

L'impact environnemental du numérique au Québec et au Canada

2E RAPPORT DU PROJET DIAGNOSTIC

RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL DIRIGÉ PAR MAXIME PINSARD

Auteurs : Maxime Pinsard, Julien Toussaint.

License : CC-BY-NC-SA 

Partage libre avec attribution des auteurs, pas d'utilisation commerciale, partage dans les mêmes conditions.



Pourquoi ce rapport ?

Ceci est le deuxième rapport du projet « diagnosTIC », faisant suite à notre état des lieux sur le numérique au Québec et au Canada ¹. L'étendue géographique n'est plus centrée sur la ville de Montréal, mais s'étend au Canada au complet, tout en transposant les chiffres à l'échelle du Québec. Les impacts des technologies de l'information et de la communication (TIC) sont aussi calculés pour le monde entier, car le numérique est intrinsèquement mondialisé, et cela fournit un cadre de comparaison pour les chiffres nationaux. Le but est de quantifier le numérique à ces trois niveaux, en présentant des métriques environnementales (émissions de GES, épuisement des ressources ...), mais aussi d'autres indicateurs pertinents, comme l'énergie utilisée ou la quantité d'appareils par exemple. C'est la première fois à notre connaissance qu'un tel inventaire est réalisé à l'échelle du Canada ou du Québec, et vient compléter les rapports déjà publiés pour l'échelle mondiale ², ou pour le cas de la France par exemple.

Mots-clés : numérique, TIC, technologies, digital, Québec, Canada, mondial.

Présentation des auteurs

M. Pinsard est ingénieur, et depuis mi-2020 PhD en énergie et matériaux de l'INRS Montréal. Il gère aussi l'antenne montréalaise du Low-tech Lab (basses technologies), et a rejoint *Les Shifters Montréal* en Octobre 2019.

J. Toussaint est ingénieur et consultant en énergie, notamment sur les enjeux de décarbonation. Il a co-créé l'antenne des *Shifters Montréal* en janvier 2019 afin de sensibiliser localement aux enjeux de la transition énergétique et des changements climatiques.

¹ M. Pinsard *et al.*, « Montréal, le Québec, le Canada : numérique à quel point ? » 1^{er} rapport du projet DiagnosTIC, *Les Shifters Montréal* (2020).

² Le présent rapport n'engage en rien la responsabilité de *The Shift Project*, ni de son association sœur *Les Shifters*. Les Shifters Montréal et leurs auteurs gardent la responsabilité pleine et entière des données et opinions du présent document.

SOMMAIRE

POURQUOI CE RAPPORT ?	1
MOTS-CLÉS : NUMÉRIQUE, TIC, TECHNOLOGIES, DIGITAL, QUÉBEC, CANADA, MONDIAL.	1
GLOSSAIRE :	4
INTRODUCTION : PERSPECTIVES DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES TIC	4
ZOOM SUR UN CONTEXTE LOCAL : LE QUÉBEC	5
EN RÉSUMÉ	6
1. DÉFINITION DE LA PROBLÉMATIQUE	7
1.1. DÉCOUPAGE DU SUJET	7
1.1.1. CARTOGRAPHIE DES FLUX ET DES PROCESSUS	7
1.1.2. DÉCOUPAGE FINAL	9
1.2. LES DIFFÉRENTS TYPES DE RÉSEAU	10
1.3. LES IMPACTS DE CHAQUE APPAREILS	10
1.4. OÙ COMMENCER, OÙ S'ARRÊTER	11
1.4.1. LIMITES GÉOGRAPHIQUES ET CONCEPTUELLES	11
1.4.2. LES TERMINAUX (HORS CENTRES DE DONNÉES ET RÉSEAUX)	12
2. LES TERMINAUX UTILISATEURS : EN ROUTE VERS 100 MILLIARDS D'APPAREILS ?	14
2.2. QUANTITÉ D'APPAREILS EN TERME DE POIDS	14
2.3. DÉCHETS GÉNÉRÉS PAR L'OBSOLESCENCE DES TERMINAUX	15
2.4. QUELS SONT LES APPAREILS UTILISÉS AU QUÉBEC ET AU CANADA ?	15
3. MATÉRIAUX (FABRICATION) : DES QUANTITÉS COLOSSALES DE MÉTAUX	17
3.1. QUELS MÉTAUX CONSIDÉRER ?	17
3.2. QUANTIFICATION POUR UN TÉLÉPHONE INTELLIGENT	20
AUTRES MÉTAUX	20
3.3. QUANTITÉ TOTALE DE MÉTAUX	21
3.4. VOLUME DE TERRE DÉPLACÉ	22
3.5. DÉPLÉTION DES MÉTAUX CRITIQUES	25
3.6. DISCUSSION	27
3.7. AUTRES ENJEUX LIÉS AUX MÉTAUX	29
4. EMPREINTE ÉNERGÉTIQUE ET GAZ À EFFET DE SERRE (GES)	29
4.1. LES TERMINAUX UTILISATEURS : FABRICATION + UTILISATION	29
4.1.1. EMPREINTE CARBONE : EXEMPLE DU TÉLÉPHONE INTELLIGENT	29
4.1.2. EXEMPLE DE DÉTAILS DE CALCUL	30
4.1.3. GÉNÉRALITÉS SUR LES PUCES ÉLECTRONIQUES	31

4.1.4.	GAZ FLUORÉS POUR LA CHIMIE (FABRICATION).....	32
4.1.5.	LORSQUE L'APPAREIL REMPLACE DU PAPIER.....	32
4.1.6.	ENERGIE POUR LA FABRICATION : ÉCARTS IMPORTANTS DANS LES CHIFFRES.....	33
4.1.7.	UTILISATION TOTALE D'ÉLECTRICITÉ POUR LES APPAREILS UTILISATEURS.....	35
4.2.	LES CENTRES DE DONNÉES	36
4.2.1.	MÉTHODOLOGIE	36
4.2.2.	CENTRES DE DONNÉES AU CANADA	37
4.2.3.	UTILISATION DES CENTRES DE DONNÉES EN DEHORS DU CANADA.....	37
4.2.4.	L'ÉLECTRICITÉ UTILISÉE PAR LES SERVEURS ET LE REFROIDISSEMENT : STATIONNAIRE ? .	38
4.2.5.	L'IMPACT CARBONE DES CENTRES DE DONNÉES : ÉLÉMENTS CONTRE-INTUITIFS	39
4.2.6.	ENERGIE TOTALE POUR LA FABRICATION	41
4.2.7.	CONCLUSION SUR LES CENTRES DE DONNÉES	41
4.3.	LES RÉSEAUX	41
4.3.1.	FABRICATION DES RÉSEAUX : FIBRES OPTIQUES, CÂBLES DE CUIVRE, SWITCHS, APPAREILS WIFI/LAN, ROUTEURS ET ANTENNES RELAIS	41
4.3.2.	MÉTHODOLOGIE POUR LES RÉSEAUX (UTILISATION)	43
4.3.3.	CONSOMMATION FINALE D'ÉLECTRICITÉ POUR LE TRAFIC DE DONNÉES.....	44
4.3.4.	LES RÉSEAUX AU CANADA ET AU QUÉBEC.....	45
4.3.5.	RÉPARTITION FINALE DU TRAFIC DE DONNÉES	47
4.4.	ÉLECTRICITÉ POUR L'UTILISATION	48
4.5.	L'EMPREINTE CARBONE DE L'EXCAVATION.....	49
4.6.	ENERGIE ET EMPREINTE CARBONE PAR CATÉGORIES	50
4.7.	IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	52
4.8.	CONCLUSION SUR LES IMPACTS	54
5.	DISCUSSION GÉNÉRALE	55
5.1.	LIMITATIONS DES ÉTUDES SUR LES IMPACTS DU NUMÉRIQUE	55
5.2.	ASPECTS POSITIFS POUR L'ENVIRONNEMENT (?).....	56
5.3.	ZOOM SUR UN USAGE : LA PUBLICITÉ SUR LE WEB.....	57
6.	FUTUR DES TIC : AU CANADA ET DANS LE MONDE	58
6.1.	PERSPECTIVES DUES AU COVID-19	58
6.2.	PROCHAINES ÉTAPES POUR CARACTÉRISER AU MIEUX LE NUMÉRIQUE	59
6.3.	RECOMMANDATIONS	59
7.	CONCLUSIONS DU PROJET DIAGNOSTIC	60
	REMERCIEMENTS.....	61

BIBLIOGRAPHIE.....	61
ANNEXES	62
CENTRES DE DONNÉES.....	62
AUTRES MÉTAUX :.....	62

Glossaire :

- EB ou Eo : *Exabytes*, exaoctets, 2^{60} bits, soit 1 milliard de Go.
- ZB ou Zo : *Zetabytes*, zetaoctets, 2^{70} bits, soit 1000 milliards de Go.
- GES : gaz à effet de serre
- Préfixe k-, M-, G- : mille (kilo), un million (méga), un milliard (giga)
- PUE (*Power Usage Effectiveness*), utilisé pour les centres de données
- tCO₂eq (ou tCO₂e) : tonnes de CO₂ équivalent
- TIC : Technologies de l'Information et de la Communication (en : *ICT*)
- TWh : Téra Watt-heure, soit un milliard de kWh
- t eq Sb : tonnes équivalents antimoine

Introduction : perspectives de l'impact environnemental des TIC

La causalité entre accroissement du PIB et aggravation de l'impact climatique et environnemental n'est plus à démontrer [3], pourtant de nombreux rapports semblent miser sur un pari technologique pour enrayer cette crise, en postulant ou démontrant que le numérique possède une place différente dans l'équation. C'est le cas des rapports *SMART* (2008, 2012 et 2015) [4], qui mettent en avant la réduction des émissions de GES grâce aux TIC (12 GtCO₂eq en 2030, voir **Figure 1**), ce qui contrebalancerait leur impact direct supposé descendre à 1 GtCO₂eq en 2030.

Figure 5: Environment - CO₂e abatement potential by sector (2030)

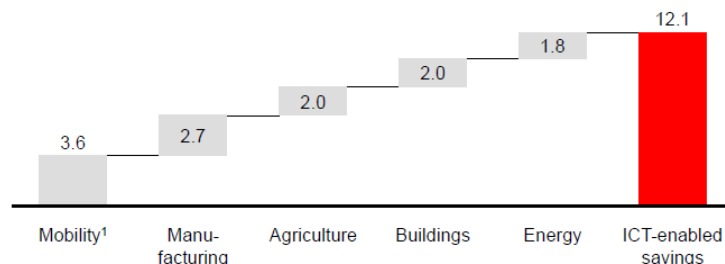


Figure 1 : Réduction des émissions de CO₂ prévues pour 2030, selon #Smarter2030. Extrait de [4].

[3] D.&D. Meadows & J. Randers, "Les Limites à la Croissance (dans un monde fini) - Le Rapport Meadows, 30 ans après", écosociété (2012)

[4] Strategy, Accenture. "SMARTer2030: ICT solutions for 21st century challenges." *The Global eSustainability Initiative (GeSI)*, Brussels, Brussels-Capital Region, Belgium, Tech. Rep (2015), http://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report.pdf

Cependant, des rapports plus récents comme ceux de *The Shift Project* en 2018-2019 [60] viennent mitiger ces prédictions : là où *Smarter2030* prévoyait que les TIC représenteraient autour de 2% des émissions mondiales en 2020 [4], *The Shift Project* montre qu'elles représentent en fait le double, et que cet impact est sur une tendance de croissance de 8% par an [60]. Pire encore : même avec un scénario de sobriété, le niveau de 3% des émissions globales serait atteint dès 2025 [60]. Ces écarts sont dus au fait que *Smarter2030* considère de longues durées de vie pour les appareils numériques - 6 ans pour les ordinateurs par exemple - ainsi que des énergies grises de fabrication assez basse (voir annexes de [4]). Ils concluent ainsi que la fabrication du numérique a un impact assez négligeable par rapport à son utilisation, alors que l'inverse est montré par de nombreuses publications ([5-7] et [18-19]) : le chiffre de 1Gt CO₂e est donc à multiplier par au moins deux, et devrait en fait être en 2030 supérieur à la valeur de 2020 selon de nombreux modèles, contrairement à ce qu'affirme *Smarter2030*.

Une autre étude canadienne rapporte que si la croissance mondiale des TIC continue sa progression exponentielle, ce secteur pourrait atteindre 14% des émissions de GES mondiales en 2040 [6]. D'autre part, il était estimé en 2018 qu'internet seul représentait 8% de l'électricité consommée au Royaume-Uni, et tendrait vers 100% en 2035 avec la tendance actuelle [86]. Une autre étude estimait enfin que l'électricité utilisée pour faire fonctionner l'informatique pesait 7% de l'électricité mondiale de 2010 à 2020, et pourrait aller jusqu'à 14% en 2030 [7-8].

Des études sur l'univers numérique en France ont en outre été publiées dans les derniers mois (début et mi-2020), par le Sénat français [5] et GreenIT [19], mais arrivent à des chiffres différents : 2% des émissions de GES nationales selon la commission du Sénat, alors que GreenIT affirme plus du double (5.7%). L'étude de GreenIT fait suite à son rapport de 2019 sur l'univers numérique mondial (voir [19]). Ces deux rapports présentent à différentes échelles les impacts environnementaux du numérique, en quantifiant ses besoins en énergie primaire et en matériaux, ce qui produit des externalités comme les émissions de GES, l'épuisement des ressources abiotiques (ADP), la tension sur l'eau douce ou des volumes importants de terre excavée. Malheureusement, ces rapports fournissent peu de matériels supplémentaires ou d'annexes permettant de remonter aux sources précises et aux méthodes de calculs (contrairement à [8], [54] ou [60] par exemple). Dans le présent rapport, nous reprenons ces indicateurs environnementaux pertinents (à l'exception de l'eau douce, pour laquelle nous n'avons pas assez de chiffres) et présentons une compilation des calculs dans des tableurs Excel ([21], [71] et [99]) accessibles en complément de ce document.

Zoom sur un contexte local : le Québec

Au Québec, « Le Plan d'action en économie numérique pour accélérer la transformation numérique des entreprises vers de nouvelles technologies. » est cité comme l'un des piliers de la réduction des GES [9]. Ailleurs on peut lire : « La transformation numérique – avec ses incidences positives sur l'automatisation, sur la mobilité électrique et sur la maîtrise des mégadonnées fait partie [des nouveaux défis du secteur énergie face aux changements climatiques]. » [10], ou encore que les technologies numériques

[5] Sénat français, « [Rapport d'information fait au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable par la mission d'information sur l'empreinte environnementale du numérique pour une transition numérique écologique](#) » (2020)

[6] Belkhir, L., & Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177, 448-463, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261733233X>

[7] Andrae, "Hypotheses for Primary Energy Use, Electricity Use and CO₂ Emissions of Global Computing and Its Shares of the Total Between 2020 and 2030", *WSEAS Transactions on Power Systems* (2020)

[8] A. Andrae, "New perspectives on internet electricity use in 2030", *Engineering and Applied Science Letters* (2020), <https://pisrt.org/psr-press/journals/easl-vol-3-issue-2-2020/new-perspectives-on-internet-electricity-use-in-2030/>

[9] « Investissement Québec. Plan d'action de développement durable 2018- 2020 », rapport (2018),

http://www.investquebec.com/documents/qc/DeveloppementDurable/PlanDeveloppementDurable_2018-2020.pdf

[10] « Rapport annuel 2019 - Hydro-Québec : Voir grand avec notre énergie propre », <http://www.hydroquebec.com/data/documents-donnees/pdf/rapport-annuel.pdf>

(automatisation, internet des objets, etc.) permettront d’assurer la stabilité future du réseau électrique [10]. Les rapports ministériels ne tarissent en effet pas d’éloges sur les TIC et leurs bienfaits pour l’environnement.

L’impression 3D est aussi citée comme faisant partie des technologies contribuant « à rapprocher les individus », et « éloignant des usines souvent perçues comme déshumanisantes et polluantes » [11]. De plus, l’institut de développement de produits la considère comme une initiative de développement durable, car utilisant des matériaux en moins grande quantité ou plus écologiques, et pouvant fabriquer à la demande [11] tout en mettant en garde contre les éventuels effets rebonds. Enfin, une autre innovation - les chaînes de bloc - pourrait s’insérer « dans le cadre d’une stratégie de transition énergétique vers une économie à faible émission carbone » selon l’IREC [12].

Toutes ces nouvelles technologies pourraient donc aider à la « transition énergétique et écologique » selon ces divers organismes. D’autres notent cependant l’importance de baliser les pratiques dès le départ, comme pour l’intelligence artificielle. Dans le “Rapport de la Déclaration de Montréal pour un développement responsable de l’intelligence artificielle” (2018), on peut ainsi lire pour un des 10 principes (« Principe de développement soutenable ») [13] :

- viser la plus grande **efficacité énergétique** et **minimiser** les émissions de gaz à effet de serre (**GES**)
- générer un **minimum de déchets électriques** et électroniques et prévoir des filières de maintenance, de réparation et de recyclage dans une logique d’économie circulaire.
- minimiser les impacts sur les **écosystèmes et la biodiversité**, notamment lors de l’extraction des ressources naturelles et des étapes de fin de vie.
- **lutter contre le gaspillage** des ressources naturelles et des biens produits

IA Québec rappelle aussi la consommation importante des centres de données en électricité, et conclut que la minimisation de l’empreinte environnementale de l’IA est l’un des piliers de l’IA responsable [14]. Pour une vision plus détaillée de ces aspects, voir notre rapport précédent sur l’état des lieux au Québec et au Canada [1].

En résumé

Selon les perspectives, les TIC peuvent être un allié ou un frein à la transition écologique vers un monde bas carbone et écologiquement vertueux. Nous partirons dans ce rapport des chiffres de *The Shift Project* [60], et tâcherons d’affiner l’étude en prenant en compte plus de paramètres, comme davantage de terminaux ou de métaux de fabrication. En outre, nous détaillerons le cas local du Québec et du Canada, ce qui permettra de remettre en contexte l’utilisation ou non du numérique pour la transition écologique souhaitée par ces régions.

[11] Institut de développement de produits, « Dossier Impression 3D – Volet 5 – L’impression 3D, au-delà des aspects techniques ! » (2018), <https://www.idp-innovation.com/dossier-impression-3d-volet-5-l-impression-3d-au-dela-des-aspects-techniques/>

[12] IREC, « [La révolution numérique au service du bien commun : la technologie des chaînes de blocs](#) » (Fev. 2020), 60 pages

[13] “[Rapport de la Déclaration de Montréal pour un développement responsable de l’intelligence artificielle](#)” (2018), collectif mené par Christophe Abrassart

[14] IA Québec, “Stratégie pour l’essor de l’écosystème québécois en intelligence artificielle » (2018), <https://ia.quebec/wp-content/uploads/2018/06/Strategie-IA-vDEF-19-juin-2018-v8.pdf>

1. Définition de la problématique

1.1. Découpage du sujet

1.1.1. Cartographie des flux et des processus

La visualisation des flux et des processus généraux à prendre en compte est résumée sur la **Figure 3**, qui se base sur la chaîne de processus décrit dans [15] :

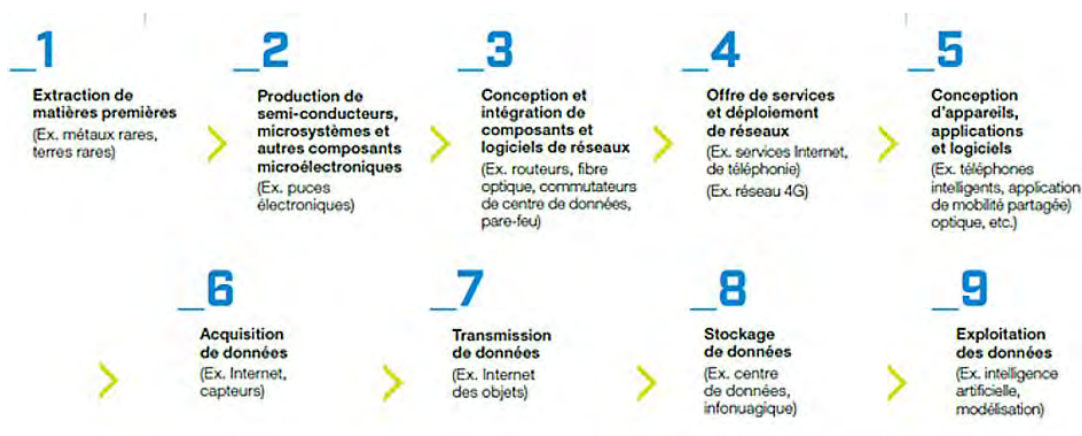


Figure 2 : Chaîne des processus mis en œuvre lors de l'exploitation de données. Extrait de [15].

Si l'électricité – de source décarbonée ou non selon la localité – permet de mettre en œuvre la plupart de ces opérations, les énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon), intenses en carbone interviennent pour les activités d'extraction minière et de transport des ressources et produits. Quand on s'intéresse aux différents flux nécessaires pour l'exemple d'un téléphone intelligent (voir **Figure 4**), il apparaît clairement que la plupart de la chaîne de valeur se situe en Asie (pour la fabrication des composants, et Chine pour leur assemblage), même si les minerais nécessaires sont aussi extraits en Amérique du Sud et en Afrique par exemple. L'intensité carbone de tels pays asiatiques est souvent haute (car dépendant du charbon, du moins jusqu'en 2020), ainsi les énergies fossiles continuent de jouer un rôle important via l'électricité utilisée dans toute la chaîne. Dans des endroits où l'électricité est décarbonée (comme c'est le cas au Québec), elles prennent alors une moindre importance pour la phase utilisation des appareils et infrastructures.

On voit aussi que des matériaux (principalement des métaux rares ou précieux) sont nécessaires pour la fabrication des puces et le déploiement des réseaux, mais aussi pour la fabrication des éléments électroniques de bases (autres métaux en plus des puces), et l'assemblage des terminaux (polymères et plastiques en plus). De plus, même si la chaîne peut être considérée en première approximation comme plutôt linéaire à l'instar de la **Figure 2**, on peut aussi considérer les rétroactions et les liens secondaires entre les différents blocs mis en jeu (**Figure 3**). Ainsi, des terminaux efficaces et la collecte de données permettent de développer de (nouveaux) logiciels, mais d'autres logiciels ont été nécessaires dans toutes les étapes de la chaîne de valeur pour concevoir les puces, les éléments électroniques, et même pour optimiser l'extraction de minerais ! Le système est donc bouclé : des développements en bout de chaîne alimentent le début de la chaîne, pour accentuer les performances et le nombre d'unités produites.

[15] TechnoMontréal, « Livre blanc des technologies au Québec » (2018), <https://technomontreal.com/programmes/livre-blanc-des-technologies-du-quebec/>

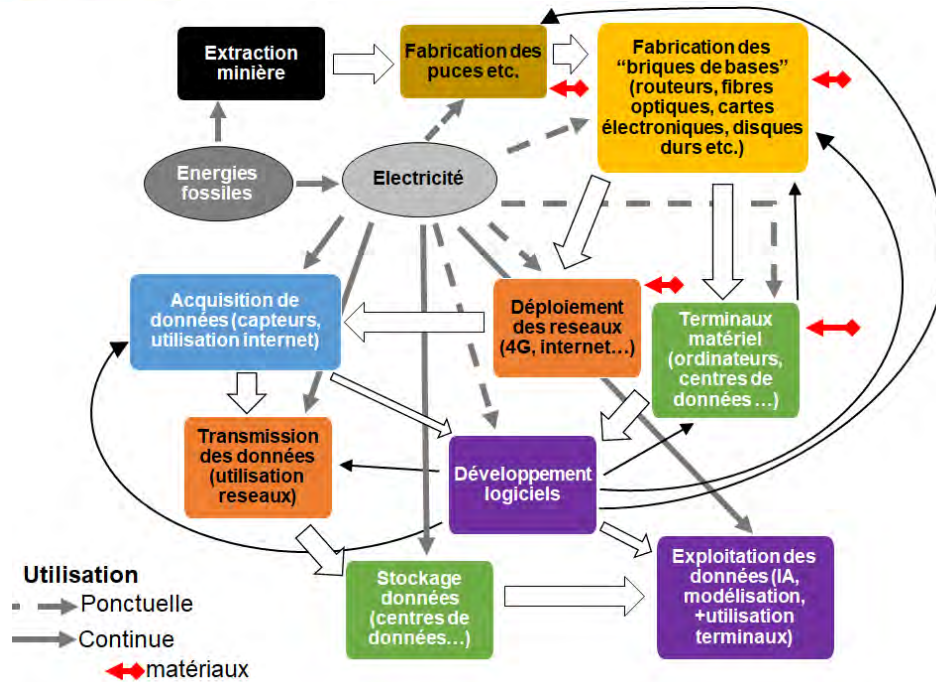


Figure 3 : Visualisation des flux et des processus comme sur la Figure 2, mais en prenant en compte les relations inter-étapes et les rétroactions. Les utilisations ponctuelles (resp. continues) d'électricité sont en pointillé (resp. trait continu). Les rétroactions sont indiquées par des flèches noires. ©2020 Les Shifters Montréal.

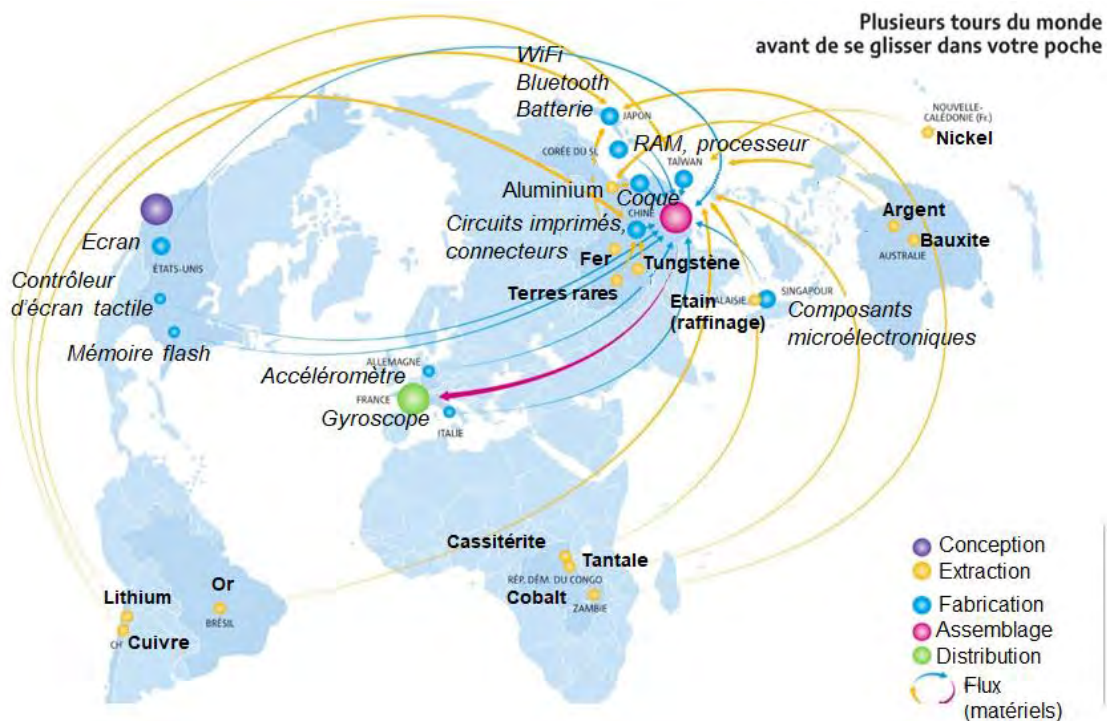


Figure 4 : Flux impliqués dans le cycle de vie d'un téléphone intelligent vendu en France. Extrait de [16].

[16] C. Marin, « Comment ne pas payer le travail au juste prix », in « Libre-échange, la déferlante » (2015), <https://www.monde-diplomatique.fr/cartes/smartphone>

1.1.2. Découpage final

Le découpage final pour le calcul des différents impacts est le même que celui utilisé par Andrae & Elder [17] repris par *The Shift Project* [60], Malmodin & Lunden [18], Belkhir & Elmeligi [6], ou encore GreenIT [19], des publications de références en la matière. Il s’agit de prendre en compte le cœur de l’architecture d’internet, les centres de données, les réseaux permettant de relier ces centres aux utilisateurs, et les appareils utilisés pour « consommer » le numérique. Les appareils considérés sont donc pour la plupart reliés au réseau, mais pas obligatoirement. Enfin, des modes de communications émergent pour échanger des données entre terminaux sans passer par le réseau et les centres de données, le machine-à-machine (M2M ou appareils IoT).

Pour chaque catégorie, la phase d’utilisation sera considérée (utilisant de l’électricité, et éventuellement des réfrigérants pour les centres de données), mais aussi la phase de production. Pour les terminaux utilisateurs, on comptera les ventes annuelles de chaque appareil (appareils neufs seulement, réparation non prise en compte). Pour les réseaux et centres de données, leur durée de vie est plus longue et ils sont moins souvent remplacés, ainsi il sera comptabilisé chaque année une fraction du coût de leur fabrication, pondérée par leur durée de vie. En fin de compte les centres de données et réseaux sont quantifiés par une approche descendante (*top-down*), car des chiffres macroscopiques comme le trafic de données sont utilisés, alors que les appareils le sont par une approche montante (*bottom-up*), car on fait la somme de chaque contribution.

Table 1 : Différentes composantes matérielles des TIC, et prise en compte de leurs impacts environnementaux. La part la plus importante a été indiquée en gras.

Centres de données	Production
	Utilisation
Réseaux (câbles sous-marins, noyau IP, réseaux d’accès, équipements sur site (CPE)) fixes et mobiles	Production
	Utilisation
Appareils utilisateur (ordinateurs, TV, téléphones, etc.)	Production
	Utilisation
Communication machine-à-machine	Production
	Utilisation

[17] Andrae & Elder, “On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030”, *Challenges* (2015)

[18] Malmodin & Lunden, “The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015”, *Sustainability* (2018), <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/research-papers/the-future-carbon-footprint-of-the-ict-and-em-sectors>

[19] F. Bordage *et al.*, « Empreinte environnementale du numérique mondial », GreenIT.fr (2019), <https://www.greenit.fr/empreinte-environnementale-du-numerique-mondial/>

Cas de la France : F. Bordage *et al.*, « iNUM : impacts environnementaux du numérique en France » (2020), <https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2020/06/2020-06-iNum-etude-impacts-numerique-France-rapport.pdf>

Note : L'énergie primaire semble parfois être un meilleur indicateur pour la phase de production des appareils. Néanmoins, lorsque l'on veut la comparer à l'énergie finale (comme l'électricité utilisée) pour pouvoir la quantifier par rapport à l'utilisation, le rendement des centrales thermiques (50% ou moins) rentre en jeu, et la comparaison perd alors de son sens. Comme on a souvent trouvé l'empreinte carbone de fabrication, on a simplement pu convertir en **énergie finale** en considérant une intensité carbone de 0.6 kgCO₂eq/kWh dans le monde par exemple.

1.2. Les différents types de réseau

On a vu dans notre premier rapport [1] que le territoire canadien différait, au niveau du raccordement réseau, de pays comme les États-Unis ou la France : une partie non négligeable du Nord canadien est reliée à internet par satellite. De plus, de nombreuses zones rurales sont raccordées par des technologies sans fil fixe, et de nombreuses portions d'espaces naturels ne sont pas desservies du tout, que ce soit par réseau fixe ou même mobile (voir précédent rapport [1]). Il apparaît donc essentiel de considérer ces différents types de réseau (voir **Table 2**) pour le cas du Canada et même du Québec.

Table 2 : Les différents types de réseau présent au Canada, et leurs fournisseurs associés.

Filaire	Transport haute capacité	Sans fil fixe	Satellite	Mobile
xDSL, fibre	Fibre optique large bande	Sans-fil dédié, 4G+LTE	Récepteur plus ou moins portable	4G, etc.
fixe	fixe	Fixe, Zones reculées	Mobile, Zones reculées, partout, cher	Mobile, couverture limitée



1.3. Les impacts de chaque appareils

Les chiffres pour certains appareils numériques ne sont pas disponibles, en premier lieu parce que les entreprises fournissant le matériel TIC sont très peu transparentes sur le sujet [52]. Il est cependant possible d'obtenir une première approximation de l'impact de certains objets en comparant l'importance relative de chaque composant dans un appareil donné (ex. **Figure 5** pour un serveur), et de reporter ceci à d'autres appareils possédant ces composants. Ceci est notamment utile pour les objets relativement « simples » comme les batteries portables de secours (*power banks*, consistant principalement en une ou plusieurs batteries) et les disques durs externes (= principalement des disques durs).

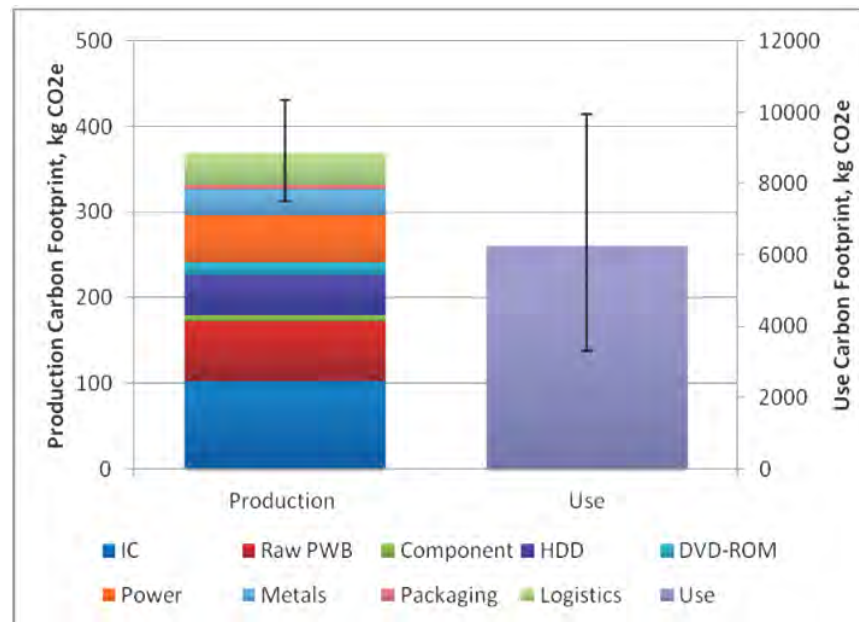


Figure 5 : Détails de l’empreinte carbone d’un serveur IBM (fabrication + utilisation) en fonction des pièces : cela permet d’inférer l’empreinte relative des mêmes composants présents dans d’autres appareils. La figure souligne aussi la nécessité de séparer la phase de production de l’utilisation, car cette dernière varie grandement. Extrait de [20].

1.4. Où commencer, où s’arrêter

1.4.1. Limites géographiques et conceptuelles

La question du numérique étant intrinsèquement mondiale, on se heurte rapidement à une limite locale versus global très poreuse. Nous avons ainsi soulevé plusieurs interrogations :

- Parmi les infrastructures (centres de données, réseaux) du Québec, quelle est la part utilisée par les Québécois ? La part utilisée par des acteurs ailleurs au Canada, en Amérique du Nord, sur les autres continents ? Les entreprises utilisant ces infrastructures sont-elles canadiennes ? Comptent-elles dans le bilan local de pollution ? Y a-t-il délocalisation ?
- Quelle est la proportion de Québécois hors de la province travaillant sur ces infrastructures ?
- D’où viennent réellement les terminaux utilisés dans la province ? Y a-t-il une différence entre les terminaux personnels et professionnels ?
- Prend-on en compte la maintenance des infrastructures, comme les lignes dans les territoires reculés (en termes de carbone et de matériaux) ?

[20] Intellect, “Evaluating the carbon impact of ICT : Understanding the limitations of LCA-based carbon footprinting methodologies” (20), http://www.greendigitalcharter.eu/wp-content/uploads/2016/07/Evaluating_the_carbon_impact_of_ICT.pdf

- À quel point les innovations du futur proche (type réseau 5G) sont prises en compte dans le calcul d'impact ? Par exemple, les innovations type « *upgrade* ». Y a-t-il des domaines « cachés » ? Quelle est leur proportion dans le calcul final ?
- Où se situe la responsabilité ? Le Québec gère les terminaux localement, et le Canada les grandes infrastructures et les satellites ? Qui décide ? Dans quel bilan inclure chaque composante ?

Le présent rapport ne répond pas à tous ces points, mais nous avons jugé judicieux de les soulever en guise d'analyse de la problématique.

1.4.2. Les terminaux (hors centres de données et réseaux)

Il est de même très difficile de délimiter quels types de terminaux seront considérés dans l'étude. Il nous semble judicieux d'utiliser la segmentation suivante :

- Niveau 1 : le plus évident, le plus parlant, ce qui a le plus d'impacts
téléphones intelligents, ordinateurs de table, laptops, tablettes, TV, consoles de jeux, appareils multimédias, montres et bracelets connectés, routeurs.
- Niveau 2 : affinement, assez évident
écrans (moniteurs), téléphones ordinaires, décodeurs TV, boîtiers type « *chromecast* », lecteurs DVD/BD, caméras (dont type GoPro, etc.), divers appareils connectés (domotique, etc.).
- Niveau 3 : moins évident, petits objets
imprimantes, scanners, disques durs externes, clés USB, batteries de secours, drones personnels, électronique de voiture, GPS, projecteurs, enceintes audio (*bluetooth*), casques audios, casques VR
- Niveau 4 : peu évident, équipement spécialisé, futur ...
caméras de surveillance, écrans publics, systèmes d'alarme, contrôleur de maison, thermostats intelligents, systèmes de visioconférence, terminal de paiement, TIC dans les industries, TIC consommés en communauté (cinéma, etc.), électroménager connecté ...

Nous avons considéré dans cette étude divers objets catégorisés TIC ou du secteur du divertissement :

PCs	Téléphones	TVs	Public	« Objets connectés »	Autres	Autres (2)
Ordinateurs de table	Cellulaire intelligent	Télévisions connectées (HD, UHD)	Caméras de surveillance	Montres intelligentes	GPS	Liseuse électronique
<i>Laptops</i>	Cellulaire ordinaire	Télévisions LCD, LED, cathodiques	Écrans publics	Bracelets connectés	Baladeurs	Périphériques ordinateurs

Écrans (moniteurs)	Téléphone fixe	Décodeurs numériques	Arcade	Enceintes connectées, assistants	Consoles portables	Clés USB
Tablettes	Batterie portable	Lecteurs DVD/BD	Terminaux de paiement	Domotique	Appareils photos	Disques durs externes
		Appareil de flux multimédia	Imprimantes	Compteurs intelligents	Caméscopes	Projecteurs
		Lecteur multimédia, HiFi		Électronique de voiture	Caméras de sport	Dispositifs machine-à-machine (M2M)
		Consoles de jeux		Casques/écouteurs sans fils		

De plus, nous avons choisi d'étudier 4 scénarios différents pour l'évolution de l'empreinte des TIC après 2025, reprenant ceux du rapport de The Shift Project [60] :

Scénario		Expected	Sobriety	+Growth,=EE	+Growth+EE
2020-2025		Attendu	Sobriété	Croissance accrue	Croissance accrue, efficacité énergétique accrue
Appareils + M2M	Achats d'appareils (1)	↗	↘	↗↗	
	Énergie grise (fabrication) et GES par unités (2)		↘	↘↘	
	Appareils connectés (3)	↗	↘	↗↗	
	Consommation unitaire d'électricité (utilisation) (4)		↘	↘↘	
Réseaux	Nb neufs (1)	↗	=	↗↗	
	Énergie grise (2)	↗↗	=	↗↗	↗
	Trafic (3)	↗↗	↗	↗↗↗	
	Coût par octet (4)		↘	↘↘	
Centres de données	Nb neufs (1)		↗	↗↗	
	Énergie grise (2)		↘	↘↘	
	Trafic (3)	↗↗	↗	↗↗↗	
	Coût par octet (4)		↘	↘↘	

Quand l'efficacité énergétique n'intervient pas (pour la quantification des métaux par exemple), les scénarios "+Growth+EE" et "+Growth,=EE" sont regroupés sur un scénario de croissance accrue "+Growth". De plus, tous les chiffres sont donnés par défaut pour le scénario « attendu » (Expected).

2. Les terminaux utilisateurs : en route vers 100 milliards d'appareils ?

2.2. Quantité d'appareils en terme de poids

Chaque utilisateur canadien ou québécois possède 40kg d'appareils électroniques, 2× plus que la moyenne mondiale (en comptant juste les appareils utilisateurs), ou encore plus de la moitié de leur poids moyen ! [21]. Cela représente une moyenne de 9 appareils par personne (**Figure 6**). De plus, entre 5 et 7kg d'appareils neufs viennent s'ajouter chaque année, soit environ deux appareils par personne !

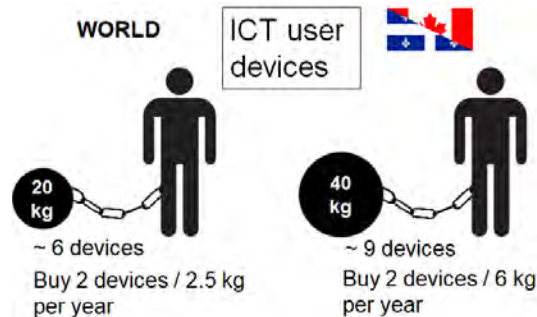


Figure 6 : Appareils numériques par internaute dans le monde (gauche) et au Québec/Canada (droite). La masse cumulée d'appareils par internaute est indiquée par un boulet, et la masse achetée et le nombre d'appareils moyens en bas. Données calculées [21]. © 2020 Les Shifters Montréal.

Au niveau mondial, la masse des appareils utilisés équivalait à 100 millions de tonnes en 2020 (l'équivalent de plus de 40% de la masse totale des internautes [22] dans le monde), c'est-à-dire dix fois plus que la masse d'appareils produits la même année (10 Mt, ou presque 5% de la masse totale des internautes) [21] (voir **Figure 7**). Le nombre d'appareils produits croît plus vite que la masse totale, et pourrait atteindre un niveau quatre fois supérieur en 2023 par rapport à 10 ans auparavant, car les nouveaux appareils connectés seront plus portables et miniaturisés (déploiement des *wearables* par exemple).

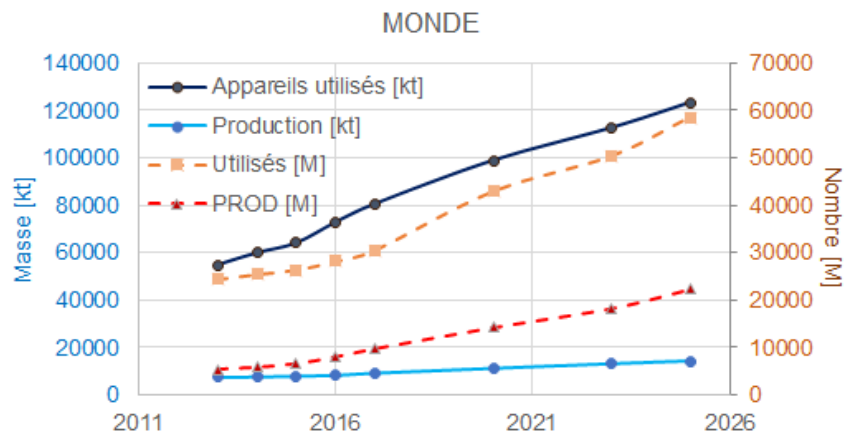


Figure 7 : Quantité d'appareils numériques utilisés et produits dans le monde (en masse et en nombre), entre 2013 et 2025 [21]. ©2020 Les Shifters Montréal.

[21] Feuille Excel [Forecast, matériel supplémentaire](#)

[22] En supposant une masse moyenne de 50kg/pers

2.3. Déchets générés par l’obsolescence des terminaux

La **Figure 8** montre la quantité de déchets d’appareils numériques générés en 2020 dans le monde, au Canada ainsi qu’au Québec : environ 5.5 milliards d’appareils deviennent obsolètes chaque année, ce qui représente 7 millions de tonnes de déchets. Le rapport 2020 de l’ONU sur les déchets électroniques [23] donne aussi un ordre de grandeur de 10 Mt de déchets par an. Cela représente 1.7 kg par internaute dans le monde, mais ce chiffre monte à 4.3kg au Canada ou au Québec.

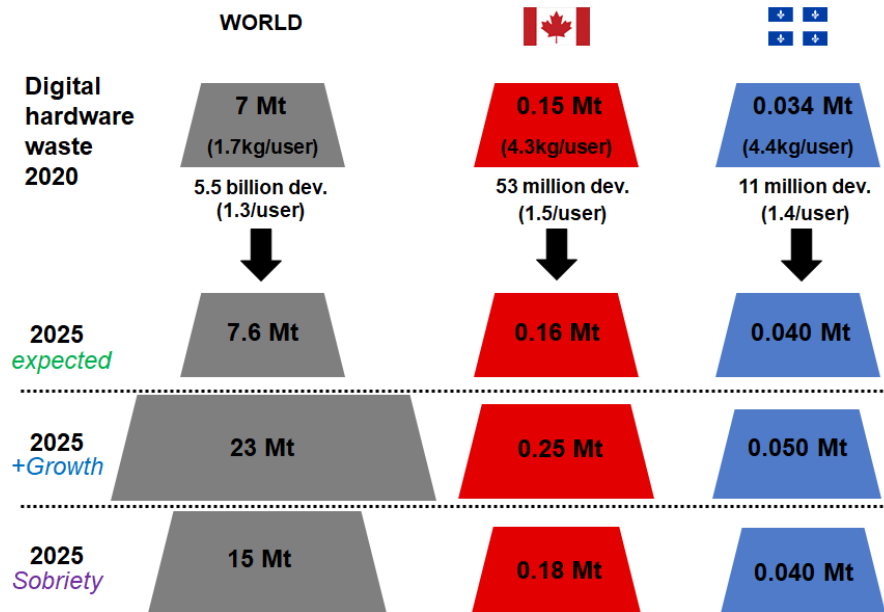


Figure 8 : Déchets générés par les appareils utilisateurs usagés, en 2020 (haut) et en 2025 selon les différents scénarios. Données dans le monde, au Canada et au Québec. On ne compte que les appareils utilisateurs. Chiffres dans [21], ©2020 Les Shifters Montréal.

Ce chiffre grimperait légèrement d’ici 2025 selon le scénario « attendu », mais une croissance accrue des usages (bleu) le multiplierait par plus de 3 (voir **Figure 8**). Un scénario de sobriété (violet) augmenterait aussi le nombre de déchets après 2020, car il y aurait alors beaucoup d’appareils produits avant 2020 devenant inutilisés, mais ce pic d’obsolescence s’effacerait dans les années suivantes.

2.4. Quels sont les appareils utilisés au Québec et au Canada ?

Au Canada les téléphones neufs en 2019 étaient de 57% chez Apple, 32% chez Samsung et 13% d’autres marques asiatiques [24]. De plus la moitié des téléphones intelligents chez les Québécois étaient un iPhone (32% pour Samsung, 2019) [25]. Concernant les matériaux, nous considérons donc l’iPhone d’Apple (64Go) comme représentatif du téléphone moyen au Québec et au Canada, en bonne approximation.

[23] Forti V. *et al.* "The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential.", UNU (2020), <https://collections.unu.edu/view/UNU:7737>

[24] Counterpoint Research, "Apple Grew 17% YoY in Canada Defying the Global iPhone Sales Trend" (2019), <https://www.counterpointresearch.com/apple-grew-17-yoy-canada-defying-global-iphone-sales-trend/>

[25] OTM, « À chacun son appareil : regard sur l’adoption de la téléphonie mobile Publication : Analyse du marché de langue française » (2019), <https://mtm-otm.ca/home>

Au Canada (anglophone), la répartition iPad/Samsung était en outre de 64%/23%, et de 60%/29% Québec en 2018 [26]. Pour les laptops, le marché est plus disparate : au Canada, Mac représente 16% des *laptops*, le reste sont des PC avec 19% pour Acer et HP, 16% pour Dell et 9% pour Lenovo et Asus par exemple [27]. Ces marques - comme pour les téléphones – ont des scores environnementaux légèrement meilleurs que la moyenne mondiale [52] : l'impact pour la fabrication des appareils canadiens et québécois sera donc logiquement légèrement inférieur en proportion au chiffre global.

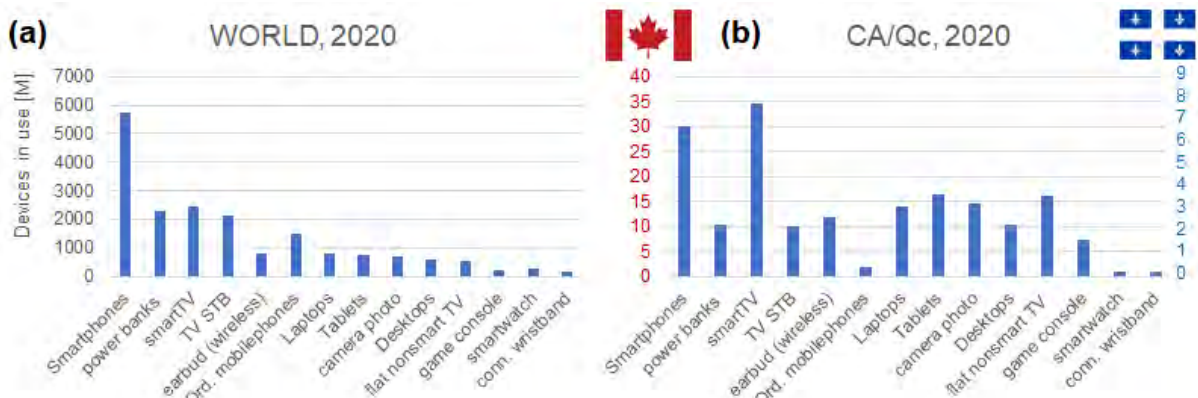


Figure 9 : Nombre d'appareils utilisés dans le monde (a), et au Canada (b, gauche)/au Québec (b, droite) en 2020, pour les principaux terminaux. STB = set-top box, un décodeur. ©2020 Les Shifters Montréal.

L'appareil le plus utilisé dans le monde en 2020 est de loin le téléphone intelligent (**Figure 9(a)**), suivi des télévisions connectées et des batteries de secours (*power banks*). Ce classement au Canada et au Québec est légèrement différent (**Figure 9(b)**) : il y a bien plus de télévisions connectées (ou classiques), ainsi que d'ordinateurs ou d'appareils photo en proportion, mais très peu d'appareils mobiles ordinaires par rapport à la moyenne mondiale.

Les appareils les plus vendus chaque année (moyenne 2018-2020) sont en revanche dans un ordre différent, car certains ont déjà partiellement saturé leur marché (comme les ordinateurs portables, voir **Table 3**), alors que d'autres émergent (comme les tablettes ou les *wearables*).

Table 3 : Ordre des ventes d'appareils électroniques (neufs) chaque année, moyenne entre 2018 et 2020, dans le monde, au Canada et au Québec. ©2020 Les Shifters Montréal.

SALES 2018-2020	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
WORLD	 (1.8B)	 (0.5B)	 (0.41B)	 (0.4B)	 (0.4B)	TV-STB (0.25B)	 (0.21B)	 (0.19B)	 (0.18B)	 (0.15B)
	 (10M)	 (5.8M)	 (5.5M)	 (3.9M)	 (3.7M)	 (3.3M)	 (3M)	TV-STB (2.8M)	 (2.2M)	 (2M)
	 (1.5M)	 (1.3M)	 (0.85M)	 (0.81M)	 (0.8M)	 (0.75M)	 (0.68M)	 (0.55M)	 (0.51M)	 (0.38M)

[26] OTM, « Le paysage des tablettes : Analyse du marché de langue française » (2019), <https://mtm-otm.ca/Reports>

[27] "Laptop ownership by brand in Canada, 2019", <https://www.statista.com/forecasts/998454/laptop-ownership-by-brand-in-canada>

Au Québec et au Canada, les appareils (neufs) les plus vendus sont tout de même les téléphones intelligents, les *laptops* et les télévisions connectées. Il se vend aussi encore beaucoup d'écrans et de PC de table par rapport à la moyenne mondiale (voir **Table 3**).

3. Matériaux (fabrication) : des quantités colossales de métaux

3.1. Quels métaux considérer ?

Il y a de très nombreux métaux différents dans un appareil électronique (parfois plus d'une quarantaine), il est donc difficile de se rendre compte lesquels ont une importance. Umicore a publié en 2016 un aperçu de la criticité pour chacun des métaux les plus courants [41], reproduit **Figure 10** : le plus grand risque en termes d'approvisionnement concerne les terres rares (REE), légères ou lourdes, mais nous avons exclu les lourdes de notre quantification. Nous avons choisi de quantifier les métaux précieux les plus parlants (Au, Ag, Cu ...), les métaux caractéristiques des matériels de TIC comme l'Indium (écrans) ou le Cobalt et Lithium des batteries, ainsi que des métaux de grande importance économique (W, Cr, Al, Mn, Ta, Sb, Mg, etc.) : ils sont indiqués en rouge sur la **Figure 10(b)**.

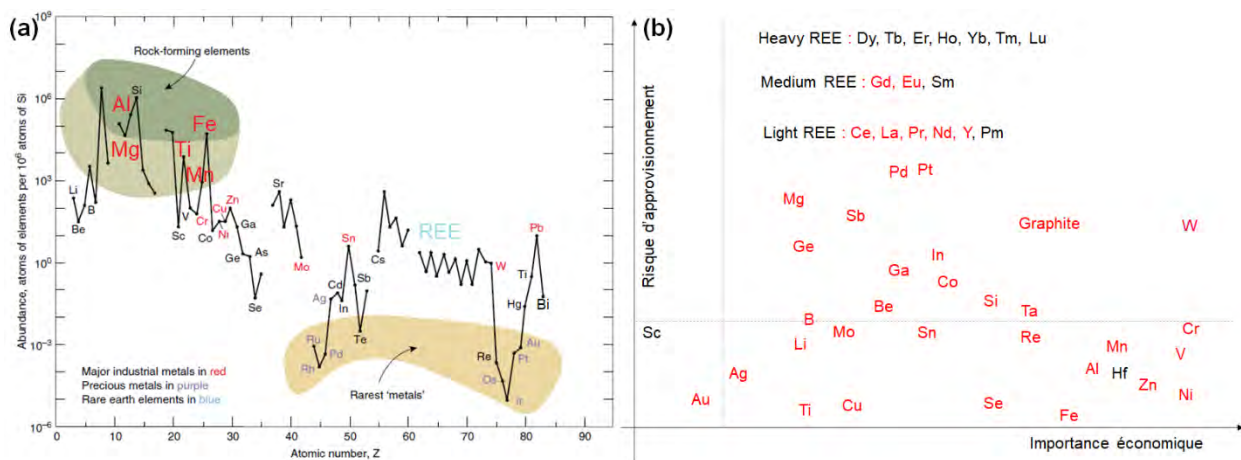


Figure 10 : (a) Abondance des éléments chimiques en fonction de leur numéro atomique, extrait de [28] (modifié de l'USGS 2002). (b) Criticité des différents métaux (+ graphite) en 2016, chiffres de [41] et [28]. REE = Rare-Earth Elements. Les métaux quantifiés dans ce rapport sont indiqués en rouge.

La criticité d'un métal varie donc selon le paramètre pris en compte : l'or (Au) est par exemple un des métaux les plus rares physiquement, mais il est tellement maîtrisé et en réserve dans plusieurs pays qu'il ne présente aucun risque d'approvisionnement. De plus, étant très cher, il n'a été utilisé qu'en infimes quantités dans les électroniques : selon ce point de vue, il n'est donc pas considéré comme rare.

La **Figure 11** classe les métaux considérés dans l'étude par application dans les appareils numériques, la couleur de chaque élément représentant la part recyclée utilisée pour la production du métal en question (voir [30]). Cette part diffère de la part de métal recyclée en fin de vie des appareils, indicateur souvent utilisé (voir [60] par exemple).

[28] G. Gunn, "Critical Metals Handbook", British Geological Survey, American Geophysical Union and Wiley (2014), <https://www.wiley.com/en-gb/Critical+Metals+Handbook-p-9780470671719>

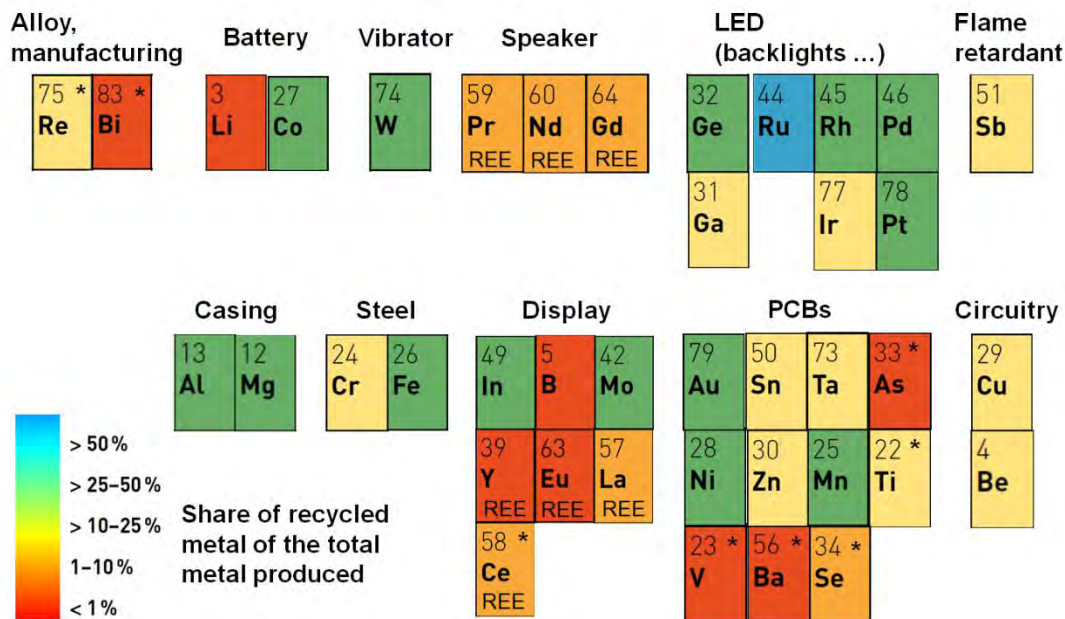


Figure 11 : Part de métal recyclée dans la production de chaque métal, parmi les métaux considérés dans cette étude, classés par leur utilisation principale. Les métaux les moins importants sont indiqués par un astérisque (*), et les terres rares par REE (Rare Earth Element). PCB : Printed Circuit Board (Circuit imprimé). Adapté de [30].

Quelques-uns des métaux rares des TIC et leurs lieux d'extraction sont indiqués sur la **Figure 12** : on voit donc que les industries du numérique reposent sur une forte mondialisation, pour obtenir les matériaux nécessaires partout sur la planète. Elles sont ainsi associées à des enjeux géopolitiques importants.

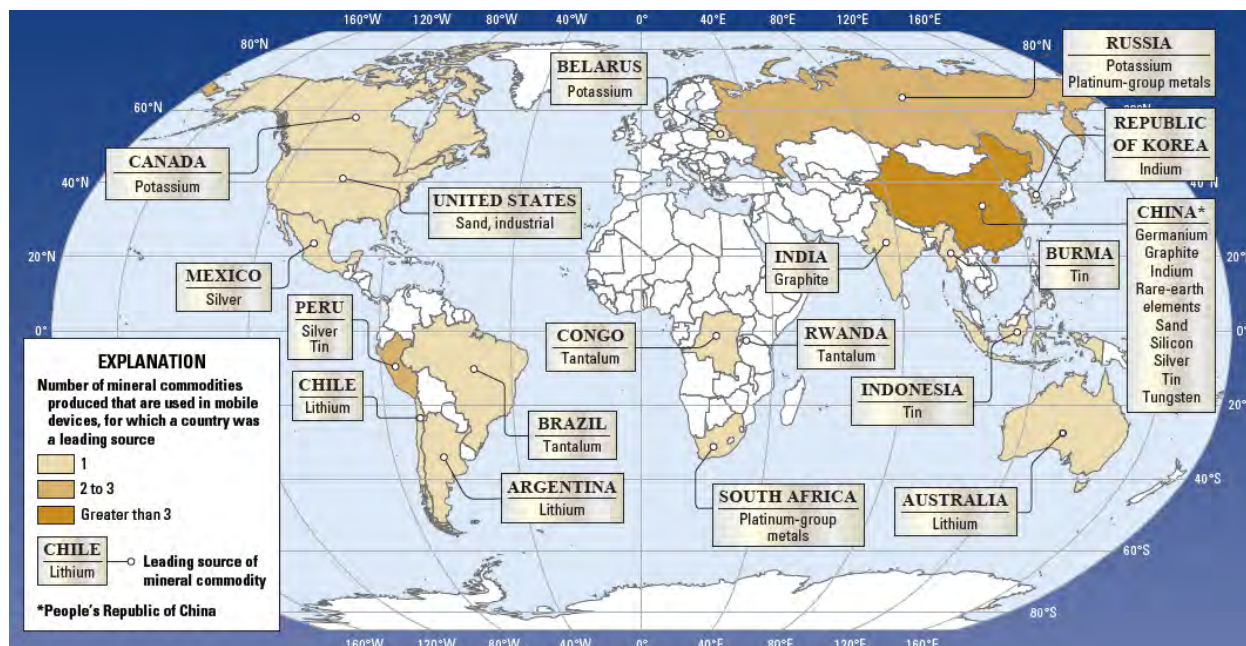


Figure 12 : Aperçu de la localisation géographique de l'extraction des métaux rares dans le monde. Extrait de [29].

[29] U.S. Geol. Survey, "A World of Minerals in Your Mobile Device" (2016), <https://pubs.usgs.gov/gip/0167/gip167.pdf>

Pour quantifier l'impact des métaux considérés, nous avons choisi de soustraire la partie recyclée (qui peut varier de 0.5% à plus de 70%, voir **Figure 11**) conformément aux chiffres fournis par l'UNEP ([30], repris dans [35]) : cela sous-entend que chaque métal utilisé dans les TIC a la même proportion provenant du recyclage que la moyenne de toutes les utilisations, ce qui n'est pas forcément vrai. Pour affiner, il faudrait retracer l'utilisation de métal recyclé pour chaque fabricant de TIC, et faire une moyenne. On aurait aussi pu ne pas inclure du tout les proportions recyclées, en remarquant que cette part recyclée ne provient pas des TIC elles-mêmes, mais d'autres domaines : en effet, c'est surtout l'or des circuits imprimés qui est récupéré dans les appareils numériques (son prix élevé rend l'activité rentable, voir **Figure 16**), les autres métaux étant trop dispersés [35].

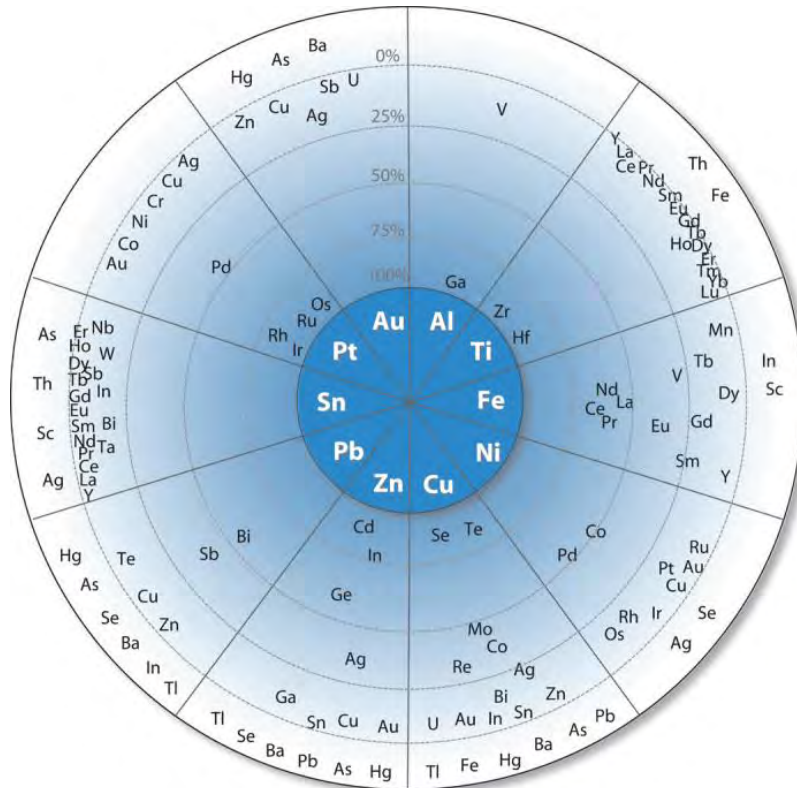


Figure 13 : La roue de l'association des métaux dans les minerais. Métaux principaux visés par l'extraction (bleu au centre), et autres métaux sous-produits de chaque métal principal (indiqués par leur symbole chimique). La proportion de production de chaque métal en tant que sous-produit est quantifiée par les axes radiaux. Extrait de [31], sources des chiffres détaillés dans le [matériel supplémentaire](#) [32].

De plus, dans le calcul du volume annuel d'extraction de chaque métal et du volume de terre déplacé, nous avons pris en compte le fait que certains métaux sont extraits comme sous-produit des métaux principaux Au, Cu, Pt, Sn, Pb, Zn, Ni, Fe, Al et Ti, comme le montre la **Figure 13**. On parle alors de métaux « compagnons » [31]. Cet effet n'est en revanche pas pris en compte dans l'épuisement des ressources abiotiques (ADP), car les métaux sont prélevés de toute façon, qu'ils soient sous-produits ou non.

[30] United Nation Environment Programme (UNEP), "Metal Recycling Opportunities, Limits, Infrastructure" (2013)

[31] Nassar, N. T., Graedel, T. E., & Harper, E. M. (2015). By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Science advances*, 1(3), e1400180, <https://advances.sciencemag.org/content/1/3/e1400180.short>

[32] DiagnosTIC, [matériel supplémentaire](#).

3.2. Quantification pour un téléphone intelligent

Selon un rapport du Sénat français de 2016, une tonne de cartes électroniques (composants des téléphones intelligents entre autres) contient 200 à 1000g d'or [33], et 270g étaient mesurés en 2013 par le cabinet *911 Metallurgist* (pour un iPhone 5) [48]. De façon remarquable, un cellulaire ordinaire (de 2004, non intelligent) contenait presque 10x moins d'or (0.034g) [34] ! Le Sénat français avance aussi qu'une tonne de roche (d'une « très bonne mine ») contient 5g d'or [33], tandis que *911 Metallurgist* utilise plutôt 0.85g (pour Yanacocha au Pérou, la concentration dépend donc de la mine) [48].

Pour l'or, on peut donc avancer un rapport masse_terre_déplacée/masse_téléphone de 1 :40 à 1 :400, et de 0.1:1 à 1:200 pour les cartes électroniques [35] (voir **Table 4**). Noter que ce rapport masse_minerai / masse_d'électronique est rigoureusement égal au gain en concentration métallique (en passant de la mine à l'appareil). Cet effet *a priori* négatif (pour obtenir une masse d'électronique, il faut extraire bien plus de masse de minerai/déplacer bien plus de terre) peut donc aussi être vu comme une opportunité, car la concentration du métal est augmentée lorsqu'il est alors dans un appareil [35]. Ceci ne prend cependant pas en compte les alliages et la dispersion des quantités [60]. Les gains en concentration (par rapport à la concentration dans les mines) pour l'ensemble des métaux considérés sont compilés dans le tableur REN [71] pour l'ensemble des appareils utilisateurs.

Table 4 : Concentration du métal or (Au) dans les minerais et dans les cartes électroniques et téléphones intelligents. Sources : Sénat France 2016 [33], Institut Mines-telecom [35] et autres (voir [71]).

Or (Au)	Téléphone intelligent	Cartes électroniques
Dans 1t de minerais (g)	0.8 - 10	
Rapport (massique) extrait/déplacé	1 :0.1Mi - 1 :1.2Mi	
Dans 1t de matériel (g)	215 - 270	1 - 1000
Gain concentration	x50 - x300	x0.1 à x200

Autres métaux

Les calculs similaires pour les autres métaux (Cu, Ag, Al, Pd, Pt, Co, Li, In, Ta) sont indiqués en **Annexes** et proviennent des sources [33], [35], [36] et [37] et [48]. Pour le Gallium (présent dans les LED), il y en a par exemple 2mg dans un cellulaire [38], et 50ppm par tonne de minerais [39], mais 10 à 30% seulement sont récupérables [39]. D'autres métaux en quantités encore plus infimes sont présents dans ce type de dispositifs électroniques (**Figure 14**), il s'agit des terres rares, avec principalement l'yttrium (Y), le lanthane (La), le praséodyme (Pr), le néodyme (Nd), l'euporium (Eu), le gadolinium (Gd), le terbium (Tb)

[33] Marie-Christine Blandin (sénatrice), « Rapport d'information fait au nom de la mission d'information sur l'inventaire et le devenir des matériaux et composants des téléphones mobiles » (2016),

http://www.senat.fr/commission/missions/materiaux_et_composants_des_telephones_mobiles/

[34] U.S. Geological Survey, « Recycled Cell Phones—A Treasure Trove of Valuable Metals » (2006), <https://pubs.usgs.gov/fs/2006/3097/fs2006-3097.pdf>

[35] Institut Mines-Télécom. (2016). Les métaux stratégiques, un enjeu mondial ? - « Métaux stratégiques : la mine urbaine française ». Annales des Mines. n° 82, http://www.annales.org/re/2016/re_82_avril_2016.pdf

[36] Univ. of Plymouth, "Scientists use a blender to reveal what's in our smartphones" (2019), <https://www.plymouth.ac.uk/news/scientists-use-a-blender-to-reveal-whats-in-our-smartphones>

[37] U.S. Geol. Survey, « Mineral Commodity Summaries 2019 », https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs2019_all.pdf

[38] Bookhagen, B., et al. "Development of a versatile analytical protocol for the comprehensive determination of the elemental composition of smartphone compartments on the example of printed circuit boards." *Analytical methods* 10.31 (2018): 3864-3871.

[39] Frenzel et al., "On the current and future availability of gallium", Resource Policy (2016), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301420715001233>

et le dysprosium (Dy) pour les appareils numériques [48]. L'utilisation de certains métaux pour des composants électroniques) sont indiqués **Table 12** en **Annexes** (en complément de la **Figure 14**, avec le minéral associé). Enfin, la concentration de ces métaux dans les appareils utilisateurs ainsi que divers calculs associés sont compilés dans le tableur REN [71].

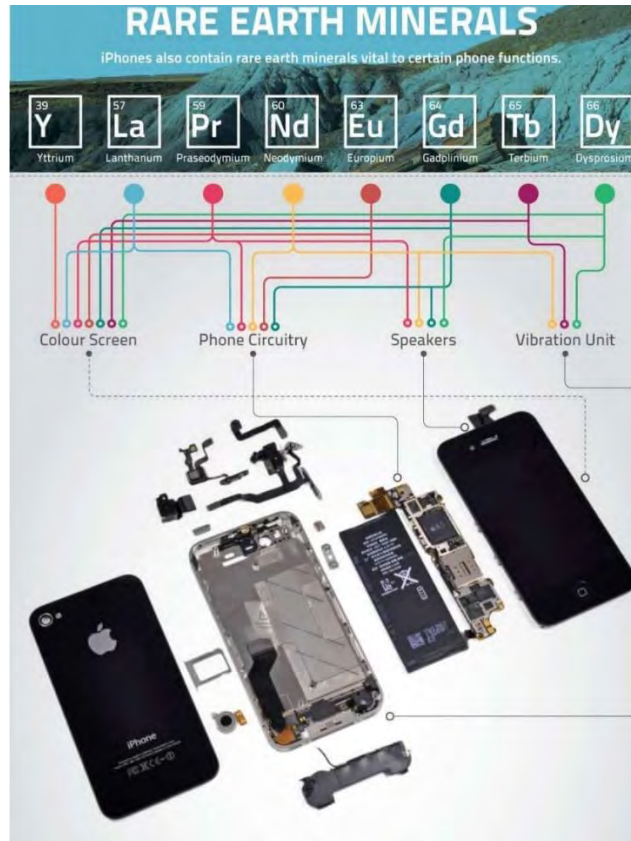


Figure 14 : Terres rares dans un téléphone intelligent. Extrait de [48].

3.3. Quantité totale de métaux

La **Figure 15(a)** montre la quantité totale de métaux utilisés pour l'industrie des TIC en 2020 [71] : l'aluminium, le fer (pour l'acier *stainless*) et le cuivre atteignent par exemple le million de tonnes, tandis que d'autres comme le platine ou le béryllium tournent autour de la tonne. À l'échelle du Canada, l'aluminium représente 20,000 tonnes par an, c'est-à-dire l'équivalent d'un dixième de la [production domestique](#) annuelle de ce pays. Au total, on estime qu'au moins 3000 kt de métal ont été nécessaires en 2020 pour la fabrication des TIC au niveau mondial **Figure 15(b)**, contre 12 kt au Québec et 60 kt au Canada : le Canada pèse donc 2% du total mondial, c'est-à-dire 4 fois plus par habitant que la moyenne mondiale.

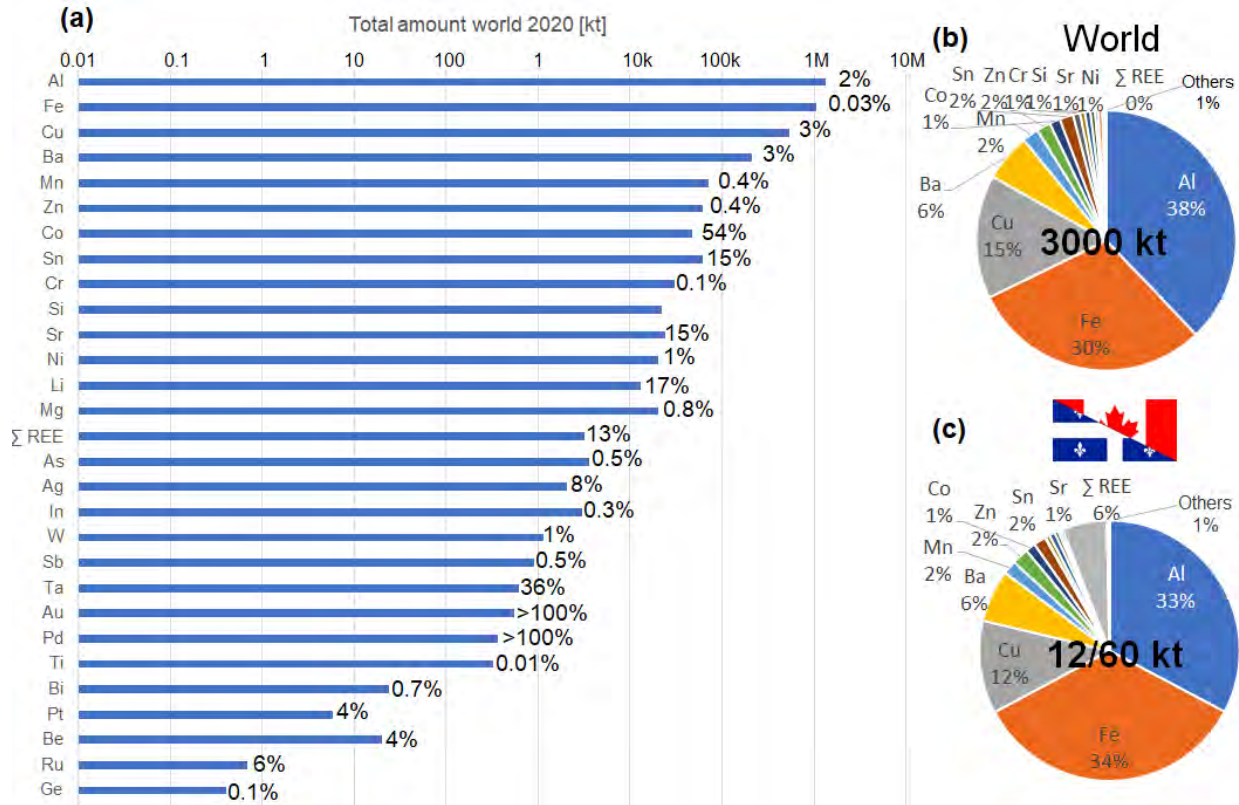


Figure 15 : (a) Quantité de métaux utilisés pour la production des appareils numériques dans le monde (estimations 2020, [71]). L'échelle est logarithmique. Les quantités utilisées sont comparées aux quantités de métal extraites de terre en 2020, en % (ce qui ignore les parts recyclées). (Droite) Répartition par métal, (b) au niveau mondial et (c) à l'échelle du Canada et du Québec. Pour l'or et le palladium, l'utilisation importante de parts issues du recyclage fait monter la quantité totale au-dessus de la quantité produite. ©2020 Les Shifters Montréal.

L'entreprise Umicore estimait enfin que 40% de la production minière mondiale de Cu, Sn, Sb, In, Ru était utilisée pour les appareils électriques/électroniques en 2016 [40], et que les téléphones portables, PC, ordinateurs portables et tablettes contenaient 4% de l'Au et de l'Ag, et 20% du Co & Pd mondial [41].

3.4. Volume de terre déplacé

Le rapport de *The Shift Project* avait calculé un ratio moyen de 1:40 entre le volume de terre déplacé et celui d'un appareil, en ne considérant que les métaux critiques Ta, Pd, Co, Ga, Cu, In [60]. On voit sur la **Figure 16** qu'ils ne représentent qu'environ la moitié du problème. Nous avons ici choisi de prendre en compte les métaux sous-produits d'autres métaux lors de l'extraction, mais en considérant chaque appareil indépendamment [71], alors qu'aurait aussi pu considérer la totalité des appareils électroniques ensemble pour ce calcul : un fabricant d'électroniques peut par exemple réutiliser les métaux extraits

⁴⁰ ce qui comprend bien plus que le numérique, avec tous les câblages en cuivre notamment

⁴¹ C. Hagelüken (Umicore), "Improving metal supply security through recycling - the case of WEEE", Critical Materials in Design, Manufacturing and Recycling at EPFL (2016), http://www.esmfoundation.org/wp-content/uploads/2016/07/Lausanne-Junior-Euromat-2016-07_Hagel%C3%BCKen.pdf

pour un appareil A dans un appareil B. La source principale pour la quantification des sous-produits est [42]. La part de métal recyclé dans la production de chaque métal est aussi considérée (voir **Figure 11**).

Les métaux Al, Fe, Cu, Zn, Sn, Co, In, Au et Pd représentent 95% du volume total de terre déplacée (avec une prédominance de l’Au, du Cu, de l’In et du Pd), c’est pourquoi ils donnent à eux seuls une bonne estimation de cette mesure. On voit sur la **Figure 17(a)** que la quantité effectivement extraite de zinc, d’étain et de cobalt pour la fabrication des TIC est de plus d’un ordre de grandeur plus petite comparée au cuivre (qui est d’au moins 500kt/an, voir **Figure 17(a)**), et d’environ trois ordres de grandeur plus petits pour l’or ou le palladium. Hagelueken & Meskers trouvent des ordres de grandeur similaires pour la quantification de tous les appareils électriques et électroniques : 4 Mt pour le cuivre, 11kt pour le cobalt et 90kt pour l’étain par exemple [43]. De plus, entre la date de publication et aujourd’hui (2010 vs 2020), la part relative des TIC dans ce total a logiquement beaucoup augmenté.

Le Canada nécessite chaque année (en théorie) environ 50× moins de chaque métal pour la production de ses TIC (**Figure 17(b)**), avec 150× moins d’internaute), et le Québec 250× moins (**Figure 17(c)**) que le total mondial. On voit aussi que pour le scénario attendu, la demande en chacun de ces métaux continuera de croître après 2020, mais légèrement moins vite qu’entre 2013 et 2020 (l’échelle logarithmique de la **Figure 17(a-c)** cache cependant cette tendance).

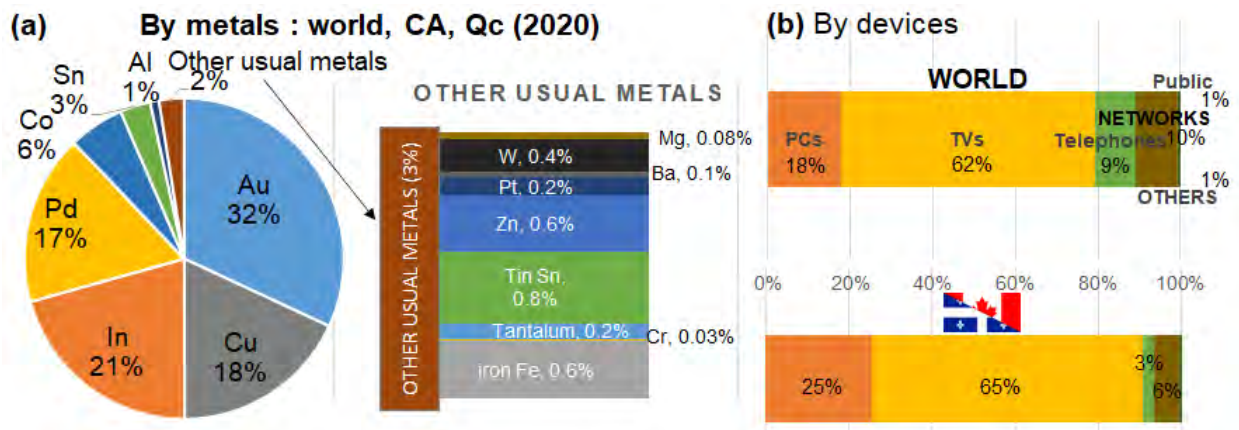


Figure 16 : Contribution de chaque métal à la quantité totale de minerais excavée, moyenne sur les principaux terminaux (téléphones, ordinateurs et TV), chiffres de 2015-2020. Puisque certains métaux sont compagnons d’autres métaux présents dans les appareils (voir **Figure 13**), la quantité de minerais pour les obtenir est amoindrie voire nulle. La part autres métaux comprend le titane et le baryum, entre autres [71]. "Networks" comprend ici les réseaux et centres de données. ©2020 Les Shifters Montréal.

[42] Nassar, N. T., Graedel, T. E., & Harper, E. M. (2015). By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Science advances*, 1(3), e1400180, <https://advances.sciencemag.org/content/1/3/e1400180.short>

[43] Hagelueken & Meskers, "Complex Life Cycles of Precious and Special Metals", from the Strüngmann Forum Report, *Linkages of Sustainability*, MIT Press, 2010

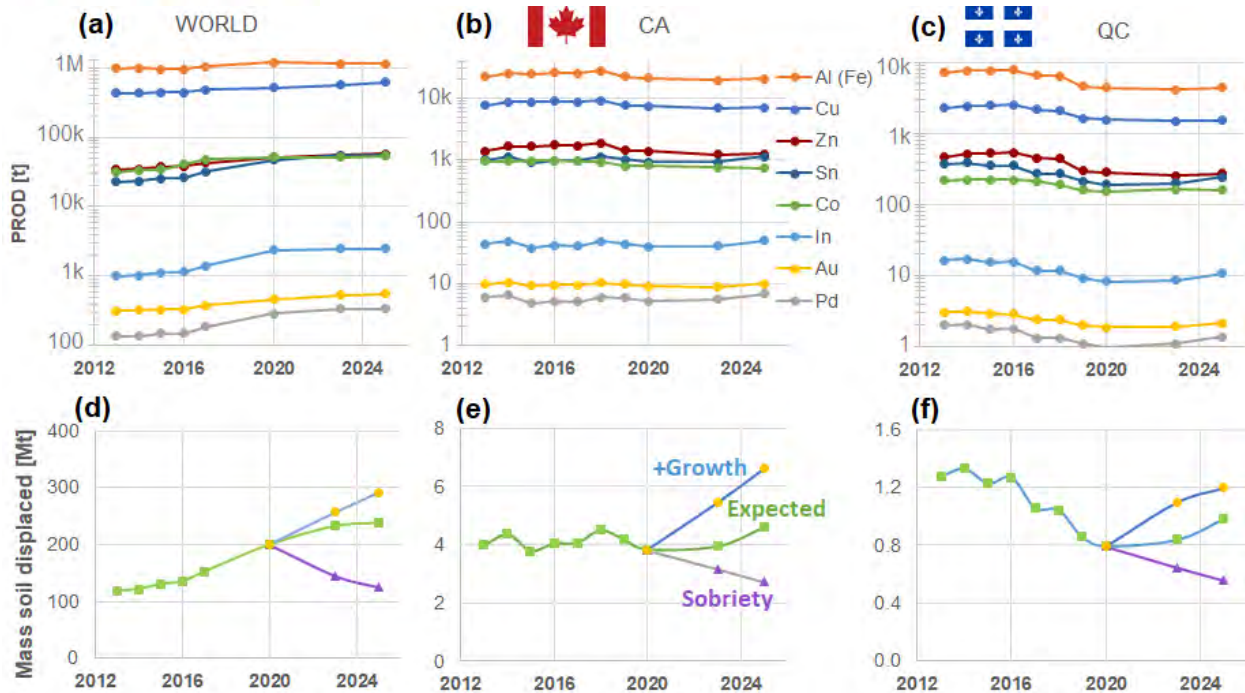


Figure 17 : (Haut) Métaux extraits pour la production des TIC (les principaux contribuant au volume total de terre déplacé) de 2013 à 2025 (scénario attendu), global (a), au Canada (b) et au Québec (c). Les graphiques sont en échelle semi-log. (Bas) Masse de terre déplacée pour extraire les métaux des TIC, en soustrayant la part recyclée et la part obtenue dans les métaux compagnons. Vert : scénario attendu, bleu : croissance accrue, violet : sobriété. Chiffres compilés dans [21] et résumé dans [99]. ©2020 Les Shifters Montréal.

En considérant tous ces aspects, on retombe sur le facteur d'environ 1 :40 [60] entre la quantité de terre déplacée et celui de l'appareil (en volume et en masse), pour les appareils ayant le plus d'impact : téléphones, laptops et TVs (voir **Figure 18**). D'autres appareils présentent des ratios différents comme les routeurs, qui demandent par exemple un volume 25× plus important, mais une masse 300× plus élevée, alors qu'un serveur demande 10× moins en volume et 2× moins en masse. Au total, près de 4 millions de tonnes de terre (ou ~1 million de m³) sont déplacées chaque année pour fabriquer le matériel des TIC du Canada (**Figure 17(e)**, vert), ce qui représente 1/50^e du total mondial (**Figure 17(d)**) estimé pour 2020, alors qu'il n'y a que 1/200^e de la population mondiale au Canada. Cela représente aussi 120kg de terre par an et par internaute, c'est-à-dire environ deux fois leur poids (contre 40kg/internaute de moyenne mondiale). Il est à noter que ces chiffres peuvent être considérés comme une limite basse pour décrire le « sac-à-dos » environnemental, car seuls les métaux sont ici pris en compte. D'autres sources comme [44] trouvent en effet des chiffres jusqu'à 5 fois plus grands, mais considèrent aussi l'extraction du pétrole pour fabriquer le plastique contenu dans les appareils et les emballages, ainsi que les énergies fossiles intervenant dans l'énergie grise de fabrication.

Enfin, les tendances pour les scénarios « attendus » (vert) sont les mêmes que sur les **Figure 17(a-c)**. Seul un scénario de sobriété (violet) – ou des progrès énormes en technologies de recyclage et pratiques de réutilisation - permettrait une réelle diminution de l'intensité minière décrite ici (diminution de moitié d'ici 2025), alors qu'une croissance accrue du nombre d'appareils (bleu, en cas d'implémentation de nombreux objets connectés par exemple) aggraverait d'autant plus cette tendance.

[44] Magalini, Federico, Ruediger Kuehr, and Cornelis Peter Baldé. "EWaste en América Latina. Análisis estadístico y recomendaciones de política pública." *United Nations University, Tokyo–Japan* (2015): 1-38, <https://www.gsma.com/latinamerica/wp-content/uploads/2015/11/gsma-unu-ewaste2015-spa.pdf>

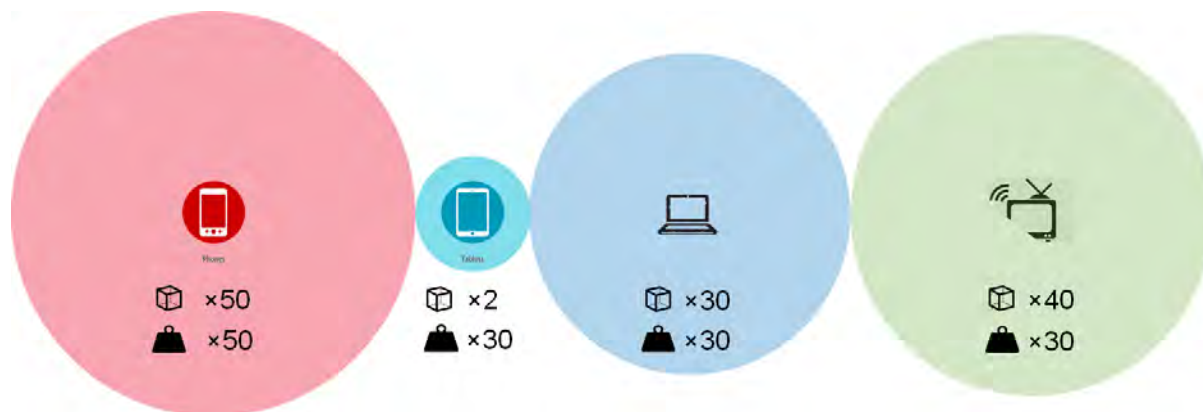


Figure 18 : Volume de terre déplacée pour quelques appareils, ratio par rapport au volume de chaque appareil. Calculs détaillés dans [71]. Le rapport masse de terre extraite contre masse de l'appareil est aussi indiqué. ©2020 Les Shifters Montréal.

3.5. Déplétion des métaux critiques

Seule une dizaine de métaux contribuent à l'épuisement des ressources abiotiques (*Abiotic Resources Depletion*, ADP, voir [45] pour la définition) : il s'agit de l'or, de l'indium, du palladium, de l'argent, du cuivre, du cobalt, du tantale, de l'antimoine, du platine et des terres rares [45-46]. On voit sur la **Figure 19(a)** que l'or (Au) représente ¾ de l'épuisement des métaux dans les TIC, suivi par l'indium à 20% [71]. Le classement par appareils (**Figure 19(b)**) montre que les télévisions (et leurs appareils associés) sont responsables de 2/3 du problème, et les PC's (laptops, desktops etc.) d'un autre 20%. Le dernier 20% est composé pour moitié des téléphones, puis d'environ 5% pour les réseaux (serveurs, routeurs, câbles, etc.), le reste de la proportion allant aux autres appareils. La répartition pour le Canada et le Québec est un peu différente : les télévisions sont responsables de la moitié, et les ordinateurs de plus d'un tiers, et le dernier 10% est partagé entre les infrastructures réseaux et les autres petits appareils, alors que les téléphones de représentent que 2%. La répartition par métaux est cependant substantiellement la même qu'au niveau mondial.

[45] D. Junot, « Face à l'essor des nouvelles technologies et l'épuisement des ressources métalliques : Proposition d'un indicateur de durabilité multicritère appliqué aux Technologies de l'Information et de la Communication », Mémoire de master (2019), https://www.foundationfuturegenerations.org/sites/www.foundationfuturegenerations.org/files/annuaire/file/2019_mtait_01_tfe_davidjunot.pdf

[46] van Oers, L., Guinée, J.B. & Heijungs, R. Abiotic resource depletion potentials (ADPs) for elements revisited—updating ultimate reserve estimates and introducing time series for production data. *Int J Life Cycle Assess* **25**, 294–308 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01683-x>

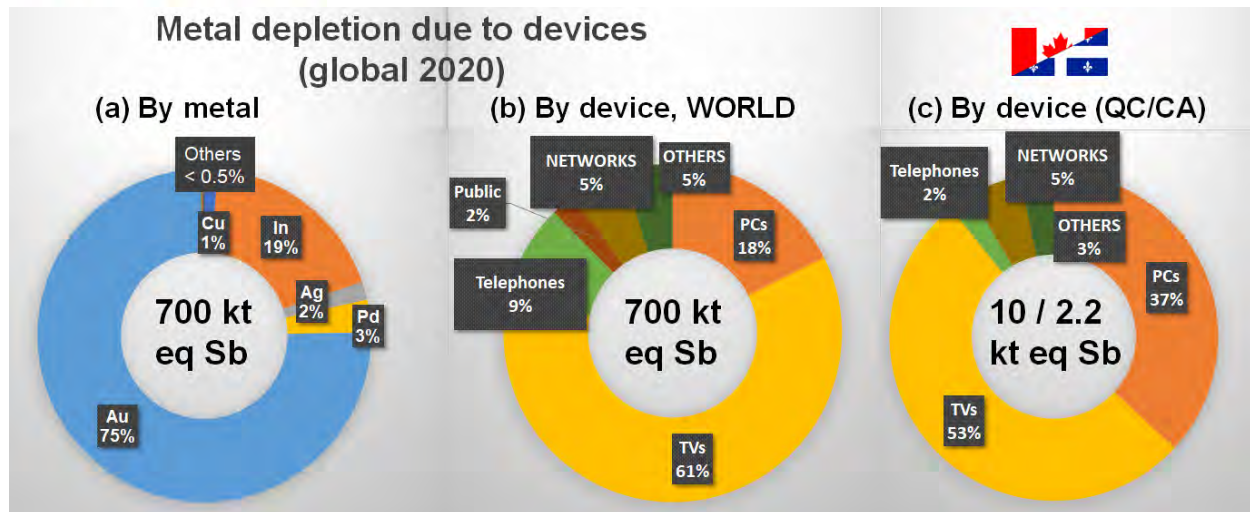


Figure 19 : Épuisement des métaux (ADP) dans les appareils de TIC, chiffres mondiaux, 2020 [71]. (a) Part de chaque métal. "Others" comprend Co, Ta, Sb, Pt et les terres rares (classé par importance, monde ou Québec/Canada). Part de chaque type d'appareil, dans le monde (b) et au Québec et au Canada (c). "OTHERS" comprend les caméras, les imprimantes et autres petits objets électroniques. ©2020 Les Shifters Montréal.

Cela représente en 2020 un épuisement total de 0.7 Mt équivalent antimoine (éq Sb) selon nos calculs. Toutefois nous n'avons pas pu prendre en compte l'intégralité des métaux, surtout pour les appareils les moins étudiés (ex : caméras, consoles ...) et le restant des infrastructures réseaux (*switchs, hubs, antennes relais, fibres optiques, etc.*). L'étude de GreenIT trouve un total de 2.2 Mt éq Sb [19], ce qui est 3x supérieur, mais en tenant compte de toutes les ressources abiotiques comme le pétrole nécessaire à la fabrication des plastiques présents dans les appareils, alors que nous n'avons considéré que les métaux. On retiendra en tout cas l'ordre de grandeur de 1 à 2 Mt éq Sb. Il est à noter que les métaux « compagnons » (le fait que certains métaux soient le sous-produit de d'autres, ou qu'ils sont minés ensemble) ne doit pas être considéré ici, car l'épuisement de chaque métal a lieu même si le métal est compagnon.

On peut toutefois noter que l'épuisement total devrait suivre une légère augmentation au niveau mondial de 2020 à 2025 (scénario « attendu », vert sur la **Figure 20(a)**), alors que de la sobriété (violet) pourrait réduire l'épuisement de moitié d'ici 2025. Cependant, si la tendance 2015-2020 se poursuit (scénario croissance, bleu sur la **Figure 20(a)**), au moins 0.9Mt éq Sb sera atteint après 2025. On retrouve sensiblement les mêmes tendances pour le Canada (**Figure 20(b)**) et le Québec (**Figure 20(c)**), avec quelques différences : le niveau d'épuisement (ADP) stagne depuis 2013. Toutefois, le scénario « attendu » (vert) montre une légère augmentation jusqu'à 2025 dû à la vente importante de TV UHD de taille croissante. L'impact de ces TVs est en effet primordial dans l'épuisement abiotique (**Figure 19(c)**), mais il est difficile de prévoir l'évolution des ventes et des technologies d'ici 2025, ce qui pourrait changer la donne. Le scénario de croissance accrue (bleu) augmenterait l'ADP de 50%, tandis qu'une sobriété le diminuerait de 50%.

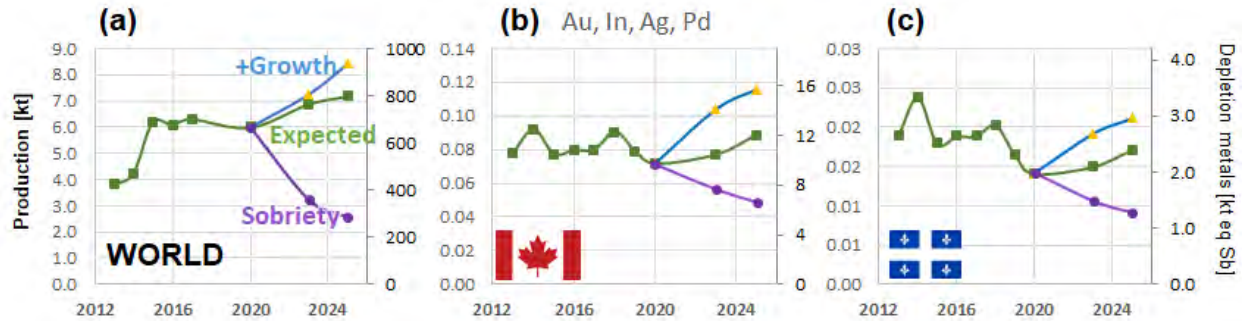


Figure 20 : Évolution de l'épuisement des métaux les plus significatifs dans l'inventaire des TIC (voir Figure 19(a)) : Au, Ag, Pd et In. Axe de gauche : masse totale pour la production annuelle d'appareils. Axe de droite : épuisement de ressources abiotiques (ADP) correspondant. Dans le monde (a), au Canada (b) et au Québec (c), selon les scénarios attendus (vert), croissance accrue (bleu-jaune) et sobriété (violet). Chiffres de [21] repris dans [99], ©2020 Les Shifters Montréal.

3.6. Discussion

Il est cependant difficile d'évaluer les compositions exactes car elles varient parfois beaucoup entre les différents téléphones (voir incertitudes de la **Table 11** en annexe, notamment l'aluminium) d'une part, les différents composants du téléphone (circuits imprimés, batterie, écran) ne sont pas toujours séparés dans la procédure de mesure d'autre part, ce qui rend difficiles les comparaisons des chiffres entre les sources (**Table 11**). D'ailleurs, pour les métaux baryum, titane, tantale, magnésium, tungstène et strontium, les valeurs mesurées par [38] dans les circuits imprimés seuls sont très supérieures à celles rapportées dans [33] pour le téléphone entier (ce qui est *a priori* contradictoire).

De plus, la teneur en métal mesurée dans une analyse - pouvant servir à déterminer la quantité nécessaire à la fabrication d'un téléphone - peut être la composition de plusieurs parties :

1. le métal effectivement utilisé dans le fonctionnement, et donc nécessaire au téléphone (pur, ou sous forme d'alliage)
2. une composition (souvent sous forme d'alliage) non essentielle au téléphone, qui pourrait être remplacée par d'autres composants, mais est utilisée, car étant plus commode/un sous-produit de la chaîne (auquel cas elle n'est pas vraiment « nécessaire » au sens strict)
3. des impuretés présentes dans diverses parties de l'appareil (initialement présentes dans le minerai, ou résultant des procédés de fabrication, etc.), pouvant encore ici mener à une surestimation de la quantité de métal nécessaire à la fabrication du téléphone.

Il faut donc retenir que chaque téléphone intelligent contient une quarantaine de métaux différents, mais en infime quantité pour la plupart d'entre eux (**Table 11**). D'autres métaux sont un peu plus abondants (cuivre, aluminium...), mais ne sont pas des métaux rares (**Figure 21**) : en fin de compte, le prix des métaux contenus dans un cellulaire (en 2020, avec les prix du marché associés) ne dépasse pas quelques \$ [48].



Figure 21 : Un cellulaire contient des métaux variés, mais soit leur coût en \$ est faible, soit leur quantité est infime. Extrait de [48].

Enfin, l'Alliance GreenIT [47] estime que 32kg de minerai sont nécessaires pour produire une puce de 2g. Ceci est cependant difficile à vérifier, car il faudrait réaliser une somme pondérée sur tous les composants d'une puce générique, donc connaître parfaitement tous ses composants et leurs impacts. On peut aussi noter que ce rapport 16,000 est bien plus élevé que celui rapporté par Greenpeace en 2017, qui rapportait un chiffre moyen de 30kg de roches déplacées pour obtenir 100g de minéral [52] calculé par le cabinet 911 Metallurgist [48] et relayé dans le [LA Times](#). Pourtant ce dernier s'agit d'une moyenne grossière qui ne correspond qu'à l'or (on extrait 3× plus de cuivre de ces 30kg, mais 7× moins d'argent métal par exemple [48]). Le rapport ×340 [52] entre le poids extrait et déplacé est donc vague. Il est compréhensible que ce genre de communication veuille donner un seul chiffre parlant, mais notre analyse métallurgique des téléphones intelligents nous pousse à manier les moyennes avec précaution. Nous tenons aussi à souligner que pour calculer ce « volume de terre déplacé », il faut aussi prendre en compte des données de mines qui varient parfois beaucoup d'une source à l'autre : pour l'or par exemple, comme indiqué plus haut. Ces impacts environnementaux ne sauraient être quantifiés que de façon *approximative*, en prétendant donner des valeurs en ordre de grandeur comme l'a fait *The Shift Project* dans son rapport de 2018 [60].

Table 5 : Résumé des rapports de volume et de masse entre l'appareil final et la terre déplacée, selon différentes sources.

Alliance GreenIT [47]	Puces	masse ×16,000
<i>Les Shifters Montréal</i>		masse ×300
Greenpeace	Téléphones	Volume ×300
The Shift Project [60]	Téléphones, laptops, TVs	Volume ×40
<i>Les Shifters Montréal</i>		Volume ×40, masse ×40

Nous calculons de notre côté un ratio massique de ×300 pour les puces électroniques, et de ×40 (masse et volume) pour les principaux équipements (voir **section 3.4**) : la **Table 5** résume les différents chiffres.

[47] Alliance GreenIT, « Livre blanc : l'écoconception des services numériques » (2017)

[48] 911 Metallurgist, « Mining your iPhone » (2013), <https://www.911metallurgist.com/mining-iphones/>

3.7. Autres enjeux liés aux métaux

Les mines pour prélever les métaux des TIC listés ci-avant ont aussi des impacts très importants sur la **destruction de la biodiversité et des habitats**, un des points majeurs de dépassement des [limites planétaires](#). Ceci reste cependant difficile à évaluer avec un indicateur chiffré. Le recyclage, ou la récupération de métaux précieux en **décharges sauvages** entraîne aussi de nombreux problèmes environnementaux, comme le **déversement de produits chimiques et de pollution aux métaux lourds** [30].

De plus, les minerais étant concentrés à certains endroits du globe (notamment en Asie du Sud et de l'Est), ils sont associés à des **enjeux géopolitiques et risques d'approvisionnement**. Enfin, certains métaux critiques (comme l'étain, le tantale, le tungstène et l'or) sont directement **source de conflits armés** dans plusieurs pays émergents, d'où le nom « minerais des conflits » [30], [49].

4. Empreinte énergétique et gaz à effet de serre (GES)

4.1. Les terminaux utilisateurs : fabrication + utilisation

4.1.1. Empreinte carbone : exemple du téléphone intelligent

Samsung ne publie malheureusement pas ses chiffres [50] d'impact environnemental par appareil comme le fait Apple [51-52], les calculs sont donc basés sur les marques ayant communiqué ce genre d'information, ou sur des études analysant directement les appareils. En 2012, Orange France estimait qu'un téléphone intelligent moyen « pesait » 30kgCO₂eq [53]. Au global il semble que même les émissions de GES des publications scientifiques [54-55] reposent sur les données des géants du secteur (Apple et Sony Ericsson en l'occurrence), ou de l'entreprise plus « équitable » Fairphone [56-57] : les sources et les méthodes de calculs restent donc plutôt opaques. Toutefois, Apple [58] et Fairphone [56] s'accordent sur la valeur de 70 kgCO₂eq pour le cycle de vie complet des téléphones intelligents génériques (incluant l'utilisation), et sur le fait que 75-80% est dû juste à la production (extraction de minerais + fabrication, assemblage des pièces), voir **Figure 22(A)** et (B). Le constat change totalement pour le Fairphone (selon

[49] Apple, "Conflict Minerals Report" (2019), <https://www.apple.com/supplier-responsibility/pdf/Apple-Conflict-Minerals-Report.pdf>

[50] Samsung, "Product Life Cycle Assessment for Mobile Product" (2017), <https://www.samsung.com/us/smg/content/dam/samsung/sg/aboutsamsung/2017/aboutsamsung-sg-life-cycle-assessment-en.pdf>

[51] Greenpeace, "Resource Efficiency in the ICT Sector" (2016), https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/20161109_oeko_resource_efficiency_final_full-report.pdf

[52] Greenpeace, « Guide to greener electronics » (2017), <https://www.greenpeace.org/usa/reports>

[53] Orange France - modèles Smartphones classiques (Samsung, Nokia, Blackberry) cité dans « Technologies numériques, information et communication (TNIC). Guide sectoriel 2012 », ADEME (2012) <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe-ges-tic-0212.pdf>

[54] Malmudin, J., and D. Lunden. "The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. Sustainability. 2018; 10 (9): 3027."

[55] Ercan, Mine, et al. "Life cycle assessment of a smartphone." *ICT for Sustainability 2016*. Atlantis Press, 2016.

[56] A. Szilágyi, "What's in a Life-Cycle Assessment?", Fairphone (2013), <https://www.fairphone.com/en/2013/08/01/whats-in-a-life-cycle-assessment/>

[57] M. Guvendik, "Examining the Fairphone's environmental impact", Fairphone (2015), <https://www.fairphone.com/en/2015/01/22/first-fairphones-environmental-impact/>

[58] Apple Inc., "iPhone 7 Environmental Report" (2016), https://images.apple.com/environment/pdf/products/iphone/iPhone_7_PER_sept2016.pdf

Voir aussi iPhone 11 : https://www.apple.com/environment/pdf/products/iphone/iPhone_11_PER_sept2019.pdf

Fairphone elle-même) : 16.4 kgCO₂eq au total, avec la moitié des émissions de GES juste dues à l'utilisation ^[59].

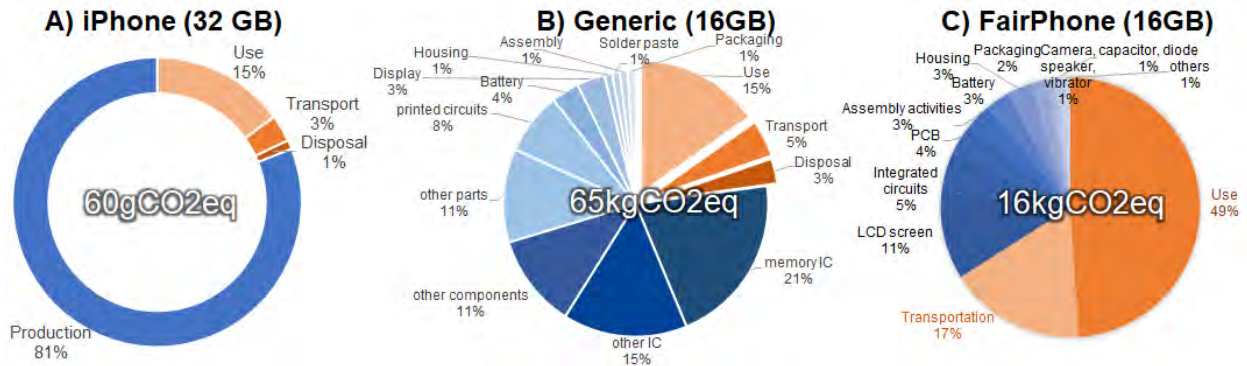


Figure 22 : GES du cycle de vie d'un téléphone intelligent pour 3 cas différents. (A) Apple iPhone (2018, extrait de [58]), (B) « Generic Smartphone » (2013, chiffres de [56]) par Fairphone (production=77%, rouge = autres), (C) Fairphone (2015, adapté de [57]).

On a donc des chiffres du simple au double selon les sources (en ne considérant pas le Fairphone, car non-représentatif tant au niveau des parts de marché que de l'impact environnemental), voir **Figure 23**. Néanmoins, il faut voir que ces chiffres varient entre les modèles de téléphones, la taille du disque dur incorporé, et surtout selon l'année de sa sortie (qui traduit sa génération). Les chiffres de Fairphone, Sony et Apple s'accordent pour fixer l'impact carbone autour de 60-70 kgCO₂e pour un téléphone de 2013-2018, avec ~15% juste dû à l'utilisation (voir [59]). Ces chiffres tendent cependant à augmenter avec le temps [60].

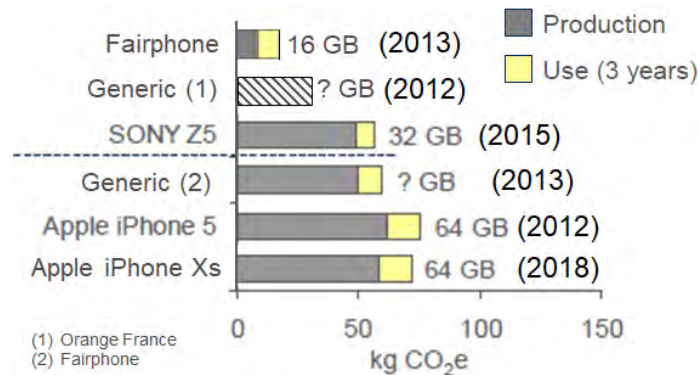


Figure 23 : Comparaison des émissions carbone de plusieurs téléphones intelligents. Adapté de [55], avec chiffres de [58] (Apple), [56, 7] (Fairphone) et [53] (Orange France). Generic : (1) de [53], (2) de [55].

4.1.2. Exemple de détails de calcul

⁵⁹ Comme ce n'est pas indiqué, on suppose que le mix carbone mondial pour l'électricité est pris en compte. Il est à 64% carboné (voir theshiftdataportal.org).

[60] The Shift Project, "Lean ICT - Pour une Sobriété Numérique" (2018)

Appareils à base de batteries

Les appareils à base de batteries, comme les batteries portables (*power banks*) nécessitent environ 100kgCO₂e et 600MJ par kWh de batterie Li-Co pour être fabriqués selon [61], ou encore 10kgCO₂e par kg de batterie selon [62]. On estime que la ou les batteries représentent 2/3 du poids de l'appareil, ce qui correspond en effet au 2/3 des 450g d'un [appareil commercial](#) de 70Wh, puisqu'une batterie de téléphone de 10Wh pèse environ 41g [58]. Il y a donc un écart de x2.5 entre ces deux sources pour l'empreinte carbone (100*0.01/0.04=25 contre 10kgCO₂e/kg), mais l'ordre de grandeur est respecté, et on prend alors la moyenne des deux.

Les drones : industriels et de loisir

Les drones pourraient être un moyen de plus en plus populaire pour la livraison d'objets, en remplacement des camions. Un drone « industriel » est ainsi bien plus lourd (~10kg [63]) qu'un drone de loisir (~700g), avec plus de batteries embarquées (780Wh [63] contre 40Wh).

4.1.3. Généralités sur les puces électroniques

L'énergie nécessaire pour fabriquer une micropuce était estimée autour de 1.5kWh/cm² (ou par puce de ~2g) en 2002 [64], ce qui conduisait à plusieurs centaines de kWh juste pour la mémoire d'un PC par exemple. Les procédés plus récents sont cependant moins énergivores, avec 0.5kWh/cm² [65], ce qui représente 5*0.5 = 2.5kWh pour un processeur Intel récent (de 1.6 milliard de transistor/cm²) [65]. Aussi, 32L d'eau et 70g de produits chimiques étaient estimés par [64] pour une puce. Une barre de RAM récente compte l'équivalent d'environ 5 puces au vu de sa taille, donc l'équivalent de 10 puces pour la RAM d'un PC (ou 16 milliards de transistors), soit 5kWh. La carte graphique comporte ~10 milliards de [transistors](#) (3kWh), mais c'est la mémoire de stockage qui en comporte le plus : 256 [milliards](#) pour 1To (80 kWh). Le total pour un PC récent avoisine donc les 100kWh [71], tout de même 1/5 des 500kWh d'énergie grise totale. On peut calculer des chiffres similaires pour les autres terminaux usuels, reportés **Table 6**.

Table 6 : Énergie grise pour les métaux et les puces de différents appareils communs. Eau et produits chimiques pour la fabrication des puces. Voir [71] pour les chiffres détaillés.

Pour les puces [71]	Téléphone intelligent	Tablette	PC	smartTV
Énergie grise pour les métaux [kWh]	5	12	50	230
Énergie grise de fabrication des puces [kWh]	30	50	100	-
Eau douce [m ³]	1.6	3	6.5	-
Produits chimiques [kg]	3.5	6.5	14	-

[61] E. Emilsson & L. Dahllöf, "Lithium-Ion Vehicle Battery Production Status 2019 on Energy Use, CO₂ Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling", IVL (2019), <https://www.ivl.se/download/18.14d7b12e16e3c5c36271070/1574923989017/C444.pdf>

[62] Stolaroff, Joshua K., et al. "Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery." *Nature communications* 9.1 (2018): 1-13, <https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2018/02/drone-delivery.pdf>

[63] J. Koiwanit, « Analysis of environmental impacts of drone delivery on an online shopping system », *Advances in Climate Change Research* (2017), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674927818300261>

[64] Williams, E. D., Ayres, R. U., & Heller, M. (2002). The 1.7 kilogram microchip: Energy and material use in the production of semiconductor devices. *Environmental science & technology*, 36(24), 5504-5510, <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es025643o>

[65] Abbasi, S. A., Busnaina, A., & Isaacs, J. A. (2019). Cumulative Energy Demand for Printing Nanoscale Electronics. *Procedia CIRP*, 80, 298-303, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118312976>

On voit que l'énergie grise des puces calculée ici correspond à environ $\frac{1}{4}$ du total (chiffres sur la **Figure 24**) pour les téléphones, tablettes et PC. Cela concorde avec la répartition pour les *smartphones* génériques de la **Figure 22** par exemple, le reste de l'énergie grise étant dédiée aux autres composantes comme l'écran, la batterie ou le boîtier.

Les tensions sur l'eau douce et la masse de produits chimiques requis pour la fabrication sont également listées : il faut plusieurs tonnes d'eau pour produire les puces d'un téléphone, une tablette ou un PC, et jusqu'à 14kg de produits chimiques (pour les PC, voir **Table 6**). Pour l'ordinateur entier, le chiffre de 22kg de produits chimiques est avancé par GreenIT [66], ce qui semble indiquer qu'environ 10kg sont nécessaires en plus des puces pour la fabrication.

4.1.4. Gaz fluorés pour la chimie (fabrication)

Quelques publications pointent l'impact des gaz fluorés lors de la fabrication : cela concerne principalement les semi-conducteurs (SC, présents dans toutes les puces), et l'industrie de l'aluminium (Al, présent en grande quantité, au moins dans les coques d'appareils). Kim *et al.* indique que ces émissions avaient baissé depuis les années 2000, mais restaient toujours significative : 13 MtCO₂e/an (SC) et 25 MtCO₂e/an (Al) pour le CF₄ (potentiel de réchauffement GWP=5000), additionné à 10 MtCO₂e/an (SC) et 5 MtCO₂e/an (Al) pour le C₂F₆ (potentiel de réchauffement GWP = 10 000) vers 2010 [67]. D'autre part, Andrae *et al.* soulignent le fait que les gaz SF₆ (sulphur hexafluoride, GWP=24 000) et NF₃ (nitrogen trifluoride, GWP=17 000) devraient être comptabilisés pour les émissions lors de la fabrication des écrans LCD [68] : l'empreinte carbone de la fabrication d'un ordinateur fixe pourrait par exemple représenter 93% des émissions totales, contre environ 60% si on ne compte pas les SF₆ et NF₃ selon [68]. En 2011, le NF₃ a été mesuré avec une augmentation de 0.15 ppt/an [69], ce qui représente 750 t/an ou encore 13 MtCO₂e/an. Comme il est difficile d'estimer le relâchement de chaque gaz pendant la fabrication de chaque type de terminal, nous les ignorons dans le bilan carbone de chaque catégorie, mais additionnons les valeurs totales dans le bilan annuel, en supposant donc que l'intégralité de ces gaz est imputable à l'industrie des puces électroniques et assimilés.

4.1.5. Lorsque l'appareil remplace du papier

Il est usuel de se demander si utiliser un appareil électronique plutôt que du papier est souhaitable d'un point de vue environnemental : le cas de la liseuse électronique (*eReader*) est éclairant. Des journalistes ont mesuré qu'une liseuse comme le Kindle produit moins de carbone que des livres papiers à partir de 20 à 50 livres environ (sur le total de la vie de la liseuse, 160 kgCO₂e allant pour la fabrication) [70]. Cependant ce calcul prend en compte l'empreinte carbone pour la fabrication d'un livre moyen, mais pas que chaque année 13% des livres neufs sont détruits, car invendus (chiffre calculé en France), ni que les livres peuvent être réutilisés plusieurs fois. L'aspect vertueux d'autres pratiques numériques est discuté plus loin, **section 5.2**.

[66] WWF, GreenIT, « Quelle démarche Green IT pour les grandes entreprises françaises ? » (2018), https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2018-10/20181003_etude_wegreenit_d%C3%A9marche_green_it_entreprises_francaises_WWF-min.pdf

[67] Kim, Joil, et al. "Quantifying aluminum and semiconductor industry perfluorocarbon emissions from atmospheric measurements." *Geophysical Research Letters* 41.13 (2014): 4787-4794, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014GL059783>

[68] Andrae, A. S., & Andersen, O. (2010). Life cycle assessments of consumer electronics—are they consistent?. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(8), 827-836, <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11367-010-0206-1.pdf>

[69] Arnold *et al.*, "Automated Measurement of Nitrogen Trifluoride in Ambient Air", *Anal. Chem.* 2012, 84, 11, 4798–4804, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ac300373e>

[70] M. Kozłowski, "Are reading eBooks on e-Readers environmentally friendly?" (2017), <https://goodereader.com/blog/electronic-readers/are-reading-ebooks-on-e-readers-environmentally-friendly>

4.1.6. Énergie pour la fabrication : écarts importants dans les chiffres

Les chiffres concernant l'énergie finale pour la fabrication des terminaux sont assez concordants pour la plupart des terminaux. Il y a cependant des disparités assez importantes pour certains appareils (voir [71]), entre Malmondin *et al.* [72] et Andrae [8] par exemple : de 700 MJ [8] à 1200 MJ [72] voire plus de 2000 MJ [73] pour un ordinateur portable (*laptop*) par exemple, et les mêmes écarts pour un écran ou un ordinateur de table (*Desktop*).

La **Figure 24** montre l'évolution au cours du temps de l'empreinte carbone (b) et énergétique (a) pour la fabrication des terminaux utilisateurs : les écrans publics, TV, ordinateurs et consoles de salon sont les appareils ayant la plus grosse empreinte à la fabrication. De plus, alors que les chiffres sont globalement constants entre 2013 et 2017, une diminution du coût unitaire de chaque appareil est attendue après 2020 jusqu'en 2025, dû à une meilleure efficacité de production et à une amélioration des procédés [8]. Il n'y aurait que l'électronique automobile qui voit son empreinte carbone et énergétique augmenter, selon les prédictions du secteur et dû à l'arrivée des voitures autonomes et innovations connexes.

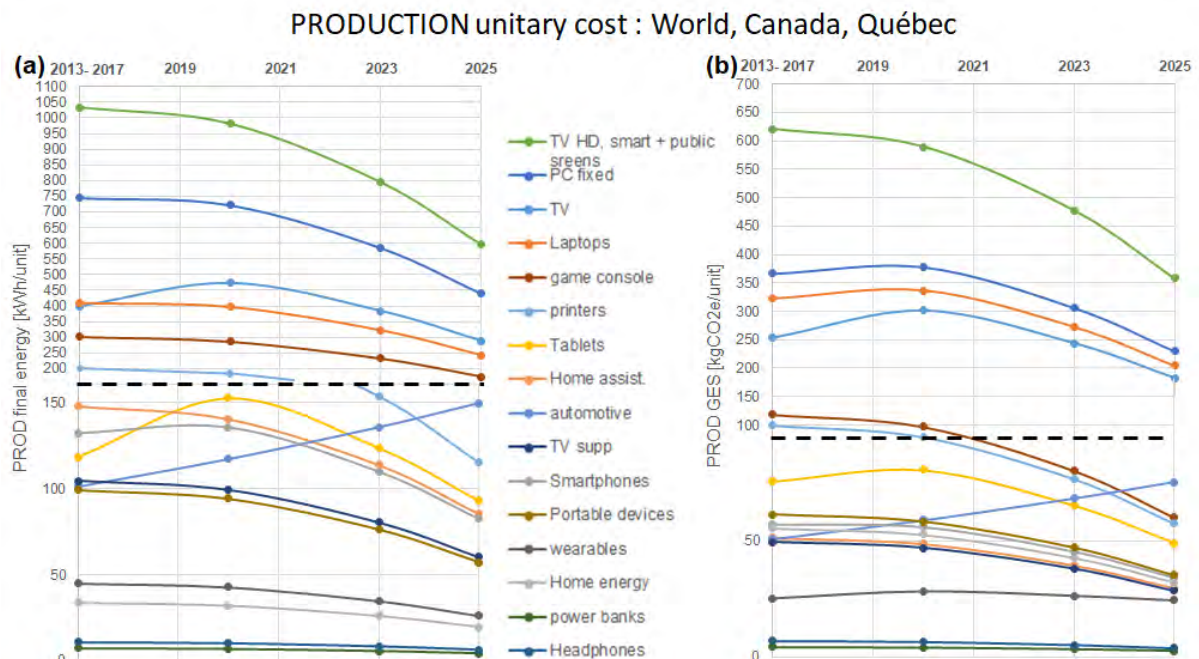


Figure 24 : Énergie finale (a) et émissions de GES (b) pour la fabrication des appareils utilisateurs (chiffres dans [21]). L'axe des ordonnées est linéaire, mais décomposé en deux parties d'échelle différente (séparées par des pointillés), pour simplifier la lecture. Seules les principales catégories sont représentées. TV supp. = décodeurs + chromecast + lecteurs DVD/BD. Wearables = bracelets connectés + montres intelligentes, portable devices = appareils photos + caméras portatives et de sport + baladeurs + enceintes bluetooth. Home assistant = enceintes intelligentes + système de surveillance domestique, headphones = airpods+casques sans fil. © 2020 Les Shifters Montréal.

Comme pour le téléphone intelligent (**Figure 23**), on voit que la phase de fabrication représente la majeure partie de l'empreinte carbone et énergétique (parfois jusqu'à 80 à 90%) de la plupart des petits appareils (**Figure 25(a)**, gris et bleu), mais la proportion est plus équilibrée pour les gros. Pour ceux qui se gardent le plus longtemps comme les décodeurs, les consoles de jeux et les imprimantes par exemple, c'est

[71] Feuille Excel [REN, matériel supplémentaire](#)

[72] Malmondin & Lunden, "The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015", *Sustainability* (2018), <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/research-papers/the-future-carbon-footprint-of-the-ict-and-em-sectors>

[73] Raghavan, B. and Ma, J., 2011, November. The energy and emergy of the internet. In *Proceedings of the 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks* (pp. 1-6), <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/2070562.2070571>

l'utilisation qui prédomine. Ceci est encore plus vrai pour les équipements réseaux, comme les routeurs ou les serveurs : l'utilisation (sur ~4 ans) pèse près de 90% de l'énergie totale [71]. Au Canada et au Québec, les appareils sont plus utilisés que la moyenne mondiale, et proviennent plus de marques limitant l'empreinte environnementale lors de la fabrication (voir 2.4) : la proportion phase d'utilisation/fabrication (orange par rapport à bleu sur la Figure 25(b) et (c)) est donc plus élevée pour l'énergie comparée à la moyenne mondiale (Figure 25(a)). Pour l'empreinte carbone, ce ratio est au contraire moins élevé, car l'intensité carbone de l'énergie est presque 5x moins élevée au Canada et 29x moins au Québec par rapport à la moyenne mondiale : pour ces régions du monde, la phase d'utilisation émet très peu de carbone par rapport à la fabrication pour tous les appareils (qui se fait en Asie, donc avec une intensité carbone assez élevée).

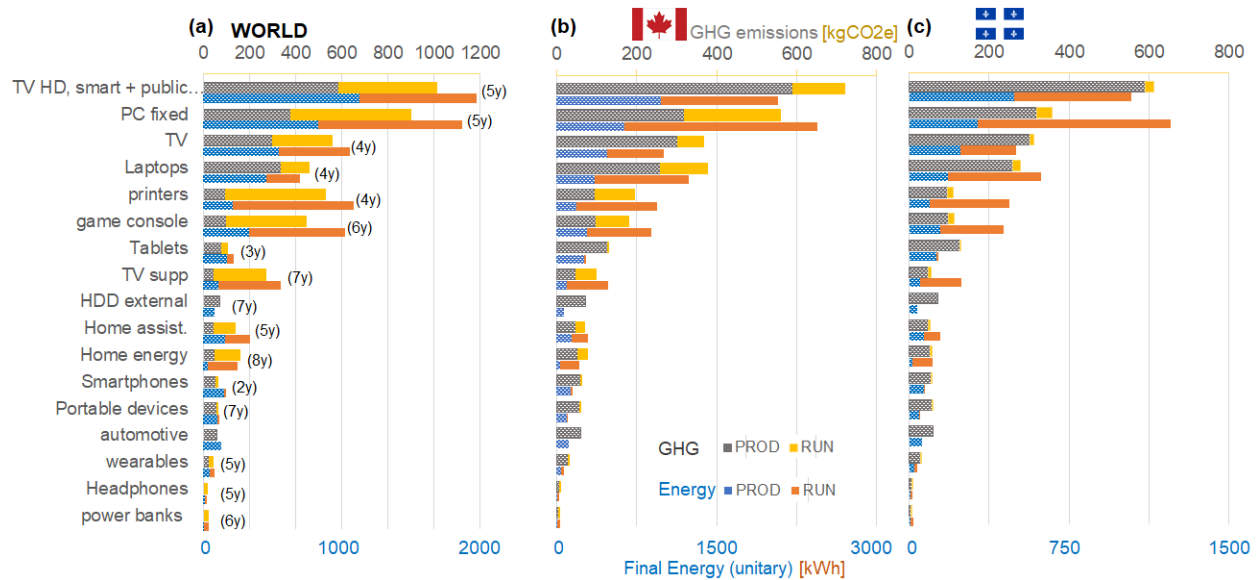


Figure 25 : Émissions de GES (gris-jaune) et énergie finale (bleu-orange) pour le cycle de vie complet des appareils, fabrication (gris, bleu) et utilisation (jaune, orange) en 2020. (a) Moyenne mondiale. (b) Au Canada. (c) Au Québec. Chiffres dans [21], voir Figure 24 pour le détail des catégories. Les durées de vie utilisées sont indiquées en (a), par (Ny). © 2020 Les Shifters Montréal.

À partir de ces données, un autre calcul intéressant peut être réalisé : la durée après laquelle un appareil numérique a égalisé son énergie de fabrication, en utilisation moyenne (Figure 26a, définie ici au moment où l'utilisation a dépensé autant d'énergie que la fabrication). On voit que la durée moyenne est entre 5 et 20 ans pour les appareils les plus courants (téléphones, ordinateurs, TV ...), mais monte à 100 ans pour les appareils photos, et plus de 1000 ans pour les liseuses électroniques. Cette métrique a en effet le désavantage de favoriser les appareils qui consomment beaucoup (comme les télévisions), et de défavoriser ceux qui consomment très peu (comme les liseuses), ou qui ne sont pas utilisés tous les jours (comme les appareils photos). Il reste que les appareils sont gardés, en moyenne, beaucoup moins longtemps que cette valeur seuil, seulement 4 ans pour un PC *laptop* par exemple (Figure 26b).

(a) Energy of use > embodied energy if the device is used for ...

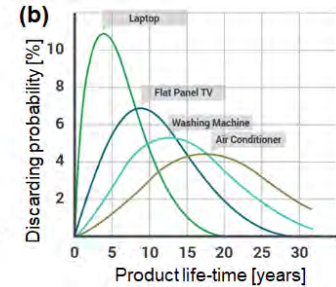


Figure 26 : (a) Laps de temps pendant lequel chaque appareil numérique devrait être utilisé (en utilisation moyenne) pour qu'il ait égalisé son énergie de fabrication, soit lorsque l'énergie d'utilisation dépasse l'énergie grise de fabrication. Chiffres dans [60], ©2020 Les Shifters Montréal. (b) Densité de probabilité du temps de conservation d'un appareil électronique avant de le mettre au rebut. Extrait de [74].

4.1.7. Utilisation totale d'électricité pour les appareils utilisateurs

L'utilisation d'énergie (finale, principalement de l'électricité) pour la fabrication des appareils utilisateurs est à peu près équitablement répartie au niveau mondial entre les télévisions (TV), les ordinateurs (PC), les téléphones et les autres petits terminaux (**Figure 27(a)**), alors que les TV et PC représentent la plus grosse part au Québec et au Canada (~80%, **Figure 27(b)** et **(c)**). Malgré l'augmentation constante du nombre de terminaux (voir **Figure 7**), l'énergie requise pour les fabriquer et les émissions associées sont supposées diminuer jusqu'en 2025 au moins grâce à l'amélioration des procédés sur toute la chaîne de production ([8], voir aussi **Figure 24**).

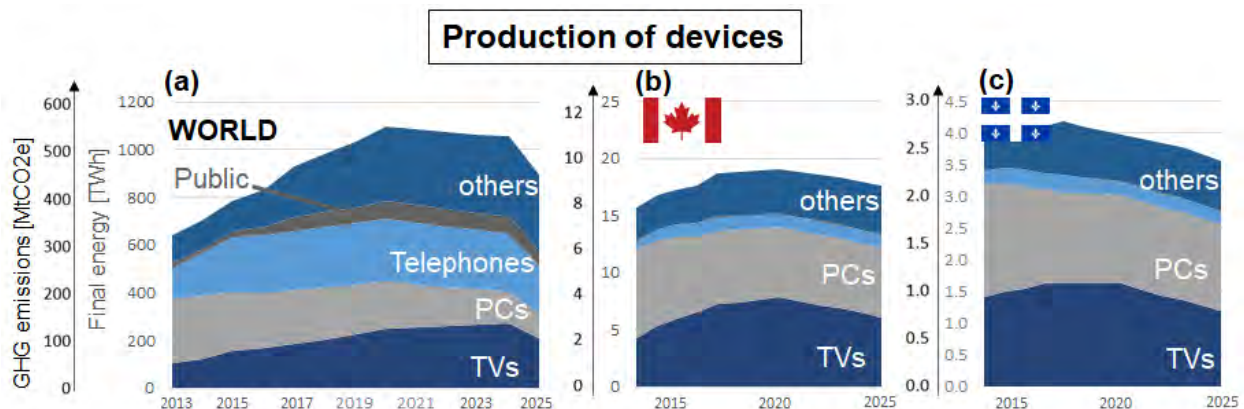


Figure 27 : Énergie finale et émissions de GES pour la production totale des appareils utilisateurs par catégorie. (a) Monde, (b) Canada et (c) au Québec, 2013-2025. Chiffres dans [21]. © 2020 Les Shifters Montréal.

Du côté de la phase d'utilisation des appareils, les télévisions représentent presque la moitié de l'électricité consommée, et donc des émissions de GES (**Figure 28**), au Canada (b) comme dans le monde (a). Les appareils produits sont de plus en plus efficaces en énergie, mais la facture globale continue d'augmenter jusqu'en 2025, car le nombre d'objets numériques utilisés continue de croître [75]. En

[74] Akcil, Ata, Ismail Agcasulu, and Basudev Swain. "Valorization of waste LCD and recovery of critical raw material for circular economy: A review." *Resources, Conservation and Recycling* 149 (2019): 622-637, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344919302927>

[75] Cisco, « VNI Complete Forecast Highlights » monde, ex. 2017-2022 : https://www.cisco.com/content/dam/m/en_us/solutions/service-provider/vni-forecast-highlights/pdf/Global_2022_Forecast_Highlights.pdf

revanche, si les équipements d'ordinateurs et TV occupent 85% du total au Québec et au Canada (Figure 28(b) et (c)), ceux-ci ne pèsent que 71% dans la moyenne mondiale.

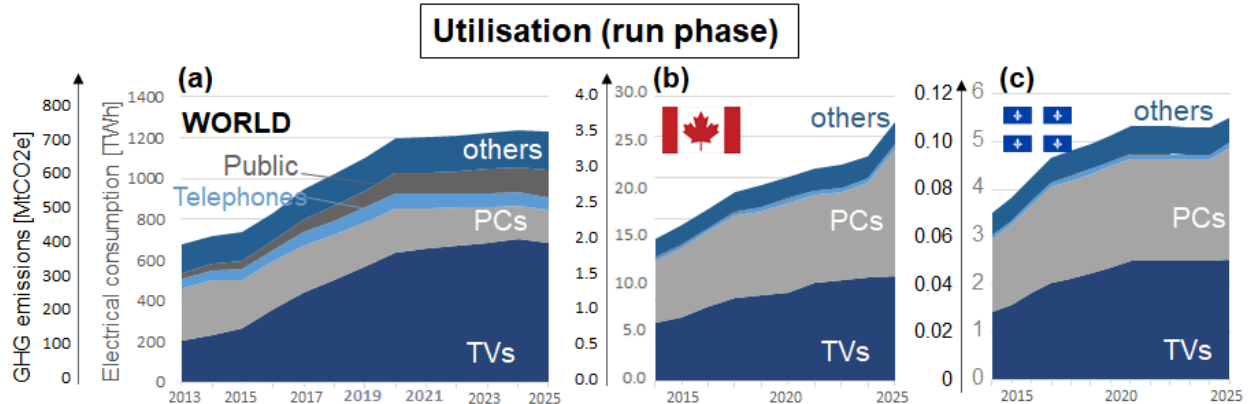


Figure 28 : Électricité consommée et émission de GES pour l'utilisation des appareils utilisateurs par catégorie. (a) Monde, (b) Canada et (c) au Québec, de 2013 à 2025. Chiffres dans [21], ©2020 Les Shifters Montréal.

L'analyse de Patsavellas *et al.* [76] rapporte environ 4 milliards de modules de TIC en plus dû à l'internet des objets (IoT), totalisant 200 MtCO₂e supplémentaires d'ici quelques années.

4.2. Les centres de données

4.2.1. Méthodologie

Deux approches permettent de mesurer la consommation des centres de données :

- 1.1 Mesurer l'impact d'un serveur, et multiplier par le nombre de serveurs. Permet aussi de connaître l'impact en métaux.
- 2.1 Mesurer le trafic total en exaocet, et multiplier par l'efficacité en TWh/Eo.

Cisco VNI and Global Cloud Index

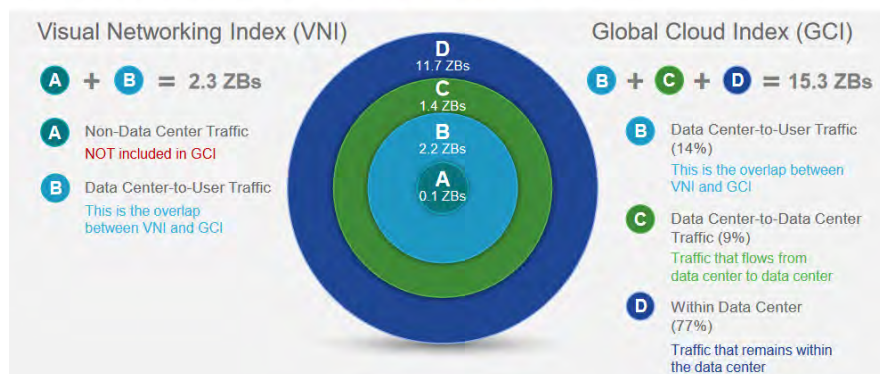


Figure 29 : Différences entre le "Visual Networking Index" (réseaux) et le "Global Cloud Index". Extrait de Cisco [77].

Il faut toutefois prendre garde à ne pas compter deux fois le trafic centre de donnée vers utilisateur, que Cisco compte dans le total réseau et le total centre de données. Ainsi, pour le total des centres de

[76] Patsavellas, J., & Salonitis, K. (2019), The Carbon Footprint of Manufacturing Digitalization: critical literature review and future research agenda, Procedia CIRP, <https://dSPACE.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/14261>

données nous compterons seulement les échanges inter et intra centres de données [77] (C+D sur la **Figure 29**). De plus, « les prévisions pour cette décennie pour les réseaux fixes ont été fortement surestimées par [17], car l'utilisation de matériel moins énergivore n'a pas été considérée » [78] : nous tenons compte de ces corrections dans notre moyenne.

4.2.2. Centres de données au Canada

L'efficacité des centres de données au Canada a été calculée à partir de la fraction de l'électricité globale de ce secteur, fournie par Ressources Naturelles Canada, et du trafic en exaoctet de ces centres de données. Un 2^e calcul pour 2013-2014 vient de l'efficacité calculée par le ratio trafic/électricité aux USA, et la comparaison de l'efficacité moyenne des serveurs dans ce pays et le Canada [79].

4.2.3. Utilisation des centres de données en dehors du Canada

La majorité des données utilisées dans un pays donné – à l'exception peut-être des États-Unis où les compagnies de TIC sont concentrées – proviennent a priori de serveurs situés à l'étranger. Par exemple, les serveurs de Google sont surtout aux États-Unis et un peu en Europe [80], et la répartition pour leur service de vidéo YouTube semble être équilibré USA/Europe (voir **Figure 30**).

[77] Cisco, "Global Cloud Index 2015-2020" (2015), https://www.cisco.com/c/dam/m/en_us/service-provider/ciscoknowledgenetwork/files/622_11_15-16-Cisco_GCI_CKN_2015-2020_AMER_EMEAR_NOV2016.pdf

[78] Andrae *et al.*, "Hypotheses for primary energy use, electricity use and CO2 emissions of global computing and its shares of the total between 2020 and 2030" (2020), WSEAS Transactions on Power Systems 15, 50-59.

[79] NRCAN, "Data Center Estimates in the United States and Canada" (2018), <https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/pdf/benchmarking-rendement/DataCenter-US-and-Canada-EN-Feb2018.pdf>



Figure 30 : Localisation des centres de données de Google (rouge), AWS (Amazon, bleu), et Azure (Microsoft, vert), données de 2020 [80], [81], [82].

4.2.4. L'électricité utilisée par les serveurs et le refroidissement : stationnaire ?

L'efficacité en TWh/Eo (ou kWh/Go) diverge selon les sources : alors qu'elle était à 0.1 vers 2013, elle est descendue autour de 0.01 en 2020 selon [19, 83], ou 0.015 selon [8, 84] (Andrae a cependant beaucoup baissé son estimation de 2015 [17]). Cela conduit à une estimation d'environ 200 TWh au niveau mondial contre plus de 300 TWh dans le 2^e cas. Alors que le trafic de données pourrait être multiplié par 4 en 2025, les prédictions optimistes [19, 83] tablent sur une stagnation de la consommation électrique grâce à l'amélioration des rendements, alors que [8, 84] prévoient une consommation supérieure à 400 TWh, et en forte augmentation jusqu'à 2030.

[80] Google, « Découvrez où sont implantés nos centres de données » (accès Mai 2020),

<https://www.google.com/about/datacenters/locations/>

[81] « Carte de l'infrastructure mondiale AWS » (accès Mai 2020), <https://aws.amazon.com/es/about-aws/global-infrastructure/>

[82] Microsoft, « Azure regions » (2020), <https://azure.microsoft.com/en-us/global-infrastructure/regions/>

[83] Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S. and Koomey, J., 2020. Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*, 367(6481), pp.984-986., <https://science.sciencemag.org/content/367/6481/984.summary>

[84] Hintemann, R. and Hinterholzer, S., 2019. Energy Consumption of Data Centers Worldwide-How will the Internet become Green?. Borderstep, In *ICT4S.*, <https://pdfs.semanticscholar.org/3ae4/4c7ede7fbb743b91b0ab100019dc41237ea4.pdf>

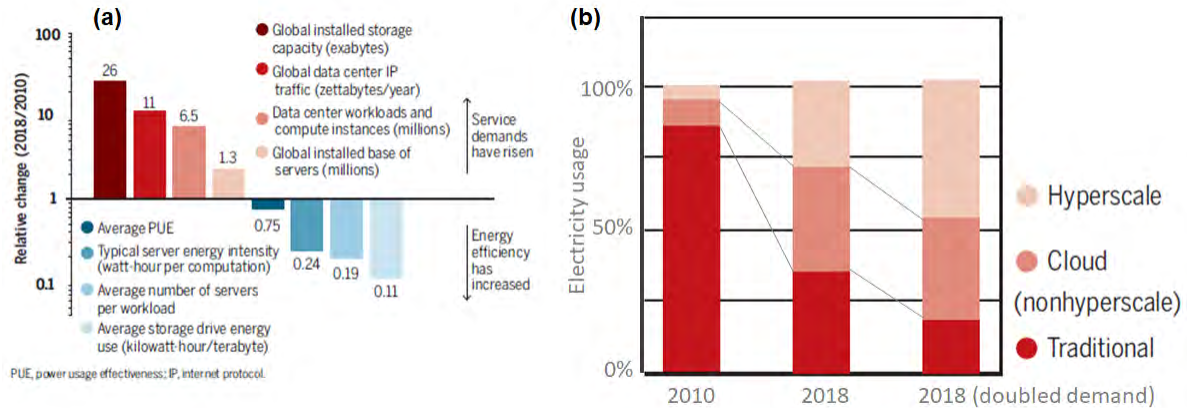


Figure 31 : Changements pour les centres de données entre 2010 et 2018. (a) Augmentation de la demande (rouge) et amélioration de l'efficacité en parallèle (bleu). (b) Changement de type de centres de données. Extrait de [83].

Le portrait des centres de données a en effet beaucoup varié en 10 ans, ce qui explique pourquoi la consommation électrique pourrait rester plafonnée : comme le montre [83], malgré la forte augmentation de la demande (**Figure 31(a)** en rouge : trafic, charge computationnelle, etc.), d'autres paramètres énergétiques se sont fortement améliorés entre 2010 et 2018. En plus du PUE (*Power Usage Effectiveness*), l'efficacité de computation, le nombre de serveurs utilisés par charge de travail ou encore l'énergie pour le stockage ont été divisés par des facteurs allant jusqu'à dix (**Figure 31(a)** bleu). De plus, les serveurs traditionnels sont progressivement remplacés par des services d'infonuagiques (*cloud*), voire même des hyper-centre de données (*hyperscale*, **Figure 31(b)**), ce qui permet des économies d'énergie [83]. Toutefois, les données restent plus immobilisées sur les appareils utilisateurs que sur les serveurs (rapport 1:7 en 2015, mais en baisse à 1:5 en 2020) [77] : de même, il y a eu en 2020 dix fois plus de données échangées (~12 Zo) que de données immobilisées sur les serveurs (~1 Zo) [77].

Dans ce rapport nous avons pris une moyenne des sources mentionnées, ce qui conduit à une augmentation de 100TWh de 2013 à 2023 pour l'utilisation des centres de données, et concorde avec l'estimation de 371TWh de Whitehead *et al.* pour 2015 [85] (contre 340TWh pour notre calcul [21]).

4.2.5. L'impact carbone des centres de données : éléments contre-intuitifs

La réduction de l'empreinte environnementale des centres de données semble être la dernière priorité pour les acteurs du secteur, derrière la facilité d'utilisation, la rentabilité et la possibilité d'évoluer en technologie [86].

Il semble qu'environ un tiers de l'électricité utilisée pour les centres de données au Canada provienne et proviendra au-delà de 2020 de centrales nouvellement construites pour l'occasion : pour des raisons d'échelle de temps et de facilité, celle-ci sont très majoritairement fossiles (94% ou plus, utilisant du gaz naturel, sources d'énergie « marginales » au Canada) : ce mix représente une intensité carbone de 0.9 kgCO₂e/kWh [87]. De plus, le reste (2/3) de l'électricité requise est produit par les centrales déjà en place (60% hydro, 15% nucléaire, 25% fossiles à 0.16-0.13 kgCO₂e/kWh), mais cette électricité n'est alors plus vendue aux États-Unis (pour leurs centres de données et autres usages), qui doivent alors compenser par

[85] Whitehead, Beth, et al. "Assessing the environmental impact of data centres part 1: Background, energy use and metrics." *Building and Environment* 82 (2014): 151-159, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036013231400273X>

[86] Public Governance International, "A PGI working paper: The digital economy and the green economy: compatible agendas?" (2019), <https://www.pgionline.com/the-digital-economy-and-the-green-economy-compatible-agendas-3/>

[87] Dandres *et al.*, "Consequences of Future Data Center Deployment in Canada on Electricity Generation and Environmental Impacts A 2015–2030 Prospective Study", *Journal of Industrial Ecology* (2016), <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/jiec.12515>

leurs propres sources marginales d'électricité, à environ 2/3 charbon et 1/3 gaz naturel pour les États concernés [87]. Chaque kWh utilisé pour les centres de données canadiens tient ainsi compte du mix états-unien, et pourrait alors entraîner 0.63 kgCO_{2e} (en supposant que les centres de données utilisent une part faible de l'électricité globale) à 0.85 kgCO_{2e} (si leur nombre devient élevé et que les centrales fossiles sont construites pour cela) [87].

L'impact carbone des centres de données ne peut de plus se résumer à l'électricité utilisée : outre la phase de production, des réfrigérants sont utilisés pour refroidir les serveurs. La grande majorité contient des HFC : R134a et R410a [88] (qui sont des GES à [1320](#) et [2088](#) GWP). De nouveaux réfrigérants comme R32 ([675 GWP](#)) ou R1234ze ([4 GWP](#)) sont proposés, ou même de l'ammoniac, du butane/propane ou encore du CO₂ (R744) [89]. Les meilleures localisations permettent aussi de refroidir avec l'air extérieur jusqu'à 85% du temps (*free cooling*, comme à Montréal) [90]. À l'échelle du Canada, les HFC sont supposés suivre un plan de réduction pour passer de 90% des gaz à seulement 30% en 2030 :

Table 7 : Réduction de l'utilisation des gaz HFC pour la réfrigération, 2019-2036.

	2019	2024	2030	2036
Canada [90]	-10%	-35%	-70%	-85%
Europe [89]	-37%	-69%	-89%	/

Le refroidissement représente 76% de la partie non-IT de l'électricité consommée par un centre de donnée moyen [91]. Le PUE (ratio entre l'électricité totale consommée et celle vraiment utile pour l'IT) pouvait aller jusqu'à 2 avant 2012 [92], et est progressivement descendu autour de 1.5 en 2019, en moyenne mondiale [93]. Cependant, il dépend beaucoup de la taille et de l'application du centre en question [94] (**Figure 32**) : il est possible de calculer un PUE moyen de 1.86 pour les États-Unis en 2014 ([94], annexe 2). Google annonçait même avoir atteint un [PUE moyen de 1.1](#) en 2019, et on peut estimer 1.25 pour le Canada en 2019, voire 1.2 pour le Québec. Pour les cas où un refroidisseur (*chiller*) est utilisé toute l'année, les 1% de perte de celui-ci [91] représentent 1.8g de HFC-134 par MWh d'électricité pour le refroidissement [92]. Ce chiffre provient cependant d'une seule étude universitaire sur un usage des refroidisseurs en Suède, il peut éventuellement être amené à varier selon les différents pays ou générations de centres de données. Avec ce chiffre, l'impact du gaz réfrigérant – s'il est correctement recyclé en fin de vie de l'appareil – est en tout cas négligeable : 0.25MtCO_{2e} au niveau mondial, c'est-à-dire 0.1% des émissions dues à l'électricité utilisée pour les centres de données.

[88] Vertiv, "How climate change rules are driving data center cooling innovation" (2018), <https://www.vertiv.com/en-emea/about/news-and-insights/articles/blog-posts/how-climate-change-rules-are-driving-data-center-cooling-innovation/>

[89] J. Rogstam, "Natural Refrigerants in Data Centre Cooling", EKA (2017), <https://www.kys.se/wp-content/uploads/Slutrapport-Nat-k%C3%B6ldm-i-datacenters-17JAN18.pdf>

[90] Alquilon, "Data Center Case Study - Client : Bell Canada" (2019), <https://www.carnotrefrigeration.com/en/case-studies/data-center-cooling>

[91] A. Sahlsten & V. Heinerud, "Natural Refrigerants in Data Center Cooling with Thermosiphon Application", KTH (2016), <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:972685/FULLTEXT01.pdf>

[92] S. Wang (2012), "Further study of Life Cycle Assessment of a high density data center cooling system –Teliasonera's "Green Room" concept Identification of improvement possibilities using Life Cycle Assessment (LCA) and discussion about the effect of the choice of Life Cycle Impact Assessment(LCIA) methods on the results", KTH (2012).

[93] A. Lawrence, "Is PUE actually going UP?" (2019), <https://journal.uptimeinstitute.com/is-pue-actually-going-up/>

[94] NRDC, "Data Center Efficiency Assessment - Scaling Up Energy Efficiency Across the Data Center Industry: Evaluating Key Drivers and Barriers" (2014), <https://www.nrdc.org/sites/default/files/data-center-efficiency-assessment-IP.pdf>

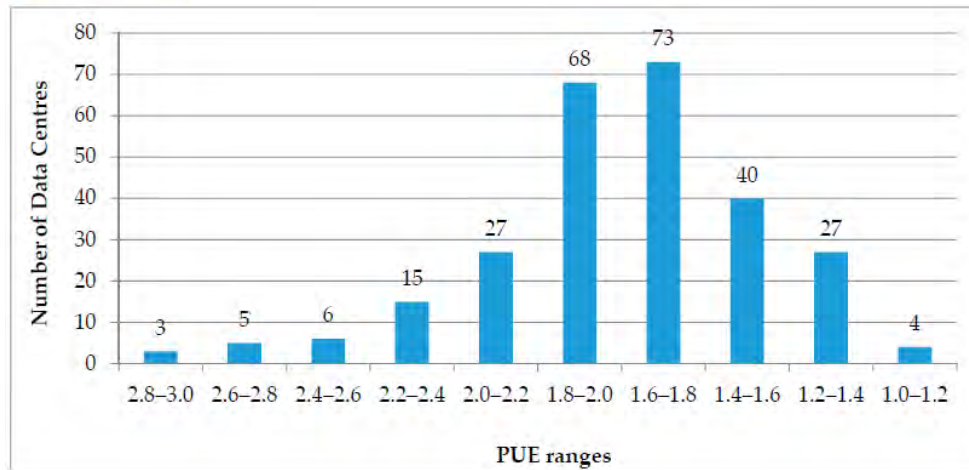


Figure 32 : PUE mesuré pour divers centres de données, 2016 (tiré de [95]).

4.2.6. Énergie totale pour la fabrication

Avec les chiffres corrigés les plus récents, les centres de données auraient ainsi nécessité seulement 6 TWh d'énergie finale pour produire leurs serveurs selon [17]. Pourtant des sources récentes comme [96] calculent 20 MWh d'énergie primaire sur les 5 ans de vie d'un serveur (2019), ce qui est en augmentation par rapport au chiffre de 2010 avancé par [73], 1.4 MWh. En moyennant sur plusieurs sources, on trouve donc autour de 70 TWh pour 2020 [21], c'est-à-dire 10 fois plus que la prédiction d'Andrae dans [17] !

4.2.7. Conclusion sur les centres de données

L'empreinte carbone ou énergétique des centres de données est pour $\frac{3}{4}$ due à l'utilisation (dans le monde, 70% au Canada et 80% au Québec), tendance qui pourraient monter à 85% en 2025. Ils comptent pour 13% de l'énergie finale du numérique (resp. de l'empreinte carbone) des TIC au niveau mondial, c'est-à-dire 25% (resp. 40%) plus que les réseaux. Plus de données y sont en effet traitées que dans les réseaux, mais elles parcourent de moins grandes distances. Au Canada, ils représentent 10 % de l'énergie finale du numérique et 14% au Québec, mais comptent pour 17% (Canada) et 29% (Québec) de l'empreinte carbone.

4.3. Les réseaux

4.3.1. Fabrication des réseaux : fibres optiques, câbles de cuivre, switchs, appareils WiFi/LAN, routeurs et antennes relais

A. Andrae a corrigé - comme pour les centres de données - le rapport de cycle de vie à 0.02 [8] au lieu de 0.15 [17] pour la fabrication des réseaux : en 2020, 5 TWh d'énergie finale y auraient ainsi été consacrés. Ce chiffre est très en-dessous de [18] (150 TWh) et [73] (200 TWh) pour 2015. Il est intéressant de noter que [73] calcule en additionnant les fibres optiques, câbles de cuivre, switchs, appareils WiFi/LAN, routeurs, alors que [18] sépare plutôt en ligne d'accès, noyau d'échange, multiplexeur d'accès LAN

[95] Avgerinou, M., Bertoldi, P., & Castellazzi, L. (2017). "Trends in data centre energy consumption under the european code of conduct for data centre energy efficiency", *Energies*, 10(10), 1470, <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/10/1470>

[96] Peñaherrera F., Hohohm J., Szczepaniak K. (2019) LCA of Energy and Material Demands in Professional Data Centers: Case Study of a Server. In: Schebek L., Herrmann C., Cerdas F. (eds) Progress in Life Cycle Assessment. Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management. Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-319-92237-9_9

(DSLAM), noyau IP et câbles sous-marins, et que les deux estimations arrivent à peu près à la même énergie grise pour la période 2013-2020 [99]. Entre 2020 et 2025, les deux estimations diffèrent cependant du simple au double, dû à l'augmentation du trafic de données et à l'incertitude sur l'efficacité énergétique [99].

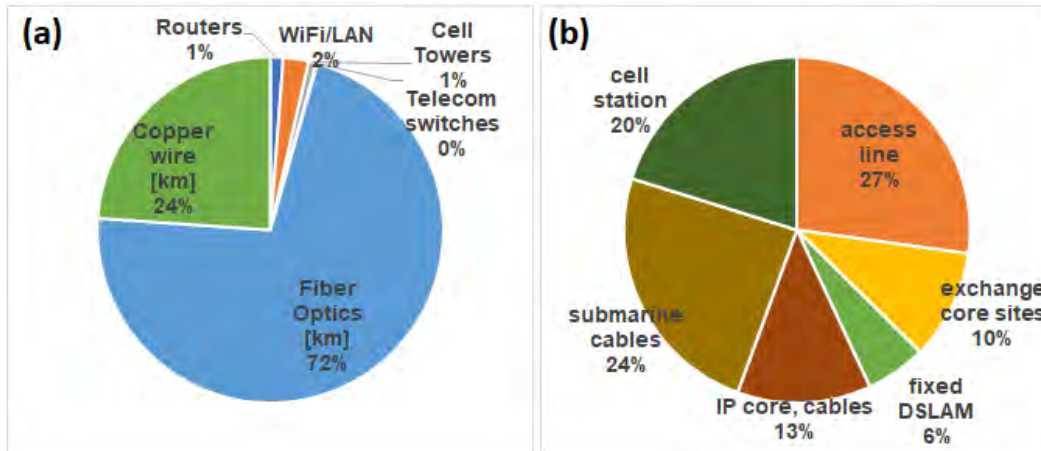


Figure 33 : Énergie grise pour la fabrication des réseaux. (a) 2010, décomposition de [73]. (b) 2015, décomposition différente, chiffres de [18]. DSLAM : Digital Subscriber Line Access Multiplexer. ©2020 Les Shifters Montréal.

Les antennes relais cellulaire (*cell towers*) viennent aussi s'ajouter à tout ceci : on voit sur la **Figure 33** qu'elles ont pris une part de plus en plus importante entre 2010 et 2015, dû à l'évolution des technologies 2G vers 3G, puis 4G. Cette part devrait *a priori* augmenter dans le futur avec le passage vers la 5G et au-delà. On remarque aussi que le remplacement des fibres optiques et des câbles coaxiaux représente la majorité des dépenses énergétiques, malgré leur longue durée de vie (30 ans [73]).

Un chiffre de Vodafone estime que l'empreinte carbone intrinsèque (*embodied*) d'une antenne pour réseau mobile est deux fois supérieure à celle de son utilisation [97] (sur sa durée de vie, supposée de 10 ans) : on trouve un chiffre proche pour l'énergie intrinsèque (grise) de toutes les antennes dans le monde, 25 TWh/an en fabrication contre 70TWh/an pour l'utilisation (ratio de 2.8 au lieu de 2).

Au total, l'énergie finale des réseaux est dominée par l'utilisation à 75%, car une fois construits les équipements durent relativement longtemps (20-30 ans). Au Québec et au Canada en revanche, c'est la fabrication qui domine à ~60% (et à 85%-95% pour les GES, chiffres dans [99]), sûrement dû à l'étendue importante des distances à couvrir. Ce chiffre pourrait changer lorsque le réseau sera arrivé à maturité, et dépendamment du scénario d'innovations qui sera mis en place.

[97] Scavage, "Sustainable Cellular Network Harvesting Ambient Energy" (2018), <http://www.scavage.eu/wp-content/uploads/2018/02/D3.1.pdf>

4.3.2. Méthodologie pour les réseaux (utilisation)

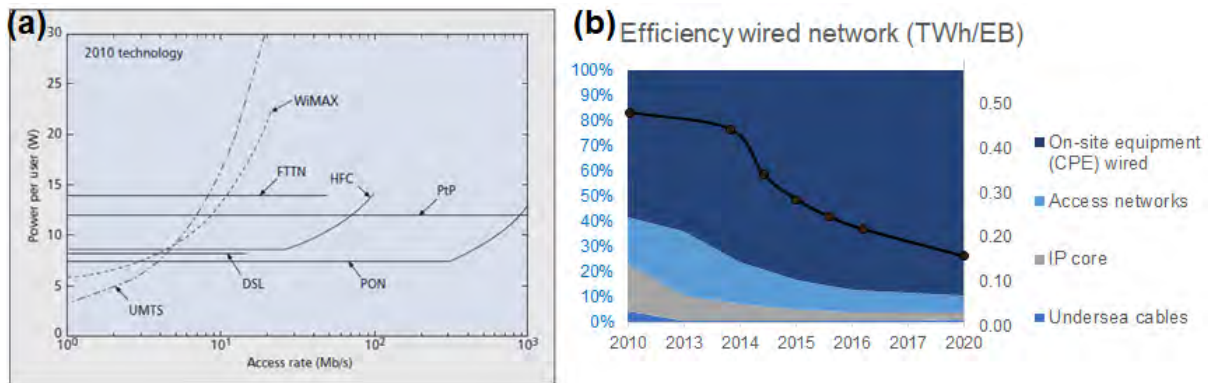


Figure 34 : (a) Technologie de réseau et consommation électrique associée : certaines applications dépendent fortement du débit d'utilisation, mais une moyenne en kWh/Go est souvent réalisée. Tirée de [98], 2010. FTTN : Fiber to the node. UMTS : 3G mobile. HFC : câble coaxial. PtP : point to point. PON : fibre optique passive. WiMAX : sans-fil fixe. (b) Part de l'efficacité énergétique de chaque composante des réseaux câblés (chiffres de [100]), la division est sensiblement la même pour les réseaux WiFi [99]. La courbe noire représente la somme des efficacités absolues au cours du temps, 1kWh/Go = 1TWh/Go. ©2020 Les Shifters Montréal.

Certaines applications dépendent fortement du débit d'utilisation du réseau [98], mais une moyenne en kWh/Go est souvent réalisée pour calculer l'efficacité énergétique de chaque type de réseau (Figure 34(a)). De plus, l'efficacité du réseau entier (WiFi et câblé) dépend surtout du routeur (CPE) [100], surtout depuis quelques années (voir Figure 34(b)). Nous avons ici repris la division d'Aslan *et al.* [100] : CPE, réseaux d'accès, noyau IP et câbles sous-marins. Toutefois d'autres publications utilisent une division légèrement différente : Radio Access Network (RAN) / Operator packet switched core (PS-core) / CPE / opérateur de gestion réseau / réseau de bureau (*office networks*) et noyau IP [113].

On peut compiler le trafic transitant par les réseaux en fonction du type de connexion (fixe, WiFi ou mobile, voir Figure 35(a)) : de 2017 à 2025, les données transiteront le plus via des connexions WiFi avec un léger recul du fixe en proportion [99], mais le nombre de connexions mobiles continuera d'augmenter. Après 2025, Andrae [8] prévoit que la 5G représentera 94% du trafic mobile, et que sa forte augmentation (Figure 35(b)) fera que les données seront équitablement réparties en proportion entre fixe, WiFi et mobile. Entre 2013 et 2030, la quantité de données pourrait de plus être multipliée par un facteur 1000 (Figure 35, les échelles des Y sont logarithmiques) tandis que la consommation électrique totale ne doublerait que deux fois (Figure 35(a)) : l'amélioration technologique est donc aussi importante que pour les centres de données (voir 4.2.4). Comme le trafic des réseaux mobiles augmente en outre très vite, ceux-ci représentent la majorité de l'augmentation de consommation électrique (multiplication par 10 entre 2013 et 2030, pour atteindre 1000TWh) [99]. Il est à noter que d'autres sources comme Pärssinen *et al.* [113] - bien que leur estimation pour les centres de données soit concordante avec la nôtre - trouvent pour les réseaux des consommations électriques supérieures à nos estimations (plus de 500TWh en 2016, contre 300TWh selon nous [21]), peut-être dû à une méthode de comptabilisation différente (voir ci-avant).

[98] Baliga, J., Ayre, R., Hinton, K., & Tucker, R. S. (2011). Energy consumption in wired and wireless access networks. *IEEE Communications Magazine*, 49(6), 70-77.

[99] Feuille Excel [ges_mat_stat.xlsx](#)

[100] Aslan *et al.*, "Electricity Intensity of Internet Data Transmission", *Journal of Industrial Ecology* (2018), <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.12630>

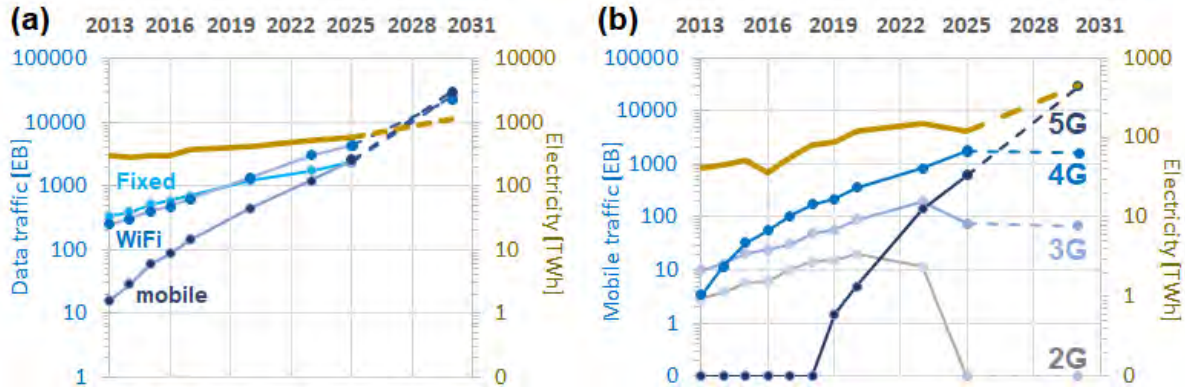


Figure 35 : Trafic de données dans les réseaux (bleu) et électricité utilisée (marron) dans le monde. (a) Détail du type de réseau (fixe, WiFi ou mobile). (b) Pour les réseaux mobiles : 2G, 3G, 4G et 5G [99]. Les échelles en Y sont logarithmiques. ©2020 Les Shifters Montréal.

À partir des estimations compilées dans [100], on peut calculer une consommation annuelle au Canada de 0.8TWh pour les réseaux mobiles en 2013, et 4.7TWh pour les réseaux fixes. On peut constater que les chiffres sont comparables à ceux de [101] en 2010 pour la Suède (pays nordique et étendu comme le Canada) : en appliquant un ratio de population (33 millions contre 10.5 millions), on trouve 0.9TWh ($\times 0.9$) pour les mobiles et 2.2TWh pour les réseaux fixes ($\times 2$, peut-être attribuable à la progression entre 2010 et 2013). D'ailleurs, la consommation annuelle des centres de données est aussi comparable : 3TWh (Canada, 2013) contre 3.5TWh (Suède en 2010 avec ratio de population) [101].

Enfin, au Canada (resp. au Québec), le trafic annuel pourrait être multiplié par 4 (resp. par 6) d'ici 2025, mais la meilleure efficacité énergétique des nouvelles générations de connectivité (5G, WiFi 6 ...) fait que la consommation électrique des réseaux pourrait légèrement diminuer jusqu'en 2025 (voir [99]).

4.3.3. Consommation finale d'électricité pour le trafic de données

Le trafic total des réseaux de télécoms et des centres de données est représenté sur la **Figure 36** (bleu pointillé) : entre 2015 et 2025, les données transitant dans les réseaux seront multipliées par 10, et celles des centres de données par presque 20 [21]. Mais c'est entre 2025 et 2030 que l'augmentation est prévue d'être fortement accélérée, entre autres dû à l'avènement de la 5G et la multiplication des objets connectés : $\times 4$ pour les centres de données et $\times 10$ pour les réseaux (voir points bleus hors courbe sur la **Figure 36**) [8]. Malgré ces augmentations, l'utilisation d'électricité ne devrait pas augmenter exponentiellement grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique (en kWh/Go) : la consommation devrait doubler d'ici 2025 par rapport à 2015, puis doubler de nouveau entre 2025 et 2030 [21]. Ces estimations sont le résultat d'une moyenne entre plusieurs scénarios : certaines prévisions optimistes prévoient même une consommation d'électricité quasi-constante (pour les centres de données [83-84, 102], voir 4.2.4) malgré l'explosion de l'utilisation de données.

[101] Malmodin, J., Lundén, D., Moberg, Å., Andersson, G., & Nilsson, M. (2014). Life Cycle Assessment of ICT. *Journal of Industrial Ecology*, 18(6), 829–845. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/jiec.12145>

[102] IEA, "Data Centres and Data Transmission Networks" (2020), <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>

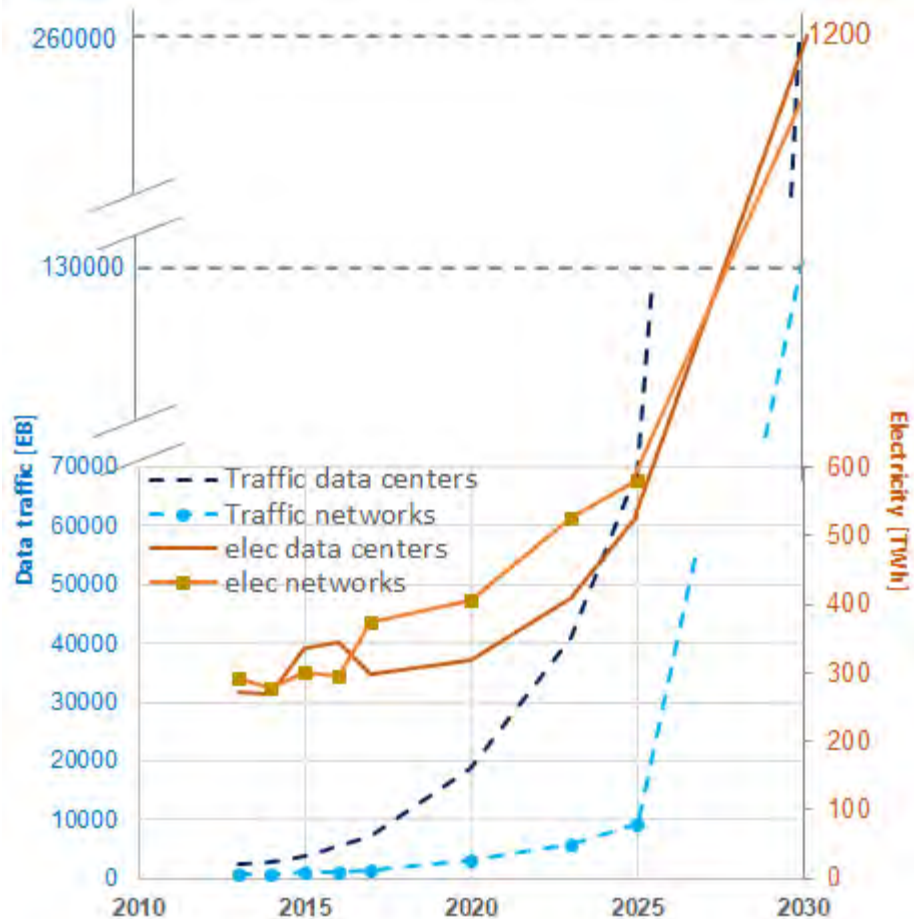


Figure 36 : Trafic de données (gauche, bleu) et consommation d'électricité (droite, orange) pour l'utilisation des réseaux à l'échelle mondiale, par an, entre 2013 et 2030 [21]. ©2020 Les Shifters Montréal.

4.3.4. Les réseaux au Canada et au Québec

Les courbes de la **Figure 36** sont différentes pour le Canada et le Québec : grâce à une meilleure implémentation de l'efficacité énergétique, la consommation électrique due aux réseaux (jaune sur la **Figure 37**) devrait diminuer jusqu'au moins 2025, malgré une légère augmentation du trafic (bleu) [99].

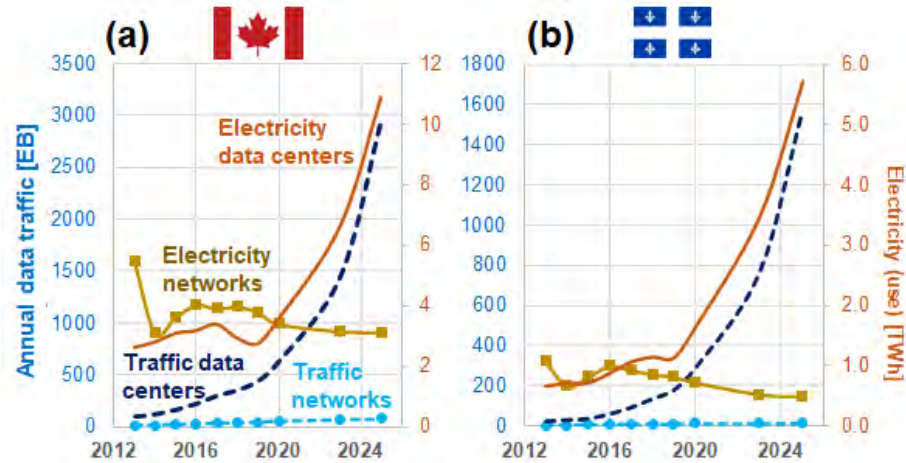


Figure 37 : Trafic de données (gauche, bleu) et consommation d'électricité (droite, orange) pour l'utilisation des réseaux (jaune et bleu clair) et des centres de données (orange et bleu foncé) à l'échelle du Canada (a) et du Québec (b), par an, entre 2013 et 2025 [21]. ©2020 Les Shifters Montréal.

Les centres de données diffèrent grandement : leur trafic pourrait être multiplié par 8 entre 2020 et 2025 (bleu foncé **Figure 37**) - et leur consommation électrique par 6 (orange) – dû au fait qu'il est de plus en plus attrayant d'implémenter des centres de données au Canada et au Québec (voir [1]).

De plus, le marché d'affaires représentait 1.3 million d'abonnements en 2018, en hausse de 1.7%/an [103] : il est donc absolument crucial de la comptabiliser en plus des abonnements des ménages. Celui-ci diffère aussi pour le type de connexion (**Figure 38**) : les entreprises utilisent moins de câbles et plus de fibre optique (b) que les connexions résidentielles (a).

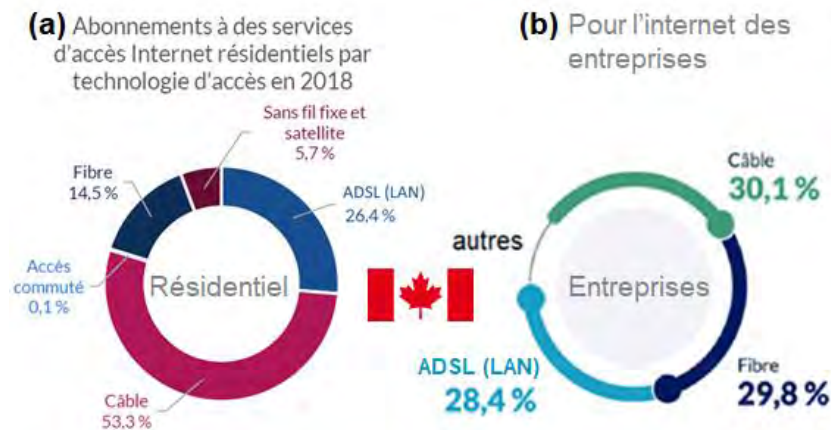


Figure 38 : Technologies d'accès internet (en %) au Canada, (a) pour l'accès internet résidentiel (b) pour le revenu d'affaires (entreprises). Extrait de [103], 2018.

De plus, 10.8 des 14.9 millions de foyers au Canada (75%) avaient un abonnement de radiodiffusion en 2018 [103]. Les services de TV représentent ainsi une part importante du trafic via internet fixe au Canada : de 1 à 2 Go/h en moyenne (**Figure 39(c)**). Les plateformes consommant le plus de données restent cependant YouTube et Netflix, loin devant le web traditionnel (http) au Canada et en Amérique du Nord au complet (**Figure 39(b)** et (c)). Si les données sont consultées via un réseau 4G, Youtube et Netflix

[103] CRTC Canada, « Rapport de surveillance des communications » (2019), <https://crtc.gc.ca/fra/publications/reports/policymonitoring/2019/cmr10.htm>

n'arrivent toutefois qu'en 4^e et 5^e position, avec 2 à 4 fois moins de données consommées que des services de TV comme GlobalTV, CBCTV ou encore CraveTV [103].

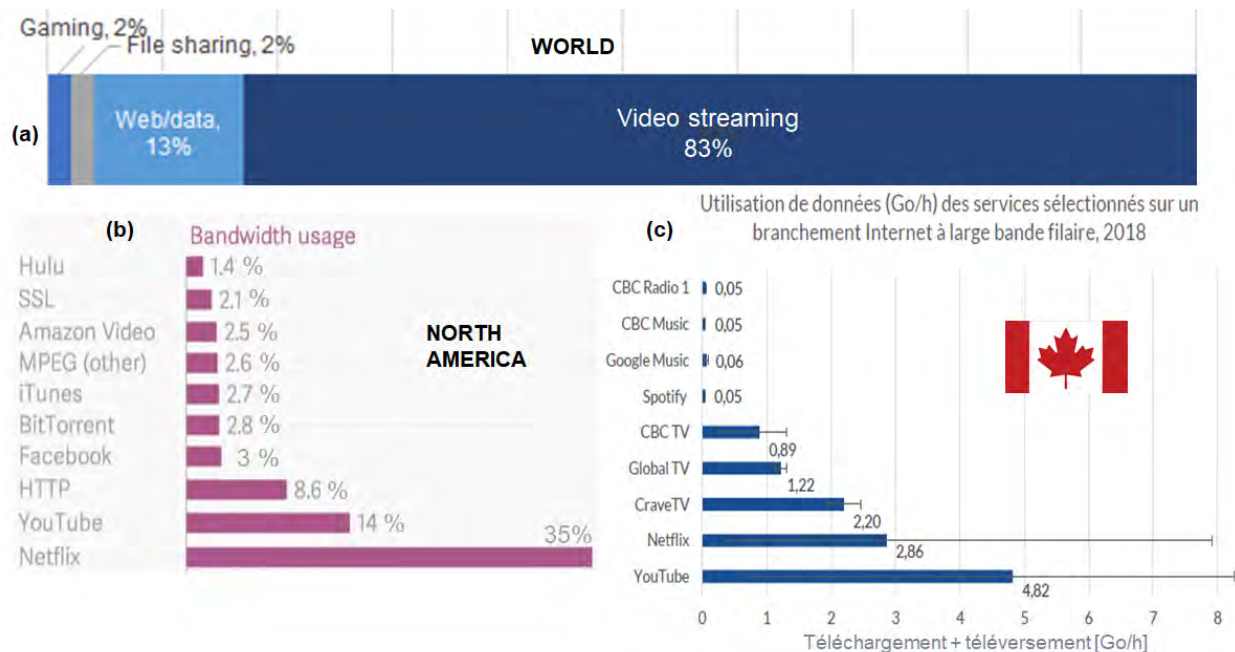


Figure 39 : Services internet consommant le plus de données (serveurs vers utilisateurs). (a) Dans le monde [77]. (b) Utilisation des données en Amérique du Nord (USA+Canada), © qz.com. (c) Utilisation des données par les Canadiens, internet fixe, extrait de [103].

4.3.5. Répartition finale du trafic de données

Il faut noter que ces calculs tiennent compte des services consommés en bout de ligne, donc des données transférées entre les centres de données et l'utilisateur via les réseaux : la vidéo en *streaming* constitue alors plus de 80% de ces échanges en moyenne mondiale (**Figure 40(b)**, rapporté par [77] via [60]). Cependant, le trafic vers l'utilisateur (web, e-mail, vidéo, etc.) se chiffre à 14% du trafic total (**Figure 29** et [77]). En plus, cette tendance s'accroît progressivement à la baisse : de 20% en 2013, la proportion pourrait passer à 12% en 2025 [21][75][77], dû à la croissance toujours plus grande des centres de données. Pour avoir l'importance relative de chaque service, il faut alors regarder le trafic à l'intérieur des centres de données (stockage, données de production, authentification), qui se chiffre en fait à 3/4 du trafic total [77] (voir **Figure 29**) : les mégadonnées (*Big Data*), la vidéo, les moteurs de recherche, les réseaux sociaux et le web classique se divisent ainsi ce trafic en parts à peu près égales d'environ 15% (**Figure 40(a)**). Dans des pays de l'OCDE comme le Canada, les jeux en ligne (« *gaming* ») représentent actuellement 5% de la bande passante, chiffre qui a tout de même doublé en proportion depuis 2016 [104].

Il reste à connaître la répartition du trafic IP entre les centres de données et entre les centres de données (*intercloud, streaming* ...), qui représentait 9% du total en 2020 selon Cisco [77] (**Figure 29**) : la vidéo en ligne, les requêtes web et le transfert de fichier étant de plus en plus répartis entre les centres de données pour assurer une meilleure fiabilité du système, on suppose ici que la part de chaque service en quantité de données est à peu près la même entre les centres de données que vers les utilisateurs. On

[104] Cisco Canada, "VNI Complete Forecast Highlights 2017-2022" (Canada), version 2015 et 2016 également.

voit finalement sur la **Figure 40(c)** que le trafic IP total est alors divisé à peu près comme celui des centres de données (a), avec une prédominance de la vidéo en *streaming* comme dans (b), mais celle-ci se chiffre à ¼ du total des données « traitées » au global contre plus de 80% en bande passante uniquement (b).

Cette quantification représente donc la dépense en énergie et en moyen matériel pour traiter une donnée, et pas uniquement la bande passante utilisée comme sur la **Figure 40(b)**. Ces deux quantifications sont cependant légitimes, et présentent le problème de l'utilisation des données sous deux angles différents, mais le trafic total (**Figure 40(c)**) donne une meilleure vue d'ensemble des services numériques les plus prédominants à l'échelle mondiale en 2020.

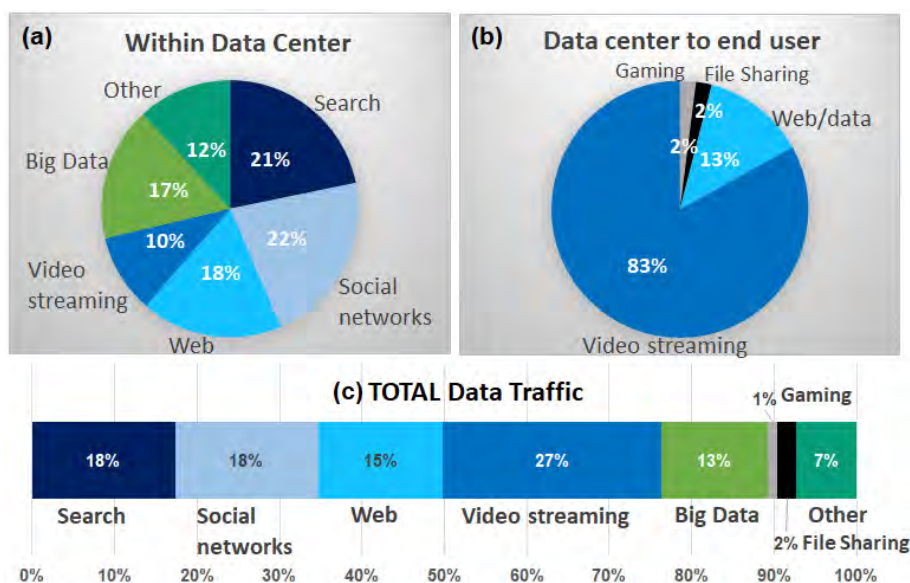


Figure 40 : Trafic de données selon qu'elles restent dans le centre de données (a) ou qu'elles sont transmises vers un terminal utilisateur (b). Chiffres mondiaux pour 2020, de [77]. En supposant le trafic entre centres de données (9%) similaire à (b), on peut obtenir la division entre chaque service du trafic IP global (c). ©2020 Les Shifters Montréal.

4.4. Électricité pour l'utilisation

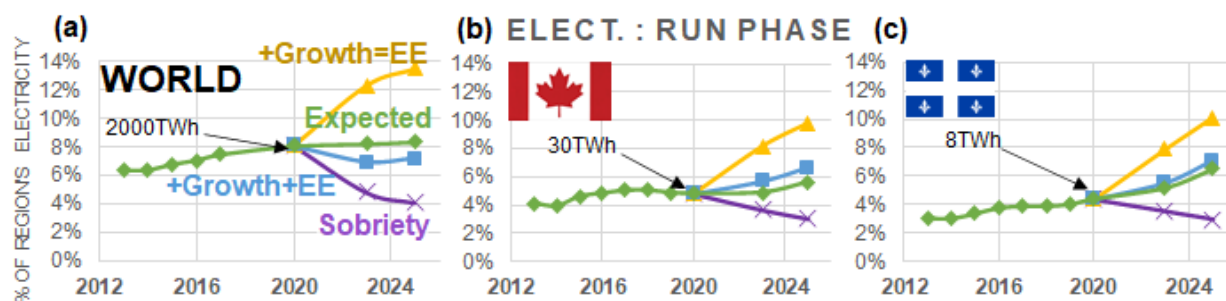


Figure 41 : Part de l'utilisation du numérique dans l'électricité, pour chaque région : (a) dans le monde, (b) au Canada et (c) au Québec. Les différents scénarios sont représentés après 2020 : attendu ("expected", en vert), croissance accrue, mais avec efficacité énergétique ("+Growth+EE", en bleu), croissance accrue sans efficacité énergétique ("+Growth,=EE", en jaune), et sobriété ("sobriety", en violet). ©2020 Les Shifters Montréal.

L'électricité totale pour l'utilisation du numérique est représentée sur la **Figure 41** : elle est en augmentation de ~2% depuis 2013 (voir [21]), et constitue en 2020 plus de 8% du total mondial. Cela représente 2000TWh, soit la consommation d'électricité dans le monde en 1960. Un scénario de sobriété

baisserait franchement ce chiffre à 4% d'ici 2025, grâce à l'amélioration prévue de l'efficacité énergétique. Une croissance importante de l'utilisation (estimée notamment par [8]) ferait par contre grimper ce chiffre à plus de 12% sans progression importante de l'efficacité énergétique (jaune sur la **Figure 41(a)**). Si on suppose qu'elle advient, la consommation électrique baisserait malgré la hausse des usages (bleu, dans le monde), et resterait proche du scénario attendu (vert) au Canada (b) et au Québec (c).

On peut noter que l'électricité pour utiliser les TIC passe de 4% à 5% seulement de 2013 à 2020 (**Figure 41(b)**) au Canada, et de 3% à 4% au Québec (moitié moins que dans le monde) : cela est dû au fait que ces régions ont des dépenses annuelles en électricité bien supérieures à la moyenne mondiale, notamment pour le chauffage en hiver.

4.5. L'empreinte carbone de l'excavation

Les émissions de GES uniquement dues à l'excavation des métaux peuvent être calculées en prenant en compte le recyclage de chaque métal, les métaux compagnons et le contenu de chaque appareil (voir [20]) : en prenant les moyennes d'émissions par masse de chaque métal de [105] et [43], on peut calculer que leur excavation émet 20MtCO_{2e} par an environ, c'est-à-dire 1/50^e des ~1000MtCO_{2e} des TIC au total dans le monde.

Pour aller plus loin, on peut s'intéresser à empreinte carbone et énergétique par dollar de métal, dépendant donc de leur cours, qui varie dans le temps. La **Table 8** liste ces valeurs pour les principaux métaux usuels et les terres rares : on voit que le coût énergétique par \$ de métal est autour de 1.5kWh pour le cuivre, l'or, le platine et les terres rares, conformément aux calculs de [106], ce qui conduit à des émissions carbone de 1kgCO_{2e}/\$ environ. Ces valeurs sont cependant 20 fois plus élevées pour l'aluminium, qui demande beaucoup d'étapes de traitement pour être purifié.

Table 8 : Coût énergétique et empreinte carbone par \$ de métal pour les métaux précieux, et quelques cryptomonnaies. Chiffres de [106], avec un cours des métaux moyenné sur 2016-2018.

	Cu	Al	Au	Pt	Terres rares	Bitcoin (BTC)	Ethereum (ETH)
Énergie (kWh/\$)	1	34	1.5	2	2.5	5	2
GES (kgCO _{2e} /\$)	0.7	20	0.8	1.1	1.5	2.8	1.1

La publication de Krause *et al.* va plus loin, en comparant également le coût environnemental des cryptomonnaies, Bitcoin et Ethereum par exemple : on voit qu'un dollar d'Ethereum est comparable à la majorité des métaux, mais que les empreintes énergétiques et carbonées sont 3 fois plus élevées pour le Bitcoin ! L'IREC estimait de plus qu'une transaction Bitcoin pouvait mobiliser 652kWh à elle seule en 2020 [12]. Mais la facture s'alourdit vraiment si on considère l'énergie requise par jeton (*coin*), c'est-à-dire pour une pièce de cryptomonnaie : 25MWh pour un Bitcoin selon nos calculs [106]. Cette différence s'explique par le fait qu'un Bitcoin est extrêmement cher, plusieurs milliers de \$, ce qui lui donne la même valeur qu'une grosse pièce d'or par exemple.

En conclusion, la « dématérialisation » *via* les cryptomonnaies consomme donc plus d'énergie que leurs équivalents physiques (métal) pour la même valeur économique, et est responsables de plusieurs millions de tonnes de CO_{2e} chaque année [106].

[105] Bakas, I. (2016). [Critical metals in discarded electronics: Mapping recycling potentials from selected waste electronics in the Nordic region](#). Nordic Council of Ministers (Norden).

[106] Krause, M. J., & Tolaymat, T. (2018). Quantification of energy and carbon costs for mining cryptocurrencies. *Nature Sustainability*, 1(11), 711-718, <https://www.nature.com/articles/s41893-018-0152-7>

4.6. Énergie et empreinte carbone par catégories

La **Figure 42** donne un résumé des impacts de chaque composante décrite ci-avant, en pourcentage du total de l'énergie finale utilisée (majoritairement sous forme d'électricité, haut) et des émissions de GES (bas). Pour l'énergie ((a), (b), (c)), la part de l'utilisation (i.e. de l'électricité domestique) représente environ 55% du total pour toutes les régions considérées (voir aussi **Figure 43**), et la majeure partie (de $\frac{1}{3}$ à $\frac{3}{4}$) est due aux appareils utilisateurs (TVs et ordinateurs principalement, voir **Figure 28**) comme le montre la **Figure 42(a-c)**. Au niveau mondial, la répartition en termes de GES (**Figure 42(d)**) est sensiblement la même, car l'intensité carbone de l'électricité globale est environ la même que dans les lieux de fabrication en Asie, soit 0.6 kgCO₂eq/kWh [18].

Au Canada (resp. au Québec) en revanche, l'électricité est bien moins carbonée, à 0.13 kgCO₂eq/kWh (resp. 0.021 kgCO₂eq/kWh, voir [59]) : ainsi la partie utilisation ne représente que 25% des émissions de GES de ces deux régions (**Figure 42(e) et (f)** ou **Figure 43**). La différence est particulièrement frappante au Québec, où les appareils utilisateurs consomment 42% de l'énergie des TIC, mais ne représentent que 3% des GES (**Figure 42(c) versus (f)**). Au Canada, l'impact des TIC sur le climat est donc pour 2/3 dû au remplacement et à l'achat d'appareils utilisateurs, le reste étant divisé à parts égales entre la fabrication des infrastructures (centres de données + réseaux) et l'électricité d'utilisation.

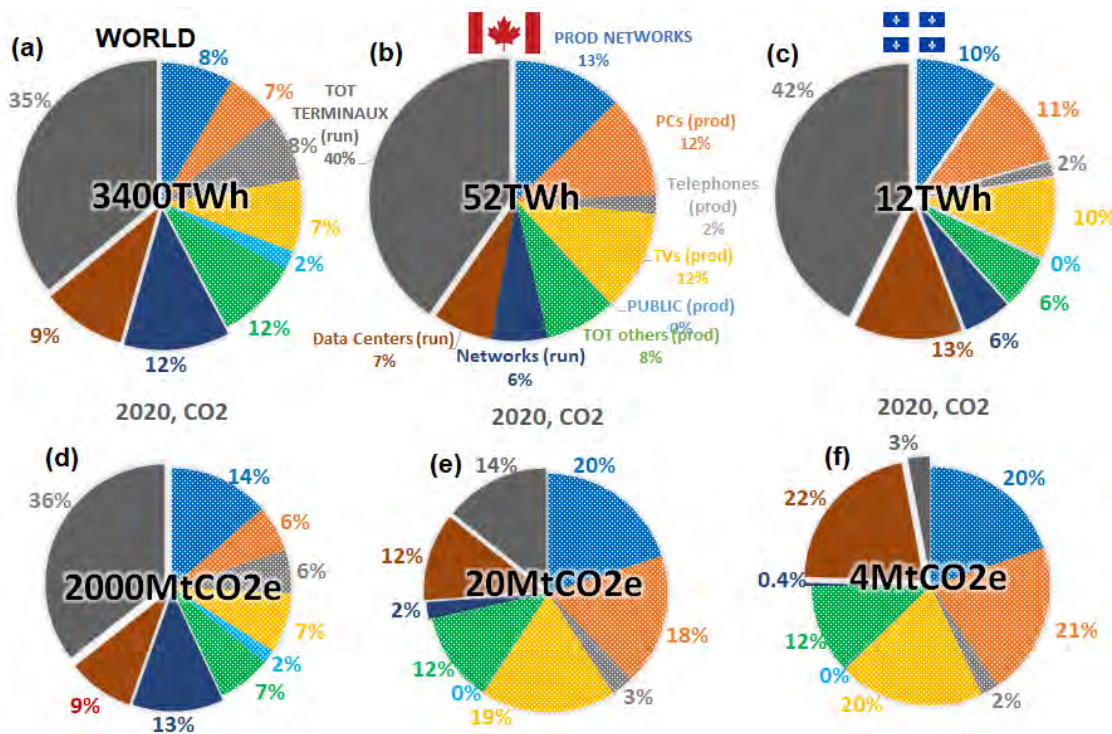


Figure 42 : Répartition de l'énergie finale (haut) et des émissions de GES (bas) des TIC en 2020 dans le monde (a), au Canada (b) et au Québec (c). La part de la production annuelle est représentée en pointillés blancs, alors que la part de l'utilisation est en couleur unie. ©2020 Les Shifters Montréal.

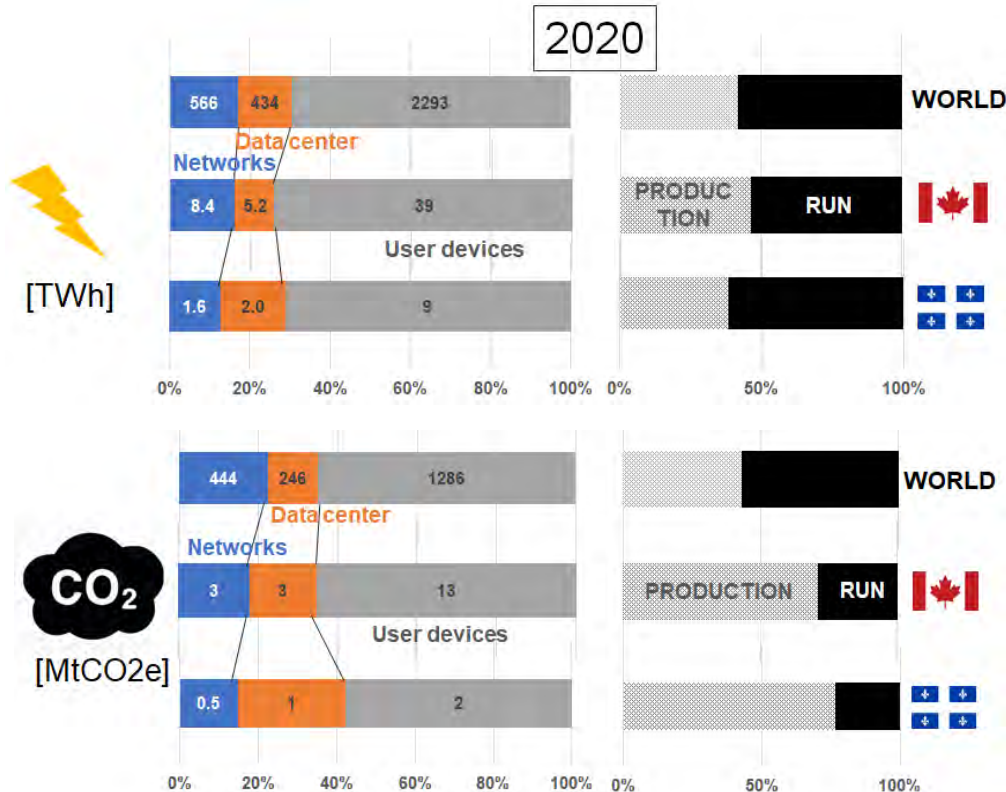


Figure 43 : (Gauche) Répartition par catégorie (réseaux en bleu, centres de données en orange et appareils utilisateurs en gris) de l'énergie finale utilisée dans les TIC (haut), et des émissions de GES (bas), dans le monde, au Canada et au Québec. (Droite) Même chose, mais divisé entre fabrication et utilisation. Chiffres dans [21]. ©2020 Les Shifters Montréal.

70% de l'empreinte énergétique pour toutes les régions et 65% de l'empreinte carbone dans le monde et au Canada sont dues aux appareils utilisateurs (**Figure 43**), chiffres concordants pour l'énergie avec l'étude de GreenIT faite en France (65%) [19]. Il y a en revanche plus de centres de données et un réseau plus vaste à entretenir qu'en France, d'où l'importance relative plus élevée de ces infrastructures dans l'empreinte carbone du Canada et du Québec.

Les différents scénarios (« attendu », « croissance accrue avec efficacité énergétique », « croissance accrue sans efficacité énergétique » et « sobriété ») conduisent à des tendances variées pour la consommation d'énergie finale et les émissions totales de GES (**Figure 44**) : l'amélioration de l'efficacité énergétique à tous les niveaux (centres de données, appareils, pour la production et l'utilisation) atténue voire annule la croissance des usages (scénario "+Growth+EE", en bleu). Cependant, seuls les scénarios de sobriété (violet) conduisent à une baisse des émissions de GES ou d'utilisation d'énergie finale après 2020, dans le monde (gauche), au Canada (milieu) ou au Québec (droite). Les émissions de GES sont directement reliées à la consommation d'énergie finale (à part quelques gaz réfrigérants décrits par exemple dans la **section 4.2.5**), mais les courbes **Figure 44** sont différentes car – entre autres - celles des GES sont chiffrées en proportion des émissions totales de chaque régions : au Canada par exemple, l'utilisation d'énergie est prévue d'augmenter, mais celle-ci devrait être de moins en moins carbonée (selon la tendance actuelle). Dans ce cas, une hausse en valeur absolue sera accentuée en proportion (comme pour le scénario vert), et une baisse sera diminuée (comme pour le violet).

De plus, on a comptabilisé ici toutes les émissions, notamment celles de la fabrication, qui ne sont pas réalisées sur le territoire canadien (mais en Asie et ailleurs). Ces émissions pourraient ne pas être directement comptabilisées dans le bilan canadien (car il n'y a pas de contrôle direct sur celles-ci), mais il

est intéressant de voir quelle proportion elles représentent par rapport au total domestique. Le scénario « attendu » (vert) prévoit en tout cas une augmentation de 10% par an des émissions de GES au Canada et au Québec après 2020, et un taux de 5% dans le monde.

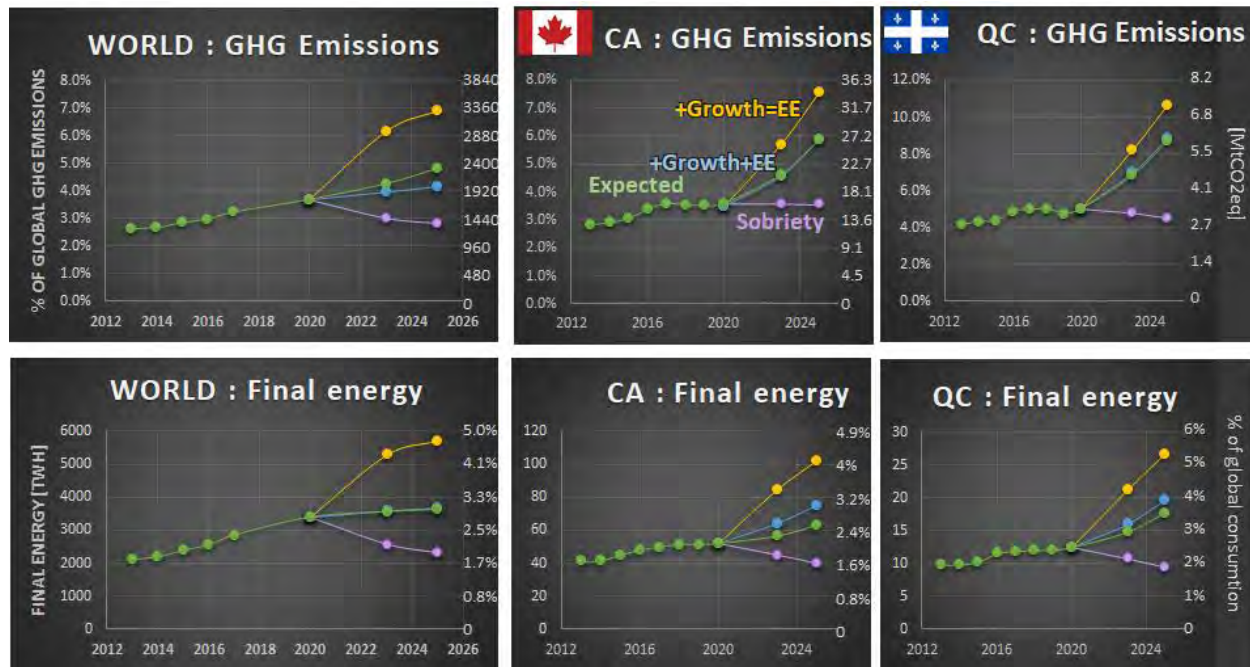


Figure 44 : Résumé de l'impact total des TIC (réseaux + terminaux, fabrication et utilisation) en termes de GES (haut) et d'énergie finale (bas). Scenarios pour le monde (gauche), le Canada (milieu) et le Québec (droite) : attendu ("expected", en vert), croissance accrue mais avec efficacité énergétique ("+Growth+EE", en bleu), croissance accrue sans efficacité énergétique ("+Growth=EE", en jaune), et sobriété ("sobriety", en violet). Sur certains graphiques le scénario bleu est confondu avec le vert, et les axes des ordonnées secondaires (droite) sont indiqués à titre indicatif, les courbes correspondantes n'étant pas tracées pour garder une lisibilité. Chiffres de [21] résumés dans [99], ©2020 Les Shifters Montréal.

4.7. Impacts environnementaux

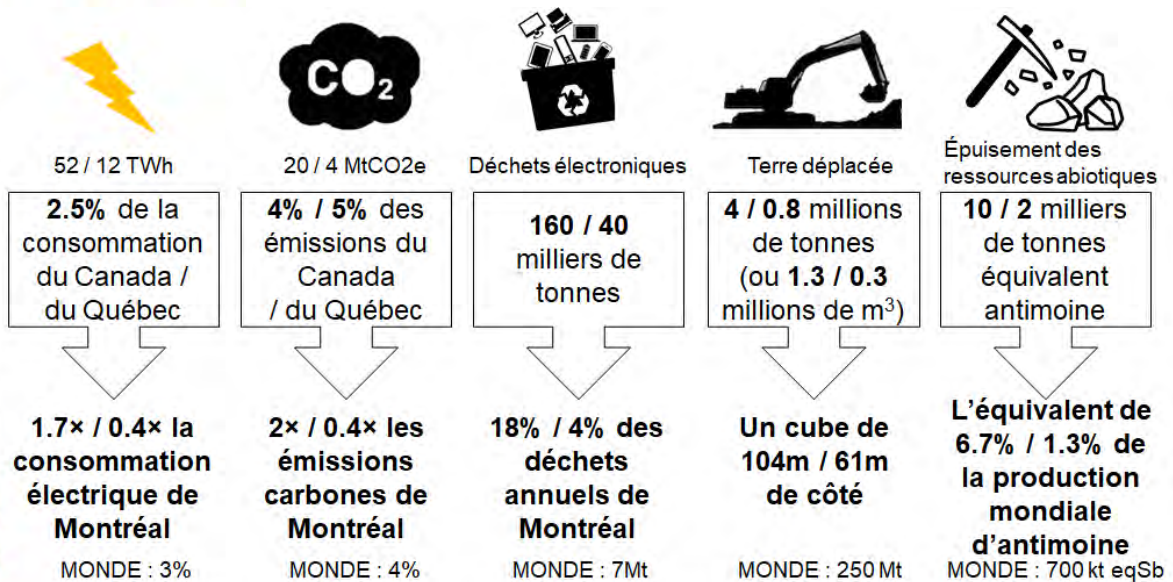
En 2020, au Canada (resp. au Québec) le numérique représente l'équivalent de :

- ➔ 2 (resp. 0.4) fois les émissions carbone de Montréal
- ➔ En déchets électroniques, 18% (resp. 4%) des déchets annuels de Montréal
- ➔ Un cube de 104m (resp. 61m) de côté de terre déplacée
- ➔ 6.7% (resp. 1.3%) de la production mondiale d'antimoine

Autres indicateurs (non-environnementaux) :

- ➔ 1.7 (resp. 0.4) fois la consommation électrique de Montréal
- ➔ 55 (resp. 11) milliers de tonnes de métal (monde : 3.6Mt), c'est-à-dire 1.5kg par internaute/an, soit presque 2 fois la moyenne mondiale.

2020, Canada/Québec

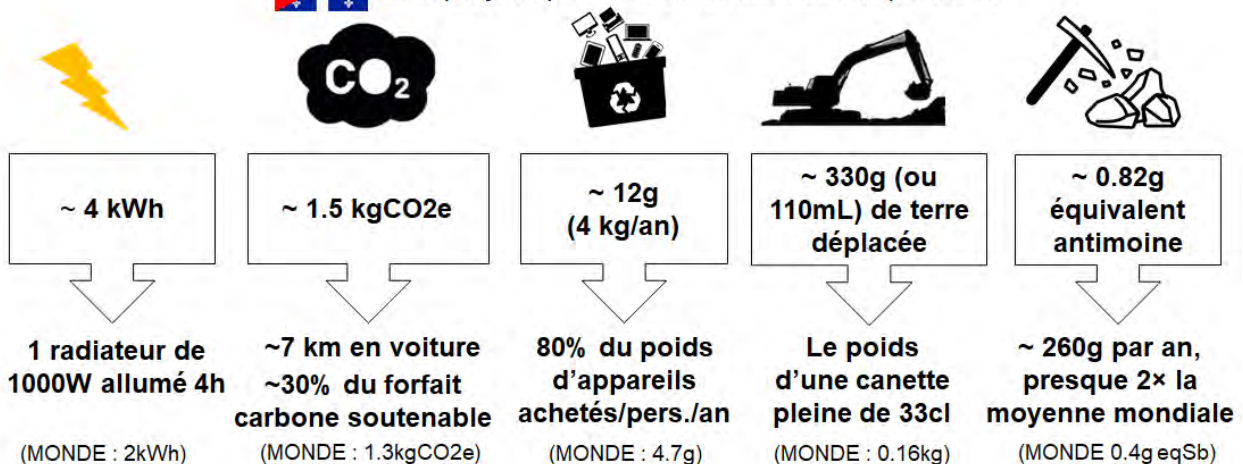


Chaque jour, pour chacun des 33 millions d'internautes canadiens (7 millions au Québec) cela revient à :

- En énergie finale : 1 radiateur de 1000W allumé pendant 4h
- Des émissions de CO₂e équivalentes à 7 km en voiture, soit 30% du forfait soutenable pour respecter l'accord de Paris.
- 12g (soit 4kg/an) de déchets électroniques, soit 80% du poids d'appareils achetés par personne
- Le poids, en terre déplacée, d'une canette pleine de 33cl
- 0.82g d'équivalent antimoine d'épuisement des ressources abiotiques



Chaque jour, par internaute canadien ou québécois



Si le numérique était un pays, son impact mondial en 2020 représenterait :

- 30 fois le Québec en émissions de GES
- 7 fois le Québec en utilisation d'énergie (finale), dont 12 fois sa consommation électrique juste pour la phase d'utilisation

L'énergie globale dépensée nécessite en 2020 l'équivalent théorique de **390 GW pendant un an** (en comptant la fabrication), soit presque **10 fois la puissance installée d'Hydro Québec**, en croissance de 5% par an ! L'**électricité** pour faire fonctionner le numérique représente en outre **220 millions de radiateurs électriques** (1000W) fonctionnant **en continu**.

4.8. Conclusion sur les impacts

En résumé, les **appareils utilisateurs** se multiplient dans le monde, tant au niveau des ventes (**Figure 45 (d)** en orange) que du nombre d'appareils connectés ((**e**) en orange) : cette évolution est **linéaire**. Pour le **trafic de données** en revanche, l'augmentation est **exponentielle** (**Figure 45 (a-c)** en bleu), particulièrement pour les données transitant par mobile (**b**). On peut voir que l'**efficacité énergétique progresse** aussi (gris sur la **Figure 45 (a-e)**), mais **moins vite que la consommation de données** ou **d'appareils** : le produit de ces deux valeurs – **l'utilisation totale d'énergie** – ne peut donc qu'**augmenter au cours du temps**, de 5% par an environ.

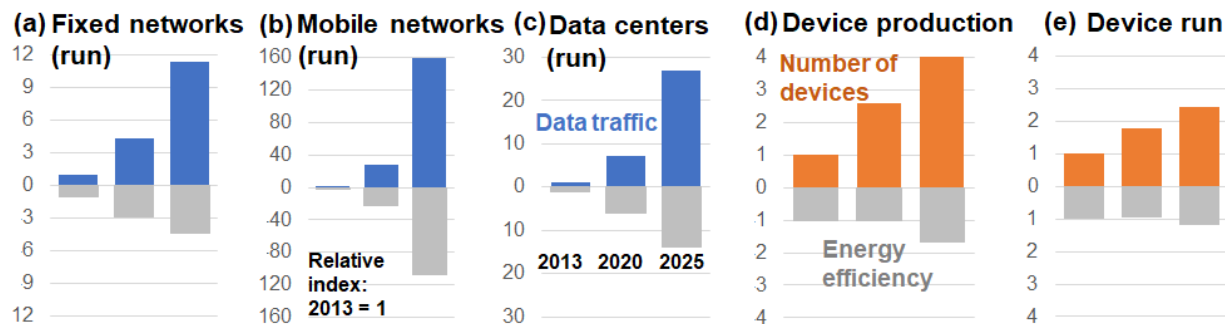


Figure 45 : Évolution dans le monde de la consommation croissante entre 2013, 2020 et 2025 de chaque catégorie (trafic de données (a-c, bleu) ou nombre d'appareils (d-e, orange) en parallèle de l'évolution de l'efficacité énergétique (gris). (a) Réseaux fixes, (b) réseaux mobiles, (c) centres de données, (d) production d'appareils et (e) utilisation d'appareils numériques. Les chiffres sont en ratio des valeurs mesurées pour 2013, voir [99]. Échelle : indice relatif, 2013 = 1. ©2020 Les Shifters Montréal.

Le cas du Canada et du Québec est légèrement différent, car le trafic de données progresse linéairement ou plus lentement (voir **Figure 46 (a-b)**), même si les centres de données (c) ont un trafic qui progresse exponentiellement. Les progrès en efficacité énergétique arrivent à compenser l'augmentation du trafic pour les réseaux fixes et mobiles (**Figure 46 (a-b)**), au moins jusqu'en 2025 selon le scénario « attendu » (d'où la diminution de l'électricité utilisée, voir **Figure 37**). Pour les centres de données et les appareils utilisateurs (**Figure 46 (c-e)**), l'efficacité énergétique n'augmente en revanche pas du tout assez rapidement, ce qui explique pourquoi l'empreinte énergétique du numérique croît au total dans ces régions.

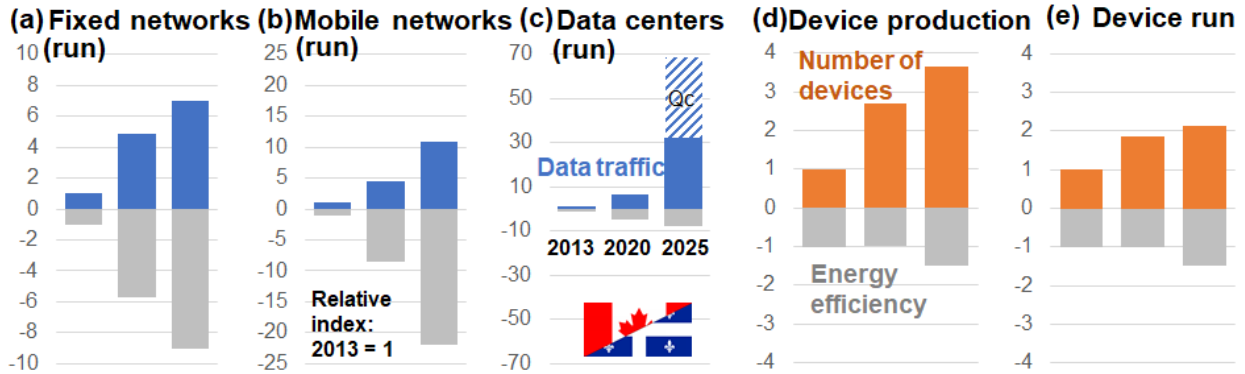


Figure 46 : Même chose que Figure 45, mais pour le Canada et le Québec. Échelle : 2013 = 1, voir [99]. Les chiffres (relatifs) sont similaires pour le Canada et le Québec, sauf pour le trafic des centres de données où le cas du Québec est indiqué en hachuré. ©2020 Les Shifters Montréal.

5. Discussion générale

5.1. Limitations des études sur les impacts du numérique

C. Hodgson écrivait en 2015, dans le cadre de l'étude de l'impact numérique du journal *The Guardian*, que les quantifications des impacts du numérique étaient minées par plusieurs aspects [107] :

« (1) Manque de sensibilisation : il y a peu de compréhension publique du fait que l'action numérique a un impact environnemental. Toutes les actions numériques sont perçues comme positives pour l'environnement et l'externalisation du côté matériel vers le *cloud* rompt encore plus notre lien avec la réalité [des impacts].

(2) Manque de leviers de contrôle : les actions numériques qui génèrent des impacts environnementaux sont généralement faibles et dispersées entre de nombreuses personnes et organisations, il y a très peu d'organismes qui réfléchissent aux impacts environnementaux numériques, et les entreprises du numérique ne sont pas très coopératives.

(3) Rythme du changement : en raison de la vitesse de changement de l'écosystème numérique, une fois les impacts identifiés, le système ou le produit lui-même change et vos résultats deviennent moins significatifs.

(4) Manque d'outils d'évaluation : les méthodes actuelles d'évaluation environnementale du numérique ne sont pas assez bonnes, car elles ne peuvent évaluer dynamiquement ses impacts. Les changements rapides signifient qu'il est très difficile d'avoir une référence constante pour comparer les performances. »

Le point #2 est amélioré depuis quelques années, notamment grâce aux quelques études mentionnées ci-dessus, mais les autres points restent toujours d'actualité. Une revue de littérature publiée en 2016 par Horner *et al.* pointe de plus le manque de données empiriques, des estimations trop simplistes de certains points de détails, des limites d'étude peu cohérentes, et une estimation trop étroite des impacts [108]. Les études devraient plus cibler la consommation, et s'intéresser aux comportements des consommateurs

[107] C. Hodgson, "Can the digital revolution be environmentally sustainable?", *The Guardian* (2015), <https://www.theguardian.com/global/blog/2015/nov/13/digital-revolution-environmental-sustainable>

[108] N. C. Horner *et al.*, "Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology" (2016), *Environ. Res. Lett.* 11 103001, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/10/103001/meta>

et aux transformations sociales dues au numérique pour mieux évaluer son impact global selon [109]. Surtout, toutes les études ne considèrent pas au même niveau certains aspects : la **Figure 47** montre un exemple de classement des différents effets, extraite de [108]. La substitution peut *a priori* diminuer l'énergie utilisée (réduction des déplacements grâce aux vidéoconférences par exemple), mais aussi l'augmenter : un affichage électronique constant sera ainsi beaucoup plus énergivore qu'une version papier s'il affiche la même chose continûment.

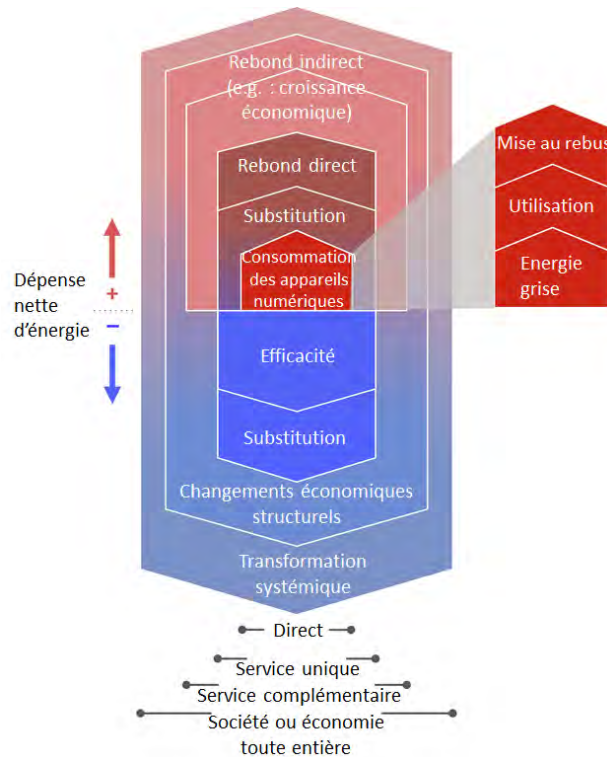


Figure 47 : Hiérarchie des effets de l'utilisation nette d'énergie : augmentation (rouge) ou diminution (bleu) dû à l'utilisation d'outils numériques, extrait de [108].

Le numérique peut aussi conduire à des changements structurels, comme par exemple l'e-commerce, qui modifie les logistiques de ventes [108]. Lorsque plusieurs de ces effets sont combinés, et qu'ils modifient grandement le mode de vie des utilisateurs, on parle alors de transformation systémique : c'est le cas d'internet par exemple. Ces deux catégories sont classées comme conduisant à des économies d'énergie (voir **Figure 47**), cependant des exemples comme le télétravail ou les véhicules autonomes n'ont pas encore totalement prouvé leurs vertus énergétiques [108].

5.2. Aspects positifs pour l'environnement (?)

Certains services "indirects" peuvent bénéficier du numérique pour réduire leurs dépenses énergétiques : c'est le cas des transports par exemple, où les véhicules (routiers ou aériens) ont pu être optimisés en termes de conception pour réduire le carburant ou les matériaux utilisés, comme le rappelle [108]. Mais pour tous ces secteurs, il est possible de trouver des effets conduisant à une augmentation de la consommation d'énergie, ou à davantage de pollution, comme le montre la **Table 9** pour l'e-commerce, la dématérialisation (ou e-matérialisation, comme le fait de remplacer un CD par des fichiers MP3

[109] Bieser, J. CT *et al.*, "Assessing indirect environmental effects of information and communication technology (ICT): A systematic literature review." *Sustainability* 10.8 (2018): 2662, <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/8/2662>

téléchargeables), le télétravail, le contrôle/surveillance, les véhicules autonomes et les plateformes de partage. Pour toutes ces innovations, le bilan définitif dépend de chaque cas.

Table 9 : Quelques innovations phares du numérique, dont l'effet positif pour l'environnement se juge au cas par cas. Infos de [108] et [109].

Innovation	Économies d'énergie / pollution réduite (-)	Effets rebonds, etc. (+)
Transports (routiers, aériens)	Optimisation : matériaux + énergie grise et d'utilisation	Davantage de lignes, de déplacements
Véhicules autonomes	Efficacité des trajets, moins d'accidents	Plus de déplacements, plus de distances parcourues, plus d'activité économique
E-commerce	Moins d'espace de stockage, moins de déplacements	Plus d'achats, plus de paquetage, plus de consommation, plus d'étalement urbain
Dématérialisation	Moins de supports matériels, moins de déplacements	Utilisations uniques de contenu, infrastructures énergivores et à plus grande échelle
Télétravail	Moins de déplacements, infrastructures de bureau réduites	Infrastructures réseau coûteuses, redondance des bureaux (si télétravailleur peu fréquent)
Contrôle et surveillance	Optimisation des dépenses pour la production, du trafic routier, de l'occupation des bâtiments	Plus de production, plus de trafic routier, dépenses reportées pour les économies sur le HVAC ¹¹⁰
Plateformes de partage	Réutilisation, partage des déplacements ou des usages	Plus de consommation, plus d'utilisation

Finalement, la revue de littérature de [108] conclue que le numérique a un potentiel énorme de réduction des dépenses énergétiques et impacts environnementaux, mais que celui-ci n'est pas toujours exploité en totalité, rendant la conclusion incertaine quant à ses effets bénéfiques. Ainsi le numérique est similaire à l'ensemble des Techniques : seule sa réalisation pratique dicte son résultat global, même si elle semble être vertueuse en théorie.

De plus, des analyses plus récentes affirment que même si les changements de pratique (et l'efficacité énergétique) dus au numérique atténuent globalement sa consommation énergétique (**Figure 47**), la consommation directe, mais surtout les effets rebonds résultant en une croissance économique accrue compensent ces gains, rendant le numérique globalement non-vertueux du point de vue énergétique [111]. Les rapports tel [112] présentant sa non-soutenabilité il y a presque 10 ans restent donc valides.

5.3. Zoom sur un usage : la publicité sur le web

Une étude de Pärssinen *et al.* [113] rappelle que la publicité sur le web est le 1^{er} mode de financement pour de nombreux services, son impact est par conséquent supposé significatif, mais ne fait pas partie des

[110] (en) *Heating, Ventilating & Air Conditioning* : Chauffage, ventilation et climatisation

[111] Lange, S., Pohl, J., & Santarius, T. (2020). Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand?, *Ecological Economics*, 176, 106760, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800919320622>

[112] Flipo, Dobre et Michot, "La face cachée du numérique, l'impact environnemental des nouvelles technologies" (2012), rapport collectif.

[113] Pärssinen M. *et al.* "Environmental impact assessment of online advertising." *Environmental Impact Assessment Review* 73 (2018): 177-200, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925517303505>

catégories classiques comme celles de la **Figure 40**, car elle peut faire intervenir en même temps du web classique, des réseaux sociaux et de la vidéo par exemple. De façon remarquable, 25 à 75% du trafic pour le web, les courriels et les *data* serait de la publicité ! Les auteurs concluent qu'elle représentait en 2016 environ 10% de la consommation énergétique totale du numérique (soit 100TWh ou 60MtCO₂e en émissions carbone), dont ¼ dû à la publicité frauduleuse uniquement, et donc qu'une réduction de la e-publicité permettrait de rendre internet plus sobre énergétiquement sur le long terme [113].

6. Futur des TIC : au Canada et dans le monde

6.1. Perspectives dues au COVID-19

Durant le confinement dû à la pandémie de COVID-19, une hausse d'environ 20% du trafic internet a été mesurée dans la plupart des pays de l'OCDE (**Figure 48**), dont le Canada. La reprise post-pandémie semble annoncer le maintien d'un trafic plus important, avec une plus grande quantité de gens en télétravail ou consommant des loisirs en ligne par exemple. Pour plus de détails, voir le 1^{er} rapport d'état des lieux [1].

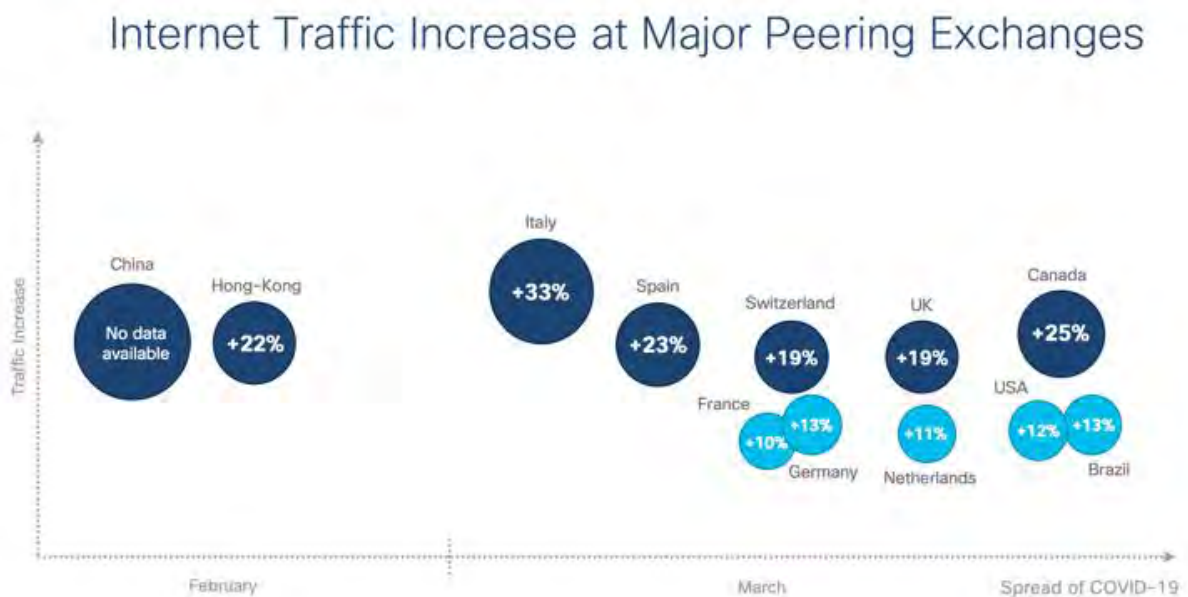


Figure 48 : Mesure de l'augmentation du trafic internet pendant la pandémie de COVID-19. Source : Cisco [114].

Plusieurs sources comme l'agence onusienne [ITU](https://www.itu.int) (Union Internationale des Télécommunications) tablent sur un renforcement des TIC dans le contexte post-COVID, avec notamment une construction rapide de nouvelles infrastructures, incluant un « développement massif de la 4G et la 5G » et un accès pour tous aux technologies de communication, comme l'affirme leur récente publication "*Pandemic in the internet age*" [115]. Pour penser raisonnablement cette question, il faut cependant questionner le rapport cause-conséquence : a-t-on besoin de plus en plus du numérique dû au(x) changement(s) de société ? Ou est-ce le numérique qui impose des changements paradigmatiques, s'autorenforçant alors progressivement, et construisant le socle d'une dépendance à ses services ?

[114] "Global Traffic Spikes. No Panic at the Cisco!", 26 mars 2020, <https://blogs.cisco.com/news/global-traffic-spikes-no-panic-at-the-cisco>

[115] ITU, "Pandemic in the Internet Age", June 2020, https://reg4covid.itu.int/wp-content/uploads/2020/06/ITU_COVID-19_and_Telecom-ICT.pdf

6.2. Prochaines étapes pour caractériser au mieux le numérique

Pour obtenir une vision encore plus nette de l'univers numérique, il conviendrait de :

- Quantifier la demande en eau douce, lors de tout le cycle de vie des équipements (voir [19])
- Inclure d'autres paramètres environnementaux, comme le potentiel d'acidification (AP), d'eutrophisation (EP), de toxicité humaine (HTP) par exemple (voir [105]), ou de destruction des écosystèmes
- Mieux caractériser quelle portion du trafic internet est utilisée par le Canada, au niveau domestique et à l'étranger
- Inclure dans le calcul la fabrication des bâtiments, surtout pour les centres de données, ainsi que les équipements numériques professionnels et spécialisés
- Quantifier au niveau du Canada/Québec les réductions de l'empreinte carbone de divers secteurs grâce au numérique (comme le fait Smarter2030 [4]).
- Calculer les impacts locaux pour des actions numériques précises, comme le visionnement de vidéos ou les jeux en ligne par exemple.

6.3. Recommandations

Au Canada et au Québec, l'impact en termes de GES est surtout concentré (aux $\frac{3}{4}$) sur la phase de production des terminaux. Il apparaît donc primordial de réduire leur nombre, une liste d'actions est ainsi proposée :

- (1) Lutter contre l'obsolescence des appareils par : des contraintes envers les constructeurs, en incitant au réemploi, en réglementant la publicité, en empêchant certaines pratiques d'abonnement (e.g. téléphone à 0\$), en limitant l'obsolescence logicielle, en légiférant sur les renouvellements des matériels en entreprise, etc.
- (2) Réduire la production d'appareils en instaurant des quotas ou des taxes à l'achat. Surtout, questionner la nécessité d'implémentation de toutes les avancées technologiques, qui rendent souvent obsolètes les anciennes générations de décodeurs, récepteurs cellulaires, WiFi, ou encore *Bluetooth* par exemple.
- (3) Limiter le nombre d'appareils utilisés et connectés (qui favorisent les ventes) en ne cédant pas au « tout-numérique », en luttant par exemple contre la nécessité d'utilisation d'une application sur téléphone intelligent pour certaines situations où ce n'est pas nécessaire. Contrôler la duplication appareils professionnels vs appareils personnels, en incitant à l'utilisation d'un seul pour les deux usages (ex : téléphone « pro-perso », ordinateur portable). Enfin, favoriser les systèmes d'échanges ou de mutualisation d'appareils (ex : imprimantes), surtout pour ceux qui sont peu utilisés (drones, caméra de sport, etc.).
- (4) Favoriser les constructeurs les plus transparents et écologiquement vertueux, *via* des systèmes de bonus-malus par exemple.
- (5) Limiter le nombre d'écrans utilisés, leur production, et leur taille, en favorisant les vidéoprojecteurs et en instaurant des lois limitatives, notamment en ce qui concerne les entreprises, l'espace public, et la publicité.

Afin d'alléger l'empreinte environnementale liée notamment aux matériaux, il faudra aussi :

- (6) Favoriser la mise au rebut (ou le réemploi) d'appareils plus utilisés (qui restent sinon dans les tiroirs et les placards).
- (7) Améliorer et contrôler les filières de recyclage des déchets électroniques.

À titre d'exemple, voici plusieurs sites web favorisant le recyclage ou le reconditionnement d'appareils numériques au Canada : recy-cell.ca, SecondCell.ca, Gorecell.ca, Oups.ca, SOSPhone.ca. Il peut être aussi judicieux de s'adresser à des associations de réparations locales, ou des événements comme les cafés réparations ("repair café") pour le côté matériel, et à des collectifs de logiciels libres (comme [Facil](#) au Québec) pour la partie logicielle.

Une consommation de données plus raisonnée sera aussi nécessaire à l'avenir. Ne pas s'abonner à des services de vidéos à la demande – qui favorisent la consommation à outrance de contenu – peut être une première étape. Diminuer la qualité d'image du contenu regardé (ou au moins l'adapter à l'écran utilisé) est aussi primordial pour économiser de l'énergie : l'extension "[Turn Off the Lights](#)" (disponible sur tous les navigateurs) permet par exemple de régler les vidéos en basse qualité par défaut sur plusieurs plateformes comme YouTube ou Vimeo.

7. Conclusions du projet DiagnosticTIC

Notre 1^{er} rapport, intitulé « Montréal, le Québec, le Canada : numérique à quel point ? » [1] présentait un état des lieux de l'univers numérique sur ces trois échelles géographiques, en comparant les tendances observées avec le reste de l'Amérique du Nord et les chiffres mondiaux dans certains cas. Nous avons conclu que dans ces régions, l'internaute moyen consommait bien plus de produits matériels et de données que la moyenne mondiale (tout en étant en-dessous d'autres pays). De plus, le numérique apparaissait comme un facteur essentiel de l'économie canadienne ou québécoise, et suivait une trajectoire exponentielle de ses usages, en s'implémentant dans tous les secteurs de la vie courante. Cet effet est renforcé par la pandémie de COVID-19.

Ce 2^e rapport montre que cette croissance du secteur du numérique a des impacts 2 à 3 fois plus importants par internaute que la moyenne mondiale (selon l'indicateur choisi) : la plus grande consommation des TIC au Canada et au Québec ne semble donc pas compensée par une meilleure efficacité énergétique, des avancées technologiques d'optimisation, des politiques bien pensées ou des caractéristiques locales, contrairement à ce que l'on peut imaginer. Pire encore, malgré le fait que l'électricité canadienne (resp. Québécoise) soit 5 (resp. 30) fois moins carbonée que la moyenne mondiale, l'empreinte carbone du numérique dans ces régions reste tout de même, par usager, supérieure à un internaute moyen. Elle atteint en effet 4% de son bilan total en 2020, soit le même que dans le monde, dû au fait que les équipements sont renouvelés plus souvent et des infrastructures lourdes sont déployées (accueil de centres de données géants, développement de nouveaux réseaux, voir [1]).

Pour tous les indicateurs, le scénario « attendu » montre en outre une augmentation des impacts d'ici 2025, car l'efficacité énergétique augmente moins vite que les usages. En misant sur des avancées technologiques spectaculaires (grande efficacité énergétique), la croissance est un peu plus mitigée mais reste importante, car elle implique aussi plus de consommation par effet rebond. Finalement, le seul scénario où les indicateurs environnementaux montrent une amélioration est celui de la sobriété, qui suppose une diminution de la possession et de l'achat d'équipements (collectifs et individuels), et un plafonnement de l'utilisation des données. Ce scénario nous paraît réaliste si les incitations adéquates décrites dans plusieurs rapports ([116-117], [19]) sont mises en place.

[116] *The Shift Project*, « [Déployer la sobriété numérique](#) » (2020).

[117] Patrignani, N., & Whitehouse, D. (2017). *Slow tech and ICT: a responsible, sustainable and ethical approach*. Springer, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-68944-9>

Remerciements

Nous remercions le Low-Tech Lab de Montréal ainsi que les auteurs du 1^{er} rapport d'état des lieux [1] pour les discussions, et plus particulièrement M. Souben pour les ressources bibliographiques, et A. Blardone pour la relecture. Nous sommes également redevables envers l'association *Les Shifters* pour leur communication et leur aide. Enfin nous remercions *The Shift Project* pour l'inspiration et leurs gabarits d'études, et l'initiative *La Fresque du Numérique* pour leur travail pédagogique de formation.

Contributions

Recherches et lecture des sources, tableurs Excel, calculs, écriture, figures, mise en page : M. Pinsard.
Discussions, diffusion : M. Pinsard, J. Toussaint. Relecture : M. Pinsard, avec l'aide d'Allan Blardone.

Bibliographie

- *The Shift Project*, « [Lean ICT - Pour une Sobriété Numérique](#) » (2018), « [L'insoutenable usage de la vidéo en ligne](#) » (2019), « [Déployer la sobriété numérique](#) » (2020).
- F. Bordage *et al.*, « [Empreinte environnementale du numérique mondial](#) », GreenIT.fr (2019)
Cas de la France : GreenIT, « iNUM : impacts environnementaux du numérique en France » (2020), <https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2020/06/2020-06-iNum-etude-impacts-numerique-France-rapport.pdf>
- Sénat français, « [Rapport d'information fait au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable par la mission d'information sur l'empreinte environnementale du numérique pour une transition numérique écologique](#) » (2020)
- TechnoMontréal, « [Livres blancs des technologies au Québec](#) » (2018)
- CRTC, « [Rapport de surveillance des communications](#) » (2019)
- Malmondin & Lunden, « [The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015](#) », *Sustainability* (2018)
- A. Andrae, « [New perspectives on internet electricity use in 2030](#) », *Engineering and Applied Science Letters* (2020)
- Belkhir & Elmeligi, « [Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations](#) », *Journal of Cleaner Production* (2017)
- Nassar, N. T., Graedel, T. E., & Harper, E. M. (2015). [By-product metals are technologically essential but have problematic supply](#). *Science advances*, 1(3), e1400180
- N. C. Horner *et al.*, « [Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology](#) » (2016), *Environ. Res. Lett.* 11 103001.

Annexes

Centres de données

Pour Cisco, l'Amérique du Nord comprend les USA et le Canada : les chiffres du Canada peuvent donc être directement déduits de ceux pour l'Amérique du Nord en connaissant les proportions USA/Canada. *Hyperscale data center* = 50% du trafic des data centers en 2020 (34% en 2015, monde) [77].

Autres métaux :

Argent (Ag)	Téléphone intelligent	Cartes électroniques
Dans 1t de minerais (g)	400 - 500	
Rapport (massique) extrait/déplacé pour l'Ag seul	1 :2000	
Dans 1t de matériel (g)	1900 - 2800	2000 - 6000
Gain concentration	×4 - ×7	×5 - ×15

Cuivre (Cu)	Téléphone intelligent	Cartes électroniques
Dans 1t de minerais (g)	9500 – 10,800	
Rapport (massique) extrait/déplacé pour l'Ag seul	1 :100	
Dans 1t de matériel (g)	115,000 - 128,000	100 - 250
Gain concentration	×10.6 - ×13.5	×0.01 - ×0.03

Table 10 : Sources : 911 Metallurgist 2013 (iPhone 5) [48], Sénat France 2016 (cartes électroniques) [33], Inst. Mines-Telecom 2016 (cartes électroniques) [35] et autres (voir [71]).

Autres	Ta	Pd (cartes)	Pt (cartes)	Al
Dans 1t de minerais (g)	250	1 - 8	6 - 9.5	250,000
Rapport (massique) extrait/déplacé pour le métal seul	1 :4000	1 :120,000 - 1 :1Mi	1 :100,000 – 1 : 170,000	1 :4
Dans 1t de matériel (g)	600 - 10,000	7 - 300	3 - 10	250,000 [118]
Gain concentration (par métal)	×2.4 - ×40	×1 - ×300	×0.3 - ×1.8	×1

Le rapport de volume déplacé ne prend pas cependant en compte la complexité du processus d'extraction, qui fait que l'aluminium demande beaucoup d'énergie pour être produit, 4× plus que le cuivre par exemple.

Métaux rares, terres rares :

Table 11 : Métaux rares. Chiffres de [35], [71].












Rares	In (écrans)	Co (batteries)	Li (batteries)	Terres Rares (aimants)
Dans 1t de minerai (g)	1 - 100	2500 - 3000	10,000	10,000 - 150,000

[118] 0.88 oz dans un iPhone, en considérant qu'il pèse 100 g.

Rapport (massique) extrait/déplacé pour le métal seul	1 :10,000 - 1 :1Mi	1 :300	1 :100	1 :7 - 1 :100
Dans 1t de matériel (g)	175 - 200	125,000 - 150,000	13,000 - 15,000	350,000
Gain concentration (par métal)	×1.8 - ×200	×42 - ×60	×1.5	×2.5 - ×35

Les gains en concentration (par rapport à la concentration dans les mines) pour l'ensemble des métaux considérés sont compilés dans le tableur REN [71] pour l'ensemble des appareils utilisateurs.

Table 12 : Principaux minerais utilisés pour fabriquer un téléphone intelligent, avec le type de métal associé et son usage. Données de [29].

Image	Minerai	Métaux	Usage
	Sable silice	SiO ₂	Verre
	Cassiterite	Étain (Sn)	Écran
	Bauxite	Aluminium (Al), gallium (Ga)	Coque, divers LED
	Sphalerite	Indium (In) Germanium (Ge)	Écran LED
	Chalcopyrite	Cuivre (Cu)	Circuits intégrés, câblage
	Tetrahedrite	Argent (Ag)	Circuits intégrés
	Silice	Silicium (Si)	Circuits intégrés
	Arsenopyrite	Arsenic (As)	Amplificateurs
	Tantalite	Tantale (Ta)	Condensateurs, système audio
	Wolframite	Tungsten (W)	Dissipateur, vibreur
	Spodumene	Lithium	Batteries
	Graphite	-	Batteries
	Bastnaesite	Terres Rares	Aimants

Documents du projet DiagnosTIC

- [Vue d'ensemble](#) de l'utilisation du numérique au Canada et au Québec, par *Les Shifters Montréal* (2020), DiagnosTIC I, 66 pages : [voir publication](#).
- Impacts environnementaux du numérique au Canada/Québec, et dans le monde, rapport détaillé (version longue), DiagnosTIC II : [doc complet](#), 61 pages (ce document).
- Rapport DiagnosTIC II version courte, [synthèse](#) (fr), [english](#): 25 pages.
- Détails des sources utilisées, et autres spécificités techniques : [technical diagnosTIC shiftersMtl](#)
- Tableur compilant le « Référentiel environnemental du numérique » (REN), i.e. la quantification par terminal et par usage de l'impact carbone, énergétique, et en ressources abiotiques. Reprise et modifications du tableur publié par *The Shift Project* [60] : [REN.xlsx](#)
- Tableur compilant l'évolution 2013-2025 de l'énergie, des GES, du nombre d'équipements et des métaux, pour Monde + Canada + Québec, selon les 4 scénarios. Reprise et modifications du tableur publié par *The Shift Project* [60] et Andrae [8] : [FORECAST.xlsx](#)
- Tableur compilant les données des autres tableurs REN et FORECAST, et les représentant en graphiques : [ges_mat_stat.xlsx](#)