



HAL
open science

Évaluation environnementale qualitative des technologies dématérialisées : illustration par le streaming musical

William Boffy, Jules Farjas

► To cite this version:

William Boffy, Jules Farjas. Évaluation environnementale qualitative des technologies dématérialisées : illustration par le streaming musical. 2019. hal-02357942

HAL Id: hal-02357942

<https://hal.science/hal-02357942>

Preprint submitted on 14 Nov 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Évaluation environnementale qualitative des technologies dématérialisées : illustration par le streaming musical

William Boffy, Jules Farjas

*Université de Technologie de Compiègne, publié le 10 novembre 2019.
Encadrement par Yacine Baouch et Stéphane Crozat.*

Résumé

L'usage des données numériques explose et cependant, il semble que les impacts environnementaux potentiels engendrés sont ignorés. En s'intéressant à l'exemple du streaming musical, nous proposons une méthode d'évaluation environnementale qualitative inspirée de l'Analyse de Cycle de Vie et utilisant la base données *EcoInvent* ainsi que la méthode d'évaluation *Impact 2002+*. Plusieurs moyens d'écoute (l'ordinateur et le téléphone), de liaisons (Wi-Fi et WAN) et de services de streaming (*Spotify* et *YouTube*) sont étudiés et comparés à l'écoute d'un fichier local (mp3) et à celle d'un CD classique.

Il apparaît que les impacts environnementaux négatifs d'une écoute en ligne dépassent ceux de l'écoute d'un CD au-delà d'un faible nombre d'écoutes, mais surtout que l'utilisation des réseaux mobiles, notamment la 4G, est le facteur le plus aggravant sur l'impact final.

© 2019 Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

Mots clés : streaming ; musique ; cycle de vie ; impact environnemental ; impact ; données.

1. Contexte

Le numérique, et plus particulièrement internet, sont désormais extrêmement ancrés dans nos modes de vie. Que ce soit pour l'usage des réseaux sociaux, des messageries ou des plateformes de divertissement, les forfaits mobiles offrent désormais jusqu'à cent gigaoctets de données mobiles pour en garantir un accès constant. On estime aujourd'hui que le nombre d'internautes augmente au rythme d'un million par jour^[1]. La quantité de données échangées ne cesse de croître, entraînant avec elle la mise en place de nouvelles structures adaptées et l'émergence de nombreux centres de données.

Nous vivons cependant dans un monde fini où les ressources disponibles et la capacité de la planète à accepter toujours plus d'émissions de gaz à effet de serre sont limitées. Les prévisions de l'IPCC^[2] sont alarmistes et questionnent nos habitudes de consommation, vis-à-vis des ressources utilisées et les changements climatiques qu'elles engendrent.

Depuis quelques années la part de consommation électrique des technologies du numérique est de plus en plus importante à travers le monde. En 2015, on estimait^[3] que cette part devrait passer des 5,7% mesurés en 2013 à 13,7% en 2025. Or cet impact est quasiment invisible aux yeux des utilisateurs, pour qui tout est dématérialisé. Un des exemples de cette révolution invisible est l'écoute de musique via streaming, également appelé lecture en ligne continue, apparue vers 1995. Alors que 37% des internautes pratiquaient le streaming audio en 2016, on en comptait déjà 45% en 2017^[4]. Pourtant, cette nouvelle pratique engendre la mise en place de dispositifs et habitudes ayant un impact non neutre sur l'environnement, impact que nous cherchons à évaluer.

¹ IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

2. Problématique

Depuis quelques années, l'impact environnemental des technologies numériques dématérialisées est l'objet de nombreuses publications. Le sujet de la musique a également été traité dans ce cadre-là mais uniquement dans sa globalité, c'est à dire son impact total sur l'environnement. Pourtant, le streaming audio est un phénomène très large dans lequel interviennent de nombreuses technologies.

Dans un processus d'optimisation de l'expérience utilisateur et afin de répondre aux exigences de nouveaux modèles économiques basés sur l'exploitation des données, ces dernières sont vouées à des cheminements de plus en plus coûteux. Comprendre ces mécanismes pourrait permettre d'établir une liste des points à prendre en compte dans le cadre d'un processus d'amélioration environnementale. C'est ainsi que nous nous proposons d'illustrer l'impact environnemental des procédés numériques, par le biais du streaming audio.

3. Proposition d'une méthode d'évaluation pour l'écoute musicale

3.1. Cas d'utilisation

Nous nous intéressons au cheminement des données nécessaires à l'écoute d'une musique selon trois cas d'utilisation : sur disque compact, via un téléchargement puis lecture locale et via une plateforme de streaming. Dans ce cadre, nous traitons les inclusions et extensions suivantes, pour chaque technologie.

3.1.1. Disque compact

Dans ce cas, l'utilisateur écoute une musique sur un disque compact.

Notre modèle est un CD ROM. Nous prenons en compte sa fabrication (gravure, transport et traitement en fin de vie) ainsi que celle de son boîtier en plastique. Chaque écoute est simulée sur une chaîne Hifi.

3.1.2. Écoute mp3

Dans ce cas, l'utilisateur télécharge une chanson mp3 à partir d'un service en ligne puis l'écoute en local.

Nous prenons en compte uniquement le téléchargement de la musique en mémoire permanente, les recherches associées depuis une plateforme web (pour la première écoute) et la

L'Analyse de Cycle de Vie ISO (14040 et 44) est la méthode d'évaluation environnementale de référence. Elle permet de prendre en compte une large partie du cycle de vie du service étudié et de l'évaluer selon une multitude d'indicateurs environnementaux. Néanmoins, la collecte de données doit être précise et exhaustive.

Concernant les technologies associées au streaming musical, la recherche d'informations peut s'avérer chronophage et complexe. De plus, les entreprises privées responsables d'une grande partie de ces services sont peu transparentes sur leurs infrastructures. Ainsi, réaliser une Analyse de Cycle de Vie est hors de nos moyens. Il est néanmoins possible de proposer un modèle d'évaluation simplifié inspiré de cette méthode et retraçant le cheminement théorique des données afin d'estimer les principales sources d'impacts environnementaux. Ceci nous permettra d'essayer de répondre à la question suivante : comment comparer les impacts environnementaux de différentes méthodes d'écoute de musique ?

lecture locale sur ordinateur pour chaque écoute. Nous écartons tous les procédés physiques liés au matériel utilisé (fabrication et usage des disques durs, entretien, etc.), jugés négligeables sur le nombre d'écoutes et d'usages que ces dispositifs permettent. La connexion internet peut être filaire ou via Wi-Fi.

3.1.3. Streaming en ligne

Dans ce cas, l'utilisateur consulte une interface de streaming audio pour écouter une musique.

Nous prenons en compte pour chaque écoute les recherches associées sur les plateformes en ligne *Spotify* et *You Tube*, le téléchargement en mémoire vive, la lecture sur terminal (smartphone ou ordinateur) et la connexion à internet (Wi-Fi, filaire ou WAN). Nous écartons tous les procédés liés au matériel utilisé (usage des disques durs, entretien, etc.), jugés négligeables par rapport au nombre d'écoutes que ces dispositifs permettent mais aussi par leur mutualisation sur d'autres services.

L'ensemble des spécificités prises en compte est résumé dans le schéma de cas d'utilisation en *figure 1*.

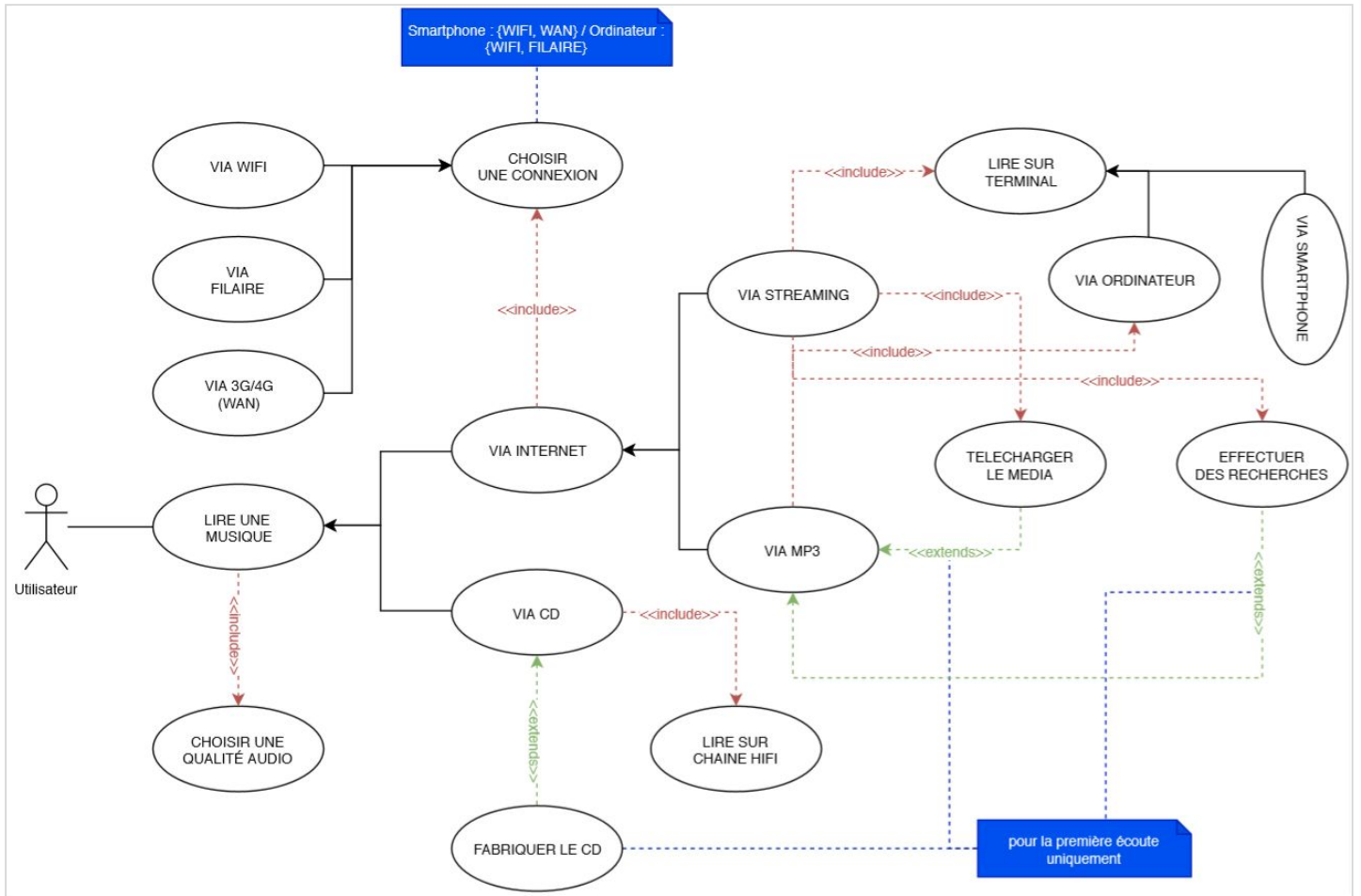


Fig. 1. Schéma de cas d'utilisation.

3.2. Modèle d'évaluation des impacts environnementaux

Nous choisissons pour évaluer l'impact environnemental la base de données *EcoInvent* et la méthode d'évaluation *Impact 2002+*. Le logiciel *Simapro* est utilisé. Pour chaque cas d'utilisation, nous chercherons à évaluer leurs impacts environnementaux selon les quatre sphères de dommage suivantes : qualité des écosystèmes, santé humaine, changements climatiques et ressources.

Nous avons construit un modèle d'évaluation des impacts pour chaque cas d'utilisation.

3.2.1. Disque compact

On note I_{CD} l'impact d'une écoute totale via CD ; I_{hf} l'impact d'écoute Hifi ; I_{fa} l'impact de fabrication d'un CD et de son boîtier ; et $S = Q_{bitrate} \cdot Dt$ la taille du

média en fonction de la durée d'écoute Dt et la qualité audio $Q_{bitrate}$.

$$I_{CD} = I_{hf} \cdot Q_{bitrate} + I_{fa} \cdot Q_{bitrate}$$

3.2.2. Écoute mp3

On note I_{mp3} l'impact de l'écoute d'une musique via mp3 ; I_{re} l'impact d'une recherche sur l'application en ligne ; Q_{re} la quantité de recherches investies pour accéder au média ; I_{st} l'impact de téléchargement (considéré égal à celui d'un téléchargement streaming) depuis le serveur ; I_{ro} l'impact du transfert client entre routeur et terminal ; I_{te} l'impact de lecture depuis le terminal client ; et $S = Q_{bitrate} \cdot Dt$ la taille du média en fonction de la durée d'écoute Dt et la qualité audio $Q_{bitrate}$.

$$I_{mp3} = I_{re} \cdot Q_{re} + I_{st} \cdot Q_{bitrate} + I_{ro} \cdot Q_{bitrate} + I_{te} \cdot Q_{bitrate}$$

3.2.3. Streaming en ligne

On note $I_{streaming}$ l'impact de l'écoute d'une musique en streaming ; I_{re} l'impact d'une recherche sur l'application en ligne ; Q_{re} la quantité de recherches investies pour accéder au média ; I_{st} l'impact de téléchargement streaming depuis le serveur ; I_{ro} l'impact de

transfert client entre routeur et terminal ; I_{te} l'impact de lecture depuis le terminal client ; et $S = Q_{bitrate} \cdot Dt$ la taille du média en fonction de la durée d'écoute Dt et la qualité audio $Q_{bitrate}$.

$$I_{streaming} = I_{re} \cdot Q_{re} + I_{st} \cdot Q_{bitrate} + I_{ro} \cdot Q_{bitrate} + I_{te} \cdot Q_{bitrate}$$

4. Expérimentation

4.1. Données mesurées et récoltées

Il aurait été idéal de mesurer l'ensemble des coûts énergétiques et de matière liés aux usages étudiés (fluides de refroidissement des serveurs, etc.), cependant la difficile récolte des données nous a contraint à baser notre étude sur l'impact de la consommation électrique de ces usages, à l'exception du CD où le coût de fabrication est pris en compte.

Nous avons donc cherché à mesurer l'impact des différents usages par le biais de la consommation électrique (kWh) en fonction de la taille des données échangées (Go) et en prenant en compte pour le disque compact, sa fabrication et celle de son boîtier. Nous ramenons l'ensemble de ces données mesurées ou récoltées à l'impact environnemental engendré par l'écoute d'un gigaoctet de musique.

Nous utilisons les répartitions énergétiques attribuées par Greenpeace^[5] pour calculer l'impact environnemental des consommations sur serveur. Nous considérons l'écoute en local exécutée sur une énergie électrique produite en France.

4.1.1. Disque compact

Le coût énergétique de l'écoute d'un gigaoctet de musique sur disque compact peut se décomposer en deux procédés : la fabrication et l'utilisation.

Nous considérons la fabrication d'un CD ROM de 1 Go d'une durée de vie de 100 ans. On considère que l'on peut écouter une heure de musique sur un tel CD ROM. L'écoute se fait via un chaîne Hifi de gamme moyenne consommant 0,07 kWh pour la diffusion d'une chanson gravée sur un disque compact.

4.1.2. Écoute mp3

Le coût énergétique de l'écoute d'un gigaoctet de musique via téléchargement mp3 peut se décomposer en

trois procédés : la recherche du média en ligne, le téléchargement du média en ligne, et l'écoute du média en local. Notons que les deux premiers points sont réalisés une unique fois. Nous considérons les consommations électriques identiques à celle détaillées dans la partie streaming. L'intérêt de ce procédé d'écoute réside dans la pondération sur le nombre d'écoutes en local, sans répétition de téléchargement et de recherche.

4.1.3. Streaming en ligne

Le coût énergétique de l'écoute d'un gigaoctet de musique sur streaming en ligne peut se décomposer en trois procédés : la recherche du média en ligne, le téléchargement du média en ligne (le streaming est un téléchargement classique, mais découpé en petites parties pour permettre une lecture en quasi-direct) et l'écoute du média en local. Notons qu'ici, les trois sont répétés pour chaque écoute.

Impact d'une recherche

L'utilisation de la console web du navigateur *Mozilla Firefox* nous a permis de déterminer une consommation moyenne de deux méga-octets par recherche.

Impact du téléchargement de données en streaming - infrastructure réseau

Nous nous sommes ici basés sur l'étude^[3] de Andrae et Edler qui fournit une estimation de la consommation électrique de l'infrastructure réseau pour 1 gigaoctet de données téléchargées (filaire, Wi-Fi et WAN).

Impact du téléchargement de données en streaming - liaison routeur/terminal

Cette donnée provient également de l'étude^[3] de Andrae et Edler qui fournit une estimation de la consommation énergétique de la partie "terminale" du réseau, soit le lien entre le routeur local et l'appareil de l'utilisateur.

Impact du téléchargement de données en streaming - terminal client

Mesures sur ordinateur

Les mesures sont effectuées sur un ordinateur portable de 15 pouces, l'*Asus Zenbook Pro (UX501)*, avec le navigateur *Mozilla Firefox* sur lequel est ouvert un unique onglet avec la version web de l'application de streaming. Nous utilisons la console de développement pour obtenir la quantité de données échangées sur une durée donnée, un wattmètre et un chronomètre. Lors de la mesure, les données d'arrière-plan sont désactivées pour empêcher le lancement de tâches annexes. En combinant la taille de données échangées dans le cadre d'une utilisation classique de la plateforme, sur une durée de temps mesurée et pour une consommation électrique également mesurée, nous pouvons estimer la consommation électrique attribuée à chaque Mo transféré.

Mesures sur smartphone

Nous utilisons le gestionnaire de batterie et de gestion de données du système d'exploitation *Android* d'un téléphone (*Samsung Galaxy Note 4*) et un chronomètre. En combinant la taille de données échangées dans le cadre d'une utilisation classique de l'application mobile, sur une durée de temps mesurée et pour une consommation

électrique donnée : nous pouvons estimer la consommation électrique attribuée à chaque Mo transféré.

4.2. Tableau récapitulatif

Service	Spotify		Youtube
	écran éteint, sans recherche, 160 kbits/s	écran allumé, avec recherche, 160 kbits/s	écran allumé, sans recherche, 1080p
mo/min	1.1	3.1	16.2
Wh/min	0.3	0.5	0.5
Wh/go	281	161	30.9

Fig. 2. Consommations électriques.

Voici le résumé des données mesurées dans cette étude : il s'agit des consommations en Mo/min, Wh/min et Wh/Go par usage et par service sur ordinateur portable.

4.3. Résultats Simapro

Une fois les modèles de cheminement de données reconstitués en plusieurs modules sous le logiciel *Simapro*, nous avons pu extraire les impacts environnementaux associés (cf. annexe 01). Notons que dans ces résultats, on considère un gigaoctet de recherche pour un gigaoctet de musique écoutée, ce qui correspond environ à deux recherches par morceau écouté.

5. Présentation et analyse des résultats

5.1. Résultats

Notons que les résultats bruts construits sous *Simapro* sont très spécifiques puisqu'ils sont rapportés à un gigaoctet de lecture. Pourtant, pour écouter une musique sur *YouTube*, plus de données sont nécessaires car le format est bien plus lourd. Il faut donc pondérer ces résultats sur un temps d'écoute, en fonction des différents formats.

5.1.1. Résultats pour une heure d'écoute

On ramène donc nos différents cas en fonction d'un temps d'écoute prenant en compte la qualité du média (160 kbits/s pour *Spotify*, Full HD soit 4500 kb/s pour *YouTube* car l'application tend vers une qualité maximale si la connexion réseau le permet). Ainsi, les consommations électriques par taille de données peuvent être adaptées à chaque usage (cf. annexe 03).

On obtient ainsi des résultats déclinables dans chacune des sphères de dommage implémentées par la méthode *Impact 2002+*.

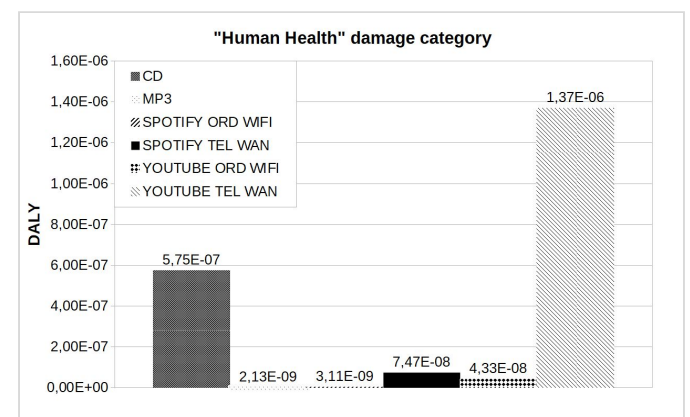


Fig. 3. Impacts sur la santé humaine des différents cas d'utilisation pour une heure d'écoute.

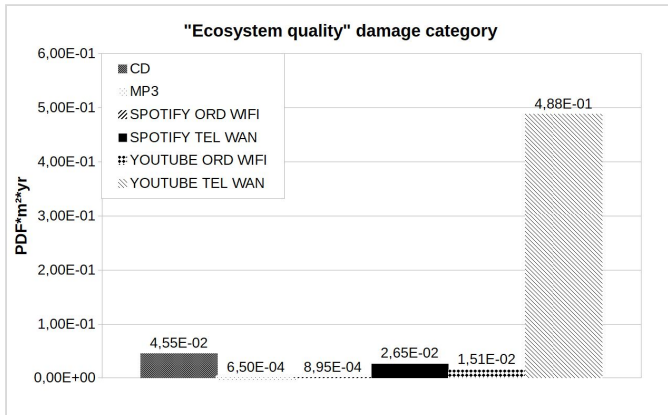


Fig. 4. Impacts sur la qualité des écosystèmes des différents cas d'utilisation pour une heure d'écoute.

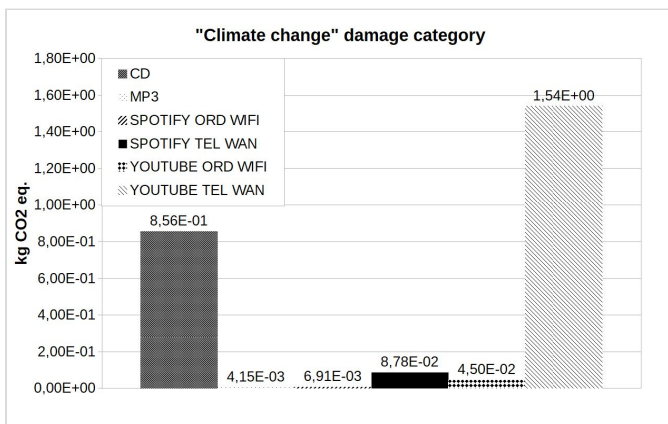


Fig. 5. Impacts sur le changement climatique des différents cas d'utilisation pour une heure d'écoute.

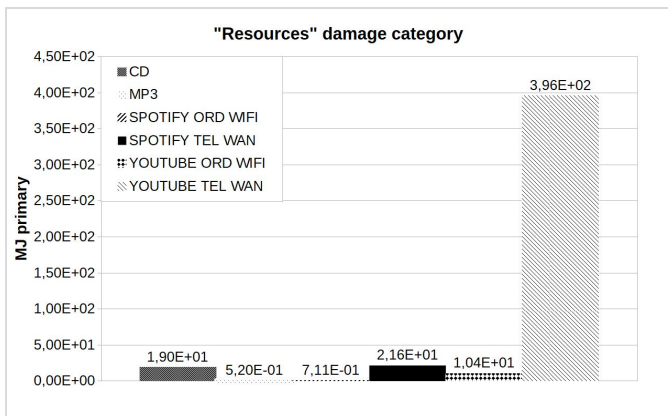


Fig. 6. Impacts sur les ressources des différents cas d'utilisation pour une heure d'écoute.

Sur toutes les sphères de dommage, l'utilisation de *YouTube* (via téléphone et réseau WAN) est plus coûteuse pour l'environnement que tous les autres supports. Cela était prévisible au vu du format exploité et de la taille de données associée à cette technologie. Pourtant, la lecture d'une heure sous *Spotify* (via téléphone et réseau WAN) est plus coûteuse pour l'environnement que celle de *YouTube* (via ordinateur

et réseau Wi-Fi) ; la taille des données n'est donc pas l'unique facteur qui explique l'impact élevé de *YouTube* (via téléphone et réseau WAN).

Il faut en effet regarder un même format de données exploité sous différents réseaux. La différence est significative entre *YouTube* (via ordinateur et réseau Wi-Fi) et *YouTube* (via téléphone et réseau WAN). Le réseau WAN a un impact très élevé, au point de négliger les autres facteurs, sur une heure d'écoute.

Notons également qu'en regardant plus précisément les impacts sur la santé humaine et les changements climatiques, le disque compact est également coûteux pour l'environnement. Mais ces résultats sont à nuancer sur le plus long terme, au-delà d'une seule heure d'écoute puisque l'on prend en compte la fabrication du CD ROM.

5.1.2. Pondération sur le nombre d'écoutes

On pondère nos précédents résultats en fonction d'un nombre d'écoutes du même média. La question que l'on se pose est la suivante : indépendamment du réseau, au bout de combien d'écoutes un support de stockage est préférable pour écouter un même média d'un gigaoctet ?

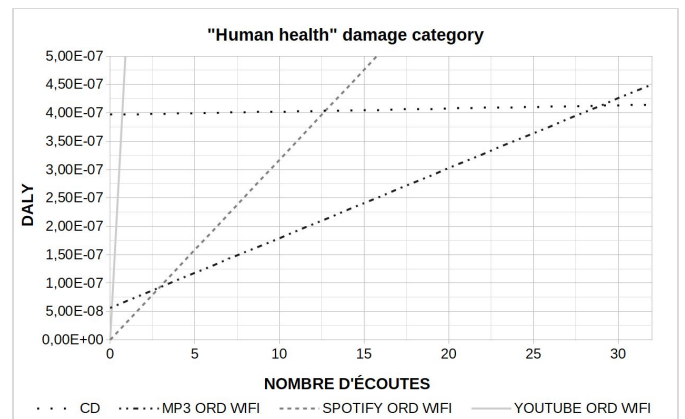


Fig. 7. Impacts sur la santé humaine des différents cas d'utilisation en fonction du nombre d'écoutes d'un même jeu de données.

En termes d'impact sur la santé humaine, le disque compact est le plus intéressant à partir de la vingt-neuvième écoute pour laquelle, la fabrication est amortie. Selon le même raisonnement, on peut observer que la lecture sur ordinateur via téléchargement Wi-Fi d'un fichier mp3 est la plus intéressante entre les troisième et vingt-huitième écoutes. En dessous de ce seuil, *Spotify* (via ordinateur et Wi-Fi) est à privilégier pour diminuer son impact.

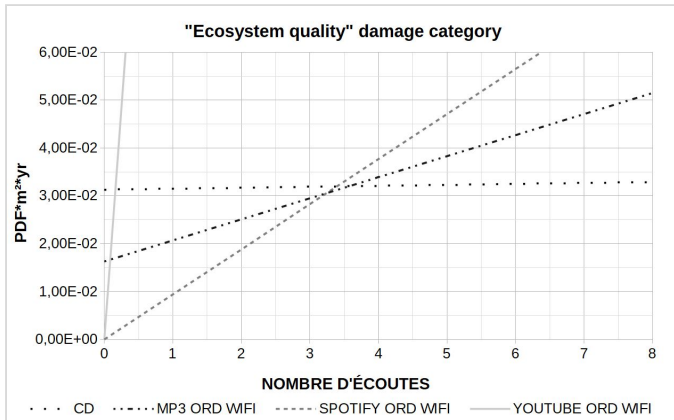


Fig. 8. Impacts sur la qualité des écosystèmes des différents cas d'utilisation en fonction du nombre d'écoutes d'un même jeu de données.

Au-delà de quatre écoutes, le CD ROM est à privilégier en termes d'impact sur les écosystèmes. Sous ce seuil, le moins impactant est *Spotify* (via ordinateur et Wi-Fi).

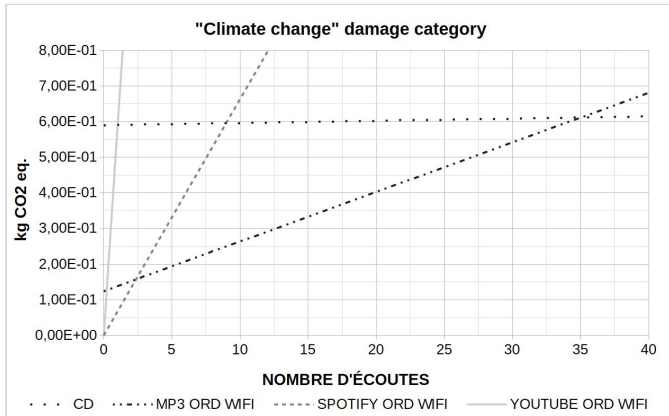


Fig. 9. Impacts sur le changement climatique des différents cas d'utilisation en fonction du nombre d'écoutes d'un même jeu de données.

A partir de la trente-sixième écoute, pour l'impact sur le changement climatique, le disque est également à privilégier.

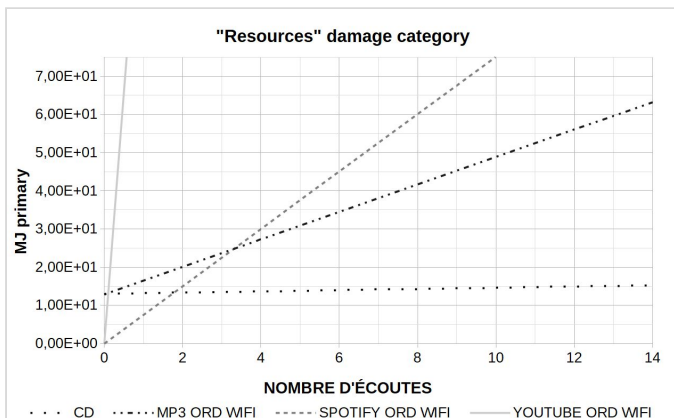


Fig. 10. Impacts sur les ressources des différents cas d'utilisation en fonction du nombre d'écoutes d'un même jeu de données.

Pour l'impact sur les ressources, il faut seulement attendre la deuxième écoute pour que le disque compact soit plus intéressant.

De ces résultats, il est intéressant de voir que les nouvelles plateformes de streaming audio encouragent des scénarios dont l'écoute est diverse et non répétitive. Les usages changent et il est intéressant de les questionner pour en comprendre leur impact.

5.2. Analyse

Les plateformes de streaming audio offrent une quantité de choix très importante et encouragent ainsi la recherche de titres musicaux dans le monde entier. Cette nouvelle pratique, jusqu'alors impossible avec le disque compact, engendre des consommations électriques de recherches associées importantes. Ramenée à une seule écoute, si l'on considère une musique de 5 Mo et la recherche associée à 2 Mo, les coûts sont multipliés.

Les données mobiles offrent la possibilité d'écouter de la musique partout. Pourtant, leur impact sur l'environnement est nettement supérieur aux autres technologies de réseau. Il est préférable de lire une musique en streaming vidéo en Wi-Fi plutôt qu'en streaming audio via WAN malgré le nombre plus important de données échangées.

Scénario A : "C'est la fête"

"Il est samedi soir, Mathilde organise une soirée chez elle. Il faut contenter le large panel de goût des invités. Quelle est la façon la plus "écologique" de diffuser de la musique ?"

L'écoute sur CD est écartée, le stockage d'une bibliothèque nécessaire à la satisfaction de tous les invités est trop contraignant et la transition entre musiques peu adaptée au cas d'usage. On pourrait envisager une écoute depuis une bibliothèque locale de fichiers mp3 pré-téléchargés, mais Alice a de grandes chances de ne pas avoir ce titre qui tient tant à cœur à son cousin. Privilégions le streaming.

Alice est chez elle, le premier choix qu'elle peut faire est d'utiliser le Wi-Fi plutôt que le réseau mobile. Elle divisera ainsi en moyenne son impact par un facteur supérieur à 20. Pour rester logique et encore diminuer son impact, il est préférable de choisir une plateforme de streaming audio plutôt que vidéo. En effet, la quantité de données échangées sur ces dernières est jusqu'à 28 fois plus élevée.

Scénario B : “Il est temps de travailler”

“Raphaël a ce projet à terminer et il se donne l’après-midi pour le faire. Il choisit de mettre de la musique pour l’accompagner dans ce travail.”

Raphaël dispose d’une vingtaine de CD, qu’il a écouté déjà plusieurs fois. En travaillant, Raphaël considère qu’il n’a pas besoin d’une musique spécifique et constamment renouvelée. La solution la plus rapide serait peut-être de lancer un onglet *Spotify* ou *YouTube*, mais la plus écologique dans ce cas-là est l’usage de CD.

Nous cherchons simplement par ces deux illustrations à montrer qu’il est éclairant d’avoir en tête l’impact des différents usages et qu’il est possible de se passer de certains, lorsque la situation s’y prête.

5.3. Comparaison

Sphères de dommage	ÉQUIVALENT CO2 POUR 1 HEURE D'ÉCOUTE					
	CD	MP3	SPOTIFY O Wi-Fi	SPOTIFY Tél. 4G	YT O Wi-Fi	YT Tél. 4G
Avion (km)	1,07	= 0,00	= 0,00	0,02	0,25	8,66
Voiture (km)	2,57	= 0,00	= 0,00	0,04	0,61	20,78
Train (km)	35,00	0,02	0,05	0,57	8,29	283,40

Fig. 12. Équivalents CO2 pour une heure de données transmises.

Au-delà des scénarios proposés, on peut approcher nos impacts sur le réchauffement climatique par des équivalences de transport. Ainsi, si l’on considère qu’un avion émet 360 grammes d’équivalent CO2 au kilomètre

6. Limites des résultats

6.1. Approximations

Faute de données, nous avons écarté le coût du stockage des données musicales sur les serveurs (de *Spotify*, *YouTube*, etc.). Le coût permanent est certainement non négligeable, chaque morceau étant stocké en une centaine de formats différents et étant répété géographiquement sur un réseau de serveurs (CDN). Les résultats de notre étude sont donc à prendre à minima.

6.2. Incertitudes

La différence de consommation entre un échange de données par Wi-Fi et par réseau mobile (WAN) que nous

parcouru, qu’une voiture en émet 150 et qu’un train en émet 11, on obtient les résultats ci-dessus. Autrement dit, le visionnage d’une vidéo de 4 minutes (en Full HD) via une connexion 4G a un impact équivalent CO2 similaire à un trajet de 19 kilomètres en train.

En exploitant pleinement les sphères de dommage calculées grâce à la méthode *Impact 2002+*, on peut trouver des équivalences bien plus précises, comme par exemple le nombre de bières italiennes en bouteilles de 1L correspondant^[6].

Sphères de dommage	ÉQUIVALENT EN LITRE DE BIÈRE EN BOUTEILLE PAR SPHÈRE DE DOMMAGE POUR UNE HEURE DE LECTURE					
	CD	MP3	SPOTIFY O Wi-Fi	SPOTIFY Tél. 4G	YT O Wi-Fi	YT Tél. 4G
Human health	0,17	= 0,00	= 0,00	= 0,00	0,06	1,78
Ecosystem quality	0,04	= 0,00	= 0,00	= 0,00	0,06	2,03
Resources	3,59	0,01	0,02	0,65	8,83	337,13

Fig. 13. Équivalents d’une heure de données transmises en litre de bière italienne (bouteille) en fonction des sphères de dommage.

Ainsi, on peut comparer la lecture d’un gigaoctet de données au travers de plusieurs prismes. Par exemple, la lecture d’une heure de données sous *YouTube* en 4G est équivalent à 1,78 bières pour l’impact sur la santé humaine, 2,03 bières pour l’impact sur la qualité des écosystèmes et 337,13 bières pour l’impact en ressources.

exploitons est issue d’une mesure^[3] de 2010. Ce rapport est à questionner puisque l’article entendait une forte réduction des coûts pour 2020. Faute de documentation plus récente et suffisamment fournie sur le sujet, nous l’avons pris comme tel.

Notons néanmoins que ces nouvelles données attendues ne prenaient pas en compte l’émergence de la 5G promettant des débits 1000 fois supérieurs mais dont les problématiques de consommation énergétique et d’impact sur la santé et les écosystèmes sont sources de nouvelles inquiétudes^[7].

7. Discussion et perspectives

Tous les impacts étudiés ici, à l'exception de celui du CD où la fabrication est prise en compte, ne se basent que sur la consommation énergétique. Ainsi l'impact sur la santé humaine d'un stream en 4G ne se base que sur le nombre de Wh consommés et ne prend pas en compte les éventuels impacts d'une antenne 4G sur les riverains concernés par exemple ou les coûts cachés derrière la fabrication des matériaux associés (ordinateur, serveur, disques durs, routeurs, etc.). Malgré le fait que la base de données *EcoInvent* prenne en considération l'ensemble des procédés pour convertir de l'énergie électrique, notre schéma n'est pas complet car nous ne détaillons pas la totalité des outils nécessaires à la transmission des données étudiées avec précision. Il s'agit de spécificités qu'il serait opportun de préciser dans une étude plus poussée.

De plus, nos calculs d'impact sur les terminaux ne se basent que sur le paysage électrique français, rendant notre étude très spécifique à ce pays. Certaines sources d'énergie, dans d'autres pays, sont très éloignées du cas français et accentuent ou diminuent leurs impacts environnementaux dans les différentes sphères de dommage.

Si cette étude n'est qu'une analyse rapide qui nécessiterait un approfondissement du calcul des coûts (des infrastructures notamment) et un élargissement aux impacts autres que ceux liés à la consommation énergétique, elle fournit néanmoins des ordres de grandeur intéressants. Il apparaît clairement que les coûts énergétiques liés à l'écoute

de musique en ligne sont loin d'être négligeables, et même supérieurs au CD au-delà d'un certain nombre d'écoutes, ce qui peut aller à l'encontre de certaines idées reçues.

Ce qui ressort avant tout est le coût prépondérant de l'infrastructure nécessaire aux données mobiles (liaison bien moins efficace énergétiquement qu'une liaison filaire jusqu'à une box internet). Limiter l'impact environnemental de son usage du numérique commencerait donc par limiter au maximum l'usage des réseaux WAN.

Ces résultats peuvent être élargis à l'échange de données en général, moyennant quelques approximations : le streaming audio n'est rien d'autre qu'un téléchargement de fichier. Ainsi, il faut additionner à l'écoute de musique les données consommées par l'usage des réseaux sociaux – plusieurs gigaoctets par mois et par utilisateur – ainsi que la lecture de vidéo, les recherches, la visioconférence...

A un rythme où, chaque minute, sont envoyées 2 millions de photos sur *Snapchat* et sont visionnées 4 millions de vidéos sur *YouTube*, il est de plus en plus intéressant de se questionner sur l'impact invisible qui émerge de ces nouvelles technologies. En 2015, les français consommaient en moyenne 1,5 gigaoctets de données mobiles (4G active) par mois^[8]. Cela correspondait à l'équivalent CO₂ d'un trajet de 7,5 km en voiture, par consommateur. En 2018, ce chiffre était déjà multiplié par quatre.

8. Annexes

8.1. Annexe 01 : Résultats selon les 4 sphères de dommages d'Impact 2002+.

Modules	Sphères de dommages			
	Human health	Ecosystem quality	Climate change	Resources
	[DALY]	[PDF*m2*yr]	[kg CO2 eq]	[MJ primary]
cd_rom	3,97E-07	3,15E-02	5,91E-01	1,32E+01
spotify_ordinateur_wifi	3,17E-08	9,42E-03	6,63E-02	7,51E+00
spotify_ordinateur_wired	3,79E-08	1,16E-02	7,32E-02	9,30E+00
spotify_smartphone_wifi	2,56E-08	7,22E-03	5,93E-02	5,71E+00
spotify_smartphone_wan	6,68E-07	2,37E-01	7,86E-01	1,93E+02
youtube_ordinateur_wifi	1,98E-08	6,91E-03	2,05E-02	4,69E+00
youtube_ordinateur_wired	3,29E-08	1,16E-02	3,53E-02	8,50E+00
youtube_smartphone_wifi	1,98E-08	6,90E-03	2,05E-02	4,69E+00
youtube_smartphone_wan	6,63E-07	2,37E-01	7,47E-01	1,92E+02
mp3_ordinateur_wifi	4,41E-08	1,38E-02	8,02E-02	1,11E+01
mp3_ordinateur_wired	5,02E-08	1,60E-02	8,71E-02	1,29E+01

8.2. Annexe 02 : Eléments de la base de données *EcoInvent* utilisés

Eléments de la base de données <i>EcoInvent</i> utilisés
Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, S
Cattle for slaughtering, live weight {GLO} market for Cut-off, S
Electricity, high voltage {CH} natural gas, import from Germany Cut-off, S
Electricity, high voltage {CH} nuclear, import from France Cut-off, S
Electricity, high voltage {CH} wind power, import from Germany Cut-off, S
Electricity, high voltage {DE} electricity production, lignite Cut-off, S
Electricity, low voltage {FR} electricity voltage transformation from medium to low voltage Cut-off, S
Injection moulding {GLO} market for Cut-off, S
Polycarbonate {GLO} market for Cut-off, S
Polystyrene, general purpose {GLO} market for Cut-off, S

8.3. Annexe 03 : Impacts pour une heure d'écoute

Sphères de dommage	Pour une heure d'écoute					
	CD	MP3 Ordinateur Wi-Fi	SPOTIFY Ordinateur Wi-Fi	SPOTIFY Téléphone WAN	YOUTUBE Ordinateur Wi-Fi	YOUTUBE Téléphone WAN
Human health	5,75E-07	2,13E-09	3,11E-09	7,47E-08	4,33E-08	1,37E-06
Ecosystem quality	4,55E-02	6,50E-04	8,95E-04	2,65E-02	1,51E-02	4,88E-01
Climate change	8,56E-01	4,15E-03	6,91E-03	8,78E-02	4,50E-02	1,54E+00
Resources	1,90E+01	5,20E-01	7,11E-01	2,16E+01	1,04E+01	3,96E+02
Qualité (kb/s)	1000	128	160	160	4500	4500
Données pour 1h (en Go)	0,45	0,0576	0,072	0,072	2,025	2,025

9. Références

[1] DATAREPORTAL. *Digital 2019: Global Digital Overview*. <https://datareportal.com/reports/digital-2019-global-digital-overview>; 2019 [accédé le 10/11/2019].

[2] IPCC. *Global warming of 1.5 °C*. https://www.climat.be/files/4115/3900/0027/181008_IPCC_sr15_spm.pdf; 2019 [accédé le 10/11/2019].

[3] Andrae, A.S.G.; Edler, T. *On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030*. *Challenges* 2015, 6, 117-157.

[4] IFPI. *Musique connexion, Panorama 2017 de la consommation de musique dans le monde*. https://www.ifpi.org/downloads/MCIR_French.pdf; 2017 [accédé le 10/11/2019].

[5] Greenpeace. *Click Clean*. <http://www.clickclean.org/france/fr/>; 2016 [accédé le 10/11/2019].

[6] Mauro Cordella, Alessandro Tugnoli, Gigliola Spadoni, Francesco Santarelli and Tullio Zangrando. *LCA of an Italian Lager Beer*.

https://www.researchgate.net/profile/Mauro_Cordella/publication/225635466_LCA_of_an_Italian_lager_beer/links/55e5751408aede0b57359d4a/LCA-of-an-Italian-lager-beer.pdf; 2008 [accédé le 10/11/2019].

[7] Cindy Russel. *Wireless Silent Spring*. <https://zero5g.com/wp-content/uploads/2018/10/Wireless-Silent-Spring-SCCM-A-Corrected-Final-Oct-28-2018-PDF.pdf>; 2018 [accédé le 10/11/2019].

[8] ARCEP. *Les services de communication électroniques en France*. <https://www.arcep.fr/fileadmin/cru-1568292809/reprise/observatoire/marche-an-2018/obs-marches-annuel-prov-2018-210519.pdf>; 2018 [accédé le 10/11/2019].

William Boffy est un étudiant ingénieur de Génie Informatique et Génie Urbain à l'Université de Technologie de Compiègne.

Jules Farjas est un étudiant ingénieur de Génie Informatique à l'Université de Technologie de Compiègne.