et virtuels ainsi que les équipements de stockage aux utilisateurs ;
- Une infrastructure de stockage : les données sont le carburant des centres de données modernes : leur stockage est donc une des fonctions les plus importantes d'un centre de données ;
- Des ressources informatiques : les applications sont le moteur d'un centre de données : les serveurs s'y trouvant fournissent la puissance de traitement, la capacité de stockage et la connectivité du réseau nécessaires au bon fonctionnement de ces applications.

Malgré le fait que nous ayons précédemment donné la définition générale d'un centre de données dans la partie 1 de ce travail, celle-ci ne permet pas encore de comprendre réellement l'origine des impacts environnementaux d'un centre de données. Ainsi, la définition donnée par Balodis et Opmane (2012, cité par Abdur, 2019, p.33) renseigne davantage sur la pollution engendrée par un centre de données : *« un centre de données est un environnement physique destiné à héberger les systèmes informatiques, les composants associés et le personnel qui s'en occupe. L'infrastructure comprend les réserves d'énergie permettant d'avoir une source d'électricité de secours, les équipements de réseaux, de refroidissement et de ventilation nécessaires pour assurer la redondance, un système anti-incendie et des appareils de sécurité ».*

De cette définition découle le concept de redondance qui lui-même est intrinsèquement lié à la fiabilité du centre de données. Les experts parlent de niveau de redondance pour décrire le fait que certains centres de données possèdent des équipements (serveurs, outils de calculs, systèmes d'alimentation et de refroidissement) en doublons pour augmenter le taux de disponibilité du système en cas de panne ou d'erreur (Gyarmathy, 2019).

Généralement, les centres de données sont utilisés pour stocker et traiter les données considérées comme sensibles ou importantes, tels que les emails et bases de données des entreprises ou du gouvernement. Par conséquent, la fiabilité, c'est-à-dire la capacité des serveurs à fonctionner correctement de manière constante et à ne perdre aucune donnée, est une priorité pour les centres de données (Yuventi & ; Mehdizadeh, 2013, p. 91). Cette fiabilité est liée non seulement aux serveurs mais aussi à l'infrastructure du centre de données, qui comprend le système de distribution du courant électrique ainsi que les systèmes de ventilation et de refroidissement.

C'est pour cela que l'environnement physique d'un centre de données est rigoureusement contrôlé : l'air conditionné est utilisé pour contrôler la température et l'humidité dans le bâtiment. De plus, les facteurs comme la chaleur, l'humidité, le flux d'air et la fumée peuvent avoir des conséquences graves sur les serveurs et les équipements informatiques (ITWatchDogs, 2011 cité par Abdur, 2019, p. 36). Étant donné que les serveurs sont moins susceptibles de subir des pannes lorsqu'ils fonctionnent en-dessous d'une certaine température et qu'ils peuvent générer de grandes quantités de chaleur, les centres de données sont équipés de systèmes de refroidissement puissants (Yuventi & ; Mehdizadeh, 2013, p. 91).

C'est pour cette raison qu'en plus d'avoir des systèmes de traitement de données redondants, la majorité des centres de données utilisent des systèmes de distribution du courant électrique dupliqués comme les réserves d'énergie *UPS (Uninterrupted Power Supply)* et les systèmes de refroidissement spécialisés afin de minimiser la probabilité d'erreurs et de pannes des serveurs (Yuventi & ; Mehdizadeh, 2013, p. 91).

Les serveurs requièrent donc un approvisionnement continu en électricité : si le réseau électrique national est en panne, une série de batteries assure le bon fonctionnement des opérations le temps que les générateurs internes démarrent. De plus, une connexion additionnelle avec une sous-station d'électricité locale peut aussi être établie afin d'assurer une alimentation ininterrompue de courant (Jochim 2017, cité par Abdur, 2019, p. 36).

Naturellement, assurer la fiabilité du centre de données grâce à la redondance des équipements et l'utilisation d'appareils *UPS* augmente la consommation électrique des centres de données. Sans compter que les opérateurs de centres de données essaient au maximum d'optimiser l'utilisation de l'espace en maximisant le nombre de serveurs installés dans le bâtiment. En conséquence, les centres de données peuvent avoir des consommations parfois plus élevées que 1.080 W/m² en comparaison de la consommation de 75 à 108 W/m² typique des bâtiments de bureau (Yuventi & ; Mehdizadeh, 2013, p. 91).

Afin d'évaluer la qualité et la fiabilité d'un centre de données, la norme *ANSI/TIA-942* a été créée avec certains critères par l'*Uptime Institute*¹²(Cisco, 2019). C'est la norme la plus largement employée qui certifie et classe les centres de données en quatre catégories selon leurs niveaux de redondance et de tolérance aux erreurs et aux pannes. En effet, les quatre niveaux que l'organisation a mis en place permettent de classer les centres de données selon leur taux de disponibilité qui mesure le pourcentage de temps durant lequel le centre de données effectue ses opérations sur une année : au plus le niveau de redondance du centre de données est élevé, au plus son taux de disponibilité est élevé (Abdur, 2019, p. 35).

¹² L'*Uptime Institute* (<https://uptimeinstitute.com>) est l'organe mondial accordant les certifications le plus fiable et le plus répandu dans l'industrie informatique pour la conception, la construction et l'exploitation des centres de données.

Tableau 2 : Niveaux de centres de données selon l'Uptime Institut.

Niveau	Critères	Taux de disponibilité	Usage
1	<ul style="list-style-type: none"> • Voie de distribution du courant unique et non redondante pour servir l'équipement informatique ; • Composants non redondants ; • Infrastructure basique ; • Interruption annuelle des activités de 28,8 heures ; 	99,671%	Utilisé par les petites entreprises
2	<ul style="list-style-type: none"> • Remplit ou dépasse tous les critères du niveau 1 ; • Infrastructures à composants redondants ; • Redondance partielle en ce qui concerne le système d'alimentation et de refroidissement ; • Interruption annuelle des activités de 22 heures ; 	99,741%	Utilisé par les entreprises moyennes
3	<ul style="list-style-type: none"> • Remplit ou dépasse tous les critères du niveau 2 ; • Voies de distribution du courant multiples et indépendantes alimentant les équipements informatiques ; • Tous les équipements informatiques doivent être alimentés par deux sources d'électricité distinctes et entièrement compatibles avec la topologie de l'architecture du site ; • Pas plus de 1,6 heures d'interruption annuelle des activités ; • Infrastructure tolérante aux pannes de type N+1 fournissant une protection de 72 heures en cas de panne ;¹³ 	99,982%	Utilisé par les grandes entreprises
4	<ul style="list-style-type: none"> • Remplit ou dépasse tous les critères du niveau 3 ; • Tout l'équipement de refroidissement est alimenté par deux sources distinctes ; • Infrastructure tolérante aux pannes et erreurs ; • Infrastructure entièrement redondante de type 2N+1 ;¹⁴ • Interruption annuelle des activités de 0,4 heures ; 	99,995%	Utilisé par les grandes multinationales

Source : Uptime Institute cité par Abdur, 2019, p. 35.

¹³ Une architecture de type N+1 est une architecture dans laquelle chaque composant (N) a au moins un composant indépendant de secours (+1) qui assure la disponibilité du système en cas de panne ou d'erreur. (Gyarmathy, 2019).

¹⁴ Une architecture de type 2N+1 fournit un système entier de secours parallèle en plus des composants additionnels présents en cas de panne. C'est le niveau le plus élevé de redondance. Il y a donc deux composants principaux (2N) identiques, fonctionnant de manière constante, accompagnés d'un composant additionnel de secours (+1) en cas de panne. Elle constitue la différence principale entre les niveaux 3 et 4 (Gyarmathy, 2019).

En plus des niveaux de centres de données, il existe de nombreux types de centres de données dépendant du fait qu'ils soient possédés par une ou plusieurs organisations et du type de technologies qui y sont utilisées pour le traitement et le stockage des données. Il y a quatre grandes catégories de centres de données (Cisco, 2019) :

- Les centres de données « entreprises » qui sont construits, possédés et dirigés par les sociétés et sont spécialement optimisés pour les services offerts aux consommateurs. Ils sont généralement construits directement sur le site de l'entreprise. Cette catégorie comprend aussi les centres de données appartenant aux laboratoires nationaux ;
- Les centres de données « services » qui sont gérés par une tierce partie pour le compte d'une entreprise : la société loue l'équipement et l'infrastructure au lieu de l'acheter et une autre société s'assure de son bon fonctionnement ;
- Les centres de données « colocation » dans lesquels les entreprises louent une surface dans un centre de données possédé par une ou plusieurs autres entreprises. Le centre de donnée fournit l'infrastructure requise (le bâtiment, le système de refroidissement, la sécurité, etc.) tandis que la société loueuse apporte et gère les composants tels que les serveurs, les appareils de stockage et les pare-feux ;
- Les centres de données « cloud » qui sont situés hors sites et où les données et applications sont hébergées par un fournisseur de services cloud tel que *Amazon Web Services (AWS)* ou *Microsoft Azure*.

4.3 La pollution d'un centre de données

Les centres de données consomment donc énormément d'électricité pour exercer leurs activités et assurer leur fiabilité comme expliqué au point précédent. Cette consommation a de lourds impacts sur l'environnement car elle génère d'énormes quantités d'émissions de carbone lors de la génération de l'électricité. De plus, les centres de données consomment aussi de très grandes quantités d'eau utilisées pour refroidir les salles où sont disposés les serveurs via différents systèmes comme les techniques de refroidissement par évaporation d'eau que nous aborderons au point 4.8.

Nous allons désormais nous pencher sur la part de l'impact environnemental du système numérique mondial relative aux centres de données. Dans ce but, nous différencions deux grandes phases :

- La phase de fabrication qui désigne l'utilisation d'une matière première ou énergie pour la conception, la fabrication et l'assemblage des appareils et équipements présents dans les centres de données ;
- La phase d'utilisation qui désigne la consommation d'une matière ou énergie première pour réaliser les opérations des centres de données.

Selon le rapport réalisé par Bordage F. et GreenIT.fr (2019) et comme expliqué précédemment au point 2.1, en 2019 :

- 17% de l'énergie primaire totale consommée par le système numérique mondial était consommée par les centres de données, ce qui correspond à 1.156 TWh. Parmi ces 17%, 88% sont relatifs à l'utilisation du centre de données : en d'autres termes, 88% de la consommation d'énergie primaire des centres de données est issue de la production d'électricité nécessaire aux opérations et au refroidissement des salles de serveurs. Les 12% restants sont relatifs à la consommation d'énergie primaire relative à la production des appareils et équipements présents sur le site ;
- 15% des émissions GES totales engendrées par le système numérique mondial concernent les centres de données, c'est-à-dire l'équivalent de 210 millions de tonnes de CO₂. Parmi ces 15%, 93% sont relatifs à l'utilisation des centres de données et donc la production d'électricité nécessaire pour leurs opérations. Les 7% restants sont relatifs aux émissions de GES provoquées par la fabrication des appareils et équipements des centres de données ;
- 7% de la consommation totale d'eau douce du système numérique mondial concerne les centres de données, c'est l'équivalent de 546.000 mètres cube d'eau douce, parmi lesquels 86% sont relatifs à l'utilisation de l'eau pour les systèmes de refroidissement et les opérations du centre de données. Les 14% restants concernent l'utilisation de l'eau lors de la fabrication des équipements et appareils des centres de données ;

- En ce qui concerne la consommation électrique totale des centres de données dans le monde, elle s'élève, comme dit précédemment dans la partie 1 au point 2.1, à 24% de la consommation électrique totale du système numérique mondial pour les phases de fabrication et d'utilisation. Cela correspond à 312 TWh d'électricité ;
- Enfin, lorsque nous nous penchons sur l'épuisement des ressources abiotiques (hors énergie fossile), les centres de données sont responsables de 8% de l'épuisement de ces ressources par le système numérique mondial. Ces 8% ne concernent que la phase de fabrication des appareils et équipements utilisés dans le centre de données.

Afin de clarifier au mieux pour le lecteur, voici un tableau récapitulatif de l'impact des centres de données par rapport au système numérique mondial dans son ensemble, selon l'indicateur de pollution étudié et la phase de vie considérée :

Tableau 3 : Répartition de l'impact environnemental des centres données en 2019.

Indicateur	Phase de fabrication (pourcentage de l'impact global)	Phase d'utilisation (pourcentage de l'impact global)	Total (pourcentage de l'impact global)
Énergie primaire	2% (136 TWh)	15% (1.020 TWh)	17% (1.156 TWh)
Émissions GES	1% (14 MtCO ₂ eq)	14% (196 MtCO ₂ eq)	15% (210 MtCO ₂ eq)
Consommation d'eau	1% (78.000 m ³)	6% (468.000 m ³)	7% (546.000 m ³)
Consommation électrique		24%	24% (312 TWh)
Épuisement ressources	8%	-	8%

Source : Bordage F. et GreenIT.fr, 2019.

La concentration des impacts écologiques d'un centre de données varie donc selon l'indicateur observé : pour les indicateurs tels que les émissions de GES, la consommation d'énergie primaire, la consommation d'eau douce et la consommation électrique, c'est la phase d'utilisation qui concentre la majorité des impacts.

En revanche, lorsque nous observons l'épuisement des ressources abiotiques, c'est la phase de fabrication des appareils et équipements du centre de données qui concentre les impacts.

Nous pouvons donc raisonnablement conclure que les opérations effectuées dans les centres de données sont à l'origine de la majorité des impacts provoqués par ceux-ci. En d'autres termes, leur phase d'utilisation concentre la majorité des impacts. Mais est-il possible de réduire l'impact de cette phase du cycle de vie en, par exemple, n'utilisant que de l'électricité générée à partir d'énergies renouvelables, comme le clament certaines entreprises ? Comment évaluer les centres de données entre eux selon leur efficacité énergétique ? Et surtout : que font les GAFAM, qui possèdent et/ou utilisent des dizaines de centres de données, pour réduire leurs impacts sur l'environnement ? Nous allons tenter d'y répondre de la manière la plus complète possible.

4.4 L'efficacité énergétique d'un centre de données

La pollution issue d'un centre de données étant expliquée à la section précédente, nous allons maintenant nous pencher sur la manière d'évaluer les centres de données selon leur consommation énergétique.

Afin d'évaluer l'efficacité énergétique d'un centre de données et pouvoir les comparer entre eux, l'industrie des centres de données a adopté la mesure *PUE* (*Power Utilization Effectiveness*) qui est la mesure la plus fréquemment utilisée et qui représente le ratio entre la consommation d'électricité totale de l'installation entière comme par exemple l'électricité consommée par les systèmes de refroidissement et de distribution du courant et la consommation d'électricité de l'équipement informatique présent dans le centre de données comme les serveurs appelée aussi travail utile (Averal *et al.*, 2012 cité par Van de Voort, Zavrel, Galdiz, & ; Hensen, 2017, p. 6).

$$PUE = \frac{\text{Consommation d'électricité totale du centre de données}}{\text{Consommation d'électricité totale de l'équipement informatique}} ; 1 \leq PUE$$

Cette mesure n'a pas d'unité mais renseigne sur la proportion d'électricité qui est réellement consommée pour effectuer les opérations d'un centre de données : par exemple, un PUE égal à 1 signifie que toute l'électricité consommée par le centre de données est utilisée pour les

opérations de stockage et de traitement des données. Par contre, un PUE égal à 2 signifie que pour chaque watt consommé par l'équipement informatique, un watt additionnel est consommé pour refroidir cet équipement et y acheminer l'électricité via les systèmes de distribution du courant. Par conséquent, la valeur optimale pour le PUE est de 1, la valeur maximale est l'infini (Van de Voort, Zavrel, Galdiz, & ; Hensen, 2017, p. 6).

Tableau 4 : PUE moyen des centres de données des GAFAM en 2018 et 2019.

PUE	Google	Amazon	Facebook	Apple	Microsoft	Moyenne industrie
	1,11	1,2	1,11	1,11	1,125	1,67

Source: Google (2019), Amazon (2019), Facebook (2020), Apple (2019), Microsoft (2019) et Uptime Institute Intelligence (2019).

Nous observons dans ce tableau que, selon les rapports environnementaux et communiqués de presse des GAFAM, les meilleurs élèves en termes d'efficacité énergétique pour les centres de données sont Google, Facebook et Apple suivis de très près par Microsoft. L'entreprise Amazon finit dernière de ce classement. Même si le reste de l'industrie fait nettement moins bien en moyenne que les GAFAM, il est nécessaire de souligner les efforts qui ont été mis en place : le PUE moyen de l'industrie était de 1,8 en 2011 (Uptime Institute Intelligence, 2019).

Il est à noter que les plus grands progrès en termes de gains d'efficacité énergétique ont eu lieu ces 5 à 6 dernières années, selon l'analyse du PUE moyen de l'industrie au cours des années. En ce qui concerne Google, des progrès ont aussi été réalisés car le PUE moyen de ses centres de données s'élevait en 2017 à 1,12 (Google, 2019). Cela signifie que chaque amélioration de l'efficacité requiert toujours plus d'investissements et d'efforts avec des rendements toujours plus faibles. De plus, la densité en kilowatts des racks contenant les serveurs augmente au fil des années car l'utilisation de services numériques augmente toujours plus, ce qui signifie que la consommation électrique des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) augmente aussi à moins d'innover en la matière, comme nous le verrons plus tard dans cette section (Uptime Institute Intelligence, 2019).

En outre, les GAFAM, qui ont généralement plus de moyens financiers et dont les centres de données sont le fer de lance de leurs activités, sont donc naturellement les leaders en termes d'efficacité énergétique.

Ensuite, la publication des *PUE* par les GAFAM dans leurs rapports environnementaux leur permet d'améliorer leur image auprès du grand public qui pointe souvent du doigt, à l'instar des médias, les grands centres de données comme principaux responsables de la pollution du numérique. De plus, une consommation électrique optimisée engendre des coûts réduits, permettant de générer plus de bénéfices.

Les GAFAM ont donc sûrement un rôle à jouer en montrant l'exemple au reste de l'industrie afin de rendre tous les centres de données de la planète toujours plus efficaces en matière de consommation électrique. Pour rappel, la consommation électrique et l'épuisement des énergies primaires sont les deux plus grands impacts que les centres de données ont sur l'environnement. Par conséquent, rendre ces infrastructures moins énergivores permettrait de réduire de manière considérable leur impact environnemental.

4.5 Les avantages du *PUE*

L'efficacité énergétique totale d'un centre de données se mesure en fonction du travail utile presté par unité d'énergie comme vu précédemment avec la notion de *PUE*. Mais comme les centres de données ne réalisent pas tous les mêmes tâches, le travail utile est difficile à mesurer et à comparer. Par conséquent, le *PUE* a gagné en popularité : il représente en effet l'efficacité énergétique d'un centre de données, mais sans avoir à déterminer le travail utile réalisé, puisqu'il est défini par *le ratio* entre l'énergie totale consommée par le centre de données et l'énergie consommée pour réaliser le travail utile. Son utilisation permet de quantifier ce que les experts considèrent comme des pertes d'énergie, c'est-à-dire l'énergie consommée par le centre de données qui n'est pas utilisée à la réalisation du travail utile, comme par exemple la consommation électrique des systèmes CVC (Van de Voort, Zavrel, Galdiz, & ; Hensen, 2017, p. 7).

En résumé, la simplicité du *PUE* et son accent sur l'efficacité des centres de données ont fait que l'industrie a très vite adopté cette mesure. La question maintenant est de savoir si elle est toujours capable de pousser les entreprises à améliorer leur efficacité énergétique. En effet, le *PUE* ne renseigne aucunement sur l'efficacité énergétique du matériel informatique présent dans le centre de données ni sur sa consommation d'eau...

Cela peut mener à une mauvaise utilisation du *PUE* : les entreprises risquent de faire des efforts pour améliorer la valeur de ses *PUE* au lieu de réduire sa consommation énergétique globale (Van de Voort, Zavrel, Galdiz, & ; Hensen, 2017, p. 6).

4.6 Les limites du *PUE*

Malgré le fait que le *PUE* soit un indicateur très utile pour comparer l'efficacité énergétique des centres de données, il reste néanmoins très limité et ce pour différentes raisons :

- Manque de règles strictes lors de son calcul

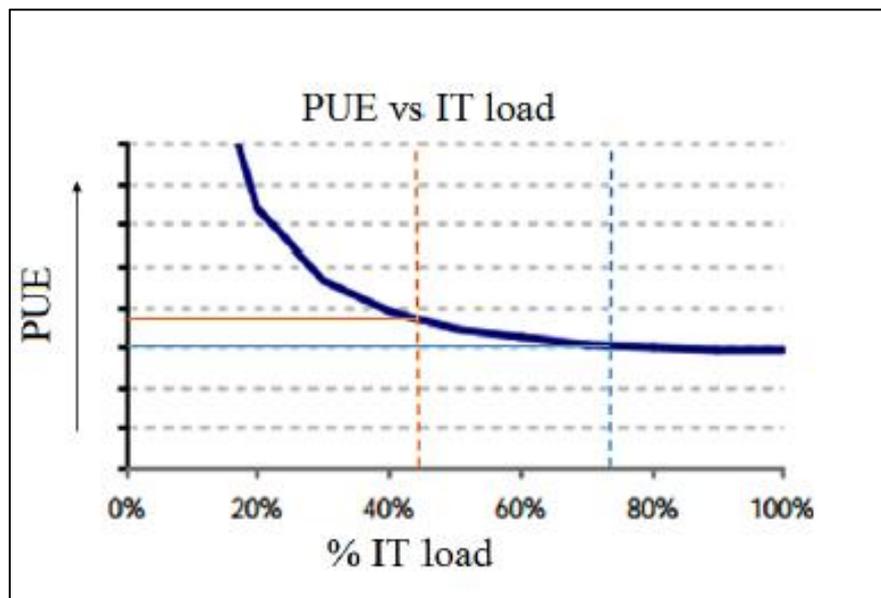
Il y a un réel manque de règles quant à l'origine des valeurs utilisées lors du calcul du *PUE* qui a pour conséquence que certains opérateurs des centres de données n'utilisent plus le *PUE* comme un outil visant à réduire les pertes d'énergie mais comme un indicateur dont il faut absolument améliorer la valeur par tous les moyens possibles (Van de Voort, Zavrel, Galdiz, & ; Hensen, 2017, p. 7). Ce manque de règles lors du calcul du *PUE* mène à une incohérence lors de la détermination des composants inclus dans la consommation totale d'électricité du centre (le numérateur). Par conséquent, certains opérateurs considèrent que celui-ci représente l'électricité dite « utile » entrant dans le centre de données et permettant le fonctionnement continu des serveurs. En se basant sur cette perspective, les systèmes d'éclairage, de sécurité ou même certains appareils qui ne sont pas toujours requis pour le refroidissement des salles de serveurs peuvent ne pas être pris en compte lors du calcul du numérateur. Il en résulte que le *PUE* ne reflète plus la performance énergétique réelle du centre (Yuventi & ; Mehdizadeh, 2013, p. 92).

- Aucune considération du régime d'utilisation des appareils

Les calculs des *PUE* peuvent aussi être faussés si les opérateurs ne tiennent pas compte de certaines considérations techniques des appareils informatiques comme leurs régimes de travail : ils utilisent généralement les caractéristiques à plein régime de ces composants pour déterminer leur efficacité. Pourtant, ces appareils sont conçus pour les pires conditions de travail, c'est-à-dire les pics d'utilisation, ce qui fait qu'ils sont souvent surdimensionnés et ne travaillent donc quasiment jamais au maximum de leurs capacités (Yuventi & ; Mehdizadeh, 2013, p. 93).

Dans de telles conditions, l'efficacité de ces appareils a tendance à diminuer en-dessous de leurs caractéristiques à plein régime. Par conséquent, les estimations des ingénieurs ont tendance à exagérer l'efficacité énergétique des centres de données ce qui mène à des valeurs du *PUE* plus basses que la réalité. Comme illustré sur la figure 1, les valeurs du *PUE* d'un centre de données varient selon la charge de travail de l'équipement informatique (Green Grid, 2012 cité par Van de Voort, Zavrel, Galdiz, & ; Hensen, 2017, p. 9) et sont donc meilleures en période de plein régime (Van de Voort, Zavrel, Galdiz, & ; Hensen, 2017, p. 9).

Figure 1 : Relation entre le PUE et le régime de travail (IT load) de l'équipement informatique.



Source : Bisci (2009) cité par Van de Voort, Zavrel, Galdiz, & ; Hensen, (2017), p. 9.

- Le *PUE* ne concerne que la consommation électrique

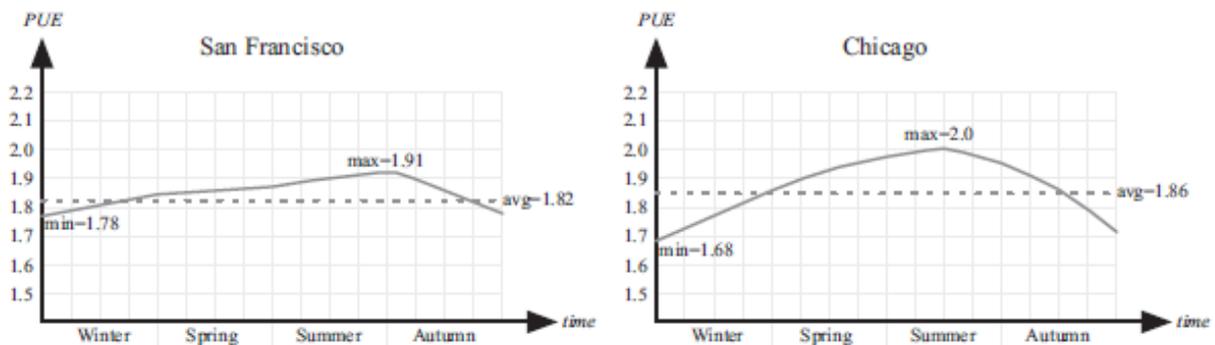
La plus grande faiblesse du *PUE* réside dans le fait que c'est une mesure de la consommation électrique et non de l'énergie totale consommée par le centre de données (Yuventi & ; Mehdizadeh, 2013, p. 93). En effet, le *PUE* ne tient pas compte de la consommation des autres ressources telles que l'eau utilisée pour le refroidissement. Pourtant l'impact de cette consommation est bien réel, en particulier si l'eau utilisée est traitée. Le type de source d'énergie n'est pas considérée non plus : l'électricité générée par des panneaux photovoltaïques est traitée de la même façon que l'électricité issue d'une centrale à charbon. Par conséquent, inclure l'impact écologique de la source d'énergie permettrait de mieux évaluer l'efficacité énergétique d'un centre de données (Van de Voort, Zavrel, Galdiz, & ; Hensen, 2017, p. 8).

- Le *PUE* ne prend pas en compte la situation géographique du centre de données

Par définition, le *PUE* représente l'efficacité énergétique d'un centre de donnée à un moment spécifique dans le temps. Pourtant, les caractéristiques d'alimentation de ces infrastructures sont susceptibles de changer selon certains facteurs environnementaux, comme la variation de température ambiante. Par conséquent, l'efficacité énergétique d'un centre de données est une fonction de la température et par association une fonction du temps lorsque l'on considère le changement climatique. En effet, le *PUE* d'un centre de données varie selon le moment de la journée et le moment de l'année, particulièrement dans les zones climatiques ayant des variations de températures extrêmes quotidiennes ou annuelles (Yuventi & ; Mehdizadeh, 2013, p. 93).

Prenons l'exemple de deux centres de données identiques construits dans le même pays mais situés pour le premier dans une zone où le climat est tempéré comme San Francisco et pour le deuxième dans une zone où les hivers sont plus froids et les étés plus chauds comme Chicago. La figure 2 illustre les valeurs potentielles du *PUE* pour ces deux centres de données évalué sur une année.

Figure 2: Évolution du *PUE* selon la période de l'année de deux centres de données situés à San Francisco et Chicago.



Source : Yuventi & ; Mehdizadeh, (2013), p. 93.

En supposant que ces deux centres de données essaient de tirer avantage de l'air environnant via la technique du *free cooling* qui sera expliquée dans le point consacré aux actions prises par les GAFAM, le centre de Chicago a un avantage lors du calcul de son *PUE* en hiver car sa consommation électrique destinée au refroidissement est réduite. Néanmoins, en été, les systèmes CVC du centre de Chicago devront fonctionner plus intensément pour refroidir le site à cause de la température extérieure élevée (Yuventi & ; Mehdizadeh, 2013, p. 93).

Alors que l'impact de la localisation d'un centre de données sur le *PUE* est bien connu de la communauté scientifique, le problème réside dans les rapports publiés par les entreprises : leurs opérateurs de centres de données ont tendance à donner le *PUE* le plus bas observé ou estimé au cours d'une période ou d'un cycle de vie d'une installation. Pour revenir à la figure 2, cela signifie que les valeurs de 1,78 et 1,68 sont les plus susceptibles d'être communiquées, suggérant que le centre de données de Chicago est plus efficace énergétiquement. Pourtant, cette conclusion est incorrecte : le centre de données de Chicago a un *PUE* moyen annuel plus élevé (1,86 pour Chicago contre 1,82 pour San Francisco), ce qui implique qu'il est moins efficace énergétiquement (Yuventi & ; Mehdizadeh, 2013, p. 93).

Afin d'ajuster le *PUE* pour le rendre plus complet, il faudrait réguler le contenu des rapports environnementaux des entreprises comme par exemple imposer aux sociétés de publier un *PUE* moyen sur une période significative (un *PUE* annuel) pour tenir compte des changements saisonniers (Yuventi & ; Mehdizadeh, 2013, p. 93).

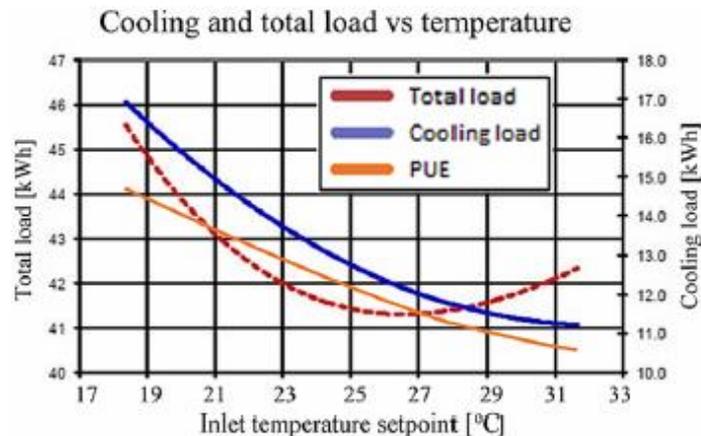
- Le *PUE* ne donne aucun renseignement sur la consommation électrique en elle-même

Des entreprises comme Google peuvent avoir de très bonnes valeurs pour le *PUE* de ses centres de données mais pourtant avoir les centres de données qui consomment le plus d'électricité dans le monde. Dès lors, à moins que ces centres ne soient alimentés exclusivement par des sources d'énergie renouvelable, l'impact de la production d'électricité n'est pas négligeable malgré le fait que les centres de données soient efficaces. Par exemple, le *PUE* moyen de l'industrie était de 1,67 en 2019 mais il ne renseigne pas sur le fait que la même année 53% des centres de données consommaient 1 mégawatt (MW) ou plus par an (Uptime Institute Intelligence, 2019). En ce qui concerne Google, dévoiler seulement son *PUE* de 1,11 n'indique en aucun cas que la consommation électrique totale des centres de données de l'entreprise s'élevait à 89 millions de mégawattheures (Google, 2019) ce qui correspond à regarder la télévision entre environ 30.000 et 50.000 années, selon la taille de l'écran. (EDF, 2018)

De plus, il existe des stratégies permettant de réduire le *PUE* sans réduire la consommation électrique : lorsque la température de refroidissement fixée par les opérateurs des centres de données augmente, le *PUE* ne reflète pas la performance réelle car cela mène à une diminution de l'électricité consommée par le système de refroidissement mais aussi à une augmentation de l'électricité consommée par l'équipement informatique. En effet, leurs ventilateurs doivent accélérer et donc intensifier leur travail pour baisser la température des serveurs.

Par conséquent, le *PUE* s'améliore mais la consommation d'électricité totale peut être inchangée ou même augmentée. Cet effet est illustré sur la figure 3.

Figure 3: Relation entre la température de refroidissement, la charge électrique totale et la charge électrique de l'équipement informatique.



Source : Van de Voort, Zavrel, Galdiz, & ; Hensen, 2017, p. 8.

En conclusion, rester dans les limites d'analyse du PUE devient très difficile malgré les efforts constants mis en place pour améliorer l'efficacité énergétique des centres de données.

Bien que les normes d'énergie pour les bâtiments aient été des leviers efficaces pour encourager l'efficacité énergétique, ils peuvent être inefficaces lorsqu'il s'agit d'inculquer un comportement écologiquement responsable. Malheureusement, ces normes sont trop souvent perçues comme des critères techniques à satisfaire et ont donc tendance à limiter l'innovation en termes de réduction de consommation d'énergie. Par conséquent, le besoin d'utiliser de nouvelles mesures de performance énergétique devient urgent afin d'élargir l'étendue de l'évaluation de l'efficacité énergétique et d'encourager encore davantage la réduction globale de la consommation énergétique dans les centres de données.

4.7 Quelques indicateurs de performance énergétique complémentaires au *PUE*

Dans le but de donner une image fidèle et plus complète de l'efficacité énergétique des centres de données et afin de contourner ses limites présentées à la section précédente, de nouveaux indicateurs d'évaluation ont été introduits pour compléter le *PUE*.

Nous présentons dans cette partie trois de ces indicateurs avec leurs valeurs respectives pour chaque GAFAM sur base des données communiquées par les entreprises et de calculs personnels selon la disponibilité des données.

- Évaluer l'impact de la source d'énergie : le *Carbon Usage Effectiveness (CUE)*

Afin de donner un aperçu de la consommation d'énergies fossiles d'un centre de données ainsi que de ses émissions de carbone, l'indicateur *CUE (Carbon Usage Effectiveness)* a été introduit. Il est quasiment identique au *PUE* sauf que le numérateur est multiplié par le *Carbon Emission Factor (CEF)* qui indique la quantité de carbone émise par unité d'énergie (Van de Voort, Zavrel, Galdiz, & ; Hensen, 2017, p. 9).

Le *CUE* est défini comme tel :

$$CUE = \frac{CEF * \text{Consommation d'électricité totale du centre de données}}{\text{Consommation d'électricité totale de l'équipement informatique}} \left[\frac{kgCO_2}{kWh} \right]$$

$$0 \leq CUE$$

Cet indicateur apporte donc plus d'informations à propos de l'empreinte écologique du centre de données : si le centre de données dispose de plusieurs sources d'énergie, comme par exemple une combinaison d'électricité provenant du réseau public et de sources renouvelables *on-site*, la contribution partielle de chaque source doit être considérée. Adopter l'indicateur *CUE* pourrait potentiellement encourager l'industrie entière à choisir des sources d'énergie à faibles impacts, comme les sources renouvelables présentes directement sur le site du centre ou d'origine externe (Van de Voort, Zavrel, Galdiz, & ; Hensen, 2017, p. 9).

Tableau 5 : CUE moyen des centres de données des GAFAM en 2018 et 2019.

<i>CUE</i> (kgCO ₂ /kWh)	Google	Amazon	Facebook	Apple	Microsoft
	0,0549	0,3930	0,0467	-	-

Source : Amazon (2019) et calculs personnels basés sur les données de Google (2019), Facebook (2020) et Apple (2019).

Nous observons dans le tableau ci-dessus que les entreprises Facebook et Google émettent moins de CO₂ par quantité d'électricité consommée dans leurs centres de données qu'Amazon, ce qui semble confirmer leur volonté d'alimenter leurs centres de données avec de l'électricité exclusivement produite à partir d'énergies renouvelables comme indiqué dans leurs rapports environnementaux respectifs (Google, 2019) (Facebook, 2020). Par contre, il semblerait qu'Amazon ait encore de nombreux efforts à faire pour réduire l'impact en émissions de GES de ses centres de données. Dû au manque de données, les *CUE* d'Apple et Microsoft n'ont pu être calculés.

- Évaluer la consommation d'eau : le *Water Usage Effectiveness (WUE)*

Bien que le *PUE* n'en tienne pas compte, la consommation d'eau, qui est principalement utilisée pour le refroidissement des équipements informatiques dans les centres de données, a un impact non négligeable. Afin d'évaluer cet impact, le *Water Usage Effectiveness (WUE)* a été introduit (Green Grid, 2011 cité par Van de Voort, Zavrel, Galdiz, & ; Hensen, 2017, p. 10). Il est défini comme suit :

$$WUE = \frac{\text{Consommation totale d'eau du centre de données}}{\text{Consommation d'électricité totale de l'équipement informatique}} \left[\frac{L}{kWh} \right]$$

$$0 \leq WUE$$

Il y a deux avantages à utiliser l'indicateur *WUE* : premièrement, le *WUE* considère la consommation d'eau ce qui n'est pas le cas du *PUE*. Ensuite, le *WUE* considère non seulement l'eau utilisée par le centre de données lors de ses opérations mais aussi durant la production de l'électricité consommée par le centre de données. En d'autres termes, cet indicateur, comme pour le *CUE*, prend en compte les impacts des opérations des centres de données mais aussi de son processus de production d'électricité, mettant en évidence que l'impact environnemental d'un centre de données ne se résume pas seulement à une phase du cycle de vie (Whitehead, Andrews, Shah, & ; Maidment, 2014, p. 157).

Cette intégration d'impacts depuis la phase de production suit la méthodologie d'analyse de cycle de vie (ACV) que nous présenterons au chapitre suivant. Cette analyse évalue l'impact d'un produit ou service depuis le moment où les matières premières sont extraites jusqu'à la fin de sa vie (mise à l'arrêt ou recyclage).

Tableau 6 : WUE moyen des centres de données des GAFAM en 2018 et 2019.

WUE (L/kWh)	Google	Amazon	Facebook	Apple	Microsoft
	0,20	-	0,27	0,77	-

Source : Facebook (2020) et calculs personnels basés sur les données de Google (2019) et Apple (2019).

À nouveau, Google et Facebook semblent montrer l'exemple en termes de consommation responsable d'eau probablement grâce à leurs techniques mises en place dans leurs centres de données, techniques que nous présenterons brièvement au point suivant. Par contre, Apple semble être à la traîne au niveau de l'optimisation de sa consommation d'eau malgré les actions mises en place par l'entreprise que nous présentons au point suivant. Par manque de données, les WUE d'Amazon et Microsoft n'ont pas pu être calculés.

- La part d'électricité verte utilisée : le *Green Energy Coefficient* (GEC)

Le GEC représente la portion d'électricité verte dans la consommation électrique totale de l'équipement informatique du centre de données. L'électricité verte est l'électricité générée à partir d'une source d'énergie renouvelable comme l'énergie solaire ou éolienne qui sont les sources écologiques d'énergie les plus utilisées dans l'industrie des centres de données (Whitehead, Andrews, Shah, & ; Maidment, 2014, p. 156). Il est calculé comme suit :

$$GEC = \frac{\text{Énergie verte consommée par le centre de données}}{\text{Consommation d'électricité totale de l'équipement informatique}}$$

$$0 \leq GEC \leq 1$$

Le GEC représente donc le pourcentage d'électricité verte utilisé pour les activités des centres de données.

Tableau 7 : GEC moyen des centres de données des GAFAM en 2018 et 2019.

GEC	Google	Amazon	Facebook	Apple	Microsoft
	100%	40%	86%	99,92%	-

Source : Google (2019), Amazon (2019), Facebook (2020) et Apple (2019).

Selon le tableau ci-dessus, Google et Apple semblent être les meilleurs exemples en termes d'utilisation d'électricité verte pour les opérations de leurs centres de données.

Néanmoins, comme nous le verrons au point suivant, il faut considérer ces valeurs avec précaution étant donné que certaines entreprises ont tendance à intégrer leurs compensations carbone (*carbon offsets purchases*), dont nous expliquerons le principe au point suivant, dans le calcul de ce pourcentage. À nouveau, aucune valeur n'est disponible pour Microsoft par suite de manque d'informations communiquées.

4.8 Les actions prises par les GAFAM pour réduire les impacts de leurs centres de données

Nous avons précédemment comparé les GAFAM selon l'efficacité énergétique moyenne de leurs centres de données et allons dans cette section décrire les actions qu'elles mettent en place pour essayer de réduire l'impact écologique de leurs infrastructures informatiques.

En effet, différentes actions ont été mises en place par les GAFAM pour réduire l'impact de leurs centres de données sur l'environnement, nous les classons en trois grandes catégories :

- Une meilleure gestion de l'eau ;
- L'approvisionnement en électricité issue de sources renouvelables ;
- Autres techniques.

a. Une meilleure gestion de l'eau

La gestion de l'eau est un réel enjeu écologique pour notre société et la préserver est devenu une priorité mondiale. L'eau est principalement utilisée dans les centres de données pour le refroidissement des équipements informatiques car c'est un processus moins énergivore que la technique traditionnelle des climatiseurs placés dans les salles de serveurs. En effet, les techniques de refroidissement utilisant de l'eau adoptées par les GAFAM comme le refroidissement par évaporation qui fait évaporer l'eau pour refroidir l'air autour des équipements consomment moins d'énergie mais requièrent par contre plus d'eau. Il y a donc une volonté de la part des opérateurs des centres de données de réduire leur consommation électrique en adoptant l'eau dans leurs opérations. Mais la raison n'est pas seulement écologique : l'eau est moins chère que l'électricité et c'est pour cela que les opérateurs de centres de données vont naturellement utiliser cette dernière (Sattiraju, N., 2020).

Il existe donc un véritable compromis entre l'utilisation d'eau et l'utilisation d'énergie selon les experts en centres de données : « *Si la consommation d'eau baisse, la consommation en énergie augmente et vice-versa* » déclare Otto Van Geet, ingénieur au Laboratoire National des Énergies Renouvelables (Sattiraju, N., 2020). En effet, bien que la technique de refroidissement par évaporation soit moins gourmande en électricité, elle consomme en revanche plus d'eau que les climatiseurs traditionnels : le *PUE* du centre est certes amélioré mais, comme expliqué précédemment, ne reflète pas cette augmentation d'utilisation de l'eau. De plus, les GAFAM placent très souvent leurs centres de données proches des centres urbains importants pour rendre leurs services encore plus réactifs et plus rapides. Par contre, cela signifie que le bâtiment est parfois construit dans une région chaude et/ou aride et par conséquent les unités de traitement chauffent plus facilement et requièrent donc plus d'eau pour leur refroidissement (Sattiraju, N., 2020).

Cependant, les GAFAM adoptent de plus en plus de nouvelles manières de limiter cette consommation. Par exemple, Google déclare porter plus d'attention sur la réduction de sa consommation en eau : l'entreprise utilise de l'eau recyclée, non potable ou de mer là où c'est possible afin d'éviter d'utiliser de l'eau potable ou de vider les réservoirs publics locaux. En d'autres termes, Google essaye au maximum de tirer avantage de l'environnement où se situent ses centres de données, comme par exemple en Irlande où le centre de données utilise l'air froid environnant pour refroidir ses équipements informatiques (Google, 2019). En outre, l'eau serait réutilisée plusieurs fois par les systèmes de refroidissement. Mais il est difficile d'appliquer la méthode des eaux recyclées pour tous les centres de données car la technologie et les infrastructures nécessaires ne sont pas toujours disponibles (Sattiraju, N., 2020). Sachant que l'entreprise a utilisé plus de 15 milliards de litres d'eau pour ses centres de données en 2019 soit l'équivalent d'environ 45.000 piscines olympiques, il semble plus que raisonnable de penser que l'entreprise a encore de la marge de progression dans sa manière de gérer sa consommation d'eau même si elle semble prendre le bon chemin pour y parvenir comme l'indique son *WUE* (Google, 2019).

Apple de son côté met aussi en place de nombreux efforts pour réduire l'impact écologique de ses centres de données. Afin de continuer à mieux gérer sa consommation d'eau, Apple se focalise sur :

- Une utilisation de l'eau plus efficace ;
- L'identification de sources d'eau alternatives, comme l'eau recyclée ou récupérée ;
- L'évacuation de l'eau de manière responsable ;
- Le développement de la gestion d'eau afin de maintenir les cours d'eau en bonne santé pour tous ceux qui en dépendent.

C'est ainsi que les récents centres de données construits par Apple (Maiden, Caroline du Nord ; Reno, Nevada ; Viborg, Danemark ; Chine) sont conçus pour consommer 80% d'eau en moins grâce notamment à des techniques avancées d'évaporation pour leur système de refroidissement, ce qui permet aux systèmes de refroidissement classiques d'être inactifs 75 % du temps sur certains sites. Sans compter que les opérateurs ont aussi déployé un filtre minéral qui permet de récupérer une plus grande partie de l'eau que l'entreprise utilise pour le refroidissement, réduisant ainsi les rejets d'eau jusqu'à 30 % (Apple, 2019).

Dans l'ensemble de ses installations dans le monde, l'utilisation d'eau recyclée s'élevait à 238,4 millions de litres pour l'année fiscale 2018. L'eau de pluie collectée représente aussi une autre source d'eau alternative pour ses installations : en 2018, l'entreprise a collecté et réutilisé 15,1 millions de litres d'eau de pluie pour les besoins de refroidissement, d'irrigation et de construction de ses centres de données dans le monde. La consommation totale d'eau d'Apple en 2018 s'élevant à 935 millions de litres, cela signifie que 30% environ de l'eau utilisée par l'entreprise était soit recyclée soit de l'eau de pluie. De plus, Apple cherche constamment de nouvelles façons de récupérer l'eau, comme la condensation de la climatisation, suivant l'exemple de Google en termes d'optimisation de la gestion de l'eau (Apple, 2019).

Afin d'améliorer son efficacité énergétique ainsi qu'optimiser sa consommation en eau dans ses centres de données, Amazon développe aussi des stratégies en s'adaptant à chaque environnement : durant les mois plus froids, l'air extérieur est utilisé directement dans le centre de données pour refroidir sans devoir utiliser de l'eau. Durant les mois les plus chauds, l'air extérieur est refroidi grâce au processus d'évaporation optimisé pour utiliser le moins d'eau possible (Amazon, 2019).

L'entreprise implémente aussi, lorsque c'est possible, la technique du refroidissement par évaporation, permettant de réduire de manière significative la consommation d'eau et d'énergie. De plus, Amazon favorise l'utilisation d'eau non-potable ou recyclée pour refroidir ses centres de données. Afin de réutiliser l'eau pour plusieurs cycles de refroidissement, des systèmes de traitement des eaux sont placés dans les centres de données pour limiter la concentration de minéraux qui, lorsque l'eau est évaporée, peuvent potentiellement endommager les canalisations (Amazon, 2019).

L'entreprise Facebook, en plus d'appliquer la méthode du refroidissement par évaporation dans la majorité de ses centres de données, a aussi développé une nouvelle technique de refroidissement indirect pour ses centres de données situés dans des zones climatiques aux conditions difficiles : le *StatePoint Liquid Cooling (SPLC)* (Mulay, 2018).

Le système SPLC développé par Facebook en collaboration avec *Nortek Air Solutions* est un des premiers de son genre car il remplace l'air par l'eau pour refroidir les serveurs. D'après les tests effectués dans divers environnements, ce système peut réduire l'utilisation d'eau de plus de 20% pour les centres de données situés dans une région chaude et humide et de presque 90% dans les régions plus froides (Peterson, 2019). Grâce à ce système, Facebook affirme que ses centres de données consomment la moitié moins d'eau qu'un centre de données traditionnel équipé de climatiseurs ou de systèmes de refroidissement de l'eau (Mulay, 2018).

b. L'approvisionnement d'électricité issue de sources renouvelables

Google et Apple sont les seules entreprises des GAFAM à déclarer dans leurs rapports environnementaux que 100% ou presque de l'électricité consommée dans leurs centres de données dans le monde proviennent de sources d'énergies renouvelables (Google, 2019) (Apple, 2019). Mais qu'en est-il réellement ? Malheureusement, les GAFAM ont plutôt tendance à compenser chaque unité d'énergie consommée dans leurs installations dans le monde avec une unité équivalente d'énergie renouvelable, comme l'énergie solaire et éolienne que d'alimenter directement leurs centres de données à partir de ces sources d'électricité verte (Google, 2019) (Apple, 2019). C'est ce que les experts appellent les *carbon offsets purchases*.

Ainsi, en 2018, Google a compensé 100% de sa consommation électrique annuelle avec des achats d'énergies renouvelables : ce montant s'élevait à plus de 10 millions de MWh. À ce jour, Google a acheté au total environ 26 millions MWh d'énergies renouvelables (Google, 2019). Après comptabilisation des *carbon offsets purchases*, les émissions de carbone nettes sont donc nulles. En achetant de l'électricité verte et des *carbon offsets* de haute qualité, Google est neutre en émissions de carbone depuis 2007 (Google, 2019).

L'électricité consommée par tous les centres de données d'Apple dans le monde, 1,3 milliards de kWh, est aussi générée à 100% environ par des énergies renouvelables telles que solaire, éolienne, pile à combustible à biogaz et énergie hydroélectrique à faible impact. En outre, deux tiers de cette électricité sont générés par des projets créés ou soutenus par Apple (Apple, 2019). Durant l'année fiscale 2018, l'utilisation d'énergies 100% renouvelables pour ses centres de données a permis d'éviter plus de 460.000 tonnes de CO₂, ceci est équivalent à retirer près de 100.000 voitures des routes pendant un an (EPA gov, 2019 cité par Apple, 2019). En plus de passer des accords avec les producteurs d'électricité verte, Apple cherche aussi à collaborer avec les autorités publiques afin de mettre en place de nouveaux cadres réglementaires. En 2013, Apple a en effet travaillé directement avec les services publics locaux du Nevada pour créer un nouveau cadre réglementaire : le *Nevada Green Rider*, qui permet à l'entreprise d'avoir un contrat d'achat d'électricité renouvelable sur le long terme avec des prix fixes, cette électricité étant issue d'un projet récent de panneaux solaires construit pour Apple mais géré par NV Energy (Apple, 2019). Bien que l'initiative soit louable, il semblerait que l'intérêt d'avoir des prix fixes prime sur la volonté de réduire l'impact écologique : nous y reviendrons plus loin dans la section dédiée à l'étude de cas.

c. Autres techniques

Nous présentons dans cette sous-section d'autres techniques considérées comme plus originales car difficiles à mettre en place dans toutes les régions du monde ou alors paradoxales car utilisant des outils numériques pour réduire l'impact écologique des centres de données, moteurs du système numérique mondial.

En 2016, Google a développé conjointement un système de recommandation utilisant l'Intelligence Artificielle pour améliorer l'efficacité énergétique de ses centres de données : au lieu d'avoir des recommandations implémentées par ses employés, le système d'IA de Google contrôle directement le refroidissement du centre de données, tout en restant sous la supervision des opérateurs Google présents sur le site (Google, 2019). Ce système a déjà prouvé son efficacité en économisant en moyenne 30% d'énergies et d'autres progrès sont encore à prévoir. Cela résulte du fait que ce système ne fait que s'améliorer au fil du temps grâce à toujours plus de nouvelles données. Certaines actions prises par le système ont même surpris les opérateurs Google présents sur place comme Dan Fuenffinger, un opérateur Google de centre de données ayant travaillé avec le système qui témoigne : « *C'était incroyable de voir l'Intelligence Artificielle prendre avantage des conditions hivernales pour produire de l'eau encore plus froide que la normale, ce qui réduit les besoins en énergie pour refroidir le centre de données. Les protocoles mis en place ne s'améliorent pas au fil du temps, l'Intelligence Artificielle elle bien* » (Google, 2019).

En 2018, Microsoft a plongé dans l'eau de mer un de ses centres de données au large de l'archipel des Orcades, dans le nord de l'Ecosse (Demeure, 2018). Le centre consiste en un cylindre de 12,2 mètres de long contenant 864 serveurs et possède une capacité de stockage équivalente à 5 millions de films. Ce centre de données est conçu pour rester 5 années d'affilée sous l'eau. Il y a de nombreux avantages à plonger dans l'eau un centre de données :

- Les données ont une distance à parcourir réduite pour atteindre les villes côtières, le centre de données se situant à 20 kilomètres des côtes ce qui permet une navigation rapide et fluide sur le web, pour le streaming vidéo et le jeu en ligne¹⁵ (Demeure, 2018) ;
- Il y a moins de régulations à suivre que pour une installation terrestre (Demeure, 2018) ;
- Le refroidissement est plus rapide et moins gourmand en énergie (Demeure, 2018) ;
- Le centre est alimenté à 100% à partir d'énergies marines et donc renouvelables, comme le mouvement des vagues et des hydroliennes (Fabre, 2018).

Par contre, la technique pose aussi certains problèmes comme la maintenance impossible des serveurs en cas de dégâts ou pannes et la restriction de taille par rapport aux sites terrestres de parfois plus de 10.000 m².

¹⁵ En Ecosse, plus de la moitié de la population vit à moins de 193 kilomètres de la côte. (Demeure, 2018)

Il existe donc plusieurs actions pour améliorer le bilan environnemental d'un centre de données, comme vu au cours de cette section. Bien qu'elles paraissent très louables sur papier, nous avons également vu que certaines peuvent cacher une réalité bien différente, comme vu avec le cas des *carbon offsets purchases*. Nous présentons au cours de la section suivante une étude de cas analysant plus en pratique les conséquences de la construction d'un centre de données. En effet, cette étude vise à mettre en lumière cette pollution souvent peu connue du grand public en analysant deux centres de données : l'un situé en Irlande et l'autre aux Pays-Bas.

4.9 Étude de cas : enquête réalisée par Arte (2020) : « Data centers : une pollution méconnue »

L'enquête commence dans les environs de Dublin en Irlande, région qui compte environ une cinquantaine de centres de données, avec la visite du centre de données appartenant à l'entreprise Digital Realty. Lors de cette visite, Val Walsh, Vice-Présidente de Digital Realty, pour justifier le fait que l'alimentation, le système de refroidissement et la connexion Internet fonctionnent constamment déclare que « *les clients désirent que les données soient accessibles en permanence* ». En effet, au maximum de sa capacité, ce centre de données peut consommer autant d'électricité qu'une ville de 15.000 habitants : « *Quand vous avez un grand nombre de serveurs dans un rack, comme ils ont chacun une unité de traitement et un ventilateur, l'énergie qui est dégagée par chaque serveur crée de la chaleur. Donc nous devons réguler la température car si elle est trop élevée, les serveurs peuvent avoir des problèmes : ils peuvent tomber en panne et il y a même un risque d'incendie* » ajoute Val Walsh. De manière générale, la climatisation représente 30 à 40% de la consommation totale d'électricité d'un centre de données.

Évidemment, cette hyperdisponibilité des services numériques n'est pas sans conséquences : d'après Liam Ryan, responsable de l'innovation et de la planification chez Eirgrid, la société nationale du transport de l'électricité en Irlande, « *cette augmentation de la demande en électricité est sans précédent. À l'horizon 2030, on s'attend à ce que la demande en l'électricité augmente de 50% dont 30% viendront des centres de données* ». De plus, entre 2016 et 2020, les investissements dans le secteur des technologies ont triplé et cette croissance met sous pression le réseau électrique du pays. Malgré cette pression sur le réseau, le gouvernement irlandais pousse au développement des centres de données car c'est un moyen d'attirer les investisseurs étrangers et de créer de l'emploi local à un tel point qu'il a décidé de classer les

centres de données comme des infrastructures stratégiques au même titre que les hôpitaux, les autoroutes et les chemins de fer. Par ailleurs, il a aussi été décidé d'implémenter une nouvelle législation en juillet 2018 qui permet d'accélérer la mise en place des projets de centres de données de plus de 10.000 m², ce qui favorise naturellement les multinationales comme les GAFAM.

Mais certains Irlandais ne voient pas l'arrivée en masse de ces mégastructures informatiques d'un bon œil. Par exemple, Patrick Bresnihan, professeur de géographie à l'Université de Maynooth, met en doute le récent projet d'Amazon qui vient d'obtenir un permis pour construire un centre de données d'un milliard d'euros près de Dublin : « *Ce centre de données, s'il est construit à sa capacité maximale sur 26 hectares, va utiliser 4,4% de l'électricité nationale mais il ne fournira que trente emplois permanents. Dans quelle mesure les centres de données nous sont-ils bénéfiques ? C'est très discutable... Ils fournissent peu d'emplois, utilisent beaucoup d'électricité et produisent beaucoup d'émissions carbone* ». En outre, beaucoup de personnes se demandent comment le réseau électrique actuel pourra supporter et approvisionner de nouveaux centres de données dans le futur. En effet, afin d'accueillir la cinquantaine de centres de données prévue dans les cinq prochaines années, un milliard d'euros devra être investi pour élargir le réseau électrique. Mais d'où provient cet argent ? Liam Ryan lui affirme que « *le milliard investi va venir des consommateurs situés en bout de chaîne. L'argent est collecté via les factures d'électricité à travers les tarifs appliqués sur ces factures* ». La question qui se pose est donc de connaître la contribution des GAFAM dans ces investissements gigantesques : Amazon, par exemple, explique que l'entreprise a investi dans la construction de deux parcs éoliens à titre de contribution. Mais est-ce réellement suffisant ?

Pas selon Patrick Breshinan, très critique : « *C'est juste un accord d'achat d'énergie venant de parcs éoliens au cours des prochaines années. Ils ne vont pas en construire eux-mêmes, ils ne s'engagent en rien dans ces infrastructures. S'ils étaient vraiment engagés dans les énergies renouvelables, ils investiraient beaucoup plus d'argent grâce à leurs énormes profits. Nous en avons besoin pour avancer vers un futur avec moins d'émissions carbone mais ils ne le font pas* ». Pire encore, les centres de données risquent de mettre en péril la transition énergétique du pays : l'Irlande n'arrivera pas à remplir ses objectifs en matière d'énergies renouvelables tant la demande des centres de données est importante.

L'enquête continue ensuite à Amsterdam, ville ayant la plus grosse densité de centres de données en Europe, où les opérateurs des centres affirment que bloquer le développement des centres de données empêche le progrès et la transition énergétique.

En effet, selon eux, ils ont développé de bonnes pratiques écologiques et ont recours aux énergies vertes à 80%. Mais d'après le journaliste indépendant Hanno Bakkeren, ces propos ne sont que du *greenwashing* car seulement 15% de l'électricité produite aux Pays-Bas est issue de sources renouvelables (la majorité de l'électricité aux Pays-Bas est produite à partir de charbon et de gaz) et que pour que les déclarations de l'industrie des centres de données soient véritablement respectées, il faudrait plus de parcs éoliens et solaires ce qui est impossible car il y a un réel manque d'espace dans le pays.

Pourtant des initiatives sont prises par certaines entreprises possédant ou opérant des centres de données afin de contribuer positivement à la société et l'environnement : par exemple, la société néerlandaise NLDC optimise le système de refroidissement de ses serveurs. Selon Jeroen Vollmuller, Vice-Président des opérations et projets de NLDC, « *dans le couloir de refroidissement, on envoie de l'air frais à 21°C dans les équipements alors que l'arrière des machines est à une température d'environ 30°C. C'est beaucoup plus efficace de ne refroidir que le couloir et non pas toute la pièce. En refroidissant au bon endroit, on économise autour de 20% de notre coût en énergies* ». De plus, ce centre de données réutilise l'énergie dégagée par les serveurs pour chauffer une piscine, une école et des locaux d'entreprises. « *En échange, ils envoient de l'eau à 10°C utilisée pour refroidir* » précise Jeroen Vollmuller et ajoute que relier le centre de données aux bâtiments voisins a coûté un million d'euros. Par conséquent, un centre de données pourrait en principe être utilisé pour alimenter en chauffage 5.000 logements. Mais est-ce vraiment réalisable en termes d'infrastructures et d'investissements ? À Stockholm en Suède par exemple, 30 centres de données fournissent 2% du chauffage de la ville (Arte, 2020).

Dans ce chapitre, nous avons donc présenté les principales entreprises fournisseuses de services et appareils numériques dans le monde : les GAFAM. Ensuite, nous avons analysé la structure d'un centre de données ainsi que ses quelques variantes ce qui nous a permis de mieux comprendre l'origine des impacts issus d'un centre de données. Grâce à l'analyse de la pollution relative à ces infrastructures informatiques du point 4.3, nous avons pu conclure que c'est leur phase d'utilisation qui concentre la majorité des impacts sur l'environnement. Par après, différentes mesures d'évaluation de leur efficacité énergétique ont été introduites, ce qui a notamment permis de comparer certaines GAFAM entre elles selon la consommation énergétique de leurs centres de données respectifs.

En outre, les actions mises en place par les GAFAM visant à réduire les impacts environnementaux de leurs centres de données ont été décrites. Enfin, l'étude de cas basé sur le documentaire réalisé par Arte a permis de mettre plus en contexte les impacts de ces centres de données, tant au niveau environnemental qu'au niveau social et économique.

Au prochain chapitre, nous analyserons le côté de la demande du marché du numérique représenté par les utilisateurs.

Chapitre 5 : Du côté de la demande

Ce chapitre analyse les impacts générés par les utilisateurs de services numériques et/ou possédant un ou plusieurs appareils numériques. Après une analyse des utilisateurs et des tendances d'utilisation du système numérique mondial dans le monde, nous présenterons les différentes catégories d'appareils numériques présentes sur le marché et les répartirons selon leur nature. Ensuite, comme nous l'avons fait pour les centres de données, nous répartirons les impacts globaux de la catégorie des utilisateurs sur leurs phases de fabrication et d'utilisation. Cette analyse nous permettra de conclure que c'est cette première qui est responsable de la majorité des impacts environnementaux relatifs aux appareils numériques. Par après, nous introduirons les autres phases constituant le cycle de vie de ces appareils et nous les intégrerons au calculateur d'impacts de la partie 3. Enfin, nous concluons ce chapitre avec une étude de cas qui compare l'empreinte environnementale d'un *e-reader* par rapport à celle d'un livre en version papier en appliquant la méthodologie d'ACV. À l'issue de cette comparaison, nous concluons qu'il est possible de réduire l'empreinte environnementale globale d'un appareil numérique en prêtant plus d'attention au comportement des utilisateurs, malgré la phase de fabrication des appareils qui regroupe la majorité des impacts négatifs.

5.1 Présentation des utilisateurs et des tendances mondiales

Par définition, les utilisateurs sont les personnes possédant des appareils numériques et utilisant les services digitaux fournis par les entreprises comme les GAFAM. Nous avons précédemment indiqué que leur nombre s'élevait à 4,54 milliards dans le monde en janvier 2020 ce qui, en termes de croissance, équivaut à une augmentation de 298 millions d'utilisateurs sur l'entièreté de l'année 2019 et donc approximativement 800.000 nouveaux utilisateurs par jour.

De manière générale, la croissance annuelle moyenne d'utilisateurs dans le monde jusqu'à ce jour est de 7% (Kemp, 2020).

Géographiquement parlant, l'utilisation du numérique est très contrastée : en moyenne en 2018, une personne vivant aux États-Unis consommait l'équivalent de 140 GB de données par mois contre seulement 2 GB pour une personne vivant en Inde. De plus, un Américain possédait en moyenne 10 appareils connectés en 2018 contre un seul pour un Indien (The Shift Project, 2018).

Voici un tableau représentant les utilisateurs du numérique dans le monde par région :

Tableau 8 : Répartition des utilisateurs du système numérique mondial dans le monde par région en janvier 2020.

	Population (millions)	Utilisateurs (millions)	Proportion mondiale d'utilisateurs	Croissance annuelle du nombre d'utilisateurs
Afrique	1.320	453,2	9,9%	+10%
Amérique	1.020	776,1	17,1%	+2,3%
Asie et Pacifique	4.030	2.420	53,3%	+9,2%
Europe	849,5	711,3	15,7%	+1,6%
Moyen-Orient	258,8	182,1	4%	+14%
Monde	7.750	4.540	100%	+7%

Source : Kemp, S. (2020).

En observant le tableau précédent, nous remarquons différentes tendances :

- Il y a plus d'utilisateurs dans les zones développées : ils sont situés majoritairement dans certains pays d'Asie (Japon et Chine), d'Amérique (Etats-Unis et Canada) et d'Europe (Kemp, 2020) ;

- En revanche, la croissance du nombre d'utilisateurs est plus élevée dans les zones moins développées comme l'Afrique, le Moyen-Orient et certains pays moins développés d'Asie et de la zone Pacifique. Ceci s'explique par le fait que les marchés des pays développés sont complètement saturés et que ce sont principalement les marchés des pays émergents qui s'équipent dorénavant avec un pouvoir d'achat réduit (Bordage F. et GreenIT.fr, 2019).

Par ailleurs, même si le nombre d'utilisateurs est plus élevé dans les pays développés que dans les pays émergents, le nombre d'heures passées en moyenne par jour sur Internet suit une tendance inverse. En effet, c'est dans les pays moins développés ou émergents que les utilisateurs passent le plus de temps par jour en moyenne sur Internet : par exemple, en 2019, un utilisateur aux Philippines aura utilisé Internet en moyenne 9 heures et 45 minutes par jour alors qu'un Japonais seulement 4 heures et 22 minutes. La moyenne mondiale pour l'année 2019 s'élève à 6 heures et 43 minutes ce qui signifie que durant l'année 2019, tous les utilisateurs dans le monde auront utilisé des services numériques pendant environ 1,25 milliards d'années au total (Kemp, 2020).

En conclusion, l'utilisation intensive du numérique n'est pas un phénomène mondial : bien que le nombre d'utilisateurs soit plus élevé dans les pays développés, c'est en revanche dans les pays moins développés que les utilisateurs passent le plus de temps connectés à Internet (The Shift Project, 2018) (Kemp, 2020).

5.2 Présentation des appareils numériques

Après avoir analysé les tendances mondiales en matière d'utilisateurs du système numérique à la section précédente, nous présentons dans cette section les appareils numériques qu'ils utilisent.

Par définition, les appareils numériques sont les appareils et équipements avec lesquels les utilisateurs se connectent à Internet et profitent des services digitaux. Mais il faut aussi tenir compte des nouveaux objets connectés qui surfent sur la vague de l'*IoT* et sont de plus en plus présents dans notre quotidien. Comme mentionné précédemment à la partie 1, nous identifions deux catégories d'équipements numériques destinés aux utilisateurs :

- La première catégorie regroupe les appareils *classiques* tels que les smartphones, les ordinateurs portables et fixes, les tablettes et autres équipements tels que les consoles de jeux vidéo : leur nombre total s'élevait à environ 14 milliards en janvier 2020. En outre, leur croissance commence à se stabiliser : en effet, le nombre d'équipements *classiques* a augmenté de 36% entre 2010 et 2015 mais seulement de 10% entre 2015 et 2020. Cette stabilisation de la croissance indique à nouveau que les marchés des pays développés sont saturés tandis que les pays émergents commencent à peine à s'équiper à cause de leur faible pouvoir d'achat (Bordage F. et GreenIT.fr, 2019).

En ce qui concerne la composition de ces équipements *classiques*, les smartphones sont les appareils les plus utilisés pour se connecter à Internet : ils représentaient 53,3% du trafic de données mondial en décembre 2019 ce qui correspond à une croissance de 8,6% par rapport à décembre 2018. Les ordinateurs fixes et portables quant à eux représentent 44% du trafic de données mondial en décembre 2019, ce qui équivaut à une baisse de 6,8% par rapport à décembre 2018 (Kemp, 2020).

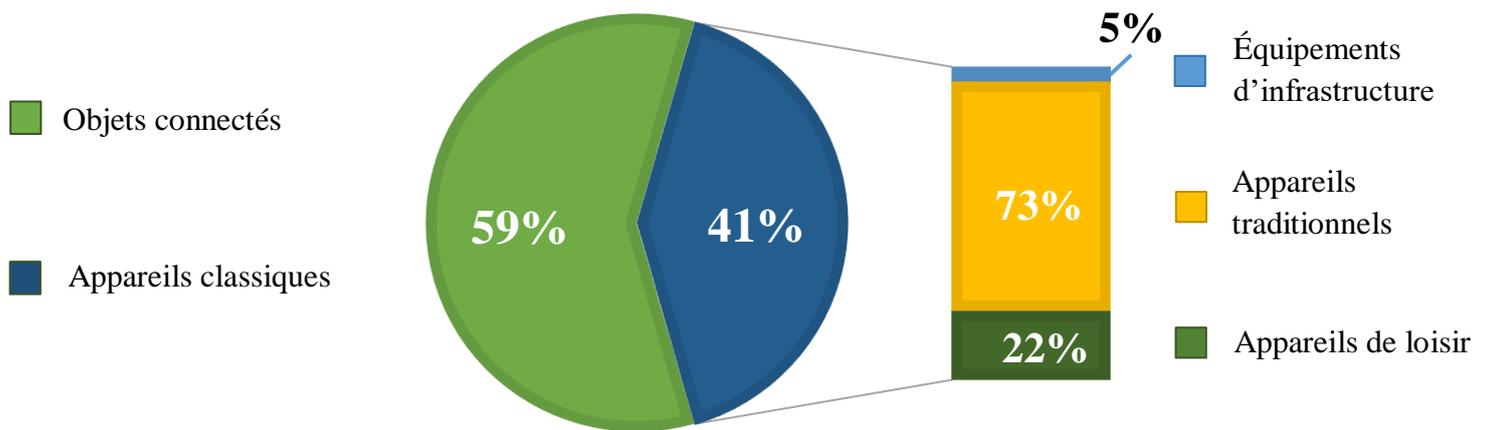
De plus, nous pouvons encore procéder à une répartition au sein même de cette première catégorie mais cette fois selon le profil énergétique des appareils : en effet, comme il sera vu au point suivant, les appareils *classiques* ne concentrent pas tous la majorité des impacts dans la même phase du cycle de vie. Ceux dont c'est la phase de fabrication qui concentre la majorité des impacts sur l'environnement sont les équipements dits *traditionnels* et représentent 73% des appareils classiques. Cette sous-catégorie regroupe les équipements tels que les smartphones, les tablettes, les ordinateurs et les écrans (Bordage F. et GreenIT.fr, 2019).

Ensuite, nous avons les appareils *de loisir* destinés à divertir les utilisateurs et dont c'est la phase d'utilisation qui engendre le plus d'impacts sur l'environnement et qui regroupe les consoles de jeux vidéo, les vidéo projecteurs et les boîtiers télévision permettant d'accéder à des milliers de chaînes. Cette catégorie représente environ 22% des appareils *classiques*. Enfin, la dernière sous-section regroupe les équipements *d'infrastructure* et donc tous les appareils de réseau tels que les routeurs, les antennes-relais, les serveurs, les routeurs Internet, etc. Ces appareils assurent le lien entre les utilisateurs et les centres de données, c'est pourquoi ils sont constamment actifs et donc fonctionnent tout le temps pour assurer un service ininterrompu. Par conséquent, c'est leur phase d'utilisation qui concentre la majeure partie des impacts engendrés (Bordage F. et GreenIT.fr, 2019) ;

- Enfin, la deuxième catégorie regroupe les *objets connectés* tels que les enceintes *bluetooth*, les télévisions intelligentes, les montres connectées, les thermostats connectés et systèmes d'éclairage, etc. Pratiquement inexistant il y a 10 ans, leur nombre s'élevait à environ 20 milliards en 2019 (Bordage & GreenIT.fr, 2019).

Ci-dessous se trouve un graphique représentant la composition du numérique selon les grandes catégories d'appareils afin de faciliter la compréhension du lecteur :

Graphique VII : Composition des appareils utilisateurs du système numérique mondial en 2019.



Source : Illustration personnelle sur base des données de Bordage F. et GreenIT.fr (2019).

5.3 L'impact des phases de fabrication et d'utilisation des appareils numériques

Nous allons maintenant nous pencher sur la part de l'impact environnemental du système numérique mondial relative aux appareils numériques des utilisateurs. Dans ce but, nous allons suivre la même procédure utilisée précédemment pour les centres de données : nous allons répartir l'impact environnemental des appareils numériques dans le monde selon les phases de fabrication et d'utilisation définies au point 4.3.

Selon le rapport réalisé par Bordage F. et GreenIT.fr (2019) :

- 60% de l'énergie primaire totale consommée par le système numérique mondial étaient consommés par les utilisateurs. Parmi ces 60%, 50% sont relatifs à leur utilisation et 50% concernent leur fabrication ;

- 66% des émissions GES totales engendrées par le système numérique mondial concernent les utilisateurs. Parmi ces 66%, 40% environ sont relatifs à l'utilisation des appareils numériques et donc la production d'électricité nécessaire à leur alimentation. Les 60% restants sont relatifs aux émissions de GES générées lors de la phase de fabrication de ces appareils ;
- 84% de la consommation totale d'eau douce du système numérique mondial concernent les utilisateurs et parmi lesquels 89% sont relatifs à l'électricité produite lors de leur phase de fabrication et à l'eau utilisée pour l'extraction des métaux. Les 11% restants concernent la production d'électricité requise pour alimenter ces appareils durant leur phase d'utilisation ;
- En ce qui concerne la consommation électrique totale des utilisateurs, elle s'élève, comme dit précédemment à la partie 1, à 44% de la consommation électrique totale du système numérique mondial pour les phases d'utilisation et de fabrication des appareils utilisateurs ;
- Enfin, lorsque nous nous penchons sur l'épuisement des ressources abiotiques (hors énergie fossile), les appareils utilisateurs sont responsables de 76% de l'épuisement de ces ressources par le système numérique mondial. Parmi ces 76%, 100% sont relatifs à la phase de fabrication des appareils utilisés par les utilisateurs dans le monde et concernent l'extraction des métaux constituant les appareils numériques.

Afin de clarifier au mieux pour le lecteur, voici un tableau récapitulatif de l'impact des appareils utilisateurs par rapport au système numérique mondial dans son ensemble, selon l'indicateur de pollution étudié et la phase de vie considérée :

Tableau 9 : Répartition de l'impact environnemental des appareils numériques utilisateurs.

Indicateur	Phase de fabrication (pourcentage de l'impact global)	Phase d'utilisation (pourcentage de l'impact global)	Total (pourcentage de l'impact global)
Énergie primaire	30% (2.040 TWh)	30% (2.040 TWh)	60% (4.080 TWh)
Émissions GES	40% (560 MtCO ₂ eq)	26% (364 MtCO ₂ eq)	66% (924 MtCO ₂ eq)
Consommation d'eau	75% (5.850.000 m ³)	9% (702.000)	84% (6.552.000 m ³)
Consommation électrique		44%	44% (572 TWh)
Épuisement ressources	76%	-	76%

Source : Bordage F. et GreenIT.fr (2019).

Nous pouvons dès lors conclure en observant le tableau ci-dessus que la majorité des impacts des appareils utilisateurs sur l'environnement provient principalement de leur phase de fabrication. C'est, comme expliqué précédemment, le profil énergétique des appareils *traditionnels* tels que les smartphones, les tablettes, les ordinateurs, les écrans, etc.

Le seul indicateur pour lequel l'impact est partagé de manière équitable entre les deux phases est l'indicateur de consommation d'énergie primaire : en effet, pour certains appareils comme les appareils de loisir, c'est bien la phase d'utilisation qui concentre la majorité des impacts comme expliqué précédemment (Bordage & GreenIT.fr, 2019).

5.4 Description des impacts liés à chaque étape du cycle de vie des appareils numériques

Nous avons présenté au point précédent les impacts liés aux phases de fabrication et d'utilisation des appareils numériques. Néanmoins, ce ne sont pas les seules étapes du cycle de vie de ces appareils : en effet, le cycle de vie complet d'un équipement est composé de cinq grandes phases (Berthoud, F., 2018) :

- L'extraction des ressources nécessaires ;
 - La fabrication ;
 - La distribution ;
 - L'utilisation ;
 - La gestion de fin de vie.
- a. L'extraction des ressources nécessaires.

Cette phase concerne principalement l'extraction des métaux et ressources nécessaires à la production des appareils numériques. Par exemple, un smartphone moyen nécessite l'extraction de 30 métaux différents comme le gallium, le cuivre, le tantale, le cobalt, l'or, ... Il y a différents impacts de l'extraction de ces métaux :

- Tensions dans les zones où sont extraits ces métaux liés aux conflits armés : par exemple au Congo où l'extraction du tantale entraîne une telle violence dans certaines régions que le tantale a été surnommé *minerais de sang* (Berthoud, F., 2018) ;
- Les besoins en eau pour extraire ces métaux sont aussi exponentiels étant donné qu'il faut toujours aller extraire ces minéraux plus profondément. Cela engendre à nouveau des conflits entre les agriculteurs et les mineurs dans les régions sujettes à la sécheresse notamment (Berthoud, F., 2018) ;

- Tensions sur les réserves : la notion de réserve est dynamique : en effet, une réserve c'est par définition la quantité de métal disponible à un moment donné (mines connues et identifiées) et que l'on peut extraire avec les technologies disponibles aujourd'hui avec le coût actuel. Actuellement, les réserves connues de métaux sont très basses. Le problème est que l'énergie nécessaire à l'extraction de métaux augmente de façon exponentielle lorsque la concentration du métal extrait diminue car il faut creuser toujours plus profondément (Berthoud, F., 2018) ;
- Pollution engendrée par les mines comme la pollution de l'eau, l'érosion des sols, la pollution sol-air, etc. Ces nuisances engendrent une baisse de la biodiversité et des problèmes de santé pour les mineurs de métaux (Berthoud, F., 2018).

b. La phase de fabrication.

Cette phase a déjà été analysée au point précédent et répartie selon les différents indicateurs environnementaux étudiés. Pour rappel, mis à part pour l'indicateur d'énergie primaire pour lequel les impacts engendrés sont répartis de manière équitable entre la phase de fabrication et la phase d'utilisation ; la phase de fabrication est la phase qui concentre la majorité des impacts environnementaux engendrés par les appareils numériques utilisateurs dans le système numérique mondial (Berthoud, F., 2018).

c. La distribution.

Pendant longtemps, les experts et scientifiques ont négligé les impacts issus de la phase de transport des appareils numériques car ils les considéraient comme insignifiants. Pourtant, il a été démontré que cette phase génère des impacts significatifs sur l'environnement. Il est néanmoins très difficile de les quantifier de façon exacte car nous manquons de données précises concernant cette phase. Mais nous pouvons tout de même affirmer que les impacts de la phase de transport sont surtout liés au fait que les consommateurs deviennent de plus en plus exigeants concernant le temps de livraison des appareils et font rarement attention à leurs origines. Par conséquent, pour payer moins cher, ils sont plus enclins à acheter des appareils produits dans des pays lointains, souvent peu respectueux de l'environnement, ce qui rallonge donc considérablement les distances à parcourir par les appareils (Berthoud, F., 2018).

d. La phase d'utilisation

Cette phase a également été analysée au point précédent de manière identique à la phase de fabrication. Pour rappel, la phase d'utilisation des appareils numériques concentre moins d'impacts que leur phase de fabrication sauf pour les appareils de loisir et les équipements d'infrastructure qui sont actifs de manière ininterrompue (Berthoud, F., 2018).

e. La gestion de fin de vie

Un des problèmes récurrents pour les appareils des utilisateurs est la gestion de leur fin de vie. En effet, en Europe, seulement 50% des équipements sont collectés par des filières adaptées au traitement de ce type de déchets et donc au recyclage de ces métaux. Et même lorsque l'appareil est collecté dans la bonne filière, il n'est pas possible de récupérer l'entièreté des matériaux qui le composent. De plus, parmi les 50% des appareils envoyés dans les filières adaptées, seulement 5% sont éliminés de façon contrôlée et 1% sont reconditionnés partiellement ou intégralement pour être réutilisés. Les 44% restants sont recyclés de façon partielle car il n'est toujours pas possible à l'heure actuelle de recycler 100% des matériaux composant les appareils numériques. Par exemple, dans le meilleur des cas 20 métaux sont recyclés alors qu'un smartphone moyen est constitué de 30 métaux différents. Ce manque de régulation concernant le recyclage des appareils numériques fait aussi fleurir le trafic illégal de déchets électroniques dans le monde : en effet, de nombreux déchets sont envoyés aux quatre coins du monde (les zones sous-développées principalement) et sont jetés dans d'immenses décharges à ciel ouvert sans aucun traitement ou recyclage. Les régions du monde concernées par ce trafic sont polluées de façon dramatique car ces dépotoirs polluent l'eau et par conséquent menacent la biodiversité locale, les cultures agricoles et aussi la santé de la population locale (Berthoud, F., 2019).

Nous pourrions donc en conclure qu'il suffit d'améliorer les filières de recyclage des appareils numériques pour réduire de façon drastique l'impact du numérique sur l'environnement : il n'y aurait en effet plus besoin d'aller puiser de nouvelles matières premières puisque tous les composants des appareils usés seraient réutilisés. Mais c'est sans tenir compte de la demande croissante en appareils numériques comme vu aux points 5.1 et 5.2. En effet, la demande exponentielle en métaux contribue également à cette situation : même si nous arrivions à recycler à 100% tous les appareils électroniques âgés de dix ans, il faudrait encore aller puiser de nouvelles matières premières, puisque la demande en appareils électroniques a augmenté en 10 ans (Berthoud, F., 2019).

Prenons un exemple pour illustrer ce problème : imaginons que la demande en appareils numériques s'élevait à 1.000 appareils en 2010 et que cette demande a une croissance annuelle de 10% ; la demande s'élève donc à 2.594 appareils en 2020. Posons donc l'hypothèse que le taux de recyclage des appareils s'élève à 100% : dès lors, il est possible de recycler les 1.000 appareils de 2010 pour en fabriquer 1.000 nouveaux. Mais le problème est qu'étant donné la croissance exponentielle de la demande pour les appareils numériques, il y a un vide à combler de $2.594 - 1.000 = 1.594$ appareils qu'il faut donc fabriquer et qui par conséquent requièrent d'aller puiser de nouvelles matières premières. Cet exemple démontre dès lors que même en ayant un taux de recyclage de 100%, il est impossible de satisfaire la demande croissante de la part des consommateurs sans devoir puiser de nouvelles matières premières.

Il existe donc cinq grandes phases constituant le cycle de vie d'un appareil numérique, nous les avons présentées et décrites dans cette section. Ce sont les cinq phases qui seront analysées aussi bien pour l'étude de cas se trouvant à la section suivante que pour le calculateur d'impacts présenté à la partie 3.

5.5 Étude de cas : livre traditionnel vs *e-reader Kindle*

L'analyse de cycle de vie qui a été décrite au point précédent étudie les impacts relatifs à chaque phase du cycle de vie d'un appareil afin d'évaluer son empreinte environnementale globale. Les avantages de cette méthodologie sont qu'elle est complète en plus de donner une évaluation fidèle à la réalité. De plus, elle permet de comparer les appareils numériques entre eux, comme nous le ferons à la partie 3 lors de la présentation de la méthodologie du calculateur réalisé, mais aussi et surtout de les comparer avec leur version non-numérique. Comme pour l'étude des centres de données, nous présentons maintenant une étude de cas pratique en appliquant l'ACV à un *e-reader Kindle* produit par la société Amazon et à un livre traditionnel en papier afin de pouvoir comparer les impacts environnementaux relatifs à chacun. Cette étude devrait nous permettre de déterminer à partir de quel degré d'utilisation un *e-reader* est avantageux pour l'environnement par rapport à un livre classique. Ce cas pratique se base sur les résultats issus d'un rapport d'étude publié dans le New-York Times écrit par Goleman et Norris (2010).

1. L'extraction des métaux nécessaires

- a. *E-reader* : Le processus de production d'un *e-reader* nécessite l'extraction d'environ 15 kg de minéraux dont certains sont toxiques ou tellement convoités qu'ils suscitent de nombreux massacres (comme le tantale). Ces minéraux sont majoritairement extraits en Afrique.
- b. Livre traditionnel : Un livre nécessite approximativement l'extraction de 300 grammes de minéraux.

2. La phase de production

- a. *E-reader* : Le processus de production d'un *e-reader* consomme en moyenne 300 litres d'eau pour produire la batterie et les cartes de circuits imprimés ainsi que pour l'affinage des métaux comme l'or qui est utilisé sous forme pure dans les circuits. Il est aussi très gourmand en énergie : il consomme en moyenne 100 kWh par *e-reader* et émet environ 30 kilogrammes de carbone dans l'atmosphère.
- b. Livre traditionnel : Il faut compter environ 7,5 litres d'eau pour fabriquer la pâte à papier qui est ensuite pressée à chaud et séchée pour produire le papier. Le processus entier consomme 2 kWh et émet environ 7,5 kilogrammes de CO₂ dans l'atmosphère.

3. La phase de distribution

- a. *E-reader* : La grande majorité des *e-readers* sont produits à l'étranger ce qui signifie qu'il y a de grandes chances qu'il ait dû traverser des océans et des continents avant d'arriver chez vous. De manière généralisée et simplifiée, les experts estiment qu'il faudrait faire un trajet en voiture de 500 kilomètres environ pour avoir un impact équivalent à la phase de distribution d'un *e-reader*.
- b. Livre traditionnel : Il est également difficile d'évaluer l'impact de la distribution dans le cycle de vie d'un livre traditionnel étant donné qu'il dépend du moyen de transport utilisé, si le livre a été acheté en ligne ou non, le mode de transport utilisé, etc.

De manière générale, les experts estiment que les impacts relatifs à la phase de distribution d'un livre sont égaux aux impacts liés à sa phase de production multipliés par 10.

4. La phase d'utilisation

- a. *E-reader* : L'utilisation de l'*e-reader* est aussi un facteur déterminant : est-ce que l'*e-reader* est partagé entre les membres de la famille ou est-ce que chaque membre possède son propre appareil ? De plus, grâce à son écran très efficace énergétiquement et comme il ne requiert pas d'ampoule allumée pour lire dans le noir, la recharge de l'*e-reader* consomme moins d'électricité qu'une ampoule allumée une à deux heures le soir pour lire. Mais il faut aussi prendre en compte le téléchargement des *e-books* et donc l'utilisation du réseau.
- b. Livre traditionnel : En ce qui concerne le livre traditionnel, tout est une question d'utilisation : lire un livre en pleine journée ne requiert pas de système d'éclairage et est donc complètement neutre pour l'environnement. De plus, la durée de vie d'un livre est bien plus longue que celle d'un *e-reader* si le propriétaire en prend soin. En outre, un livre traditionnel peut être partagé avec des centaines de personnes durant sa vie, évitant donc le besoin de produire des copies de ce livre.

5. Gestion de fin de vie :

- a. *E-reader* : Les déchets générés par les *e-readers* posent un réel problème : ces déchets sont nombreux et la plupart des utilisateurs ne les disposent pas dans les filières de recyclage contrôlées et certifiées. Le résultat est donc que la majorité des *e-readers* sont soit jetés dans des décharges et ne subissent donc aucun traitement de recyclage, soit sont envoyés dans des filières de recyclage peu scrupuleuses dans lesquelles ce sont des enfants vivant dans des pays sous-développés qui démontent les appareils à la main, exposés aux matières toxiques contenues dans ceux-ci.
- b. Livre traditionnel : Si le livre est conservé avec soin, il peut être recyclé ou utilisé par un nouvel utilisateur.

En résumé, un *e-reader* peut être bénéfique pour l'environnement par rapport à un livre traditionnel mais cela dépend grandement de l'utilisation qui en est faite, du comportement de l'utilisateur ainsi que de la gestion de la phase de fin de vie de l'appareil. D'après l'étude réalisée, en moyenne, la quantité de carbone émise durant toute la durée de vie d'un appareil *Kindle* d'Amazon est complètement compensée après sa première année d'utilisation si l'utilisateur lit au moins 36 *e-books* cette année-là. De plus, chaque année d'utilisation similaire supplémentaire permet d'éviter en moyenne l'émission nette de 169 kilogrammes de CO₂, ce qui correspond à la quantité de CO₂ émise par le processus de production de 23 livres traditionnels. Tout est donc une question d'utilisation : sachant qu'une personne doit lire au moins 36 *e-books* pour compenser les impacts relatifs à la phase de production de l'*e-reader*, ce qui correspond à l'impact de la production de 23 livres traditionnels, un *e-reader* sera donc bénéfique pour l'environnement si l'utilisateur est considéré comme un lecteur passionné. Par contre, si l'utilisateur lit moins, il lui est recommandé d'acheter ses livres en version papier (Goleman & ; Norris, 2010).

En conclusion, pour juger le côté bénéfique de la dématérialisation par rapport à leurs versions physiques, la phase d'utilisation des appareils numériques est aussi déterminante que le comportement des utilisateurs. Il est évidemment possible de réduire les impacts de la phase de fabrication en achetant des appareils reconditionnés ou intégrant des composants recyclés et donc de réduire l'impact global de l'appareil étant donné que cette phase concentre la majorité des impacts.

Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié les impacts des différentes phases du cycle de vie des centres de données qui représentent le côté de l'offre du marché du numérique, ainsi que des appareils numériques des utilisateurs, qui constituent la demande.

Après une brève présentation des différentes GAFAM, nous avons étudié les différentes structures des centres de données, liées à leur niveau de redondance et à leur taux de disponibilité. Grâce à cette analyse, nous avons pu identifier les sources de pollution de ces infrastructures informatiques et pu conclure que la phase d'utilisation des centres de données regroupe la majorité des impacts qui lui sont associés, illustrant à nouveau l'impact de l'« hyperdisponibilité » du système numérique mondial. Nous avons ensuite introduit l'indicateur *PUE* permettant de mesurer l'efficacité énergétique d'un centre de données. Après avoir expliqué les avantages et les limites d'utilisation de cet indicateur, nous avons introduit une série d'indicateurs complémentaires au *PUE* permettant d'évaluer la consommation énergétique des centres de données de façon plus complète. Par après, nous avons décrit les différentes actions mises en place par les GAFAM pour essayer de réduire l'impact de leurs centres de données sur l'environnement, comme par exemple Microsoft qui plonge son centre de données dans l'océan pour faciliter le refroidissement de ses appareils informatiques. Enfin, nous avons conclu ce chapitre consacré à l'offre du marché du numérique par une étude de cas concernant les centres de données en Irlande et aux Pays-Bas afin d'illustrer de manière plus pratique les conséquences environnementales mais aussi sociales et économiques liées à l'implémentation d'une telle infrastructure.

Nous avons étudié de façon similaire le côté de la demande représentée par les utilisateurs et leurs appareils numériques. Après une analyse des tendances mondiales concernant l'utilisation du numérique ainsi qu'une présentation des deux types d'appareils numériques : les appareils dits *classiques* et les *objets connectés*, nous avons étudié l'impact de ceux-ci en suivant la méthodologie d'ACV. Nous avons conclu que pour la majorité des appareils, c'est bien la phase de fabrication qui concentre la majorité des impacts. Pourtant, après avoir comparé un *e-reader* et un livre traditionnel en papier, nous avons aussi conclu que pour réduire les impacts du cycle de vie d'un appareil numérique, il faut se pencher sur la phase d'utilisation et plus particulièrement sur le comportement de son utilisateur ainsi que sur la gestion de sa phase de fin de vie. C'est en arrivant à ce constat que l'idée de développer un calculateur d'impacts environnementaux appliquant la méthodologie d'ACV a germé.

Dès lors, la prochaine et dernière partie de ce travail est consacrée à ce calculateur d'impacts, qui tente de conscientiser les utilisateurs sur l'importance d'une certaine sobriété durant l'utilisation de services numériques.

Partie 3 : Présentation du calculateur d'impacts

Chapitre 6 : Revue des outils d'évaluation existants

Avant d'introduire le calculateur d'impacts réalisé dans le cadre de ce travail, nous présentons plusieurs outils permettant d'évaluer les impacts d'un appareil numérique et/ou de l'utilisation d'un service numérique. Les outils d'évaluation présentés dans ce chapitre sont soit proposés par l'*Université Virtuelle Environnement & Développement Durable* de Valenciennes, qui est une bibliothèque de ressources en ligne gratuite d'accès axée sur l'écologie, soit par le livre écrit par le Groupe EcoInfo et Françoise Berthoud : « *Impacts écologiques des technologies de l'information et de la communication* » (2012).

Il existe deux grandes catégories d'outil d'évaluation qui dépendent du type de démarche suivie par leurs concepteurs (UVED, s. d.-c) :

- Les outils quantitatifs qui permettent d'obtenir des résultats à validité forte. Cependant, ces outils peuvent être difficiles à réaliser de manière très précise, c'est pourquoi leurs concepteurs se basent très fréquemment sur des hypothèses simplificatrices ;
- Les outils qualitatifs quant à eux n'offrent aucune quantification des impacts mais permettent de dégager les grandes tendances et une liste des impacts et dommages sur l'environnement d'un produit ou service.

Ces deux catégories peuvent de plus être partagées en deux classes : celle des monocritères qui ne tiennent compte que d'un seul critère environnemental et celle des multicritères qui tiennent compte de plusieurs critères environnementaux (UVED, s. d.-c).

Enfin, il existe aussi un système de niveau de maturité attribué à chaque outil ou méthode d'évaluation : chaque niveau (de 1 à 5) renseigne sur la méthodologie appliquée par l'outil, le niveau 5 étant considéré comme le niveau offrant le plus de précision scientifique et de robustesse (UVED, s. d.-c).

La figure 4 présente les cinq niveaux différents de maturité ainsi que leurs conditions respectives à remplir.

Figure 4: Les cinq niveaux de maturité des outils d'évaluation de l'impact environnemental des services et produits numériques.

Niveau	Qualitative	Quantitative	Approche de l'outil	
			Nom de phases du cycle de vie	Nombre de critères environnementaux
1	x		1 ou plusieurs	Monocritère
2	x		1 ou plusieurs	Multicritère
3	x		Cycle de vie complet	Multicritère
4		x	1 ou plusieurs ou cycle de vie complet	Mono ou multicritère
5		x	Cycle de vie complet	Multicritère

Source : (UVED, s. d.-c).

Afin d'évaluer de manière critique chaque outil présenté, nous lui attribuons un niveau de maturité selon les critères décrits précédemment.

I. La matrice Matériaux-Énergie-Toxicité (MET)

Cet outil, très populaire car simple d'utilisation, se présente sous la forme d'un tableau, comme illustré à la figure 5, comprenant trois critères : les matériaux utilisés, l'énergie consommée et la toxicité engendrée. Pour chaque service ou produit, le cycle de vie entier est évalué. Néanmoins, cet outil permet uniquement à l'entreprise d'obtenir des résultats qualitatifs des impacts : chaque cellule de la matrice contient seulement une description des impacts engendrés selon le critère et la phase observés, ce qui ne permet pas d'obtenir de résultat quantitatif. Par exemple, la cellule concernant l'usage de la phase d'utilisation et se rapportant au critère de l'énergie pourrait contenir « consommation électrique de l'appareil ou du service » sans donner aucun ordre de grandeur. La matrice, une fois complétée, présente donc une liste qualitative des impacts sans les évaluer de façon précise. Cet outil est donc classé comme qualitatif et multicritère de niveau de maturité 3 (UVED, s. d.-l) (Puyou, 1999 cité dans Groupe EcoInfo & ; Berthoud, 2012, p. 87).

Figure 5: Exemple de matrice MET.

Matrice MET				
		Matière (Inputs et outputs)	Energie (Inputs et outputs)	Toxicité (outputs)
Matériaux et composants issus des fournisseurs				
Production et autres opérations sur sites du producteur				
Distribution				
Utilisation	Usage			
	Maintenance			
Fin de vie	Récupération			
	Valorisation			

Source : UVED. (s. d.-l).

II. La matrice d'Évaluation des Produits Respectueux de l'Environnement (ERPA)

Cette méthode est une cotation de l'impact environnemental : à chaque élément i,j (élément de la ligne i et de la colonne j) est attribué une cote variant de 0 (impact environnemental insignifiant) à 4 (impact environnemental très fort) qui se base sur les réponses aux questions pré-établies de l'outil comme par exemple : « *le produit est-il conçu de manière à minimiser l'emploi de matériaux rares ?* ». Ensuite, la moyenne de la note de chaque question est attribuée à chaque élément i,j . Enfin, chaque élément i,j est représenté sur un diagramme de type cible qui permet de représenter de manière photographique le produit : au plus les points sont proches du centre de la cible, au plus le produit étudié sera respectueux de l'environnement. Cet outil est classé comme un outil qualitatif et multicritère de niveau de maturité 3 (UVED, s. d.-j).

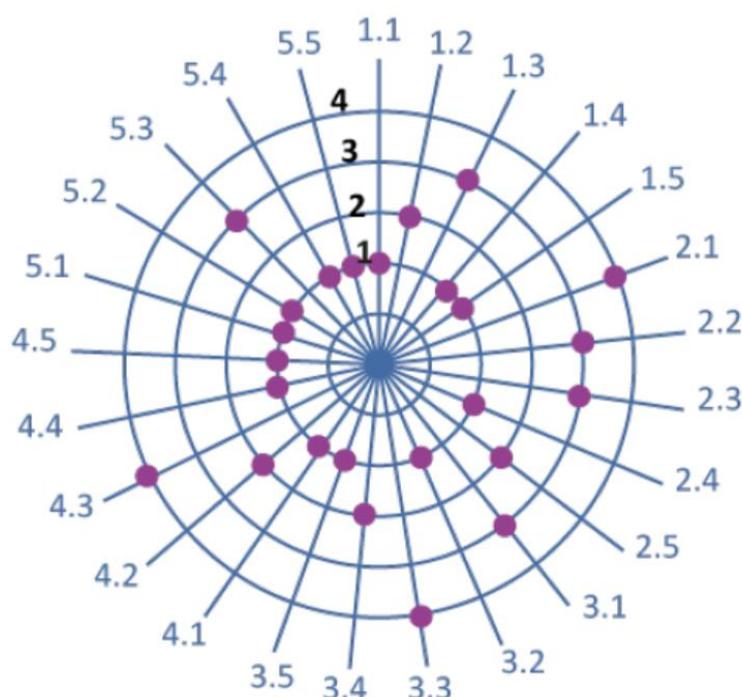
Ci-dessous se trouvent un exemple de matrice ERPA pour un produit fictif (figure 6) ainsi que son diagramme de type cible associé (figure 7).

Figure 6: Exemple de matrice ERPA pour un produit fictif.

Étapes du cycle de vie	Matrice ERPA				
	Critères environnementaux				
	Choix des matériaux	Utilisation de l'énergie	Rejets gaz eux	Rejets liquides	Rejets solides
Préfabrication	1	2	3	1	1
Fabrication	4	3	3	1	2
Distribution	3	1	4	2	1
Utilisation	1	2	4	1	1
Fin de vie	1	1	3	1	1

Source : (UVED, s. d.-j).

Figure 7: Diagramme de type cible de la matrice ERPA de la figure 6.



Source : (UVED, s. d.-j).

III. La matrice Matériaux-Énergie-Produits chimiques-Autres (MECO)

Cette matrice est une version plus sophistiquée de la matrice MET, comme illustré aux figures 8 et 9, car elle évalue un produit sur l'ensemble de son cycle de vie et en tenant compte des quatre critères suivants : les matériaux, l'énergie, les produits chimiques et autres. Cet outil, comme les deux matrices présentées précédemment, est classé dans la catégorie des outils qualitatifs et multicritères de niveau de maturité 3 (UVED, s. d.-k).

Figure 8: Liste (non exhaustive) des impacts évalués dans la matrice MECO.

Impacts environnementaux, consommation de ressources et impacts sur l'environnement de travail associés à chaque catégorie de la méthode MECO			
Catégories	Types de catégories d'impacts associés à cette catégorie MECO		
	Impacts environnementaux	Consommation de ressources	Impacts sur l'environnement de travail
M Matériaux	- Déchets - Cendres et scories	- Ressources utilisées pour les matériaux - De manière générale, consommation de ressources renouvelables	
E Energie	- Changements climatiques - Formation d'ozone photochimique - Acidification - Enrichissement en nutriment - Déchets - Cendres et scories - Déchets nucléaires	- De manière générale, consommation de ressources non renouvelables	
C Produits chimiques	- Destruction de l'ozone stratosphérique - Formation d'agents photo-oxydants - Toxicité persistante - Impact écotoxicologique - Impact toxicologique chez les humains - Déchets dangereux	- Ressources utilisées pour la production de produits chimiques	- Impacts liés à l'exposition aux produits chimiques comme le cancer, les allergies, les dommages causés au système sexuel ou au système nerveux
O Autres (others)			- Travail monotone et répétitif - Bruits - Accidents de travail

Source : (UVED, s. d.-k).

Figure 9: Exemple de matrice MECO.

Matrice MECO					
Catégorie	Etape du cycle de vie				
	Extraction des matières premières	Fabrication	Usage	Transport	Fin de vie
Matériaux					
Energie					
Produits Chimiques					
Others					

Source : (UVED, s. d.-k).

IV. Les listes négatives (ou listes de substances)

Ces listes, basées sur la réglementation ou réalisées en interne par les entreprises à l'attention de leurs fournisseurs, visent à exclure ou minimiser l'emploi de substances polluantes et/ou toxiques dans la composition d'un produit. Il existe trois variantes de listes négatives (UVED, s. d.-i) :

- Les listes noires qui mentionnent les substances qui ne peuvent pas être employées par l'entreprise ;
- Les listes grises qui mentionnent les substances dont il faut limiter l'emploi autant que possible ;
- Les listes blanches qui listent les substances alternatives en remplacement des substances prohibées ;

Bien que très efficaces pour améliorer la santé de l'environnement tout en encourageant la compétitivité et l'esprit d'innovation de l'industrie chimique mondiale, ces listes ne représentent pas des outils à part entière dans le sens où ils mentionnent simplement des substances chimiques, interdites ou non, sans nécessairement proposer d'alternatives plus écologiques. Ces listes sont classées dans la catégorie des outils qualitatifs et monocritères dont le niveau de maturité est 2 car seules les substances concernant la phase de fabrication sont étudiées (UVED, s. d.-i) (Groupe EcoInfo & ; Berthoud, 2012, p. 88).

V. Les listes de contrôle (ou checklists)

Ces listes sont des outils utilisés par les concepteurs pour déterminer si leurs produits sont respectueux de l'environnement ou non. En répondant à une série de questions concernant chacun des axes d'impacts environnementaux de son produit (voir la roue de stratégie de Brezet à la figure 11), le concepteur reçoit en retour une liste d'améliorations environnementales à mettre en place pour réduire l'impact de son produit (UVED, s. d.-h).

La figure 10 illustre un exemple de liste de contrôle relative à l'axe « optimisation du système de fin de vie ».

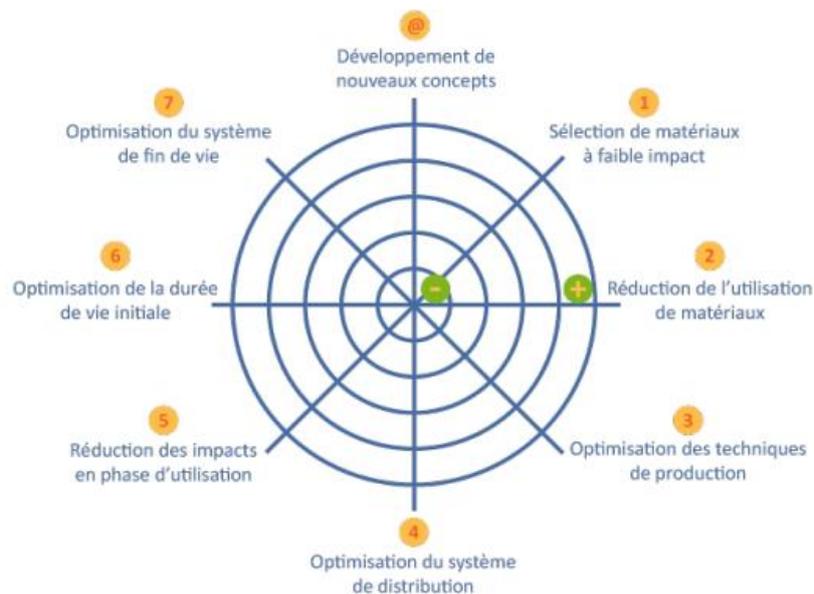
Figure 10: Exemple de liste de contrôle pour l'optimisation de la fin de vie du produit.

Liste de contrôle pour la réutilisation	Adapté au produit	Caractéristiques			Absence de données
		1: inadapté (action urgente préconisée)	2: situation acceptable (action possible)	3: situation idéale (action non prioritaire)	
Conception modulaire	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Accessibilité des composants	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Standardisation des éléments	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Protection contre la corrosion	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Source : (UVED, s. d.-h).

Ensuite, une fois la liste de contrôle remplie, un résultat moyen est obtenu pour chaque axe du produit et ensuite représenté sur une roue stratégique de Brezet (Brezet, 1997 cité par UVED, s. d.-h) qui, mise sous forme de radar, tente de quantifier chaque item de cette roue : si l'indice écologique obtenu est proche du centre (du côté du – sur la figure 11), cela signifie que l'axe concerné du produit en question est à améliorer de façon urgente afin de réduire son impact environnemental.

Figure 11: Roue de stratégie de Brezet.



Source : (UVED, s. d.-h).

Les axes généralement évalués pour les produits ainsi que la liste (non exhaustive) d'améliorations environnementales à mettre en place sont illustrés à la figure 12.

Figure 12: Liste (non exhaustive) des axes de la roue de stratégie ainsi que des améliorations environnementales.

1	Sélection de matériaux à faible impact	Matériaux plus propres Matériaux renouvelables Matériaux à moindre contenu énergétique Matériaux recyclés Matériaux recyclables
2	Réduction de l'utilisation de matériaux	Réduction en masse Réduction en volume (de transport)
3	Optimisation des techniques de production	Techniques de production alternatives Moins d'étapes de production Consommation d'énergie moindre/plus propre Moins de déchets de production Moins de consommables en production / consommables plus propres
4	Optimisation du système de distribution	Moins d'emballages/emballages plus propres / réutilisables Mode de transports efficace énergétiquement Logistique efficace énergétiquement
5	Réduction des impacts en phase d'utilisation	Moins de consommation énergétique Sources d'énergie plus propres Moins de consommables nécessaires Consommables plus propres Pas de pertes de gaspillage d'énergie/de consommables
6	Optimisation de la durée de vie initiale	Fiabilité et durabilité Maintenance et réparation plus faciles Structure de produit modulaire Conception classique (pas d'effet de mode) Forte relation produit-utilisateur
7	Optimisation du système de fin de vie	Réutilisation de produit « Remanufacturing » Recyclage de matériaux Incinération plus sûre
@	Développement de nouveaux concepts	Dématérialisation Utilisation partagée du produit Intégration de fonctions Optimisation fonctionnelle du produit (des composants)

Source : (UVED, s. d.-h).

Cette méthode est classée dans la catégorie des outils qualitatifs et multicritères. Son niveau de maturité s'élevé à 3 (UVED, s. d.-h) (Groupe EcoInfo, & ; Berthoud, 2012, p. 88).

VI. L'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

Cette approche quantitative et multicritère tient compte de l'intégralité des impacts environnementaux d'un produit, procédé ou service et ce tout pour chaque phase de son cycle de vie (de l'extraction des matières premières à l'élimination en fin de vie en passant par la fabrication, la distribution et l'utilisation). Pour chacune de ces phases, un bilan détaillé et quantitatif des flux entrants et sortants de matières et d'énergie est réalisé (Groupe EcoInfo, & ; Berthoud, 2012, p. 84)

Grâce à cette analyse de chacune des phases du cycle de vie d'un produit, cet outil est le plus scientifiquement valable et rend l'analyse des impacts sur l'environnement du produit la plus précise possible. Néanmoins, pour qu'un tel outil soit valable, il est nécessaire de suivre certaines normes : en effet, les scientifiques ont remarqué que certains industriels embellissaient leurs ACV (par exemple en choisissant seulement les bons indicateurs, les bonnes informations, ...) afin qu'ils obtiennent un résultat positif ne reflétant pas la réalité (UVED, s. d.-a). Par conséquent, la série de normes ISO 14 040 et 14 044 décrit les principes, les cadres réglementaires et les lignes directrices à respecter pour réaliser une ACV conforme (ISO inc., 2012). Cette approche est celle possédant un niveau de maturité le plus élevé (5) ce qui fait d'elle la méthode la plus précise et robuste (Groupe EcoInfo, & ; Berthoud, 2012, p. 84). À titre d'illustration, le logiciel Bilan Produit est un exemple d'ACV conçu par l'ADEME¹⁶.

VII. L'Évaluation Simplifiée et Qualitative du Cycle de Vie (ESQCV)

Cette méthode d'évaluation, basée sur une méthodologie ACV simplifiée, qui requiert moins d'informations et donne des résultats qualitatifs, identifie les impacts environnementaux comme la consommation d'énergies fossiles et les dommages perpétrés sur l'environnement comme l'extinction d'espèces animales et permet de réaliser une liste des sources de pollution potentielles afin de les localiser (Groupe EcoInfo, & ; Berthoud, 2012, p. 87).

L'approche est constituée de trois étapes (UVED, s. d.-g) :

1) Évaluation qualitative

Sur base d'un questionnaire à remplir par le fournisseur du produit analysé, il est possible d'identifier un nombre restreint d'impacts environnementaux (seuls les principaux sont pris en compte afin de faciliter la démarche) et ensuite une grille d'évaluation, comme celle présentée à la figure 13 ci-dessous, est complétée.

¹⁶ Ce logiciel est gratuit d'utilisation et disponible à l'adresse : <http://www.base-impacts.ademe.fr/>

Figure 13: Exemple d'une grille d'évaluation qualitative pour un produit fictif.

Problèmes environnementaux	Extraction des matières premières	Production	Distribution	Utilisation	Traitement de fin de vie
Pollutions et déchets : quantités, toxicité	-	0	++	+	
Épuisement des ressources naturelles : quantités utilisées, origine renouvelable ou non, ressource abondante ou rare	-	-	0	?	-
Bruits, odeurs, atteinte à l'esthétique	?	+	-	++	0
Appréciation par rapport à l'environnement : - défavorable + favorable ++ très favorable ? absence de données 0 sans objet					

Source : (UVED, s. d.-g).

Grâce à cette grille, il est possible de rapidement identifier les phases problématiques du cycle de vie d'un appareil.

2) Évaluation quantitative

Sur base des données relatives au produit étudié, une seconde fiche est remplie ce qui permet de quantifier les problèmes principaux identifiés à l'étape précédente. En d'autres termes, les impacts environnementaux les plus forts sont identifiés et mesurés à l'aide d'indicateurs comme par exemple la masse des matériaux composant le produit, son taux de recyclabilité (qui sera étudié au point X), son bilan énergétique, sa durabilité, etc.

La combinaison de ces deux premières étapes fait de l'ESQCV un outil à la fois qualitatif et quantitatif.

3) Recommandations

Les résultats obtenus à l'étape précédente doivent mener à des recommandations d'amélioration de l'appareil étudié.

En conclusion, une ESQCV a pour objectif d'améliorer un produit sans toutefois considérer tous les impacts environnementaux issus de chaque phase de son cycle de vie : cette méthode sélective (un ou plusieurs critères environnementaux analysés) ne permet donc pas la comparaison de produits différents mais permet l'amélioration constante de ceux-ci. Les experts la qualifient de progressive car elle fournit continuellement des améliorations ciblées à mettre en place. Son niveau de maturité est de 4 (UVED, s. d.-g).

VIII. Les bilans énergétiques

Ces bilans contiennent différentes mesures des consommations énergétiques liées au cycle de vie d'un produit. Leur objectif commun est de déterminer les actions à mettre en place pour réduire les consommations de ressources non renouvelables et développer l'utilisation de ressources renouvelables. Ce type d'indicateur est de nos jours devenu primordial pour les entreprises pour évaluer leur empreinte environnementale. Cependant, cette approche monocritère ne reflète pas tous les impacts du produit sur l'environnement (Groupe EcoInfo, & ; Berthoud, 2012, p. 87 - 88).

Parmi les bilans énergétiques les plus utilisés, citons le contenu énergétique (aussi appelé énergie grise) qui représente la quantité d'énergie totale utilisée pour un appareil au cours de son cycle de vie. Il est égal à la somme des consommations énergétiques prenant place à chaque étape du cycle de vie de l'appareil à laquelle est soustraite la somme des éventuelles énergies récupérées (récupération de la chaleur lors d'une incinération par exemple) (UVED, s. d.-b).

Un autre indicateur énergétique important est l'empreinte d'eau qui évalue la quantité d'eau utilisée et polluée au cours de la fabrication d'un appareil. Cet outil mesure donc aussi la dépendance d'une entreprise à cette ressource. Bien que l'eau douce soit considérée comme une ressource renouvelable, cette ressource a tendance à s'amenuiser jusqu'à en devenir très rare dans certaines régions du monde, notamment à cause de la population mondiale croissante et de l'augmentation du niveau de vie global (UVED, s. d.-e).

Ces deux outils monocritères et quantitatifs ont un niveau de maturité égal à 4.

IX. L'empreinte carbone

L'empreinte carbone d'un appareil, appelée aussi inventaire GES, quantifie les émissions de GES liées au cycle de vie de cet appareil pour évaluer son impact environnemental. Cet outil quantitatif et monocritère de niveau de maturité 4 possède différentes méthodologies de calculs définies et soumises à des normes strictes. Parmi les normes les plus populaires dans le monde figurent l'ISO 14067, le *Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol)* et le PAS 2050.

L'ISO 14067 se divise en deux parties : la première donne les principes à appliquer lors du calcul de l'empreinte carbone alors que la deuxième liste les conditions à remplir lors de la présentation des résultats et la communication des recommandations (UVED, s. d.-d).

Le *GHG Protocol* offre l'accès à un assortiment d'outils, de ressources et de bases de données pour faciliter la quantification de l'empreinte carbone (UVED, s. d.-d).

Enfin, la norme PAS 2050 définit les conditions à respecter et aide les entreprises lors de l'analyse des émissions de GES liées au cycle de vie de produits et services (UVED, s. d.-d).

X. Le taux de recyclabilité

Le taux de recyclabilité d'un appareil représente le pourcentage de composants de cet appareil qui peuvent être recyclés. Cependant, il faut le considérer avec précaution car une valeur élevée de cet indicateur peut cacher le fait que la partie non recyclée est très polluante. Cet outil quantitatif et monocritère de niveau de maturité 4 encourage les entreprises à modifier la conception de leurs produits pour les rendre plus recyclables (UVED, s. d.-m).

XI. Calculateur d'impact environnemental professionnel par Decathlon et l'INR¹⁷

Né d'un partenariat entre Decathlon et l'Institut du Numérique Responsable (INR), ce calculateur d'impact environnemental a été conçu pour mettre en évidence les impacts liés à la consommation du numérique dans le cadre professionnel. Cet outil, très simplifié, ne prend pas encore en compte tous les impacts sur l'environnement mais d'après leurs créateurs, il sera progressivement amélioré. De plus, il est possible de comparer les résultats obtenus aux impacts des déplacements quotidiens (trajets en avion, trajets maison-travail). Ce calculateur se base sur les données fournies par l'ADEME et GreenIT.fr.

Il nous est d'abord demandé d'indiquer le type d'équipement que nous utilisons. Pour ce faire, une liste de différents modèles d'ordinateurs portables professionnels des marques telles que Lenovo, Dell et Apple. Ensuite, il est nécessaire d'indiquer la durée d'utilisation de l'appareil : au plus celle-ci est élevée, au plus l'impact de la phase d'utilisation sera élevé mais l'impact environnemental annuel total sera plus faible car étalé sur un nombre d'années plus élevé. Une fois de plus, nous remarquons que c'est bien la phase de fabrication qui concentre la majorité des impacts environnementaux.

¹⁷ Ce calculateur est disponible à l'adresse : <https://institutnr.org/calculatrice/impact-environnemental-numerique-inr.html>

Pour la phase de fabrication, les étapes de production et de distribution sont prises en compte bien que les détails des calculs ainsi que les hypothèses émises ne soient pas fournis par les créateurs du calculateur. Il est aussi possible d'indiquer si nous utilisons un smartphone professionnel, bien que les impacts issus de celui-ci ne soient pas non plus détaillés.

Il y a aussi la possibilité d'indiquer le stockage *Cloud* utilisé ainsi que le nombre d'emails envoyés par jour. Enfin, il est possible d'indiquer le nombre d'heures de streaming vidéo par jour passées dans un cadre professionnel.

Le résultat final obtenu est exprimé en kgCO₂eq et représente soit l'impact global sur l'ensemble du cycle de vie de l'appareil étudié soit l'impact annuel.

En guise d'exemple, voici quelques résultats obtenus suite à plusieurs essais :

- La phase d'utilisation de n'importe quel ordinateur portable professionnel engendre un impact de 25 kgCO₂eq par année d'utilisation ;
- En moyenne, la phase de fabrication (qui inclut la distribution) d'un ordinateur portable professionnel a un impact de 340,65 kgCO₂eq ;
- Un giga-octet (Go) de stockage cloud utilisé a un impact de 0,12 kgCO₂eq par an ;
- Envoyer entre un et dix emails par jour pendant une année a un impact annuel de 32,25 kgCO₂eq ;
- Une heure de streaming vidéo (dans un cadre professionnel) par jour a un impact annuel de 19 kgCO₂eq.

Bien que ce calculateur prenne en compte les phases de fabrication, distribution et d'utilisation, il ne tient pas compte de la phase de fin de vie des appareils. De plus, bien que les données proviennent de bases de données confirmées scientifiquement, les créateurs du calculateur ne mentionnent nulle part les hypothèses qui ont été émises ou encore les détails des calculs effectués. Enfin, bien que l'empreinte carbone apporte déjà des informations importantes, ce calculateur n'est qu'un outil monocritère ce qui, malgré le fait qu'il soit quantitatif et analyse plusieurs phases du cycle de vie de l'appareil, ne fait pas de lui un outil de niveau de maturité maximal : en effet, de par ses caractéristiques et fonctionnalités, son niveau de maturité est de 4.

XII. L'EcoIndex par GreenIT.fr et le Collectif conception numérique responsable¹⁸

Cet outil permet d'évaluer la performance environnementale d'un site web (*URL*), son empreinte technique (son poids, sa complexité, etc.) et son empreinte environnementale associée en fonction de trois paramètres :

- Le nombre d'éléments ancrés sur la page web, qui informe sur la complexité de la page web et donc des efforts à effectuer par le navigateur pour afficher le site : au plus le site est complexe, au plus l'affichage est laborieux et donc la durée de vie de l'appareil utilisé est diminuée ;
- La quantité de données transférées qui reflète les efforts à effectuer pour transférer le site jusqu'au navigateur web. Dans la première version du logiciel, la connexion considérée est une connexion WIFI ;
- Le nombre de requêtes HTTP qui indique la charge serveur : dit de façon très simple, au plus le nombre de requêtes HTTP est élevé pour un site, au plus le nombre de serveurs requis pour charger la page est élevé.

En termes de résultats, le logiciel fournit différentes informations :

- Un EcoIndex : une note allant de 0 à 100 qui, lorsqu'elle est élevée, indique que la page web a une excellente performance environnementale. C'est la représentation la plus fréquemment utilisée pour évaluer un site. Les bornes de l'EcoIndex ont été définies et validées suite à une série d'analyses sur plus de 500.000 URLs différentes ;
- Une note allant de A à G qui représente la performance de la page web analysée par rapport aux 500.000 autres URLs testées. Il s'agit donc d'un rang reflétant la performance relative à l'échantillon analysé ;
- L'empreinte environnementale de la page web qui renseigne sur l'impact moyen du site en termes d'émissions de GES et de consommation d'eau douce ;

¹⁸ Cet outil est disponible à l'adresse : <http://www.ecoindex.fr/>

- Enfin, il est aussi possible d'effectuer une analyse de bonnes pratiques qui, selon certains paramètres, permet d'étudier si la page visitée est optimisée de façon à réduire son impact sur l'environnement ou non.

En guise d'exemple, voici les résultats obtenus pour la page web <https://www.rtbf.be/sport/> :

- EcoIndex : 45/100 ;
- Rang : D ;
- Empreinte d'eau : 3,15 cl ;
- Émissions de GES : 2,1 gCO₂eq.

En conclusion, cet outil permet de mesurer l'empreinte environnementale des pages web et constitue un bon outil de comparaison. L'EcoIndex est donc un outil multicritère à la fois qualitatif et quantitatif qui ne vise pas une étape du cycle de vie d'un appareil en particulier mais est plutôt une évaluation de la durabilité d'une page web à un moment donné. Son niveau de maturité s'élève donc à 4.

XIII. *Le Software Longevity Index (SLI) par GreenIT.fr et le Collectif conception numérique responsable*¹⁹

Comme vu précédemment, c'est la phase de fabrication des appareils numériques qui concentre la majorité des impacts sur l'environnement. Par conséquent, afin d'amortir l'empreinte écologique liée à cette phase sur une plus longue période, il est nécessaire d'allonger la durée de vie des équipements mais cela dépend fortement des logiciels qui y sont installés (Bordage, F., 2020).

¹⁹ Cet outil est disponible à l'adresse : <https://www.greenit.fr/2012/02/14/sli-un-indicateur-pour-evaluer-la-durabilite-des-logiciels/>

En effet, les raisons principales pour lesquelles les entreprises se débarrassent de leurs appareils numériques (ordinateurs et autre équipement informatique) sont :

- Car ces équipements n'arrivent plus à exécuter les nouvelles versions de logiciels trop exigeantes (manque de puissance), ce qui peut entraîner un risque au niveau de la sécurité des données étant donné que le logiciel de sécurité n'est pas à jour ;
- Les appareils ne sont plus sous garantie (Bordage, F., 2020).

Ainsi, la première raison est liée à la couche logicielle installée sur les appareils. Cette couche logicielle comporte deux composantes clés :

- Le support technique : c'est la durée durant laquelle le créateur du logiciel va rendre disponible des mises à jour pour son produit pour assurer leur bon fonctionnement. Malheureusement, il arrive que certains logiciels soient « abandonnés » par leurs éditeurs et donc ne soient plus mis à jour. Par conséquent, les responsables informatiques des entreprises, qui ne veulent prendre aucun risque de travailler avec de tels logiciels, sont donc forcés à passer vers une autre version ou un autre logiciel ;
- La puissance informatique : c'est la puissance nécessaire pour exécuter le logiciel. En effet, un appareil informatique peut vite se retrouver dépassé si les mises à jour ou nouvelles versions des logiciels évoluent trop rapidement en termes de puissance. Dans ce cas de figure, une entreprise aura tendance à se débarrasser de ses appareils pour en acquérir des plus puissants. Dès lors, le renouvellement prématuré des appareils est fortement conditionné par l'évolution des besoins en ressources des logiciels (Bordage, F., 2020).

Ainsi, c'est dans le but d'évaluer la durabilité des logiciels que GreenIT.fr et le Collectif conception numérique responsable ont développé un indicateur standard : le *Software Longevity Index (SLI)*. Cet outil se base sur la règle suivante : si la durée du support technique est allongée et/ou si le logiciel est édité de façon à nécessiter moins de ressources, alors il sera possible d'exécuter ce logiciel sur un appareil identique plus longtemps (Bordage, F., 2020).

Cet indicateur de durabilité logicielle se calcule comme suit :

$$SLI = \frac{\left[\frac{\left(\frac{P_n}{L_n} \right)}{\left(\frac{P_{n-1}}{L_{n-1}} \right)} \right]}{D}$$

Où :

- P : puissance nécessaire pour exécuter la version n du logiciel = [Fréquence processeur (MHz) * Mémoire vive (Mo) * Espace disque (Mo)] / 1024 ;
- L : durée du support technique de la version n du logiciel ;
- D : nombre d'années entre la date de sorties des versions n et n-1.

Au plus le résultat obtenu est faible, au plus la durabilité du logiciel étudié est grande. Au-delà de la valeur du *SLI*, il est aussi possible de comparer son évolution selon la version du logiciel étudiée car elle renseigne sur les progrès réalisés par l'éditeur : soit en allongeant la durée du support technique, soit en diminuant le besoin en ressources informatiques pour son exécution, soit en combinant les deux. Par conséquent, regarder l'évolution du *SLI* selon les différentes versions des logiciels permet de déterminer l'intérêt de migrer vers une nouvelle version.

En guise d'exemple, appliquons le modèle *SLI* au système d'exploitation Windows comme illustré à la figure 14.

Figure 14: Calcul du *SLI* pour les différentes versions du système d'exploitation Windows.

Windows	Puissance	Evolution	Années de support	Evolution	Ecart entre versions (années)	SLI
98 SE	456	0	3,9	0%		
2000 Pro	16 625	x36	5,2	31%	1,7	16
XP pro	56 250	x3	7,2	39%	1,7	1,4
Vista Enterprise	15 000 000	x267	5,1	-29%	5,0	75
7 pro	40 000 000	x3	5,2	0,3%	2,7	1,0

Source : (Bordage, F., 2020).

Ce tableau nous apporte plusieurs informations :

- Le besoin en puissance de Windows 2000 a évolué d'un facteur 36 par rapport à celui de Windows 98 et par conséquent la durabilité de Windows 2000 a baissé par rapport à l'ancienne version, malgré le fait que le nombre d'années de support technique ait été augmenté ;
- Par contre, grâce à l'évolution plus raisonnable de son besoin en ressources associée à l'allongement de la durée de son support technique, le *SLI* de Windows XP a nettement été amélioré le rendant plus durable par rapport à Windows 2000. Cela indique qu'en tant que responsable informatique, il était plus raisonnable de passer de la versions 98 à la version XP et donc d'attendre quelques années la sortie de cette dernière que de migrer directement à la version 2000, en termes de durabilité ;
- En suivant le même raisonnement, nous parvenons à la conclusion que le passage de la version XP à la version 7 était plus raisonnable que le passage de la version XP à la version Vista, quitte à patienter plus longtemps et donc amortir l'impact de la phase de fabrication des appareils sur une durée plus longue.

En conclusion, cet outil, comme démontré avec l'exemple précédent, permettrait de guider les responsables informatiques des entreprises à prendre de meilleures décisions quant au renouvellement des appareils utilisés par les employés et d'amortir l'impact environnemental de la phase de fabrication des équipements sur une durée d'utilisation allongée. La comparaison de la durabilité des versions des logiciels est une approche récente et devrait s'élargir prochainement aux appareils informatiques : il suffirait d'appliquer le même calcul que le *SLI* mais sans tenir compte de la durée séparant deux nouvelles versions du même appareil (Bordage, F., 2020). Cet outil qualitatif et monocritère possède un niveau de maturité égal à 1.

XIV. L'outil *Carbonalyser* par The Shift Project²⁰

Cet outil, créé par The Shift Project, se présente sous la forme d'une extension du navigateur Internet et évalue la consommation électrique ainsi que les émissions de GES liées à l'utilisation d'Internet. Afin d'évaluer les impacts environnementaux de la navigation Internet, l'outil :

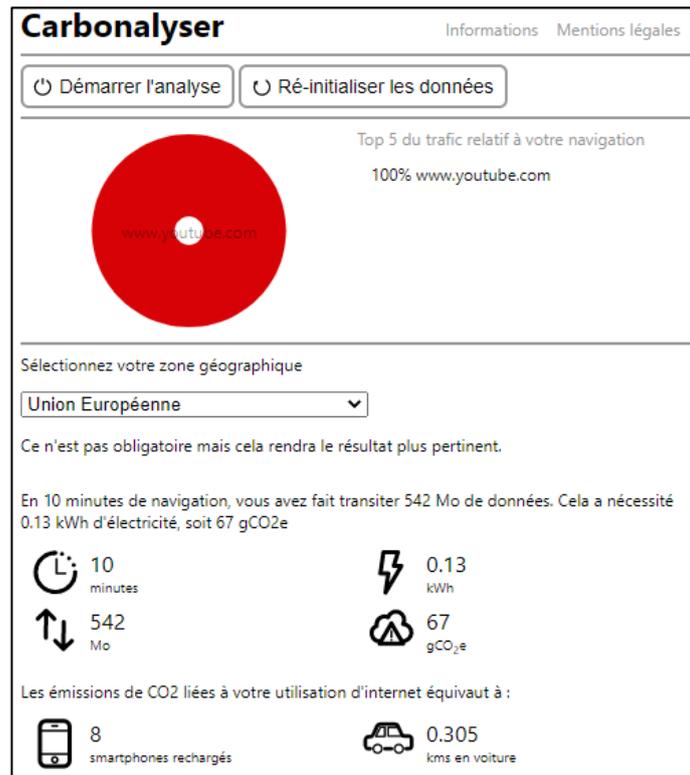
- Compte le volume de données qui transitent ;
- Exprime ce débit de données en consommation d'électricité grâce au modèle *Ibyte* développé par The Shift Project ;
- Exprime cette consommation d'électricité en émissions de GES selon la zone géographique de l'utilisateur (The Shift Project, 2020b).

Pour utiliser cet outil, il suffit de télécharger l'extension *Carbonalyser* pour le navigateur Internet utilisé et ensuite de lancer l'analyse. Une fois notre navigation terminée, les résultats sont communiqués par l'outil comme illustré à la figure 15.

En guise d'exemple, voici les résultats de l'analyse réalisée par l'outil lors du visionnage d'une vidéo de 10 minutes sur Youtube avec une résolution de 1080p. Les résultats obtenus se trouvent à la figure 15 ci-dessous.

²⁰ Cet outil est disponible à l'adresse : <https://theshiftproject.org/carbonalyser-extension-navigateur/>

Figure 15: Résultats obtenus lors du visionnage de 10 minutes de vidéo Youtube de qualité 1080p



Source : (The Shift Project, 2020b)

D'après l'analyse de l'outil, dix minutes de visionnage de vidéo Youtube avec une qualité de 1080p représenterait un trafic de données égal à 542 Mo. Ce trafic, exprimé en consommation électrique, représente 0,13 kWh ce qui est équivalent à recharger 8 smartphones. En termes d'émissions de GES, le visionnage du test aura émis 67 gCO₂eq ce qui correspond à 305 mètres parcourus en voiture (The Shift Project, 2020b).

Pour calculer la consommation en électricité, l'outil utilise le modèle *1byte* développé par The Shift Project. Ce modèle calcule la consommation électrique liée au trafic d'un volume de données défini en prenant en compte l'électricité consommée par les centres de données où sont stockées et transitent les données, les infrastructures réseau et l'appareil utilisateur utilisé pour visualiser les données transférées (The Shift Project, 2020b). De plus, deux hypothèses ont été émises lors des calculs :

- 1) Pour l'appareil utilisateur considéré, une moyenne a été calculée pour les consommations en électricité de l'ordinateur portable et du smartphone ;

2) La connexion utilisée par l'utilisateur est une connexion WIFI.

Enfin, pour les calculs des émissions de GES, l'outil tient compte de la zone géographique de l'utilisateur : la consommation électrique engendrée par la navigation web est transformée en émissions de GES grâce au facteur d'émission de la zone géographique concernée. Ce facteur exprime l'intensité carbone liée à la production d'électricité en fonction du mix électrique de chaque zone géographique comme suit (The Shift Project, 2020b) :

- Union Européenne : 0,276 kgCO₂eq/kWh ;
- France : 0,035 kgCO₂eq/kWh ;
- Etats-Unis : 0,493 kgCO₂eq/kWh ;
- Chine : 0,681 kgCO₂eq/kWh ;
- Autres (correspond au facteur moyen mondial) : 0,519 kgCO₂eq/kWh.

En conclusion, grâce à cette extension web, il est possible d'évaluer les impacts sur l'environnement (consommation électrique et émissions de GES) de notre navigation web sur base du volume de données échangées. Ce type d'outil multicritère et quantitatif ne tient compte seulement de la phase d'utilisation des appareils (navigation web). Son niveau de maturité s'élève à 4.

Conclusion

En guise de conclusion, un tableau récapitulatif des outils analysés au cours de ce chapitre ci-dessous (tableau 10). Nous observons sur ce tableau que le seul outil d'un niveau de maturité égal à 5 se trouve être l'ACV, dont un exemple est le logiciel Bilan Produit comme expliqué au point VI. Ce logiciel couvre toutes les phases du cycle de vie d'un produit de façon très précise, ce qui ne le rend pas simple d'utilisation pour l'utilisateur. En effet, il est nécessaire de rentrer un à un les noms des différents matériaux composant le produit dont nous souhaitons évaluer les impacts globaux ainsi que leur quantité exacte. Par conséquent, si l'entreprise qui produit l'appareil ne renseigne pas suffisamment sur la composition de l'appareil, il devient très difficile de réaliser une ACV précise. D'où le besoin de réaliser un calculateur qui est à la fois simple d'utilisation, ce qui est possible en généralisant les calculs et en posant des hypothèses simplificatrices, et suit en même temps une méthodologie d'ACV. De plus, comme nous le verrons au chapitre suivant, le calculateur permet d'évaluer les impacts sur l'environnement de plusieurs actions numériques, ce que les outils présentés précédemment ne permettaient pas de faire ou alors de façon limitée. En effet, seules certaines actions comme envoyer un email ou regarder une vidéo sont considérées par ces outils. Nous avons donc implémenté plusieurs actions, qu'il est aussi possible de cumuler pour représenter de façon la plus fidèle possible leurs impacts environnementaux. Nous présenterons ce calculateur ainsi que les hypothèses de calculs au chapitre suivant.

Tableau 10 : Tableau récapitulatif de l'analyse des outils d'évaluation d'impacts environnementaux.

Outil	Monocritère	Multicritère	Qualitatif	Quantitatif	Niveau de maturité	Phase(s) étudiée(s)
Matrice MET		X	X		3	Cycle entier
Matrice ERPA		X	X		3	Cycle entier
Matrice MECO		X	X		3	Cycle entier
Liste négative	X		X		2	Fabrication
Liste de contrôle		X	X		3	Cycle entier
Analyse de Cycle de Vie		X		X	5	Cycle entier
ESQCV ²¹	X	X	X	X	4	Cycle entier
Bilans énergétiques	X			X	4	Cycle entier
Empreinte carbone	X			X	4	Cycle entier
Taux de recyclabilité	X			X	4	Fabrication et fin de vie
Calculateur Decathlon et INR	X			X	4	Fabrication et utilisation
EcoIndex		X	X	X	4	-
<i>SLI</i>	X		X		1	-
<i>Carbonalyser</i>		X		X	4	Utilisation

²¹ Comme expliqué dans le paragraphe consacré à l'ESQCV, cet outil est à la fois qualitatif et quantitatif. De plus, c'est au choix de l'utilisateur de considérer un ou plusieurs critères.

Chapitre 7 : Méthodologie du calculateur d'impacts environnementaux

Nous présentons dans ce chapitre la méthodologie suivie lors de l'élaboration du calculateur d'impacts environnementaux suivant la méthodologie d'ACV. Pour chaque appareil, nous précisons les calculs effectués et hypothèses appliquées pour chacune des phases du cycle de vie analysées. Ensuite, nous présentons les actions numériques sélectionnées et qui figurent dans le calculateur. Enfin, nous présentons une série de cas pratiques qui comparent les impacts engendrés selon les paramètres d'utilisation, comme l'écoute d'un morceau de musique avec et sans le clip vidéo.

7.1 Définitions

Nous définissons dans ce point les éléments centraux du calculateur ainsi que les phases du cycle de vie qui sont analysées.

I. Définitions des éléments étudiés

Pour réaliser le calculateur, les trois acteurs du système numérique mondial sont représentés chacun par un ou plusieurs appareils numériques (appareils dont l'utilisation s'appuie sur l'usage du réseau Internet et les services numériques). Ainsi la catégorie des utilisateurs est représentée par :

- Un smartphone ;
- Un ordinateur portable ;
- Une télévision connectée.

La catégorie des centres de données sera quant à elle représentée par un centre de données moyen dont les spécifications techniques seront détaillées plus loin. Enfin, la catégorie des infrastructures de réseau sera elle représentée par un routeur wifi classique.

Ces appareils numériques ont été sélectionnés afin de quantifier et illustrer l'impact environnemental moyen d'une utilisation de services numériques en Belgique et en France.

Afin de quantifier l'utilisation de services numériques, des actions numériques dont l'impact a été mesuré (voir plus loin) ont été définies. Ces actions nécessitent par définition l'utilisation d'un appareil numérique, d'un routeur Internet et d'un serveur du centre de données. Voici la liste des actions retenues :

- Écouter un morceau de musique ;
- Regarder une vidéo en ligne ;
- Passer un appel vocal ;
- Regarder son fil d'actualité sur un réseau social ;
- Surfer sur le web ;
- Envoyer un email ;
- Passer un appel vidéo ;

Ces actions ainsi que les mesures prises sont détaillées au point 7.3.

II. Cycle de vie

Afin de donner une estimation la plus proche de la réalité, les phases de cycle de vie de chacun des appareils seront étudiées et intégrées dans le calculateur. Ces phases sont dans l'ordre :

A. La phase de fabrication

Cette phase regroupe l'extraction des matières premières utilisées pour la conception des appareils étudiés, la production des composants et l'assemblage des appareils.

Les facteurs environnementaux analysés pour cette phase sont :

- La quantité de chacune des matières premières extraites ;
- La quantité d'émissions de GES (kgCO₂eq) ;
- La consommation d'énergie primaire (kWh).

B. La phase de distribution

Cette phase vise à quantifier l'impact de l'acheminement de l'appareil depuis son lieu de production jusque l'utilisateur final en tenant compte de l'impact issu du transport et de l'emballage.

Les facteurs environnementaux analysés pour cette phase sont :

- La quantité d'émissions de gaz à effets de serre (GES) (kgCO₂eq) ;
- La consommation d'énergie primaire (kWh) ;
- L'épuisement des ressources abiotiques (Kg Sb).

C. La phase d'utilisation

Cette phase vise à quantifier l'impact sur l'environnement de l'utilisation de services numériques représentés par la liste d'actions numériques sélectionnées et présentées au point 7.3.

Les facteurs environnementaux analysés pour cette phase sont :

- La quantité d'émissions de gaz à effets de serre (GES) (kgCO₂eq) ;
- La consommation d'électricité (kWh).

D. La phase de fin de vie

Cette phase vise à évaluer les impacts sur l'environnement de la gestion de fin de vie des appareils numériques (ordinateurs portables, smartphones et télévisions connectées) selon deux scénarios : le recyclage dans une filière contrôlée et la réutilisation (ou utilisation prolongée) de l'appareil.

Les facteurs environnementaux analysés pour cette phase sont :

- La quantité d'émissions de gaz à effets de serre (GES) (kgCO₂eq) évitées pour la production d'un nouvel appareil grâce au recyclage d'un appareil usé ;

- Le nombre d'années d'utilisation de l'appareil nécessaires pour amortir l'impact de la production de l'appareil en question.

7.2 Description de la méthodologie appliquée et des hypothèses

Pour chaque phase du cycle de vie de chaque appareil, nous présentons les résultats obtenus selon les facteurs environnementaux étudiés. Une description de la méthodologie et des calculs est également donnée pour chaque appareil.

I. Phase de fabrication

L'hypothèse principale émise lors de la quantification de l'impact environnemental issu de la fabrication des appareils numériques est le fait de considérer que chaque appareil est produit et assemblé en Chine. En effet, afin de simplifier les calculs, nous ignorons l'impact issu de la phase de transport des matières premières telles que les métaux qui sont majoritairement issus d'Afrique jusqu'en Chine. Cette hypothèse est cruciale pour représenter l'impact en termes de consommation d'énergie primaire : en effet, la valeur des émissions de GES a été divisée par le facteur d'émissions de carbone qui exprime l'intensité carbone liée à la production d'électricité en fonction du mix électrique de chaque pays. En Chine, ce facteur s'élève à 0,555 kgCO₂/kWh (Climate Transparency, 2019).

A. Ordinateur portable

Les quantités de matières premières contenues dans un ordinateur portable moyen sont issues des données fournies par The Shift Project, un article scientifique et la branche EcoInfo du CNRS (The Shift Project, 2018) (Van Eygen et al., 2016) (EcoInfo, 2014).

Tableau 11 : Matériaux composant un ordinateur portable.

Matières premières	
Nom	Quantité (mg)
Gallium	8
Indium	20
Tantale	500
Cuivre	170.000
Palladium	12.000
Aluminium	426.000
Plastiques	1.218.000
Tungsten	-
Argent	440
Or	100
Néodyme	-
Cobalt	65.000

Source : *The Shift Project (2018), Van Eygen et al. (2016) et EcoInfo (2014).*

Les données utilisées pour évaluer les émissions de GES issues de la production d'un ordinateur portable sont fournies par les rapports d'analyses de cycle de vie suivant les normes ISO 14040 et ISO 14044 des ordinateurs portables suivants :

- Dell Latitude 7300 13-inch (256GB) 2019 (Dell, 2019);
- Dell Latitude E6400 13-inch (256GB) 2010 (Dell, 2010);
- Acer Chromebook C740 2015 (Acer, 2015);
- Asus Notebook U35SD Series 2012 (Asus, 2012);
- Asus Notebook C423 14-inch (64GB) 2019 (Asus, 2019);
- MacBook Pro 16-inch (512GB) 2019 (Apple, 2019a);
- MacBook Pro 13-inch (256GB) 2019 (Apple, 2020b);
- MacBook Air 13-inch (256GB) 2020 (Apple, 2020a);
- HP 250 G7 Notebook (256GB) 2019 (HP, 2019);
- HP 240 G7 Notebook (256GB) 2020 (HP, 2020).

Ensuite, la moyenne des émissions de GES issues de la phase de production de chaque ordinateur portable a été calculée pour représenter l'impact moyen en termes de kgCO₂eq de la production d'un ordinateur portable. Cette valeur s'élève à 162,22 kgCO₂eq.

En suivant la méthodologie détaillée dans le paragraphe d'introduction de cette phase, nous obtenons que la production d'un ordinateur portable implique une consommation d'énergie primaire s'élevant à 292,29 kWh (1.052 MJ).

B. Smartphone

Les quantités de matières premières contenues dans un smartphone moyen sont issues des données fournies par le rapport de Greenpeace (2017) et The Shift Project (2018) et illustrées au tableau 12.

Tableau 12 : Matériaux composant un smartphone.

Matières premières	
Nom	Quantité (mg)
Gallium	0,4
Indium	10
Tantale	50
Cuivre	15.120
Palladium	10
Aluminium	22.180
Plastiques	9.530
Tungstène	440
Argent	310
Or	30
Néodyme	50
Cobalt	5.380

Source : Greenpeace (2017) et The Shift Project (2018).

Les données utilisées pour évaluer les émissions de GES issues de la production d'un smartphone sont fournies par les rapports d'analyses de cycle de vie suivant les normes ISO 14040 et ISO 14044 des smartphones suivants :

- Sony Z5 2016 (Ercan et al.,2016) ;
- Apple iPhone 11 2019 (64GB) (Apple, 2019b) ;
- Apple iPhone 11 2019 (128GB) (Apple, 2019b) ;
- Apple iPhone 11 2019 (256GB) (Apple, 2019b) ;
- Apple iPhone XR 2018 (64GB) (Apple, 2018) ;
- Apple iPhone XR 2018 (128GB) (Apple, 2018) ;
- Apple iPhone XR 2018 (256GB) (Apple, 2018) ;
- Apple iPhone SE 2020 (64GB) (Apple, 2020c) ;
- Apple iPhone SE 2020 (128GB) (Apple, 2020c) ;
- Apple iPhone SE 2020 (256GB) (Apple, 2020c) ;
- Huawei P30 Pro 2019 (256GB) (Huawei, 2019a) ;
- Huawei P30 Lite 2019 (128GB) (Huawei, 2019b) ;
- Huawei Mate 20 Pro 2018 (128GB) (Huawei, 2018) ;
- Huawei P30 2019 (256GB) (Huawei, 2019c).

Cette liste regroupe majoritairement des smartphones produits par Apple et Huawei qui sont les acteurs principaux du marché des smartphones. Bien que Samsung soit un acteur majeur du marché des smartphones, cette entreprise ne divulgue aucune information concernant l'impact environnemental de ses produits. En effet, quelques analyses de cycle de vie ont été réalisées sur certains de leurs modèles mais ces analyses ne donnent aucune information quantitative, seulement des pourcentages concernant les impacts de chaque phase de vie. Dès lors, afin de rester le plus proche possible de la réalité, il a été décidé de ne pas inclure les smartphones de la marque Samsung pour cause de manque de données fiables les concernant.

La moyenne des émissions de GES issues de la phase de production de chaque smartphone s'élève à 57,21 kgCO₂eq.

Nous obtenons ainsi que la production d'un smartphone implique une consommation d'énergie primaire s'élevant à 103,09 kWh (371 MJ).

C. Télévision connectée

Il n'a pas été possible de lister les quantités de matières premières contenues dans une télévision connectée moyenne par manque de données.

Les données utilisées pour évaluer la consommation d'énergie primaires issue de la production d'une télévision connectée sont issues d'une analyse de cycle de vie suivant les normes ISO 14040 et ISO 14044. Cette analyse, réalisée pour une télévision LED, indique que la production d'un kilogramme de télévision connectée LED entraîne une consommation d'énergie primaires égale à 226,83 kWh (EPA, 2018). Cette valeur correspondant à une télévision de 32 pouces de diagonale, elle a été ramenée à 389,87 kWh pour correspondre à la production d'une télévision de 55 pouces de diagonale afin de représenter la taille moyenne d'un téléviseur.

Néanmoins, cette valeur est à considérer avec précaution car issue d'une seule et même source : à nouveau le manque d'informations communiquées par les producteurs de télévisions concernant les impacts environnementaux de leurs produits rend très complexe une analyse plus détaillée des impacts issus de la production d'une télévision connectée. Afin d'obtenir une valeur totale représentant au mieux la consommation d'énergie primaire issue de la production d'une télévision connectée, la moyenne des masses de cinq modèles vendus par les trois plus grands fabricants du marché des télévisions en termes de parts de marché a été calculée. Les modèles étudiés sont :

- Samsung Q77T (Samsung, 2020b) ;
- Samsung Q95T (Samsung, 2020e) ;
- Samsung Q90T (Samsung, 2020d) ;
- Samsung Q80T (Samsung, 2020c) ;
- Samsung Q75T (Samsung, 2020a) ;
- Sony XH95 (Sony, 2020e) ;
- Sony XG9505 (Sony, 2020b) ;
- Sony XH90 (Sony, 2020d) ;
- Sony XG8505 (Sony, 2020a) ;
- Sony XH80 (Sony, 2020c) ;
- LG 55UN73006LA (LG, 2020a) ;
- LG OLED55CX6LA (LG, 2020e) ;
- LG OLED55B9PLA (LG, 2020b) ;

- LG OLED55C9MLB (LG, 2020c) ;
- LG OLED55C9PLA (LG, 2020d).

La masse moyenne d'une télévision connectée, sur base des modèles étudiés, s'élève ainsi à 20,17 kilogrammes. En intégrant cette masse moyenne dans les calculs de la consommation en énergie primaire de la phase de production nous obtenons une valeur de 7.862,38 kWh (28.304,56 MJ).

En multipliant cette valeur par le facteur d'émissions de carbone de la Chine, nous obtenons que la production d'une télévision connectée moyenne d'une masse d'environ 20 kilogrammes engendre des émissions de 4.363,62 kgCO₂eq.

D. Centre de données

L'impact de la phase de production d'un centre de données n'est pas pris en compte dans le calcul de l'impact environnemental global d'une action numérique pour différentes raisons.

Premièrement, il n'y a que très peu de données disponibles renseignant sur les impacts de la production d'un serveur dont la fiabilité est vérifiée, ce qui rend toute quantification trop hasardeuse. Ensuite, comme expliqué à la partie 2, la majorité des impacts issus des centres de données sont relatifs à leur phase d'utilisation : 88% environ des énergies primaires consommées par un centre de données sont relatives à la phase d'utilisation de celui-ci ; il en est de même pour 93% des émissions de GES (Bordage F. et GreenIT.fr, 2019). Enfin, le serveur étant un appareil numérique que l'utilisateur final ne possède pas et qu'il partage avec de nombreux autres utilisateurs, il ne semble pas judicieux d'attribuer l'impact complet de la production de cet appareil à un utilisateur en particulier.

E. Appareil de réseau

L'évaluation des impacts issus de la production d'un appareil de réseau sont basés sur une analyse de cycle de vie réalisée par l'*IEEE*²² d'un routeur WIFI constitué de deux antennes et de 5 ports Ethernet (Sikdar, 2013).

²² *Institute of Electrical and Electronical Engineers.*

Cette configuration, très populaire, est typique pour ce genre d'appareils. Il n'a pas été possible de lister les quantités de toutes les matières premières composant cet appareil à cause du manque de données disponibles et fiables. En effet, seules les quantités d'aluminium (1,76 grammes) et de plastiques (272,84 grammes) sont communiquées de façon précise (Sikdar, 2013).

En ce qui concerne la quantité d'émissions de GES émises durant la phase de production, celles-ci s'élèvent à 8,59 kgCO₂eq pour le routeur étudié dont la masse est de 759 grammes. En termes d'énergie primaire, la phase de production en consomme 36,61 kWh (131,79 MJ) (Sikdar, 2013).

II. Phase de distribution

La deuxième phase du cycle de vie étudiée est la phase de distribution qui vise à évaluer les impacts engendrés par le transport de l'appareil du lieu de production au lieu où il sera utilisé et l'emballage de celui-ci. Voici les hypothèses émises pour les calculs des impacts relatifs à cette phase :

- Le lieu de production se trouve en Chine ;
- Les pays où l'appareil est utilisé sont la Belgique et la France.

En ce qui concerne la méthodologie des calculs, les impacts sont évalués grâce à l'outil Bilan Produit conçu par l'ADEME et présenté précédemment au point VI du chapitre 6. Concrètement, le logiciel évalue l'impact du transport et de l'emballage selon la masse du produit étudié, le nombre de kilomètres à parcourir, selon le type de transport utilisé, le type de matériaux utilisé pour l'emballage et la masse de ce dernier.

Dans notre cas, nous avons :

- La distance de vol entre Pékin et Bruxelles, qui est de 7.750 kilomètres (valeur arrondie issue du site <https://fr.distance.to/>) ;
- La distance de vol entre Pékin et Paris, qui est de 8.200 kilomètres (idem) ;
- L'emballage de chaque appareil est constitué entièrement de carton ondulé ;
- Chaque appareil est acheminé en avion (vol long-courrier).

Pour évaluer la masse moyenne de chaque catégorie d'appareil, une moyenne des masses de chaque appareil étudié a été calculée. Il en est de même pour leurs emballages. Ces informations sont fournies par les rapports environnementaux et/ou les fiches techniques de chaque appareil fournis par les entreprises les produisant.

A. Ordinateur portable

Pour calculer la masse moyenne d'un ordinateur portable, les modèles étudiés pour la phase de fabrication ont été utilisés. Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau 13 ci-dessous.

Tableau 13 : Résultat de la phase de distribution d'un ordinateur portable.

Critère	Belgique	France
Masse moyenne appareil (kg)	1,81	
Masse moyenne emballage (kg)	1	
Distance de transport (km)	7.750	8.200
Émissions de GES (kgCO ₂ eq)	28	29
Énergie primaire (kWh)	105,56	111,11
Épuisement des ressources abiotiques (kg Sb)	1,5 ⁻⁶	1,6 ⁻⁶

Source : Résultats issus du logiciel Bilan Produit.

B. Smartphone

Pour calculer la masse moyenne d'un smartphone, les modèles étudiés pour la phase de fabrication ont été utilisés. Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau 14 ci-dessous.

Tableau 14 : Résultat de la phase de distribution d'un smartphone.

Critère	Belgique	France
Masse moyenne appareil (g)	176	
Masse moyenne emballage (g)	345	
Distance de transport (km)	7.750	8.200
Émissions de GES (kgCO ₂ eq)	5,6	5,9
Énergie primaire (kWh)	21,11	22,5
Épuisement des ressources abiotiques (kg Sb)	3,4 ⁻⁷	3,5 ⁻⁷

Source : Résultats issus du logiciel Bilan Produit.

C. Télévision connectée

Pour calculer la masse moyenne d'un ordinateur portable, les modèles étudiés pour la phase de fabrication ont été utilisés. À noter que le poids moyen du téléviseur inclut le poids du pied. Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau 15 ci-dessous.

Tableau 15 : Résultat de la phase de distribution d'une télévision connectée.

Critère	Belgique	France
Masse moyenne appareil (kg)	20,17	
Masse moyenne emballage (kg)	6,33	
Distance de transport (km)	7.750	8.200
Émissions de GES (kgCO ₂ eq)	260	270
Énergie primaire (kWh)	972,22	1.027,78
Épuisement des ressources abiotiques (kg Sb)	1,4 ⁻⁵	1,5 ⁻⁵

Source : Résultats issus du logiciel Bilan Produit.

D. Centre de données

Les impacts issus de la phase de distribution d'un serveur de centre de données n'est pas considérée dans le calcul des impacts sur l'environnement.

E. Appareil de réseau

Les masses utilisées lors des calculs des impacts du transport et de l'emballage sont issues du rapport d'analyse de cycle de vie étudié pour la phase de production (Sikdar, 2013). Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau 16 ci-dessous.

Tableau 16 : Résultat de la phase de distribution d'un appareil de réseau.

Critère	Belgique	France
Masse moyenne appareil (g)	759	
Masse moyenne emballage (g)	250	
Distance de transport (km)	7.750	8.200
Émissions de GES (kgCO ₂ eq)	9,8	10
Énergie primaire (kWh)	36,11	38,89
Épuisement des ressources abiotiques (kg Sb)	5,3 ⁻⁷	5,6 ⁻⁷

Source : Résultats issus du logiciel Bilan Produit et Sikdar (2013).

III. Phase d'utilisation

Afin d'évaluer les impacts issus des phases d'utilisation de chaque appareil, il a d'abord été nécessaire de déterminer des profils d'utilisation pour chaque appareil étudié : ces profils permettent de représenter les impacts de chaque appareil selon leur durée d'utilisation quotidienne. De plus, la consommation électrique et les émissions de GES de chaque appareil, excepté le serveur du centre de données, sont exprimés respectivement en kWh par minute et en kgCO₂eq par minute. Pour le serveur du centre de données, ces deux impacts sont exprimés selon la quantité de bytes de données transférés.

Afin de convertir la consommation électrique de chaque appareil en émissions de GES, nous utilisons les facteurs d'émissions de carbone propre au pays où l'appareil est utilisé : pour la Belgique, ce facteur s'élève à 0,167 kWh/kgCO₂eq alors que pour la France, il est égal à 0,047kWh/ kgCO₂eq (Carbon footprint, 2019).

A. Ordinateur portable

Le profil d'utilisation de l'ordinateur portable a été déterminé pour représenter un usage professionnel, défini par le label américain *Energy Star*, de huit heures passées par jour en moyenne.

Pour évaluer la consommation électrique moyenne annuelle d'un ordinateur portable, la moyenne des consommations électriques annuelles de chaque ordinateur étudié aux phases de fabrication et de distribution a été calculée. Ensuite, cette valeur est ramenée en kWh par minute ce qui facilitera les calculs des impacts de chaque action numérique.

Pour évaluer les émissions de GES issues de l'utilisation d'un ordinateur portable, nous convertissons la consommation électrique moyenne par minute en émissions de GES par minute en utilisant le facteur d'émissions de carbone de chaque pays. Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau 17 ci-dessous.

Tableau 17 : Résultat de la phase d'utilisation d'un ordinateur portable.

Critère	Belgique	France
Consommation électrique moyenne annuelle (kWh/an)	17,34	
Consommation électrique moyenne par minute (kWh/minute)	9,89 ⁻⁵	
Facteur d'émissions carbone (kgCO ₂ eq/kWh)	0,167	0,047
Émissions de GES (kgCO ₂ eq/minute)	1,65 ⁻⁵	4,65 ⁻⁶

B. Smartphone

Le profil d'utilisation du smartphone a été déterminé sur base de l'utilisation quotidienne moyenne dans le monde qui est 3 heures et 42 minutes par jour en moyenne selon le rapport d'étude du cabinet américain *App Annie* (Dumonteil, 2020). Pour évaluer la consommation électrique moyenne annuelle d'un smartphone, la moyenne des consommations électriques annuelles de chaque smartphone étudié aux phases de fabrication et de distribution a été calculée. À noter que les consommations électriques de certains smartphones étudiés ont été recalculées pour refléter le profil d'utilisation déterminé précédemment dans les calculs des impacts. En effet, la majorité des entreprises dévoilent la consommation électrique de leurs produits selon une utilisation quotidienne de 2 heures et 30 minutes. Ensuite, cette valeur est ramenée en kWh par minute, de façon similaire aux ordinateurs portables.

Pour évaluer les émissions de GES issues de l'utilisation d'un smartphone, nous convertissons la consommation électrique moyenne par minute en émissions de GES par minute de façon similaire aux ordinateurs portables. Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau 18 ci-dessous.

Tableau 18 : Résultat de la phase d'utilisation d'un smartphone.

Critère	Belgique	France
Consommation électrique moyenne annuelle (kWh/an)	11,27	
Consommation électrique moyenne par minute (kWh/minute)	1,39 ⁻⁴	
Facteur d'émissions carbone (kgCO ₂ eq/kWh)	0,167	0,047
Émissions de GES (kgCO ₂ eq/minute)	2,32 ⁻⁵	6,53 ⁻⁶

Nous observons ici, en comparant les résultats du smartphone et de l'ordinateur portable, que ce n'est pas forcément le petit appareil qui consomme le moins, suggérant que la miniaturisation d'un appareil numérique n'est pas forcément synonyme d'impacts environnementaux réduits.

C. Télévision connectée

Le profil d'utilisation de la télévision connectée a été déterminé selon le temps moyen passé quotidiennement devant la télévision par les européens : en 2017, un européen passait en moyenne 231 minutes par jour devant sa télévision (Statista, 2018a).

Pour évaluer la consommation électrique moyenne annuelle d'une télévision connectée, la moyenne des consommations électriques annuelles de chaque télévision étudiée aux phases de fabrication et de distribution a été calculée. Ensuite, cette valeur est ramenée en kWh par minute.

Pour évaluer les émissions de GES issues de l'utilisation d'un ordinateur portable, nous convertissons la consommation électrique moyenne par minute en émissions de GES par minute de façon similaire aux appareils précédents.

À noter que le modèle de télévision considéré pour cette phase possède un écran de 55 pouces de diagonale.

Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau 18 ci-dessous.

Tableau 19 : Résultat de la phase d'utilisation d'une télévision connectée.

Critère	Belgique	France
Consommation électrique moyenne annuelle (kWh/an)	168,1	
Consommation électrique moyenne par minute (kWh/minute)	1,99 ⁻³	
Facteur d'émissions carbone (kgCO ₂ eq/kWh)	0,167	0,047
Émissions de GES (kgCO ₂ eq/minute)	3,33 ⁻⁴	9,36 ⁻⁵

D. Centre de données

Concernant le profil d'utilisation du serveur présent dans un centre de données, il a été déterminé pour refléter son caractère « hyperdisponible » et donc fixé à 24 heures par jour. Les impacts environnementaux sont évalués pour un centre de données dont les caractéristiques sont les suivantes :

- La surface du centre de données est de 1.000 m² pour représenter la surface moyenne des centres de données ;
- Le PUE est de 1,67 et est égal au PUE moyen de l'industrie des centres de données en 2019, comme expliqué à la partie 2 ;
- Le centre de données possède au total 1.500 unités de traitement (serveurs) et stockage de données ;
- La capacité maximale du centre de données est de 1 MW.

Afin de quantifier les impacts issus de la phase d'utilisation d'un centre de données, nous avons suivi la méthodologie suivante : pour nos calculs, nous sommes partis de la consommation moyenne d'un serveur. Sur base d'un rapport d'étude réalisé par la Commission Européenne qui se base sur l'évaluation énergétique de huit modèles de serveurs différents, nous obtenons que la consommation moyenne annuelle d'un centre de données possédant 1.500 serveurs est égale à 3 millions de kWh par an (European Commission, 2019).

Cette valeur ne tient compte que de l'électricité consommée par les serveurs, il n'est pas encore question des unités de stockage ni des systèmes électriques annexes tels que le système de refroidissement, le système de ventilation, l'éclairage, etc. Selon le même rapport, dans un centre de données d'une configuration similaire à celui considéré dans notre calculateur, 64,44% de l'électricité (sans tenir compte des systèmes électriques annexes) sont consommés par les serveurs (European Commission, 2019). La portion restante, 35,66%, est consommée pour l'utilisation des systèmes de stockage (European Commission, 2019). Nous obtenons donc que la quantité d'électricité utilisée pour le stockage des données s'élève à 1.660.000 kWh par an.

En résumé, l'électricité consommée pour le fonctionnement des serveurs et le stockage des données, pour un centre de données respectant notre configuration, s'élève à 4.660.000 kWh par an. À nouveau, cette consommation n'inclut pas la consommation électrique des systèmes annexes. Afin de les intégrer, nous multiplions cette valeur par le PUE moyen de l'industrie en 2019 donné par l'Uptime Institute et dont la valeur est égale à 1,67. Nous obtenons un résultat égal à 7.780.000 kWh par an.

Enfin, pour exprimer cette consommation électrique en fonction de la quantité de données transférées, nous divisons cette valeur par le trafic total de données du centre étudié dans le rapport de la Commission Européenne : ce trafic total est de 83 pétaoctets environ ($8,33 \cdot 10^{16}$ bytes) (European Commission, 2019). Nous obtenons donc un résultat de $9,34 \cdot 10^{-11}$ kWh/byte de données transféré.

Afin de vérifier et valider ce résultat, nous l'avons comparé à la valeur utilisée par le modèle *Ibyte* développé par The Shift Project et présenté au chapitre 6. Cette valeur est égale à $7,2 \cdot 10^{-11}$ kWh/byte et nous permet de valider notre résultat : en effet, les deux valeurs sont suffisamment proches l'une de l'autre et la différence peut s'expliquer par le fait que The Shift Project ne tient pas compte de l'électricité consommée par les systèmes de stockage des données et utilise un PUE égal à 2 dans ses calculs.

Enfin, afin d'exprimer le résultat obtenu en termes d'émissions de GES, nous allons suivre le même procédé que pour les autres appareils, c'est-à-dire utiliser le facteur d'émissions de carbone. Cependant, c'est la moyenne européenne qui est utilisée cette fois. En effet, pour le centre de données, il est très difficile de pouvoir affirmer qu'il se situe dans le même pays que celui de l'utilisateur.

C'est pourquoi, par souci de simplification des calculs et de généralisation des résultats, nous avons décidé de prendre le facteur d'émissions carbone européen qui s'élève à 0,339 kgCO₂eq/kWh (Carbon footprint, 2019). Nous obtenons donc un résultat de 3,17⁻¹¹ kgCO₂eq par byte transféré.

En guise de résumé, le tableau 20 ci-dessous reprend les différents hypothèses et résultats.

Tableau 20 : Résumé des hypothèses et résultats pour la phase d'utilisation d'un centre de données.

Critère	Valeur
Profil d'utilisation	24 heures/jour
Surface (m ²)	1.000
PUE	1,67
Nombre de serveurs (unité)	1.500
Consommation électrique des serveurs (kWh/an)	3.000.000
Consommation électrique des équipements de stockage (kWh/an)	1.660.000
Consommation électrique totale du centre de données (hors systèmes annexes) (kWh/an)	4.660.000
Consommation électrique totale du centre de données (avec systèmes annexes) (kWh/an)	7.780.000
Trafic annuel de données du centre étudié (bytes)	8,33 ¹⁶
Consommation électrique par byte transféré (kWh/byte)	9,34 ⁻¹¹
Émissions de GES par byte transféré (kgCO ₂ eq/byte)	3,17 ⁻¹¹

Source : European Commission (2019) et Carbon footprint (2019).

E. Appareil de réseau

De façon similaire au centre de données, le profil d'utilisation du routeur Internet a été déterminé de façon à refléter son « hyperdisponibilité », et donc nous considérons qu'il fonctionne constamment, 24 heures par jour.

Afin de comparer les impacts sur l'environnement selon le type de connexion utilisée (réseau mobile ou via un routeur Internet), nous avons évalué la consommation électrique respective des deux types de connexions et les avons exprimées selon la quantité de données transférées sur le réseau. Concrètement, à partir d'informations issues d'un rapport d'étude publié dans l'*International Journal of Green Technology* en 2019 (Andrae, 2019), nous obtenons les résultats affichés au tableau 21 ci-dessous.

Tableau 21 : Résultats de la phase d'utilisation d'un appareil de réseau.

Critère	Réseau mobile	Routeur Internet
Trafic de données global (2020) (EB)	641,5	2.506
Consommation électrique globale (2020) (TWh)	137	130,5
Consommation électrique par byte (kWh/byte)	1,85 ⁻⁹	4,52 ⁻¹⁰
Émissions de GES par byte (kgCO ₂ eq/byte) Belgique	3,09 ⁻¹⁰	7,54 ⁻¹¹
Émissions de GES par byte (kgCO ₂ eq/byte) France	8,71 ⁻¹¹	2,12 ⁻¹¹

Source : Andrae, (2019).

IV. Phase de fin de vie

Comme expliqué précédemment, les impacts de cette phase sont évalués selon deux scénarios :

- Le recyclage dans une filière contrôlée : nous évaluons pour ce scénario la quantité d'émissions de GES évitées lors de la production d'un nouvel appareil assemblé à partir de composants recyclés. Cette évaluation se fait sur base du pourcentage net d'émissions de GES évitées grâce au recyclage de chaque appareil. De plus, il tient aussi compte des émissions de GES qui sont émises durant les trois étapes du recyclage (le recyclage des appareils numériques se fait en trois étapes : la collecte et le tri, le démontage et la séparation mécanique et le traitement final) mais qui sont plus faibles que les émissions émises par la production d'un nouvel appareil.

Illustrons ceci par un exemple : l'appareil fictif que nous possédons engendre 100 kgCO₂eq d'émissions lors de sa phase de production. Afin de le recycler, 10 kgCO₂eq d'émissions sont émises mais les composants recyclés permettent de réduire de 60 kgCO₂eq la production d'un nouvel appareil du même type. Alors, le pourcentage net d'émissions de GES évitées grâce au recyclage de cet appareil s'élève à : $\left(\frac{60-10}{100}\right) * 100 = 50\%$.

Afin d'obtenir l'impact positif du recyclage, nous multiplions ensuite le taux respectif de chaque appareil par la quantité d'émissions de GES émises durant leurs phases de production respectives.

- La réutilisation de l'appareil (ou l'utilisation prolongée) : ce scénario vise à calculer le nombre d'années d'utilisation nécessaire afin d'amortir les impacts (émissions de GES) issus de la phase de production de chaque appareil. Le calcul est le suivant :

$$\frac{\text{émissions de GES relatives à la phase de production [kgCO}_2\text{eq]}}{\text{émissions de GES relatives à la phase d'utilisation } \left[\frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{minute}}\right]} * \left(\frac{1}{60 * 24 * 365,25}\right)$$

A. Ordinateur portable

Pour le premier scénario, nous basons nos calculs par les valeurs issues d'une étude réalisée en Belgique en collaboration avec Recupel²³ et Galloo²⁴ (Van Eygen et al., 2016). Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau 22 ci-dessous.

Tableau 22 : Résultats de la phase de fin de vie d'un ordinateur portable.

Critère	Valeur
Pourcentage moyen de la masse recyclable d'un ordinateur portable	89%
Émissions nettes de GES évitées grâce au recyclage (% des émissions relatives à la phase de production de l'appareil étudié)	87%
Émissions nettes de GES évitées grâce au recyclage (kgCO ₂ eq)	141,13

Source : Van Eygen et al. (2016).

Pour le scénario 2, nous obtenons qu'il faudrait utiliser son ordinateur portable en Belgique pendant un total de 16 années et 249 jours environ de manière continue afin d'amortir les émissions de GES issues de la phase de production, et de 66 années et 136 jours environ en France.

En moyenne, il faudrait donc utiliser un ordinateur portable pendant 42 années et 190 jours environ de manière continue afin d'amortir les émissions de GES issues de la phase de production.

²³ Recupel est une ASBL belge spécialisée dans la collecte et le recyclage des déchets électroniques (<https://www.recupel.be/fr/>)

²⁴ Galloo est une organisation belge spécialisée dans le recyclage des véhicules, des métaux et des plastiques. (<https://www.galloo.com/fr/>)

B. Smartphone

Pour le premier scénario, nous basons nos calculs sur les valeurs issues d'une étude scientifique (Yu, Williams, & ; Ju, 2010) et le rapport d'étude concernant le recyclage des métaux réalisé par les Nations Unies (United Nations Environment Programme, 2011). Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau 23 ci-dessous.

Tableau 23 : Résultats de la phase de fin de vie d'un smartphone.

Critère	Valeur
Pourcentage moyen de la masse recyclable d'un smartphone	90%
Émissions nettes de GES évitées grâce au recyclage (% des émissions relatives à la phase de production de l'appareil étudié)	74%
Émissions nettes de GES évitées grâce au recyclage (kgCO ₂ eq)	42,34

Source : United Nations Environment Programme (2011) et Yu, Williams, & Ju (2010).

Pour le scénario 2, nous obtenons qu'il faudrait utiliser son ordinateur portable en Belgique pendant un total de 4 années et 253 jours environ de manière continue afin d'amortir les émissions de GES issues de la phase de production, et de 16 années et 238 jours environ en France.

En moyenne, il faudrait donc utiliser un ordinateur portable pendant 10 années et 245 jours environ de manière continue afin d'amortir les émissions de GES issues de la phase de production.

C. Télévision connectée

Pour le premier scénario, nous basons nos calculs sur les valeurs issues du rapport annuel de Recupel (Recupel, s. d.) et le rapport d'analyse de cycle de vie d'un écran de télévision (Hischier & ; Baudin, 2010). Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau 24 ci-dessous.

Tableau 24 : Résultats de la phase de fin de vie d'une télévision connectée.

Critère	Valeur
Pourcentage moyen de la masse recyclable d'une télévision	80,39%
Émissions nettes de GES évitées grâce au recyclage (% des émissions relatives à la phase de production de l'appareil étudié)	57,76%
Émissions nettes de GES évitées grâce au recyclage (kgCO ₂ eq)	481,81

Source : Recupel, (s. d.) et Hischier & ; Baudin (2010).

Pour le scénario 2, nous obtenons qu'il faudrait utiliser sa télévision connectée en Belgique pendant un total de 4 années et 282 jours environ de manière continue afin d'amortir les émissions de GES issues de la phase de production, et de 16 années et 344 jours environ en France.

En moyenne, il faudrait donc utiliser un ordinateur portable pendant 10 années et 311 jours environ de manière continue afin d'amortir les émissions de GES issues de la phase de production.

7.3 Actions numériques : présentation et mesures

Afin de rendre fonctionnel le calculateur d'impacts, nous avons pris des mesures du trafic de données généré lors de la réalisation d'une série d'actions numériques. Ensuite, grâce aux résultats obtenus précédemment et aux mesures des actions numériques, nous obtenons un impact total qui inclut les impacts issus du cycle de vie de l'appareil utilisé et de l'action numérique réalisée.

Pour la prise de mesure, chaque action numérique a été réalisée en parallèle avec l'extension *Carbonalyser*, basée sur le modèle *Ibyte* et présentée au point XIV du chapitre 6. Grâce à cette extension, nous avons pu mesurer le trafic de données généré en Mo selon la durée de l'action. Certaines actions n'ayant pu être mesurées, les résultats se basent sur des tests effectués par divers sites Internet ou alors sont directement communiqués par la plateforme en question.

A. Écouter un morceau de musique

Cette action numérique a été mesurée sur la version web de l'application Spotify. Les différents niveaux de qualité sonore ont été mesurés un à un afin de comparer les différences de trafics de données générés. Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau 25 ci-dessous.

Tableau 25 : Résultats pour l'action « écouter un morceau de musique ».

Qualité	Durée du test (secondes)	Trafic de données mesuré (Mo)	Débit (Mo/seconde)	Débit (Mo/minute)
Basse	268	0,804	0,003	0,18
Normale	268	3,216	0,012	0,72
Haute	268	5	0,019	1,12
Très haute	268	10,72	0,040	2,4

Source : *The Shift Project (2020)*.

B. Regarder une vidéo en ligne

Cette action numérique a été mesurée sur les plateformes suivantes : Youtube, Facebook et Netflix. Les différents niveaux de qualité vidéo ont été mesurés un à un afin de comparer les différences de trafics de données générés. À noter que le débit de données d'une vidéo en 4K sur la plateforme Netflix est issu du site de la plateforme.²⁵ Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau 26 ci-dessous.

²⁵ <https://help.netflix.com/fr/node/87#>

Tableau 26 : Résultats pour l'action « regarder une vidéo en ligne ».

Plateforme	Qualité	Durée du test (secondes)	Trafic de données mesuré (Mo)	Débit (Mo/seconde)	Débit (Mo/minute)
Youtube	360p	169	21	0,124	7,46
	720p	169	58	0,343	20,59
	1080p	169	94	0,556	33,37
Facebook	360p	120	15	0,125	7,50
	720p	192	111	0,578	34,69
	1080p	200	196	0,980	58,8
Netflix	360p	60	5	0,083	5,00
	720p	60	11,68	0,195	11,68
	1080p	60	50	0,833	50,00
	4K	60	116,67	1,945	116,67

Source : *The Shift Project (2020)*.

C. Passer un appel vocal

Cette action numérique a été mesurée par le site Zangi²⁶ sur les plateformes suivantes : Line, Facebook, Skype et WhatsApp. L'application WhatsApp, qui dispose d'un mode d'économie de données transférées, possède un résultat selon le mode utilisé. Les résultats obtenus sont dans le tableau 27 ci-dessous.

²⁶ <https://zangi.com/news/en/5-best-messenger-apps-least-data-usage/>

Tableau 27 : Résultats pour l'action « passer un appel vocal ».

Plateforme	Qualité	Débit (Mo/minute)
Line	Normale	0,37
Facebook	Normale	0,33
Skype	Normale	0,72
WhatsApp	Normale	0,31
	Économie de données	0,2

Source : The Shift Project (2020).

D. Regarder son fil d'actualité sur un réseau social

Cette action numérique a été mesurée sur les plateformes suivantes : Instagram, Facebook et LinkedIn. Les deux dernières plateformes possèdent un mode de lecture de vidéos automatique qui peut être désactivé : la différence de trafic entre les deux modes a donc été mesurée pour ces deux plateformes. Les résultats obtenus sont dans le tableau 28 ci-dessous.

Tableau 28 : Résultats pour l'action « regarder son fil d'actualité sur un réseau social ».

Plateforme	Mode de lecture de vidéos automatique	Durée du test (secondes)	Trafic de données mesuré (Mo)	Débit (Mo/seconde)	Débit (Mo/minute)
Facebook	Activé	120	51	0,908	54,5
	Désactivé	120	109	0,425	25,5
LinkedIn	Activé	120	33	1,07	64
	Désactivé	120	128	0,275	16,5
Instagram	Activé	120	33	0,275	16,5

Source : The Shift Project (2020).

E. Surfer sur le web

Cette action numérique a été mesurée par le site ATT²⁷, spécialiste en TIC. Cette action consiste à surfer de site en site sans aucun téléchargement de fichier ni de vidéo regardée. Le débit mesuré est de 0,25 Mo par minute.

F. Envoyer un email

Cette action numérique a aussi été mesurée par le site ATT. Les mesures prises permettent de comparer l'effet d'un email avec une pièce jointe d'une taille de 1 Mo avec celui d'un email sans pièce jointe. Pour l'email sans pièce jointe et prenant trois minutes à écrire, nous obtenons un débit égal à 0,007 Mo/minute. En ce qui concerne l'email contenant une pièce jointe et prenant aussi trois minutes à écrire, le débit de données est égal à 0,34 Mo/minute. En règle générale, il suffit de rajouter la taille de la pièce jointe au débit de données de l'email pour évaluer son impact.

G. Passer un appel vidéo

Cette action numérique a été mesurée sur les plateformes suivantes : Skype, Facebook et WhatsApp. La première plateforme dispose d'un mode HD ce qui permet de comparer la différence de débit avec le mode normal. Les résultats obtenus sont dans le tableau 29 ci-dessous.

²⁷ <https://www.att.com/esupport/data-calculator/index.jsp>

Tableau 29 : Résultats pour l'action « passer un appel vidéo ».

Plateforme	Qualité	Durée du test (secondes)	Trafic de données mesuré (Mo)	Débit (Mo/seconde)	Débit (Mo/minute)
Skype	Normale	300	22,50	0,075	4,50
	Très haute (HD)	300	49,4	0,165	9,88
Facebook	Normale	300	22	0,073	4,40
WhatsApp	Normale	300	24	0,08	4,80

Source : *The Shift Project (2020)*.

7.4 Présentation du calculateur d'impacts et de résultats expérimentaux

Le calculateur en lui-même permet de calculer l'impact environnemental total, c'est-à-dire de tenir compte de toutes les phases du cycle de vie de l'objet dont la phase d'utilisation dépend de l'action numérique sélectionnée, d'une utilisation de services numériques. Le calculateur fonctionne en 6 étapes :

- 1) Choix du pays : les choix possibles sont la Belgique et la France. Ce choix permet de déterminer la valeur du facteur d'émissions de carbone qui sera utilisée pour convertir la consommation électrique en émissions de GES comme présenté dans la phase d'utilisation de chaque appareil. De plus, le choix du pays a de l'importance lors de l'évaluation des impacts liés à la phase de distribution pour déterminer la distance de transport.
- 2) Choix du type de connexion : les choix possibles sont « réseau mobile » et « WIFI ou ethernet ». Le fait de choisir une connexion de type WIFI ou câblée (ethernet) a un impact sur les phases de fabrication, de distribution et d'utilisation, comme vu précédemment. Le réseau mobile quant à lui n'influence que les impacts issus de la phase d'utilisation.

- 3) Choix de l'appareil : le choix de l'appareil détermine les impacts relatifs à la fabrication de l'appareil, sa distribution, la phase d'utilisation et la phase de fin de vie.
- 4) Description de l'action numérique réalisée : le but de cette étape est de quantifier le trafic de données généré selon le type d'action numérique, la plateforme utilisée et la durée d'utilisation. Il est possible pour certaines plateformes de choisir parmi différents paliers de qualité vidéo et sonore ou parmi certains modes d'utilisation comme le mode d'économie de données pour WhatsApp. La liste des actions numériques est détaillée au début de ce chapitre. Les résultats des mesures prises pour chaque action numérique sont résumés dans les tableaux au point 7.3.
- 5) La dernière étape consiste à indiquer si l'appareil en question sera remis dans une filière de recyclage contrôlée similaire à Recupel en fin de vie. En cas de réponse positive, les gains nets en émissions de GES, c'est-à-dire les émissions de GES évitées grâce au recyclage de certains composants de l'appareil dont les émissions de GES provoquées par les différentes étapes du recyclage sont soustraites, sont déduites des émissions de GES totales finales.
- 6) Enfin, la dernière étape consiste à calculer la durée d'utilisation nécessaire en années pour amortir les impacts issus de la phase de production de l'appareil étudié. L'utilisateur indique depuis combien de temps (en années) il possède son appareil et ensuite nous déduisons cette valeur à la moyenne relative à chaque appareil calculées et présentées au point 7.2.

Nous allons maintenant illustrer de manière pratique le fonctionnement ainsi que certains résultats issus de cas fictifs d'utilisation de services numériques.

Cas n° 1 :

Pour cette expérience, les paramètres suivants ont été inscrits dans le calculateur :

- L'utilisateur se trouve en Belgique lors de l'utilisation ;
- La connexion utilisée est du type WIFI ou ethernet ;
- L'appareil utilisé est un ordinateur portable ;
- L'action réalisée est le visionnage de vidéos en ligne sur la plateforme Youtube pendant une heure d'une qualité de 1080p ;
- L'appareil est utilisé depuis trois ans et sera envoyé dans une filière de recyclage contrôlée en fin de vie ;

Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau 30 ci-dessous.

Tableau 30 : Résultats pour le cas 1.

Phase	Appareil	Émissions de GES (kgCO ₂ eq)	Consommation électrique (kWh)
Fabrication	Ordinateur portable	162,2	292,29
	Routeur	8,59	36,61
<i>Sous-total</i>		170,82	328,90
Distribution	Ordinateur portable	28	105,56
	Routeur	9,8	36,11
<i>Sous-total</i>		37,8	141,67
Utilisation	Ordinateur portable	9,91 ⁻⁴	5,93 ⁻³
	Centre de données	0,634	1,87
	Routeur	1,51	9,04
<i>Sous-total</i>		2,15	10,92
Fin de vie		-141,13	
TOTAL		69,63	

Nous remarquons que les émissions totales de GES s'élèvent à 210,76 kgCO₂eq mais que grâce au recyclage de l'ordinateur en fin de vie, 141,13 kgCO₂eq sont économisés sur la production d'un nouvel ordinateur portable. De plus, pour cette expérience, 81,05% des émissions de GES émises sont relatives à la phase de fabrication contre 1,02% relatifs à la phase d'utilisation. De plus, comme l'appareil étudié est utilisé depuis trois ans, il faudrait en moyenne 39,5 ans d'utilisation supplémentaires pour amortir les impacts de la phase de fabrication.

Un des objectifs de ce calculateur, en plus de donner une évaluation des impacts globaux sur l'environnement, est de montrer aux utilisateurs les variations d'impacts selon le « niveau de confort » souhaité : en effet, il est plus confortable d'écouter de la musique en très haute définition ou de regarder une série ou un film en qualité 4K. Afin de comparer les impacts selon le niveau de confort souhaité, nous allons maintenant comparer les résultats obtenus précédemment avec un autre cas quasiment similaire si ce n'est que cette fois-ci, la qualité de la vidéo sera diminuée.

Cas n° 2 :

Les hypothèses reprises pour ce cas sont identiques à celles du cas n°1 sauf que la qualité vidéo est maintenant de 360p. Comme nous faisons varier les paramètres relatifs seulement à la phase d'utilisation, nous allons l'examiner plus en détails. Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau 31 ci-dessous.

Tableau 31 : Résultats pour le cas 2.

Phase	Appareil	Émissions de GES (kgCO ₂ eq)	Consommation électrique (kWh)
Fabrication	Ordinateur portable	162,2	292,29
	Routeur	8,59	36,61
<i>Sous-total</i>		170,82	328,90
Distribution	Ordinateur portable	28	105,56
	Routeur	9,8	36,11
<i>Sous-total</i>		37,8	141,67
Utilisation	Ordinateur portable	9,91 ⁻⁴	5,93 ⁻³
	Centre de données	0,142	0,418
	Routeur	0,34	2,02
<i>Sous-total</i>		0,48	2,44
Fin de vie		-141,13	
TOTAL		67,96	

Les autres phases ne sont pas affectées par le changement de l'hypothèse de qualité vidéo. Nous remarquons donc que le fait de regarder sur Youtube une vidéo d'une qualité de 360p pendant une heure permet de réduire les émissions de GES relatives à la phase d'utilisation de 1,67 kgCO₂eq par rapport à la qualité de 1080p. Cela représente en termes d'économies, selon l'ADEME, à produire 167 feuilles de papier de 80g ou la production de 2,5 kg de sucre environ. Il faut en outre garder à l'esprit que cette différence est mesurée pour une utilisation d'une heure seulement pour une seule personne...

Cas n° 3 :

Supposons maintenant que le contenu regardé sur Youtube dans le cas n°1 était uniquement composé de clips musicaux. Il est dès lors intéressant de s'interroger sur la différence entre une écoute sans les clips vidéo associés, comme sur Spotify par exemple, et avec comme sur Youtube.

Les hypothèses reprises pour ce cas sont identiques à celles du cas n°1, sauf que l'utilisation ne se fait plus sur Youtube mais sur Spotify avec une qualité de 1080p et sans contenu vidéo. Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau 32 ci-dessous.

Tableau 32 : Résultats du cas 3.

Phase	Appareil	Émissions de GES (kgCO ₂ eq)	Consommation électrique (kWh)
Fabrication	Ordinateur portable	162,2	292,29
	Routeur	8,59	36,61
<i>Sous-total</i>		170,82	328,90
Distribution	Ordinateur portable	28	105,56
	Routeur	9,8	36,11
<i>Sous-total</i>		37,8	141,67
Utilisation	Ordinateur portable	9,91 ⁻⁴	5,93 ⁻³
	Centre de données	0,0213	0,0627
	Routeur	0,05	0,3
<i>Sous-total</i>		0,07	0,37
Fin de vie		-141,13	
TOTAL		67,55	

À nouveau, les variations d'émissions de GES selon le type d'utilisation d'une même action numérique sont significatives : en effet, le fait de se passer de clip vidéo permet d'éviter d'émettre 2,08 kgCO₂eq ce qui est équivalent à, selon l'ADEME, laisser allumer une ampoule à incandescence pendant environ quatre jours consécutifs. À nouveau, la variation d'émissions de GES selon l'utilisation est significative.

Cas n° 4 :

Intéressons-nous maintenant à la variation d'impacts issue du type de connexion utilisée. Nous reprenons pour ce cas les mêmes conditions d'utilisation, à l'exception que la connexion utilisée, qui est maintenant du type réseau mobile. Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau 33 ci-dessous.

Tableau 33 : Résultats pour le cas 4.

Phase	Appareil	Émissions de GES (kgCO ₂ eq)	Consommation électrique (kWh)
Fabrication	Ordinateur portable	162,2	292,29
<i>Sous-total</i>		162,2	292,29
Distribution	Ordinateur portable	28	105,56
<i>Sous-total</i>		28	105,56
Utilisation	Ordinateur portable	9,91 ⁻⁴	5,93 ⁻³
	Centre de données	0,634	1,87
	Réseau mobile	6,19	37,09
<i>Sous-total</i>		6,83	38,97
Fin de vie		-141,13	
TOTAL		55,92	

Nous remarquons pour ce cas que des gains en émissions de GES ont été réalisés pour les phases de fabrication et de distribution : 8,62 kgCO₂eq et 9,8 kgCO₂eq respectivement. Cela reflète le fait que les impacts issus du réseau mobile ne sont pas comptabilisés pour ces deux phases, comme expliqué précédemment. Par contre, lorsque nous nous penchons sur la phase d'utilisation, l'augmentation des émissions de GES issues de l'utilisation du réseau mobile est significative : utiliser le réseau mobile pour l'action numérique étudiée engendre 4,68 kgCO₂eq de plus par rapport à l'utilisation du WIFI ou ethernet. Par conséquent, nous pouvons affirmer qu'utiliser un réseau mobile engendre des impacts pendant la phase d'utilisation qui sont supérieurs aux impacts engendrés par l'utilisation d'une connexion WIFI ou ethernet (sans considérer les phases de fabrication et de distribution).

7.5 Prochaines étapes

Bien que le calculateur présenté dans ce dernier chapitre se démarque des outils présentés pour les raisons évoquées dans la conclusion du chapitre 6, il reste encore de nombreux points qui pourraient être améliorés. Premièrement, il serait utile d'y intégrer de nouvelles zones géographiques pour l'utilisateur afin de donner un caractère mondial au calculateur. Ensuite, il serait nécessaire d'allonger les listes des différents appareils étudiés en y intégrant d'autres modèles produits par d'autres marques afin que l'utilisateur puisse sélectionner le modèle exact qu'il utilise. Malheureusement, cela nécessite d'avoir accès aux informations sur les produits, ce qui, comme vu avec les smartphones de la marque Samsung, n'est pas toujours le cas. De plus, il serait beaucoup plus agréable pour l'utilisateur d'avoir accès à ce calculateur sous la forme d'une application mobile ou d'un site web, remplaçant le fichier Excel actuel, qui est certes fonctionnel, mais dont le design pourrait être grandement embelli. Enfin, certaines mesures se basant sur les résultats fournis par d'autres logiciels, comme le Bilan Produit et l'outil *Carbonalyser*, il serait utile de développer notre propre méthodologie de calculs pour les phases de distribution et de mesure du flux de données lié à une action numérique.

Conclusion générale

Au cours de ce mémoire, nous avons étudié l’empreinte environnementale du système numérique mondial en débutant par une analyse des usages principaux des services numériques par les utilisateurs selon la composition des flux de données mondiaux. Nous avons conclu que c’est le visionnage de vidéos en ligne qui génère le plus de trafic de données et, sur base de l’analyse de l’évolution des usages du numérique, nous avons pu conclure que la tendance globale d’utilisation est à la hausse, ce qui confirme le fait que la transition numérique s’accélère aux quatre coins du globe.

Ensuite, grâce à l’analyse des impacts globaux du système numérique mondial sur l’environnement, nous avons effectué une répartition de cet impact global selon les trois acteurs principaux du numérique. Nous avons pu conclure, selon les informations rendues disponibles par des organisations comme GreenIT.fr et The Shift Project, que ce sont les utilisateurs qui, pour chaque facteur environnemental étudié, concentrent la majorité des impacts environnementaux. Cette première répartition aura donc permis d’identifier le segment sur lequel il fallait étudier plus en détails les sources et les causes de la pollution qu’ils génèrent. Par conséquent, nous avons effectué une répartition supplémentaire en suivant la méthodologie d’analyse de cycle de vie qui nous a permis de conclure que, bien que la phase de fabrication des appareils numériques soit responsable de la plus grande partie des impacts qu’ils génèrent au cours de leur cycle de vie, la phase d’utilisation de ces appareils ainsi que le comportement des utilisateurs sont également très importants.

Parallèlement, une étude approfondie des GAFAM et de leurs centres de données a été réalisée, permettant de conclure que c’est leur « hyperdisponibilité » et donc le fait qu’ils fournissent en permanence les services numériques qui les rend très polluants. Pourtant, les GAFAM essayent de réduire les impacts relatifs à la phase d’utilisation de leurs centres de données, mais par manque de règles et de contrôles des informations utilisées et communiquées par ces entreprises, il est très difficile de se fier uniquement à leurs rapports environnementaux. Comme vu lors de l’étude de cas, la vérité est trop souvent enjolivée pour rassurer les consommateurs. Avec l’introduction de lignes directrices pour la rédaction de ces rapports, il semble raisonnable de penser que les utilisateurs, plus informés sur le sujet, prendraient déjà plus conscience des conséquences de leurs actions numériques.

Une conclusion similaire peut être établie pour les appareils numériques. En effet, trop peu d'entreprises communiquent les impacts réels relatifs à leurs produits et trop peu d'outils d'évaluation complets et/ou faciles d'utilisation sont disponibles pour les consommateurs, comme vu aux chapitres 6 et 7. Est-ce par manque d'intérêt des utilisateurs ou par peur que ceux-ci, découvrant les véritables conséquences de leurs achats, décident de se rabattre sur des appareils conçus de façon plus écologiques ? Il serait intéressant d'étendre les recherches à ce sujet.

Grâce au calculateur d'impacts proposé, l'utilisateur peut, de manière généralisée, évaluer les impacts de son utilisation de services numériques ainsi que ceux liés au cycle de vie de ses appareils. Sur base des résultats obtenus lors des expériences réalisées, nous avons pu conclure que modifier certains paramètres lors de l'utilisation de services numériques liés au niveau de confort et au comportement de l'utilisateur ont des effets significatifs sur la réduction de l'empreinte environnementale du numérique. Il serait intéressant de tester ce calculateur auprès d'échantillons d'utilisateurs pour vérifier s'il est réellement efficace pour informer et conscientiser ceux-ci sur les impacts générés par leur utilisation ainsi que pour étudier les éventuels changements dans leur comportement suite à cette prise de conscience.

En guise de conclusion finale, nous reconnaissons que le numérique, malgré ses impacts négatifs sur l'environnement, a un rôle à jouer dans la transition vers l'utilisation de sources d'énergies renouvelables, comme vu avec l'exemple du *smart grid*, et dans la réduction des dommages causés à l'environnement liés à certains secteurs, comme l'agriculture ou la gestion des déchets. Néanmoins, il reste des barrières à franchir à la transition numérique, et elles ne pourront être franchies que grâce à plus de collaboration entre les différents acteurs et un partage d'informations étendu. De plus, pour que le numérique puisse être bénéfique à l'environnement, il sera nécessaire d'éduquer les utilisateurs et essayer de leur faire adopter un comportement que nous pourrions qualifier de *sobre numériquement*.

Annexe I : Ordres de grandeur des données

1 kilo-octet (Ko ou KB) = 1.024 octets ou Bytes

1 méga-octet (Mo ou MB) = 1.024 Ko

1 giga-octet (Go ou GB) = 1.024 Mo

1 péta-octet (Po ou PB) = 1,04⁶ Go

1 exa-octet (Eo ou EB) = 1.024 Po

1 zetta-octet (Zo ou ZB) = 1.024 Eo

Annexe II : Ordres de grandeur des masses

1 kilogramme (kg) = 1.000 grammes (g)

1 tonne (t) = 1.000 kilogrammes

1 mégatonne (Mt) = 1.000.000 tonnes

Annexe III : Facteurs environnementaux étudiés

Épuisement des ressources

La contribution à l'épuisement des ressources naturelles non renouvelables évalue l'impact du numérique en matière d'épuisement des stocks de métaux et matières premières.

Cet indicateur s'exprime en kg équivalent antimoine (kg eq. SB).

Émissions de GES

Les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère contribuent au réchauffement climatique.

Cet indicateur est exprimé en kilogramme équivalent CO₂ (kgCO₂eq).

Consommation d'eau

L'eau bleue est l'eau facilement mobilisable par les êtres humains (en opposition à l'eau verte captable uniquement par les végétaux).

Cet indicateur est exprimé en litre d'eau bleue (l ou m³ d'eau).

Énergie primaire (EP) :

L'énergie primaire est l'énergie nécessaire pour fabriquer l'énergie finale. Dans le domaine du numérique, en fonction de l'étape du cycle de vie d'un équipement, on utilise différentes énergies primaires pour fabriquer différentes énergies finales. Lors de certaines phases du cycle de vie, l'électricité est fabriquée à partir de différentes sources d'énergie primaire : rayonnement solaire, réaction nucléaire, combustion de charbon, etc.

Cet indicateur est exprimé en kiloWattheure (kWh) par unité de temps.

Consommation électrique (énergie finale)

La production de l'électricité consommée par les équipements numériques est la source d'une partie des impacts environnementaux listés ci-dessus.

Cet indicateur est exprimé en kiloWattheure (kWh) par unité de temps.

Annexe IV : Types d'émissions de GES

Il existe trois types d'émissions de GES différents (ADEME, s. d.) :

- **Scope 1** : Ce sont les émissions directes issues de sources possédées ou gérées par l'entreprise ou par l'organisation ;
- **Scope 2** : Ce sont les émissions indirectes issues de la production d'électricité, de chaleur ou de vapeur utilisés pour les activités de l'entreprise ou de l'organisation ;
- **Scope 3** : Les émissions indirectes, non comptabilisées dans le scope 2, issues de la chaîne d'approvisionnement de l'entreprise ou de l'organisation.

Bibliographie

- Abdur, R. (2019). Data Center Architecture Overview. *National Academy for Planning and Development* , 28, 33-41. Consulté à l'adresse https://www.researchgate.net/publication/334374013_Data_Center_Architecture_Overview
- Acer. (2015). ACER CSR. Consulté à l'adresse <https://www.acer-group.com/sustainability/en/greenhouse-gas-inventory.html>
- ADEME. (s. d.). ADEME - Site Bilans GES. Consulté le 8 août 2020, à l'adresse <https://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/accueil/contenu/index/page/bilan%20ges%20organisation/siGras/1>
- Alcott, B. (2005). Jevons' paradox. *Ecological Economics*, 54(1), 9-21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.03.020>
- Amazon. (2019). *Amazon Sustainability Report 2019*. Consulté à l'adresse <https://sustainability.aboutamazon.com/pdfBuilderDownload?name=sustainability-thinking-big-december-2019>
- Amazon. (s. d.). Services et produits de cloud Amazon | AWS. Consulté le 23 juin 2020, à l'adresse <https://aws.amazon.com/fr/>
- Andrae, A. (2019). Comparison of Several Simplistic High-Level Approaches for Estimating the Global Energy and Electricity Use of ICT Networks and Data Centers. *International Journal of Green Technology*, 5(1), 50-63. <https://doi.org/10.30634/2414-2077.2019.05.06>
- Apple. (2018). *iPhone XR Environmental Report*. Consulté à l'adresse https://www.apple.com/environment/pdf/products/iphone/iPhone_XR_PER_sept2018.pdf
- Apple. (2019). *Apple Environmental Sustainability Report 2019* . Consulté à l'adresse https://www.apple.com/environment/pdf/Apple_Environmental_Responsibility_Report_2019.pdf
- Apple. (2019a). *Product Environmental Report 16-inch MacBook Pro*. Consulté à l'adresse https://www.apple.com/environment/pdf/products/notebooks/16-inch_MacBookPro_PER_Nov2019.pdf
- Apple. (2019b). *Product Environmental Report iPhone 11*. Consulté à l'adresse https://www.apple.com/environment/pdf/products/iphone/iPhone_11_PER_sept2019.pdf
- Apple. (2020a). *Product Environmental Report 13-inch MacBook Air with Retina display*. Consulté à l'adresse https://www.apple.com/environment/pdf/products/notebooks/13-inch_MacBookAir_w_Retina_PER_Mar2020.pdf
- Apple. (2020b). *Product Environmental Report 13-inch MacBook Pro*. Consulté à l'adresse https://www.apple.com/environment/pdf/products/notebooks/13-inch_MacBookPro_PER_May2020.pdf
- Apple. (2020c). *Product Environmental Report iPhone SE*. Consulté à l'adresse https://www.apple.com/environment/pdf/products/iphone/iPhone_SE_PER_Apr2020.pdf

Arte. (2020, janvier 12). *Data centers : une pollution méconnue - Vox Pop* [Fichier vidéo]. Consulté à l'adresse <https://www.arte.tv/fr/videos/094553-000-A/data-centers-une-pollution-meconnue-vox-pop/>

Asus. (2012). *Carbon Neutrality Report*. Consulté à l'adresse https://csr.asus.com/english/file/ASUS_CarbonNeutralityCommitment.pdf

Asus. (2019). *Product Carbon Footprint Report*. Consulté à l'adresse https://csr.asus.com/english/file/PEP_Notebook_C423.pdf

Berrone, P., Ricart, J. E., Duch, A., & Carrasco, C. (2019). IESE Cities in Motion Index 2019. *IESE Insights*, 25-47. <https://doi.org/10.15581/018.st-509>

Berthoud, F. (2018). Le numérique : menace ou espoir pour l'environnement ? Présenté à Conférence « Comprendre et Agir », INRIA, Grenoble. Consulté à l'adresse <https://team.inria.fr/steep/seminars/les-conferences-debats-comprendre-et-agir/#conf17>

Berthoud, F. [France 3 H.-F. (2019, mars 21). Conférence : Virage numérique, gouffre écologique ? par Françoise Berthoud (CNRS, Rennes, France) [Fichier vidéo]. *YouTube*. Consulté à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=wBX9C2D9UQA>

Bordage, F. (2020, 26 avril). SLI : un indicateur pour évaluer la durabilité des logiciels. Consulté à l'adresse <https://www.greenit.fr/2012/02/14/sli-un-indicateur-pour-evaluer-la-durabilite-des-logiciels/>

Bordage, F., & GreenIT.fr. (2019, septembre). *Empreinte environnementale du numérique mondial*. Consulté à l'adresse https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2019/10/2019-10-GREENIT-etude_EENM-rapport-accessible.VF.pdf

Bricout, M., Roussel, R., & Monteil, C. (s. d.). Agriculture de précision – Dictionnaire d'agroécologie. Consulté le 25 mars 2020, à l'adresse <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/agriculture-de-precision/>

Budaev, D., Lada, A., Simonova, E., Skobelev, P., Travin, V., Yalovenko, O., G. Voshchuk & Zhilyaev, A. (2018). Conceptual design of smart farming solution for precise agriculture. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 13(3), 307-314. <https://doi.org/10.2495/dne-v13-n3-307-314>

Cailloce, L. (2018). Numérique : le grand gâchis énergétique. <https://lejournel.cnrs.fr/articles/numerique-le-grand-gachis-energetique>

Carbon footprint. (2019). *CARBON FOOTPRINT COUNTRY SPECIFIC ELECTRICITY GRID GREENHOUSE GAS EMISSION FACTORS*. Consulté à l'adresse https://www.carbonfootprint.com/docs/2019_06_emissions_factors_sources_for_2019_electricity.pdf

Cisco. (2018). *Cisco Visual Networking Index (VNI) Complete Forecast Update, 2017–2022*. Consulté à l'adresse https://www.cisco.com/c/dam/m/en_us/network-intelligence/service-provider/digital-transformation/knowledge-network-webinars/pdfs/1213-business-services-ckn.pdf

Cisco. (2019, août 28). What is a Data Center. Consulté le 17 avril 2020, à l'adresse <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/data-center-virtualization/what-is-a-data-center.html>

Climate Transparency. (2019). *BROWN TO GREEN : THE G20 TRANSITION TOWARDS A NET-ZERO EMISSIONS ECONOMY*. Consulté à l'adresse https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2019/11/B2G_2019_China.pdf

Dell. (2010). *Carbon Footprint of a Typical Business Laptop From Dell*. Consulté à l'adresse <https://i.dell.com/sites/content/corporate/corp-comm/en/Documents/dell-laptop-carbon-footprint-whitepaper.pdf>

Dell. (2019). *Life Cycle Assessment of Dell Latitude 7300 25th Anniversary Edition*. Consulté à l'adresse <https://corporate.delltechnologies.com/content/dam/digitalassets/active/en/unauth/data-sheets/products/laptops/full-lca-latitude7300-anniversary-edition.pdf>

Demeure, Y. R. S. (2018, juin 8). Microsoft plonge un data center dans l'océan Atlantique ! Consulté à l'adresse <https://sciencepost.fr/microsoft-plonge-un-data-center-dans-locean-atlantique/>

Dileep, G. (2020). A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable Energy*, 146, 2589-2625. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.092>

Dropbox Inc. (2019). *Dropbox Announces Fourth Quarter and Fiscal 2018 Results*. Consulté à l'adresse <https://dropbox.gcs-web.com/node/7246/pdf>

Dropbox Inc. (2020). *Dropbox Announces Fourth Quarter and Fiscal 2019 Results*. Consulté à l'adresse <https://investors.dropbox.com/node/8196/pdf>

Dropbox Inc. (s. d.). Dropbox Investor Relations. Consulté à l'adresse <https://dropbox.gcs-web.com/>

Dumonteil, P. (2020, 15 janvier). Les jeunes Français passent près de quatre heures par jour sur leur smartphone. Consulté à l'adresse https://www.bfmtv.com/tech/vie-numerique/les-jeunes-francais-passent-pres-de-quatre-heures-par-jour-sur-leur-smartphone_AN-202001150061.html

EcoInfo. (2014, 11 avril). Les matériaux dans les équipements terminaux. Consulté à l'adresse <https://ecoinfo.cnrs.fr/2014/04/11/les-materiaux-dans-les-equipements-terminaux/>

EDF. (2018, 30 août). Que peut-on faire avec 1 kWh ? Consulté le 18 avril 2020, à l'adresse <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/le-developpement-durable/que-peut-on-faire-avec-1-kwh>

EDF. (s. d.). Que peut-on faire avec 1 kWh ? Consulté à l'adresse <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/le-developpement-durable/que-peut-on-faire-avec-1-kwh>

eMarketer. (2019, décembre 3). US: Netflix Grabs the Most Attention, but Its Reign Will Be Challenged. Consulté le 26 avril 2020, à l'adresse <https://www.emarketer.com/newsroom/index.php/us-netflix-grabs-the-most-attention-but-its-reign-will-be-challenged/>

energuide.be. (s. d.). Combien les appareils électroménagers consomment-ils ? Consulté le 16 juillet 2020, à l'adresse <https://www.energuide.be/fr/questions-reponses/combien-les-appareils-electromenagers-consomment-ils/71/>

EPA. (2018). *Life Cycle Assessment Data for TV-LED - Baseline Product Modeled as a 32-inch LCD*. Consulté à l'adresse https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-02/documents/lca_tv.pdf

Ercan, M., Malmodin, J., Bergmark, P., Kimfalk, E., & Nilsson, E. (2016). Life Cycle Assessment of a Smartphone. *Atlantis Press*, 124-133. Consulté à l'adresse <https://download.atlantis-press.com/article/25860375.pdf>

European Commission. (2019). *COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT IMPACT ASSESSMENT*. Consulté à l'adresse <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/10102/2019/EN/SWD-2019-106-F1-EN-MAIN-PART-1.PDF>

Fabre, M. (2018, juin 19). Grâce au Français Naval Group, Microsoft plonge un data center dans la mer pour le refroidir écologiquement. Consulté à l'adresse <https://www.novethic.fr/actualite/energie/transition-energetique/isr-rse/microsoft-plonge-un-data-center-dans-la-mer-ecossaise-pour-le-refroidir-plus-ecologiquement-145937.html#b>

Facebook. (2020). *Facebook Sustainability Data 2019*. Consulté à l'adresse https://sustainability.fb.com/wp-content/uploads/2020/05/2019-Sustainability-Data-Disclosure_Final-1.pdf

Forbes, & Morgan, B. (2019, décembre 16). 100 Stats On Digital Transformation And Customer Experience. Consulté à l'adresse <https://www.forbes.com/sites/blakemorgan/2019/12/16/100-stats-on-digital-transformation-and-customer-experience/#1839e69e3bf3>

G Suite. (2018, juillet 26). Google Drive: Save time. Stay focused. (Cloud Next '18) [Fichier vidéo]. *YouTube*. Consulté à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=jCcZrJ1EIa4&t=1198s>

Giacobbe, M., Puliafito, C., & Scarpa, M. (2018). The Big Bucket: An IoT Cloud Solution for Smart Waste Management in Smart Cities. *Communications in Computer and Information Science*, 707, 43-58. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72125-5_4

GlaxoSmithKline. (2020). Carbon | GSK. Consulté à l'adresse <https://www.gsk.com/en-gb/responsibility/environment/carbon/>

Global Carbon Project. (s. d.). CO2 Emissions | Global Carbon Atlas. Consulté à l'adresse <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>

Goleman, D., & Norris, G. (2010, 4 avril). Op-Chart - How Green Is My iPad ? - *NYTimes.com*. Consulté à l'adresse <https://archive.nytimes.com/www.nytimes.com/interactive/2010/04/04/opinion/04opchart.html>

Google. (2019). *Google Environmental Report 2019*. Consulté à l'adresse https://services.google.com/fh/files/misc/google_2019-environmental-report.pdf

Greenpeace. (2017). *FROM SMART TO SENSELESS : The Global Impact of 10 Years of Smartphones*. Consulté à l'adresse <https://www.greenpeace.org/usa/wp-content/uploads/2017/03/FINAL-10YearsSmartphones-Report-Design-230217-Digital.pdf>

Griffith Institute for Tourism . (2016, novembre 9). The Next Stage of Sustainable Tourism – Measurement - Griffith Institute for Tourism Insights. Consulté le 19 mars 2020, à l'adresse <https://blogs.griffith.edu.au/institute-for-tourism/the-next-stage-of-sustainable-tourism-measurement/>

Griffith University, Becken, S., Connolly, R., Stantic, B., Le, D., Mandal, R., ... Marshall, N. (2018). *Projects 5.5. and 5.6: Aesthetics LongTerm Monitoring Program (ALTMP) for the Great Barrier Reef*. Consulté à l'adresse https://www.griffith.edu.au/_data/assets/pdf_file/0026/844622/Updateon5.5and5.6AestheticValueNESP.pdf

Groupe EcoInfo & Berthoud, F. (2012). *Impacts écologiques des technologies de l'information et de la communication*. Les Ulis, France : EDP Sciences.

Gyarmathy, K. (2019, août 15). N, N+1, 2N, 2N+1 Redundancy: What Do They Mean? Consulté le 20 avril 2020, à l'adresse <https://www.vxchnge.com/blog/n1-data-center-infrastructure-redundancy>

Hall, M. (2019, 29 mai). Facebook | Overview, History, & Facts. Consulté à l'adresse <https://www.britannica.com/topic/Facebook>

Hall, M. (2020, 9 avril). Amazon.com | History & Facts. Consulté à l'adresse <https://www.britannica.com/topic/Amazoncom#info-article-history>

Hischier, R., & Baudin, I. (2010). LCA study of a plasma television device. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(5), 428-438. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0169-2>

Hosch, W. L., & Hall, M. (2020, 11 mai). Google | History & Facts. Consulté le 23 juin 2020, à l'adresse <https://www.britannica.com/topic/Google-Inc>

HP. (2019). *Product carbon footprint HP 250 G7 Notebook PC*. Consulté à l'adresse https://h22235.www2.hp.com/hpinfo/globalcitizenship/environment/productdata/Countries/MultiCountry/productcarbonfootprint_notebo_201931323854209.pdf

HP. (2020). *Product carbon footprint HP 240 G7 Notebook PC*. Consulté à l'adresse https://h22235.www2.hp.com/hpinfo/globalcitizenship/environment/productdata/Countries/MultiCountry/productcarbonfootprint_notebo_2020312224856355.pdf

Huawei. (2018). *Product Environmental Information*. Consulté à l'adresse <https://consumer.huawei.com/en/support/product-environmental-information/>

Huawei. (2019a). *Product Environmental Information*. Consulté à l'adresse <https://consumer.huawei.com/en/support/product-environmental-information/>

Huawei. (2019b). *Product Environmental Information*. Consulté à l'adresse <https://consumer.huawei.com/en/support/product-environmental-information/>

Huawei. (2019c). *Product Environmental Information*. Consulté à l'adresse <https://consumer.huawei.com/en/support/product-environmental-information/>

ISO inc. (2012, août). Série 14 040 - Analyse du cycle de vie - SISO-INC. Consulté à l'adresse <http://www.siso-inc.com/pour-en-savoir-plus/autres-normes/normes-pour-l-environnement/serie-14040---analyse-du-cycle-de-vie>

- Keeso, A. (2014). *Big Data and Environmental Sustainability: A Conversation Starter* (14-04). Consulté à l'adresse <https://www.smithschool.ox.ac.uk/publications/wpapers/workingpaper14-04.pdf>
- Kemp, S. (2020, janvier 30). Digital 2020: Global Digital Overview. Consulté le 12 avril 2020, à l'adresse <https://datareportal.com/reports/digital-2020-global-digital-overview>
- Larousse. (s. d.). Définition de numérique. Consulté le 12 mai 2020, à l'adresse <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/num%C3%A9rique/55253>
- Levy, S. (2020, 7 février). Apple Inc. - Apple refocuses on key markets. Consulté le 23 juin 2020, à l'adresse <https://www.britannica.com/topic/Apple-Inc/Apple-refocuses-on-key-markets>
- LG. (2020a). LG 55UN73006LA : 55'' (139cm) | TV LED | UHD | 4K. Consulté à l'adresse <https://www.lg.com/fr/televiseurs/lg-55un73006la-led-uhd-4k-tv>
- LG. (2020b). LG OLED55B9PLA : 55'' (139 cm) LG OLED B9 | Processeur intelligent $\alpha 7$ Gen 2 | Contraste infini | Cinéma HDR avec Dolby Vision | Dolby Atmos | Cinema screen design. Consulté à l'adresse https://www.lg.com/be_fr/televiseurs/lg-OLED55B9PLA
- LG. (2020c). LG OLED55C9MLB : 55'' (139 cm) LG OLED C9 | Processeur Intelligent $\alpha 9$ Gen 2 | Contraste infini | Cinéma HDR avec Dolby Vision | Dolby Atmos | Cinema screen design. Consulté à l'adresse https://www.lg.com/be_fr/televiseurs/lg-OLED55C9MLB
- LG. (2020d). LG OLED55C9PLA : OLED55C9PLA. Consulté à l'adresse https://www.lg.com/be_fr/televiseurs/lg-OLED55C9PLA
- LG. (2020e). LG OLED55CX6LA : CX 55 inch 4K Smart OLED TV. Consulté à l'adresse https://www.lg.com/be_fr/televiseurs/lg-oled55cx6la
- Microsoft. (2019). *Microsoft Sustainability Report 2019*. Consulté à l'adresse <https://query.prod.cms.rt.microsoft.com/cms/api/am/binary/RE4d74y>
- Mulay, V. (2018, juin 5). StatePoint Liquid Cooling system: A new, more efficient way to cool a data center. Consulté à l'adresse <https://engineering.fb.com/data-center-engineering/statepoint-liquid-cooling/>
- Nations: Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- Netflix. (2019). *Q4 2019 Financial Statements*. Consulté à l'adresse <https://www.netflixinvestor.com/financials/financial-statements/default.aspx>
- Omnicores Agency. (2020a, février 10). YouTube by the Numbers: Stats, Demographics & Fun Facts. Consulté le 12 avril 2020, à l'adresse <https://www.omnicoreagency.com/youtube-statistics/>
- Omnicores Agency. (2020b, avril 22). Facebook by the Numbers: Stats, Demographics & Fun Facts. Consulté le 2 mai 2020, à l'adresse <https://www.omnicoreagency.com/facebook-statistics/>
- Peterson, R. (2019, janvier 1). Data centers: 2018 year in review. Consulté à l'adresse <https://engineering.fb.com/data-center-engineering/data-centers-2018/>

- Pornhub.com. (2018, janvier 9). 2017 Year in Review. Consulté à l'adresse <https://www.pornhub.com/insights/2017-year-in-review>
- Pornhub.com. (2019, décembre 11). The 2019 Year in Review. Consulté à l'adresse <https://www.pornhub.com/insights/2019-year-in-review>
- Public Utilities Board Singapore. (2016). Managing the water distribution network with a Smart Water Grid. *Smart Water*, 1(4). <https://doi.org/10.1186/s40713-016-0004-4>
- Rahman, G., Bin Ramim Chowdhury, F., Al Mamun, A., Hasan, R., & Mahfuz, S. (2013). Summary of Smart Grid: Benefits and Issues. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(3), 1-5. Consulté à l'adresse https://www.researchgate.net/profile/Sayed_Mahfuz/publication/273758536_Summary_of_Smart_Grid_Benefits_and_Issues/links/550aa3e00cf265693ced69c6/Summary-of-Smart-Grid-Benefits-and-Issues.pdf
- Recupel. (s. d.). Processing results – Recupel. Consulté le 27 juillet 2020, à l'adresse <https://annualreport.recupel.be/processingresults-en/#tabs>
- Rejcek, P. (2017, janvier 23). Big Data Is Helping Us See Environmental Problems in a Whole New Light. Consulté le 19 mars 2020, à l'adresse <https://singularityhub.com/2017/01/23/big-data-is-helping-us-see-environmental-problems-in-a-whole-new-light/>
- RTL Info. (2019, février 1). La pollution générée par Internet est comparable à celle du TRANSPORT AÉRIEN selon Greenpeace. Consulté à l'adresse <https://www.rtl.be/info/belgique/societe/la-pollution-generee-par-Internet-est-comparable-a-celle-du-transport-aerien-les-conseils-pour-agir-tout-de-suite-1096611.aspx>
- Samsung. (2020a). QLED 4K 55 pouces Q75T (2020). Consulté à l'adresse https://www.samsung.com/be_fr/tvs/qled-4k-q75t/QE55Q75TALXXN/
- Samsung. (2020b). QLED 4K 55 pouces Q77T (2020). Consulté à l'adresse https://www.samsung.com/be_fr/tvs/qled-4k-q77t/QE55Q77TALXXN/
- Samsung. (2020c). QLED 4K 55 pouces Q80T (2020). Consulté à l'adresse https://www.samsung.com/be_fr/tvs/qled-4k-q80t/QE55Q80TALXXN/
- Samsung. (2020d). QLED 4K 55 pouces Q90T (2020). Consulté à l'adresse https://www.samsung.com/be_fr/tvs/qled-4k-q90t/QE55Q90TALXXN/
- Samsung. (2020e). QLED 4K 55 pouces Q95T (2020). Consulté à l'adresse https://www.samsung.com/be_fr/tvs/qled-4k-q95t/QE55Q95TALXXN/
- Sattiraju, N. (2020, avril 1). Google Data Centers' Secret Cost: Billions of Gallons of Water. Consulté à l'adresse <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-04-01/how-much-water-do-google-data-centers-use-billions-of-gallons>
- Sikdar, B. (2013). A study of the environmental impact of wired and wireless local area network access. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 59(1), 85-92. <https://doi.org/10.1109/tce.2013.6490245>

Silva, B. N., Khan, M., & Han, K. (2018). Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 38, 697-713. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.053>

Social Blade. (2020). *Youtube user analytics / statistics for youtube* [Base de données]. Consulté à l'adresse <https://socialblade.com/youtube/user/youtube/monthly>

Sony. (2020a). XG85 | LED | 4K Ultra HD | Contraste élevé HDR | Smart TV (Android TV™). Consulté à l'adresse https://www.sony.be/fr/electronics/televiseurs/xg8505-series/specifications?cpint=SG_PRODUCT_DETAILS_PRI-TOUT-PDP-X85G_SERIES-EN_GL-2018-11-M01-EMBRACELIFES

Sony. (2020b). XG95 | Full Array LED | 4K Ultra HD | Contraste élevé HDR | Smart TV (Android TV). Consulté à l'adresse https://www.sony.be/fr/electronics/televiseurs/xg9505-series/specifications?cpint=SG_PRODUCT_DETAILS_PRI-TOUT-PDP-X95G_SERIES-EN_GL-2018-11-M01-UNLOCKWORLDS

Sony. (2020c). XH80 | 4K Ultra HD | Contraste élevé HDR | Smart TV (Android TV). Consulté à l'adresse <https://www.sony.be/fr/electronics/televiseurs/xh80-series/specifications>

Sony. (2020d). XH90 / XH92 | Full Array LED | 4K Ultra HD | Contraste élevé HDR | Smart TV (Android TV). Consulté à l'adresse <https://www.sony.be/fr/electronics/televiseurs/xh90-series/specifications>

Sony. (2020e). XH95 | Full Array LED | 4K Ultra HD | Contraste élevé HDR | Smart TV (Android TV). Consulté à l'adresse <https://www.sony.be/fr/electronics/televiseurs/xh95-series/specifications>

Statista. (2018a). Daily TV viewing time in European countries 2017. Consulté à l'adresse <https://www.statista.com/statistics/422719/tv-daily-viewing-time-europe/>

Statista. (2018b). Nombre d'utilisateurs inscrits à Skype au monde 2009-2024. Consulté à l'adresse <https://fr.statista.com/statistiques/873142/nombre-utilisateurs-inscrits-skype-monde/>

Statista. (2019). Number of active video gamers worldwide from 2014 to 2021. Consulté à l'adresse <https://www.statista.com/statistics/748044/number-video-gamers-world/>

Statista. (2020a) Call of Duty: Warzone players 2020. Consulté à l'adresse <https://www.statista.com/statistics/1110000/call-of-duty-warzone-players/>

Statista. (2020b). Facebook users worldwide 2020. Consulté le 26 mars 2020, à l'adresse <https://www.statista.com/statistics/264810/number-of-monthly-active-facebook-users-worldwide/>

Sverdlik, Y. (2019, octobre 17). Analysts: There are Now More than 500 Hyperscale Data Centers in the World. Consulté le 9 avril 2020, à l'adresse <https://www.datacenterknowledge.com/cloud/analysts-there-are-now-more-500-hyperscale-data-centers-world>

The Radicati Group Inc. (2018). *Email Statistics Report, 2018-2022*. Consulté à l'adresse https://www.radicati.com/wp/wp-content/uploads/2018/01/Email_Statistics_Report,_2018-2022_Executive_Summary.pdf

The Radicati Group Inc. (2015). *Email Statistics Report, 2015-2019*. Consulté à l'adresse <https://www.radicati.com/wp/wp-content/uploads/2015/02/Email-Statistics-Report-2015-2019-Executive-Summary.pdf>

The Shift Project. (2020a). *Déployer la sobriété numérique*. Consulté à l'adresse <https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2020/01/2020-01.pdf>

The Shift Project. (2018). *-LEAN ICT - POUR UNE SOBRIÉTÉ NUMÉRIQUE*. Consulté à l'adresse <https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2018/11/Rapport-final-v8-WEB.pdf>

The Shift Project. (2019). *Climat : l'insoutenable usage de la vidéo en ligne*. Consulté à <https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/07/2019-01.pdf>

The Shift Project. (2020b). « Carbonalyser » : découvrez combien surfer sur le web coûte au climat. Consulté le 7 juin 2020, à l'adresse <https://theshiftproject.org/carbonalyser-extension-navigateur/>

United Nations (2014). *World urbanization prospects: The 2014 revision, highlights*. United Nations Environment Programme. (2011). *Recycling Rates of Metals : A status report*. Consulté à l'adresse http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8702/Recycling_Metals.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Uptime Institute Intelligence. (2019). *Annual Data Center Survey Results*. Consulté à l'adresse <https://datacenter.com/wp-content/uploads/2019/06/data-center-survey-2019.pdf>

UVED. (s. d.-a). L'ECO-CONCEPTION ET SES OUTILS - Analyse du Cycle de Vie. Consulté le 13 juillet 2020, à l'adresse http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap02/co/ch02_440_2-2-13.html

UVED. (s. d.-b). L'ECO-CONCEPTION ET SES OUTILS - Contenu énergétique (énergie grise). Consulté le 14 juillet 2020, à l'adresse http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap02/co/ch02_330_2-2-5.html

UVED. (s. d.-c). L'ECO-CONCEPTION ET SES OUTILS - Deux grandes catégories d'outils. Consulté le 13 juillet 2020, à l'adresse http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap02/co/ch02_280_2-1.html

UVED. (s. d.-d). L'ECO-CONCEPTION ET SES OUTILS - Empreinte carbone. Consulté le 14 juillet 2020, à l'adresse http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap02/co/ch02_310_2-2-3.html

UVED. (s. d.-e). L'ECO-CONCEPTION ET SES OUTILS - Empreinte eau. Consulté le 14 juillet 2020, à l'adresse http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap02/co/ch02_320_2-2-4.html

UVED. (s. d.-f). L'ECO-CONCEPTION ET SES OUTILS - Empreinte écologique. Consulté le 13 juillet 2020, à l'adresse http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap02/co/ch02_300_2-2-2.html

UVED. (s. d.-g). L'ECO-CONCEPTION ET SES OUTILS - Évaluation Simplifiée et Qualitative du Cycle de Vie. Consulté le 13 juillet 2020, à l'adresse http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap02/co/ch02_420_2-2-11.html

- UVED. (s. d.-h). L'ECO-CONCEPTION ET SES OUTILS - Listes de contrôle (check lists). Consulté le 13 juillet 2020, à l'adresse http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap02/co/ch02_360_2-2-8.html
- UVED. (s. d.-i). L'ECO-CONCEPTION ET SES OUTILS - Listes de substances (listes négatives). Consulté le 13 juillet 2020, à l'adresse http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap02/co/ch02_370_2-2-9.html
- UVED. (s. d.-j). L'ECO-CONCEPTION ET SES OUTILS - Matrice Environmentally Responsible Product Assessment. Consulté le 13 juillet 2020, à l'adresse http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap02/co/ch02_400_2-2-10-2.html
- UVED. (s. d.-k). L'ECO-CONCEPTION ET SES OUTILS - Matrice Materials-Energy-Chemical products, Others. Consulté le 13 juillet 2020, à l'adresse http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap02/co/ch02_410_2-2-10-3.html
- UVED. (s. d.-l). L'ECO-CONCEPTION ET SES OUTILS - Matrice Materials-Energy-Toxicity. Consulté le 13 juillet 2020, à l'adresse http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap02/co/ch02_390_2-2-10-1.html#footnotesN102EE
- UVED. (s. d.-m). L'ECO-CONCEPTION ET SES OUTILS - Taux de « recyclabilité ». Consulté le 14 juillet 2020, à l'adresse http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap02/co/ch02_350_2-2-7.html
- Van de Voort, T., Zavrel, V., Galdiz, I., & Hensen, J. (2017). Analysis of performance metrics for data center efficiency. *Rehva Journal*, 1, 5-11. Consulté à l'adresse https://www.rehva.eu/fileadmin/REHVA_Journal/REHVA_Journal_2017/RJ1/p.05/05-11_RJ1701_WEB.pdf
- Van Eygen, E., De Meester, S., Tran, H. P., & Dewulf, J. (2016). Resource savings by urban mining : The case of desktop and laptop computers in Belgium. *Resources, Conservation and Recycling*, 107, 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.032>
- Whitehead, B., Andrews, D., Shah, A., & Maidment, G. (2014). Assessing the environmental impact of data centres part 1: Background, energy use and metrics. *Building and Environment*, 82, 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.021>
- Wogan, D. (2014, mars 12). With Wiki Energy, Pecan Street Project shares the largest residential energy database with the world. Consulté à l'adresse <https://blogs.scientificamerican.com/plugged-in/with-wiki-energy-pecan-street-project-shares-the-largest-residential-energy-database-with-the-world/>
- World Health Organization . (2010). *Telemedecine: Opportunities and developments in Member States* (Volume 2). Consulté à l'adresse https://www.who.int/goe/publications/goe_telemedicine_2010.pdf
- World Health Organization. (2018). *Global Health Observatory data repository* [TeleHealth Reported data by country]. Consulté à l'adresse <https://apps.who.int/gho/data/node.main.GOE03?lang=en>
- Yu, J., Williams, E., & Ju, M. (2010). Analysis of material and energy consumption of mobile phones in China. *Energy Policy*, 38(8), 4135-4141. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.041>

Yuan, E. (2020, avril 16). A Message to Our Users. Consulté à l'adresse <https://blog.zoom.us/wordpress/2020/04/01/a-message-to-our-users/>

Yuventi, J., & Mehdizadeh, R. (2013). A critical analysis of Power Usage Effectiveness and its use in communicating data center energy consumption. *Energy and Buildings*, 64, 90-94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.015>

Zachary, G. P., & Hall, M. (2020, 10 janvier). Microsoft Corporation | History, Products, & Facts. Consulté le 23 juin 2020, à l'adresse <https://www.britannica.com/topic/Microsoft-Corporation>

Zaveri, P. (2020, avril 30). Microsoft Teams now has 75 million daily active users, adding 31 million in just over a month. Consulté à l'adresse <https://www.businessinsider.fr/us/microsoft-teams-hits-75-million-daily-active-users-2020-4>

Zhou, K., Fu, C., & Yang, S. (2016). Big data driven smart energy management: From big data to big insights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 215-225. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.050>