



HAL
open science

Proposition d'une méthode d'évaluation environnementale multicritère des réunions en présentiel et en visio-conférence

Aurélien Béranger, Clément Brizard, Valentin Le Gauche, Yacine Baouch

► To cite this version:

Aurélien Béranger, Clément Brizard, Valentin Le Gauche, Yacine Baouch. Proposition d'une méthode d'évaluation environnementale multicritère des réunions en présentiel et en visio-conférence. 2021. halshs-03120479v2

HAL Id: halshs-03120479

<https://shs.hal.science/halshs-03120479v2>

Preprint submitted on 29 Jun 2021

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.

Proposition d'une méthode d'évaluation environnementale multicritère des réunions en présentiel et en visio-conférence

Aurélien Béranger ^{*}, Clément Brizard [†], Valentin Le Gauche [‡], and Yacine Baouch [§]

Université de Technologie de Compiègne

8 décembre 2020

Résumé

La visio-conférence est plébiscitée comme un moyen d'amélioration des impacts environnementaux, notamment par la réduction des déplacements. Néanmoins, ce dispositif de téléprésence participe au déploiement d'infrastructures matérielles non sans conséquences environnementales. Les différences d'impacts environnementaux entre des réunions en téléprésence et en présentiel ont été l'objet d'études. Cependant, celles-ci ont une focalisation particulière sur l'aspect énergétique ou climatique, au détriment, parfois, de certaines étapes des cycles de vie et d'autres critères environnementaux. Cet article propose une méthode d'évaluation environnementale multicritère et générique des réunions inspirée de l'Analyse de cycle de vie. Une réunion est modélisée selon trois composantes : les équipements matériels, les données transférées par le logiciel utilisé et les déplacements nécessaires à la rencontre, et selon différents paramètres tels que la durée ou nombre de participants. Nous appliquons cette méthode en utilisant la base de données EcoInvent 3.4 et la méthode d'évaluation Impact2002+. L'évaluation porte sur une réunion réalisée selon trois scénarios. Nous étudions aussi les variations liées à certains de leurs paramètres. Nos résultats indiquent que la téléprésence n'est pas toujours préférable au mode présentiel d'un point de vue environnemental. La grande diversité des composantes d'une réunion, en particulier de ses moyens de transport et des équipements numériques mobilisés, oblige à rentrer dans la complexité de ce qui est en jeu au cas par cas pour en comprendre les impacts.

Mots-clés : Analyse de cycle de vie, visio-conférence, réunion, téléprésence, évaluation environnementale, technologies numériques

Abstract

Videoconferencing has been acclaimed as a means of improving environmental impacts, particularly by reducing travel. Nevertheless, this telepresence system contributes to the deployment of physical infrastructures with certain environmental consequences. The differences in environmental impact between telepresence and face-to-face meetings have been the subject of studies. However, these have a particular focus on the energy or climate aspect, sometimes to the detriment of certain life cycle stages and other environmental criteria. This article proposes a multi-criteria and generic environmental assessment method for meetings inspired by Life Cycle Assessment. A meeting is modelled according to three components : the hardware, the data transferred by the software and the travel required for the meeting, and according to various parameters such as duration or number of participants. We apply this method using the EcoInvent 3.4 database and the Impact2002+ evaluation method. The evaluation covers a meeting carried out according to three scenarios. We also study the variations related to some of their parameters. Our results indicate that telepresence is not always preferable to face-to-face meetings from an environmental point of view. The great diversity of the components of a meeting, in particular its means of transport and the digital equipment used, makes it necessary to enter into the complexity of what is at stake on a case-by-case basis in order to understand its impacts.

Keywords : life-cycle assessment, virtual meeting, meeting, telepresence, environmental analysis, information technologies

*aurelien.beranger@lilo.org

†clement.brizard@mailo.com

‡valentin.le-gauche@laposte.net

§yacine.baouch@utc.fr

1 Introduction

La première démonstration d'une visio-conférence transcontinentale date de l'exposition universelle de 1964 (HALL 1964, p. 17) et son application dans l'enseignement supérieur français de 1992 (OLOGEANU 2001, p. 71). Son usage n'est donc pas récent et il est désormais massif. À titre d'exemple, les services du Réseau national de télécommunications pour la technologie, l'enseignement et la recherche (RENATER) ont été jusqu'en 2019 le support de plus de 245 000 visio-conférences annuelles (*Renavision* 2019; *Rendez-vous* 2019).

Cette technologie et plus généralement le numérique sont devenus des outils incontournables pour nombre d'activités. Cela à tel point qu'ils rendent envisageable et possible la poursuite des activités scolaires et professionnelles en période de confinement¹.

Cette place grandissante est renforcée par la promotion de la visio-conférence en tant que support à des politiques qui visent l'amélioration des impacts environnementaux par la réduction des déplacements d'organisations publiques (ARNFALK et al. 2015; ADEME 2017a; ADEME 2017b) et privées (BORGGREN et al. 2013, p. 126-127). Même si ces moyens de communication sont dits virtuels, ils participent au déploiement d'infrastructures matérielles non sans impact sur l'environnement (ADEME 2018, p. 9). Le réseau mondial qu'est internet est constitué de près de 9 milliards d'équipements (smartphones, ordinateurs et objets connectés), 45 000 serveurs et 800 millions d'équipements réseaux (routeurs, box ADSL, etc.) (ADEME 2018, p. 5). L'utilisation des services que porte cette infrastructure matérielle est elle aussi en large augmentation : le nombre d'abonnements à Netflix, le leader mondial du *streaming* vidéo, a connu une hausse de 20 % en 2019 pour atteindre 167 millions, tandis qu'en 2018, 365 millions de nouveaux utilisateurs se sont reliés à internet, soit un million par jour (DATAREPORTAL 2019).

Le but du présent article est de proposer une méthode d'évaluation environnementale multicritère d'une réunion. Son application permettra de montrer les différences d'impacts selon les modalités choisies, avec comme perspective d'éclairer la décision.

2 État de l'art

La massification de l'usage de la visio-conférence s'est accompagnée d'une diversification des équipements et des formats de réunions virtuelles (COROAMA, HILTHY et BIRTEL 2012). La variété d'écrans, de caméras, de micros, de systèmes son, de terminaux et des divers équipements matériels est étendue par celle des outils logiciels libres ou propriétaires². Par ailleurs, nous observons aussi des cas de réunions hybrides, pour lesquelles une partie des participants se retrouve physiquement au même endroit et d'autres communiquent par l'intermédiaire d'un dispositif de téléprésence. Considérer tous les formats de réunion virtuelle im-

plique donc également de prendre en compte les transports. Cela revient à étendre la réflexion à toutes les modalités de l'objet « réunion », avec un cadre formel ou non, en présentiel ou à distance, c'est-à-dire par le biais d'une médiation numérique.

Le nombre de publications scientifiques qui traitent de l'impact environnemental du numérique a été multiplié par près de huit entre 2001 et 2015 (TINETTI et al. 2016, p. 24). Certaines abordent les impacts environnementaux des réunions et des visio-conférences. Cependant, elles ne proposent que rarement une analyse multicritère complète, ne se focalisant que sur les aspects énergétiques ou climatiques. De même, elles ne couvrent que rarement l'ensemble des étapes des cycles de vie³ (COROAMA, HILTHY et BIRTEL 2012; ONG, MOORS et SIVARAMAN 2012; ONG, MOORS et SIVARAMAN 2014; BORGGREN et al. 2013). Pourtant, l'Analyse de cycle de vie (ACV), méthode de référence, régie par les normes ISO 14 040 et 14 044 (*ISO 14040* 2006; *ISO 14044* 2006), permet de dresser un bilan environnemental aussi exhaustif que possible, par l'identification et la quantification des intrants et extrants impliqués. Les limites de réalisation d'une ACV résident dans la collecte d'une grande quantité de données. L'impact des centres de données numériques, par exemple, est encore difficile à évaluer en raison de l'opacité du milieu (DIGUET et LOPEZ (DIR.) 2019; CARNINO et MARQUET 2018). Ceci avait déjà été montré par l'exemple de l'impact du streaming musical (BOFFY et FARJAS 2019). Une méthode d'évaluation avait été construite inspirée de l'ACV.

En synthèse de cet état de l'art, il apparaît :

- nécessaire de modéliser une réunion avec différents paramètres, à savoir sa durée, le nombre de ses participants, les équipements matériels, les données transférées par le logiciel utilisé et les déplacements nécessaires à la rencontre ;
- qu'utiliser une méthode similaire à (BOFFY et FARJAS 2019) permet d'évaluer les impacts environnementaux en considérant l'ensemble des cycles de vie.

Après avoir développé notre modèle d'évaluation, nous détaillerons les données utilisées pour la mettre en application. Celle-ci consistera à comparer les impacts environnementaux d'une réunion selon différents scénarios. Enfin, nous discuterons des limites de notre étude et des perspectives qu'elle ouvre.

3 Proposition d'une méthode d'évaluation

3.1 Unité fonctionnelle

Même si nous ne réalisons par formellement une ACV, il est important de définir une unité de référence pour comparer différents scénarios de réunion. L'unité fonctionnelle choisie

¹Le Ministère du Travail français estime d'ailleurs dans ce contexte que « près de 8 millions d'emplois (plus de 4 emplois sur 10) sont aujourd'hui compatibles avec le télétravail dans le secteur privé » (MINISTÈRE DU TRAVAIL 2020).

²Jitsi, Microsoft Skype, Google Hangouts, Gotomeeting, Zoom, Webex, etc.

³Extraction des matières premières, fabrication, transport, utilisation, fin de vie.

est « *mettre en relation X individus pendant Y minutes* ». Nous considérons que deux individus sont mis en relation lorsqu'ils peuvent s'entendre, se voir et partager des documents s'ils le souhaitent. Nous faisons donc ici le choix de considérer qu'une réunion en présentiel est équivalente à la même réunion réalisée à distance, ou en intégrant ces deux modalités.

3.2 Description du modèle

Nous modélisons l'impact d'une réunion comme la somme de l'impact de ses composants matériels, du transfert de données générées par le logiciel utilisé et des éventuels transports réalisés par les participants.

L'impact d'une réunion sera modélisé de la façon suivante :

$$I_{réunion} = I_{matériel} + I_{données} + I_{transport}$$

Avec $I_{réunion}$ l'impact d'une réunion, $I_{matériel}$ l'impact des équipements matériels utilisés pour la réunion (par exemple un ordinateur, un câble, une caméra), $I_{données}$ l'impact du transfert de données générées par le logiciel de visio-conférence choisi pour la réunion et $I_{transport}$ l'impact des transports réalisés par les participants. On trouvera le détail du modèle d'évaluation à la figure 1.

Tous ces impacts s'expriment en Unité d'impact (UI), par exemple les kg eq. CO₂ pour la catégorie d'impact « changement climatique » de la méthode d'évaluation Impact2002+ (JOLLIET et al. 2003).

3.2.1 Impact des équipements matériels

L'impact d'un composant matériel se partage entre l'impact dû à son fonctionnement pendant la réunion et celui dû au reste de son cycle de vie, à savoir sa fabrication, son transport, et sa fin de vie, ensemble que nous nommerons « hors-fonctionnement ». L'impact en fonctionnement est pondéré par un coefficient qui représente la part du composant dédiée à la visio-conférence : un ordinateur peut en même temps être utilisé pour un logiciel de traitement de texte. Nous avons donc :

$$I_{matériel} = \sum_{m \in M} (I_{fct_m} \cdot k_m + I_{\neg fct_m}) \cdot t_{réunion}$$

avec M l'ensemble des équipements matériels de la réunion, I_{fct_m} l'impact dû à une minute de fonctionnement de l'équipement m pendant la réunion, $I_{\neg fct_m}$ son impact pour une minute hors-fonctionnement et $t_{réunion}$ la durée de la réunion. k_m correspond au taux d'utilisation (entre 0 et 1) de l'équipement dédié à la visio-conférence pendant la réunion.

Détaillons d'abord l'impact du fonctionnement de l'équipement. Si certains appareils sont éteints immédiatement après leur utilisation, d'autres comme des télévisions ou des vidéo-projecteurs, peuvent être laissés en mode « veille » la plupart du temps, n'étant parfois éteints que le week-end. Nous prenons donc en compte l'impact dû au temps de veille de l'appareil rapporté au temps de la réunion :

$$I_{fct_m} = I_{visio_m} + I_{veille_m} \cdot r_{veille/visio}$$

avec I_{visio_m} l'impact de l'équipement m dû à une minute de visio-conférence, I_{veille_m} son impact dû à une minute de veille et $r_{veille/visio}$ le ratio entre le temps de veille de l'appareil et sa durée d'utilisation. Par exemple, un appareil qui fonctionnerait une heure par semaine et resterait dix heures en veille aurait un rapport de 10 pour 1.

L'impact hors-fonctionnement de l'équipement est lui aussi réparti entre l'impact imputable à la durée de la visio-conférence, et à la durée de veille équivalente :

$$I_{\neg fct_m} = I_{\neg fct_m_{total}} \cdot \left(\frac{1}{d_{serv_m}} + \frac{r_{veille/visio}}{d_{veille_m}} \right)$$

avec $I_{\neg fct_m_{total}}$ l'impact hors-fonctionnement de l'équipement m sur l'ensemble de sa durée de vie, d_{serv_m} la durée de service de m , d_{veille_m} sa durée totale de veille sur l'ensemble de sa durée de vie et $r_{veille/visio}$ le ratio introduit dans la formule précédente. Si la durée de service de l'équipement n'est pas déjà connue (cf. 3.3.1), nous la calculons comme suit :

$$d_{serv_m} = f_m \cdot d_{vie_m} \cdot 230$$

avec f_m la fréquence d'utilisation de l'équipement m (en heures/jour), d_{vie_m} sa durée de vie (en années) et 230 le nombre de jours travaillés par an (en France, en 2020). La durée totale de veille est quant à elle calculée en déterminant le nombre d'heures de veille par jour à partir de la fréquence d'utilisation journalière de l'équipement m :

$$d_{veille_m} = (24 - f_m) \cdot d_{vie_m} \cdot 230$$

3.2.2 Impact du transfert de données

La notion d'impact environnemental lié au transfert de données n'a de sens que dans le cas de l'usage d'un dispositif d'audio-conférence ou de visio-conférence. Dans ce cas, nous le décomposons en un impact lié au téléchargement du logiciel utilisé et un impact du transfert de données lors du fonctionnement du logiciel. Nous avons donc :

$$I_{données} = I_{téléchargement} + I_{fct_d}$$

$I_{téléchargement}$ est l'impact causé par le téléchargement du logiciel ou de la page web permettant d'accéder à la conférence en ligne. Il se décline pour l'ensemble des participants P . Pour chaque participant p , on multiplie $t_{fichier}$, la taille du fichier à télécharger (une quantité de données, en Go) par In_{NW} , l'intensité énergétique d'un transfert de données sur le réseau (en UI/Go). Le facteur k_p modélise la part de cet impact imputable à la réunion en question. Il est nul dans le cas où le participant n'a pas eu besoin de télécharger le logiciel, s'il suit la réunion sur l'instance de quelqu'un d'autre par exemple. Il vaudra 1 si le téléchargement est intégralement imputable à cette réunion, comme c'est le cas pour un service web, c'est-à-dire lorsque le logiciel est embarqué dans une page web qu'il faut ouvrir pour chaque réunion (ainsi que se font les vidéo-conférences sur Jitsi ou Hangouts). Enfin, pour un logiciel installé sur l'ordinateur ou le smartphone de l'utilisateur, il tendra vers 0 lorsque le nombre de réunions effectuées augmente.

$$\begin{aligned}
I_{réunion} = & \\
& \sum_{m \in M} \left(k_m \cdot (I_{visio_m} + I_{veille_m} \cdot r_{veille/visio}) + I_{\neg fct_m} + I_{\neg fct_m_total} \cdot \left(\frac{1}{d_{serv_m}} + \frac{r_{veille/visio}}{d_{veille_m}} \right) \right) \cdot t_{réunion} \\
& + \left(n_p \cdot d_{descendant} \cdot t_{réunion} + \sum_{p \in P} k_p \cdot t_{fichier} \right) \cdot In_{NW} \\
& + \sum_{t \in T, p \in P} I_t \cdot dist_{p,t}
\end{aligned}$$

FIGURE 1 : Modèle d'évaluation

$$I_{téléchargement} = \sum_{p \in P} k_p \cdot t_{fichier} \cdot In_{NW}$$

Concernant l'impact du transfert de données sur le réseau durant la réunion I_{fct_d} , on considère $d_{descendant}$, la quantité de données reçue par seconde par chacun des participants utilisant le logiciel de visio-conférence (en Go/s), à nouveau multipliée par l'intensité énergétique du réseau In_{NW} . Il est important de noter que le débit descendant $d_{descendant}$ est variable selon la définition audio et vidéo de l'échange et selon le nombre points de connexion n_p . Le débit ascendant n'est pas pris en compte. On obtient finalement :

$$I_{fct_d} = n_p \cdot d_{descendant} \cdot In_{NW} \cdot t_{réunion}$$

3.2.3 Impact des transports

L'impact d'un trajet correspond à l'impact généré par le moyen de transport utilisé par les passagers et la distance parcourue. L'impact de l'ensemble des transports effectués pour une réunion est donc donné par :

$$I_{transport} = \sum_{t \in T, p \in P} I_t \cdot dist_{p,t}$$

avec T l'ensemble des modes de transport utilisés, P l'ensemble des participants, I_t , impact du transport de type t pour un kilomètre, $dist_{p,t}$, distance parcourue par le participant p avec le mode de transport t (en km).

3.3 Données mesurées et récoltées

Les valeurs des coefficients utilisés dans la méthode sont issues de mesures, de la base de données EcoInvent 3.4 ou de la littérature. Le détail des sources et des impacts de chaque élément est disponible en Annexes, dans le tableau 3.

3.3.1 Matériel

Nous considérons l'impact d'un élément matériel en deux temps : lors du fonctionnement (I_{fct_m}) et hors-fonctionnement ($I_{\neg fct_m}$). La deuxième partie correspond à sa fabrication, son transport et sa fin de vie. Lorsque cela est possible nous utilisons un procédé EcoInvent pour estimer les impacts de ces trois phases. Nous procédons sinon

par assimilation massique. L'impact d'un élément matériel inconnu est calculé en multipliant l'impact d'un gramme d'un procédé EcoInvent connu par la masse de l'élément inconnu mesurée avec une balance. Seul l'impact d'un vidéo-projecteur n'est pas obtenu grâce à l'une ou l'autre de ces manières. Il est modélisé grâce au logiciel Simapro 8.5 et à une ACV de vidéo-projecteur issue de la littérature (CHEUNG, BERGER et FINKBEINER 2018). Par ailleurs, pour déterminer la part de l'impact hors-fonctionnement qui doit être attribuée à la réunion considérée, nous utilisons la durée de service de l'équipement. Si elle n'est pas connue, nous la calculons à partir de la fréquence d'utilisation journalière de l'équipement, sa durée de vie et le nombre de jours travaillés par an (cf. 3.2.1). Nous fixons deux valeurs de fréquence d'utilisation : trois heures par semaine pour les équipements considérés comme étant spécifiques à la visio-conférence (par exemple un vidéo-projecteur) et sept heures par jour pour les autres équipements (par exemple un ordinateur portable). Voir section 8.2 pour la justification de ces valeurs.

Le fonctionnement d'un élément matériel se compose de son utilisation lors de la visio-conférence et de son temps de veille. Cela équivaut pour chacun des cas à une consommation électrique. Celle-ci est calculée grâce à la mesure de la puissance consommée par l'élément en un temps donné, grâce à un wattmètre et un chronomètre. L'impact est obtenu en multipliant la consommation électrique, en kWh, par l'impact du mix électrique français, en UI/kWh.

3.3.2 Transfert de données

La quantité de données nécessaire au téléchargement d'un logiciel ou à l'accès à la page de réunion a été mesurée grâce à la console de développement du navigateur Mozilla Firefox, en désactivant les données d'arrière plan pour empêcher le lancement de tâches annexes.

Nous procédons de deux manières pour connaître la quantité de données reçues par chaque participant lors de la visio-conférence. Lorsqu'elles sont disponibles, nous utilisons les valeurs de débit descendant fournies par les éditeurs de logiciels de téléprésence. Elles indiquent des quantités de données reçues par seconde (en Go/s) dépendant de la qualité de connexion et du nombre de points de connexion. Les valeurs de débit manquantes sont estimées en simulant des

réunions virtuelles. Nous lançons plusieurs instances du logiciel sur un même ordinateur (Lenovo Yoga 2) puis mesurons la quantité totale de données reçue sur un temps donné grâce au terminal fourni par Ubuntu et à un chronomètre. Cette quantité totale divisée par le nombre d'instances du logiciel utilisées et par la durée de la réunion simulée donne une estimation de la quantité de données reçues par chaque participant en une seconde (en Go/s).

Quelle que soit la méthode choisie, nous obtenons ensuite une consommation énergétique grâce à une estimation de l'intensité énergétique du réseau en kWh/Go (ONG, MOORS et SIVARAMAN 2014, p. 87). Elle ne prend en compte que l'utilisation du réseau et exclut le coût environnemental de la construction et de la fin de vie des infrastructures. Les impacts sont finalement calculés grâce au coût du mix électrique français fourni par EcoInvent.

3.3.3 Transport

L'ensemble des cycles de vie des infrastructures et des moyens de transport est pris en compte par les procédés EcoInvent. Ils fournissent directement des impacts en UI rapportés au kilomètre ou au personne-kilomètre.

4 Application de la méthode

Nous appliquons cette méthode à l'évaluation de l'impact environnemental d'une réunion réalisée selon trois scénarios distincts. Cette réunion dure deux heures et met en relation cinq personnes utilisant un support de réunion type diaporama. Les trois scénarios (cf. table 1) se distinguent par le logiciel qu'ils utilisent (ou non), par le nombre et les modes de transport qu'ils impliquent, et par les composants matériels qu'ils mobilisent.

L'objectif principal est de comparer l'impact environnemental de cette réunion selon ces trois scénarios. Dans un second temps, nous étudions l'évolution des résultats en fonction de certains paramètres dont la durée de réunion.

4.1 Description des scénarios

4.1.1 Scénario A

Dans ce premier scénario, tous les participants se rendent au même endroit pour assister à la réunion. Cela engendre un certain nombre de déplacements : un des participants a eu à effectuer 100 km en train régional ainsi que 3,5 km en bus de ville ; deux autres participants ont également parcouru 3,5 km en bus ; un quatrième a effectué 20 km dans sa voiture personnelle ; le dernier est venu à pied.

Nous considérons que chacun des participants utilisera son ordinateur portable durant la réunion. Un vidéo-projecteur permet de présenter le diaporama.

4.1.2 Scénario B

Dans le deuxième scénario, il a été décidé d'utiliser les dispositifs de téléprésence avancée présents dans des salles dé-

diées de l'organisation concernée. Chacun de ces dispositifs est constitué d'un ordinateur de bureau, d'une structure métallique à roulette portant deux écrans TV de 107 cm de diagonale, ainsi que d'un kit de visio-conférence intégrant un micro « pieuvre », une caméra rotative, des haut-parleurs et une télécommande. La réunion se déroule en trois endroits à la fois, dont deux où sont utilisés ces dispositifs et un où l'un des participants communique grâce à son ordinateur portable. Le logiciel Skype a été choisi. On considère que l'amortissement des téléchargements du logiciel se fait sur 100 réunions ($k_p = 1/100$), les dispositifs étant utilisés régulièrement entre deux mises à jour.

Peu de déplacements ont été effectués : 3,5 km en bus de ville pour deux des participants sont attribuables à la réunion.

4.1.3 Scénario C

Dans ce dernier scénario, les participants ont décidé d'effectuer la réunion par visio-conférence en se regroupant par localité. Elle se déroule donc en trois points différents, la communication est assurée par une instance du logiciel Jitsi sur laquelle sont connectés trois des cinq ordinateurs portables des participants. Le logiciel Jitsi étant embarqué dans le navigateur web, chaque participant a chargé la page web spécifiquement pour cette réunion ($k_p = 1$).

Les déplacements engendrés font moins de 10 km : deux des participants se déplacent en vélo ; un autre effectue 3,5 km en bus de ville ; un autre 5 km en tramway ; et ce sont 2 km avec sa voiture électrique professionnelle pour le dernier.

4.2 Analyse des résultats

Quelle que soit la catégorie d'impact définie par la méthode Impact2002+, les variations d'impact d'un scénario à l'autre sont très marquées : du simple à plus du double entre C et B, ainsi qu'entre B et A pour la qualité des écosystèmes, le changement climatique et les ressources (voir figure 2, page 6). Pour la santé humaine, l'écart reste important : B est 40 % moins impactant que le scénario A. Il n'y a donc pas de transfert d'impact.

En première analyse, le scénario A, qui comportait plus de transport que les deux autres est le plus impactant. Le scénario C, malgré divers transports urbains mobilisés, se révèle bien moins impactant que le B, caractérisé par ses dispositifs de téléprésence avancée.

4.2.1 Détail des contributions aux impacts par poste

La figure 3, à la page 7, offre le détail des contributions aux impacts par poste pour les trois scénarios étudiés. C'est sans surprise qu'avec un trajet régional, le transport compte pour environ 90 % des impacts du scénario A. À l'inverse, c'est le matériel qui représente l'écrasante majorité des impacts du scénario B. De plus, même si le scénario B est au global deux fois moins impactant que le scénario A, son matériel à lui-seul, équivaut à entre 55 % et 30 % de l'impact total du scénario A.

composantes	scénario A	scénario B	scénario C
nombre de participants	5		
durée	2h		
nombre de lieux de réunion	1	3	3
logiciel de visio-conférence	Skype		Jitsi
transport	100 km en train régional 20 km en voiture thermique 3 x 3,5 km en bus de ville 3 km à pied	2 x 3,5 km en bus de ville	3,5 km en bus de ville 5 km en tramway 2 km en voiture électrique 2 x 5 km en vélo
matériel	5 ordinateurs portables 1 vidéo-projecteur	3 ordinateurs portables 2 ordinateurs de bureau 2 kits de visio-conférence 4 écrans LCD de 107 cm de diagonale 2 structures métalliques pour écrans	5 ordinateurs portables

TABLE 1 : Description des trois scénarios de réunion

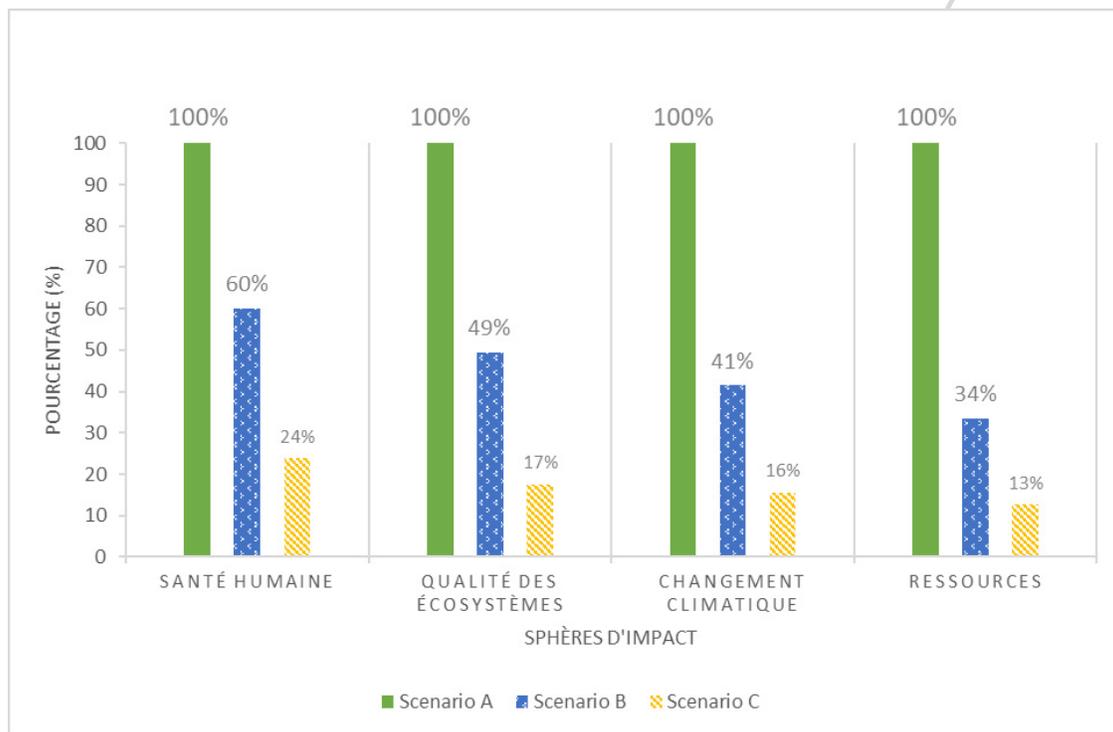


FIGURE 2 : Impacts comparés relatifs des scénarios de réunion

Le scénario C est largement moins impactant que les deux autres : 4 à 8 fois moins que le scénario A. Avec autant de points de réunion et de plus importants trajets urbains, son impact total est inférieur à l'impact du matériel du scénario B. La grande diversité de moyens de transports peut donc induire des différences d'impacts très importantes, même en ne parlant que des déplacements à une échelle régionale.

Nous voyons également la variété de dispositifs que recouvre le concept de matériel. Ils ont d'abord des impacts très différenciés : selon nos mesures et calculs, pour une même durée de réunion, un vidéo-projecteur est cinq fois plus impactant qu'un ordinateur portable. Cela est en partie expliqué par leurs fréquences d'utilisation différentes, 7 heures par jour pour un ordinateur portable et 3 heures par semaine pour un vidéo-projecteur.

Nous constatons aussi que l'impact du transfert de données générées par le logiciel, pour les scénarios où il est présent, est à chaque fois négligeable : selon les catégories d'impact et les scénarios son impact est de deux à quatre ordres de grandeur inférieur à ceux du matériel et des transports.

Finalement, la comparaison des contributions du matériel, du transfert de données et du transport aux impacts des scénarios montre la grande diversité des réalités qu'enveloppent les concepts de visio-conférence et de réunions.

4.2.2 Évolution des impacts selon la durée de réunion

Parmi les paramètres entrant en compte dans notre définition de l'impact d'une réunion, figure sa durée. L'objectif est donc maintenant d'étudier l'influence de ce facteur sur l'impact d'une réunion.

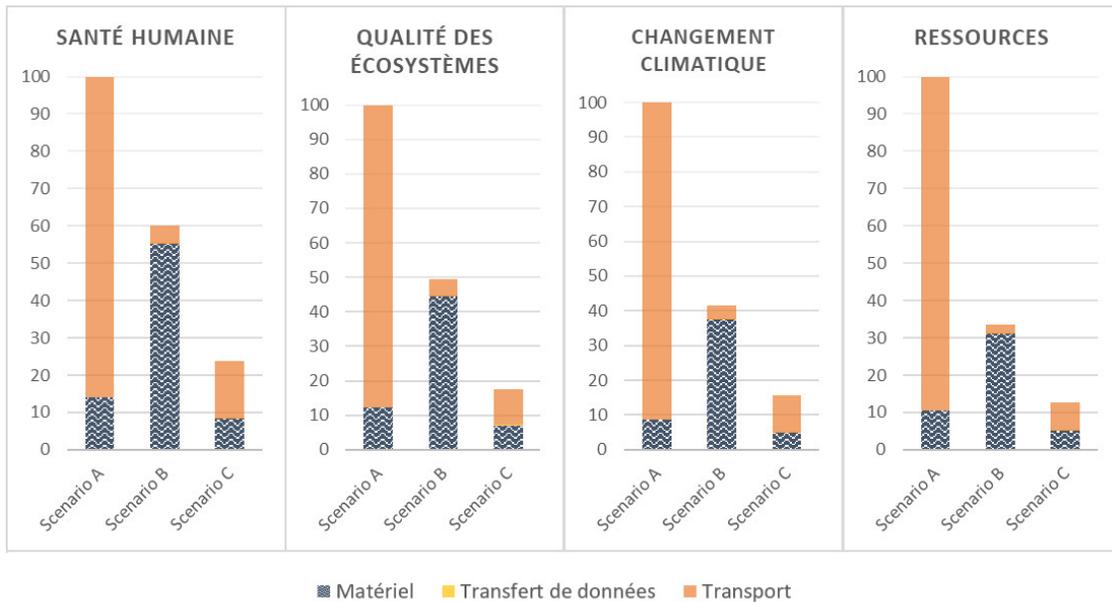


FIGURE 3 : Détails des postes d'impacts relatifs des scénarios de réunion

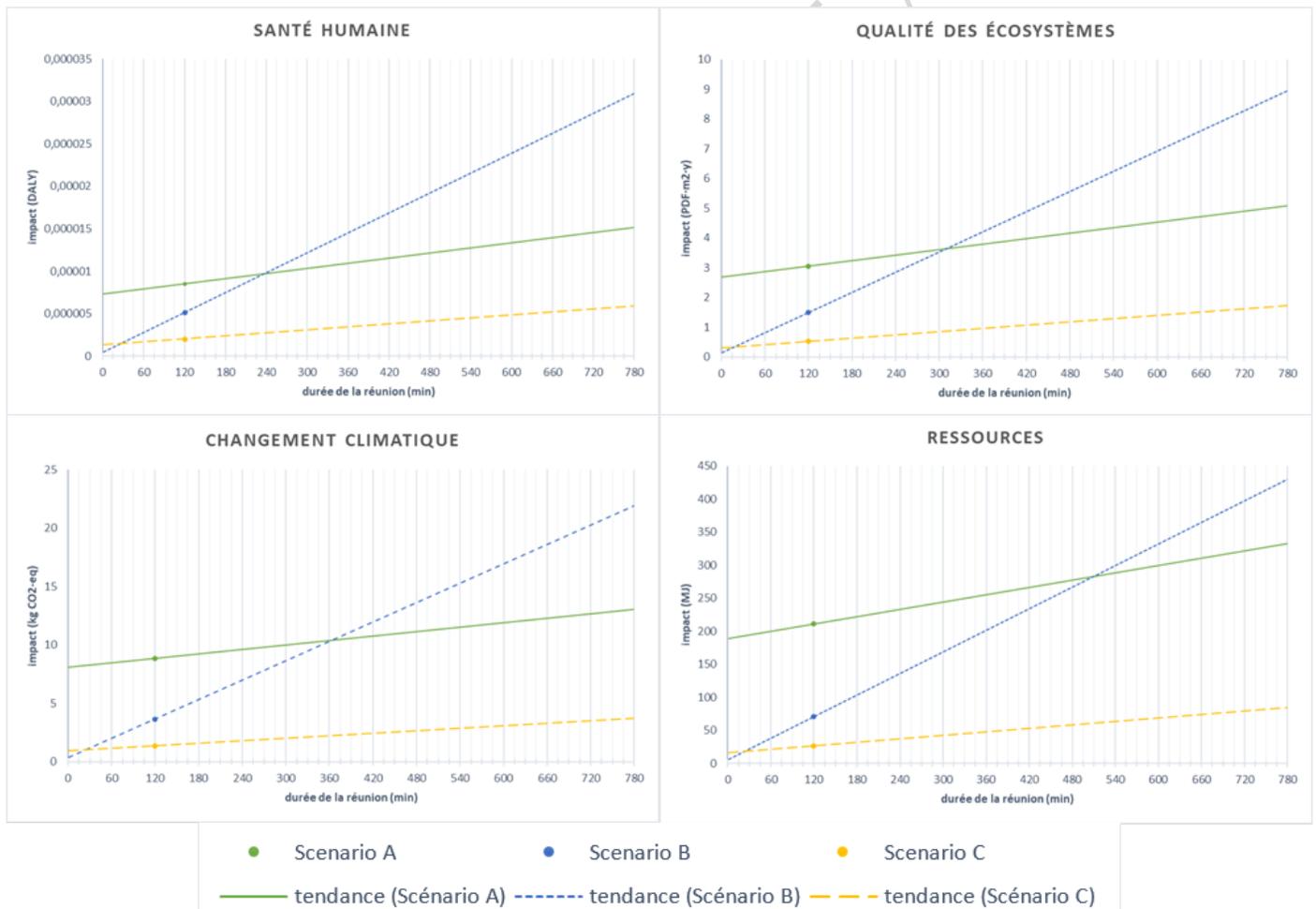


FIGURE 4 : Évolution de l'impact des trois scénarios selon la durée de la réunion

Nous constatons d'abord sur la figure 4, à la page 7, qu'au démarrage de la réunion (durée = 0 min), c'est le scé-

nario B qui affiche le plus faible impact. À ce stade, l'impact tient uniquement au transport et au téléchargement du logiciel. Or, comme l'illustre la figure 3, l'impact du transfert de données est négligeable devant les autres composantes d'une réunion. Le faible impact du scénario B au lancement de la réunion tient donc au fait que c'est le scénario le moins lourd en transport. À l'inverse, A affiche les plus hauts impacts.

Cependant, une fois la réunion lancée, c'est le scénario B qui finit par devenir le plus impactant. Ainsi, il dépasse d'abord le scénario A sur une première catégorie d'impact (santé humaine) à partir de 4h de réunion. Après 8h30 de réunion, il le dépasse pour les ressources et devient alors le scénario le plus impactant toutes catégories d'impact confondues. Ces points d'équilibre apparaissent beaucoup plus tôt avec le scénario C. En effet, 27 min de réunion suffisent pour que B devienne plus impactant sur toutes les catégories d'impact. Autrement dit, par rapport au scénario avec peu de transport mais beaucoup de matériel (B), notre scénario opposé (C) devient moins impactant dès 27 min de réunion.

En outre, quelle que soit la catégorie d'impact considérée, B est le scénario dont l'impact croît le plus rapidement avec l'allongement de la réunion. Ainsi que définit dans notre modèle d'évaluation (cf. section 3), le matériel et le transfert de données sont tous deux fonction du temps. Or, nous avons vu que B est le scénario qui doit la plus grande part de son impact au matériel, et pour toutes les catégories (cf. figure 3). Autrement dit, plus une réunion inclut de composants matériels, plus vite ses impacts augmenteront avec la durée de la réunion.

5 Discussion

5.1 Limites et potentiel de l'étude

5.1.1 Limites liées aux données

Pour chaque équipement matériel, nous avons dû affecter une durée de service. Or, cette dernière peut grandement faire varier leur impact hors-fonctionnement (cf. 3.2.1). Ainsi, pour tous les équipements que nous avons considérés comme étant exclusivement utilisés pour des visio-conférences (par exemple vidéo-projecteur, micro ou écran TV), nous avons choisi une fréquence d'utilisation de 3h par semaine et un renouvellement tous les 5 ans (cf. 8.2). Pour se rendre compte des variations d'impact suivant la fréquence d'utilisation de ces équipements, nous avons créé deux variantes du scénario B : un scénario B' où la durée de fonctionnement des équipements dédiés à la visio-conférence (tous, sauf les ordinateurs portables) est fixée à 1h par semaine, et un scénario B'' à 20h par semaine. Les résultats illustrés par la figure 5, à la page 9, montrent que le scénario B est presque deux fois moins impactant que B'', et seulement 20 % plus impactant que B'. Autrement dit, l'impact d'équipements sous-utilisés (1h par semaine) est réduit de moitié en les utilisant 3h par semaine. Nous comparons à présent les alternatives au scénario B avec nos deux autres scénarios de départ (cf. figure 6, page 10). Nous pouvons voir que si ses équipements dédiés à la visio-conférence sont utili-

sés 20h par semaine, le scénario B devient moins impactant que le A sur la santé humaine et la qualité des écosystèmes après respectivement 10h et 12h de réunion. En augmentant la fréquence d'utilisation de ses équipements, on constate donc une relative diminution de l'impact du scénario impliquant le plus de matériel (B) par rapport à celui mobilisant le plus de transport (A).

Pour calculer l'impact hors-fonctionnement des composants matériels, nous avons, quand ils étaient disponibles, utilisé des composants de la base EcoInvent (3.3.1). Certaines références demanderaient à être actualisées. Par exemple, pour l'ordinateur de bureau, nous ne disposons que d'un composant de 11.3 kg (modèle Mandax Pentium 4, 2002), loin des caractéristiques des modèles contemporains. Néanmoins dans un jeu de données de 2020 compilant des références de 25 produits électroniques courants les deux références les plus récentes sont un modèle de 2009 (HP Compaq 6000) de plus de 9,5 kg et un de 2010 (Dell Optiplex 780 ultra small form factor) de moins de 3 kg (BABBITT et al. 2020). Ces exemples confirment la grande hétérogénéité des potentiels équipements utilisés pour une visio-conférence, et donc de leurs impacts.

Toujours concernant le matériel, nous ne disposons de l'impact lié à la veille que pour certains équipements (écran d'ordinateur, projecteur et dispositif de téléprésence avancée). Ces équipements sont donc désavantagés par rapport aux autres, leur impact étant alourdi par la prise en compte de la veille. Cette incomplétude oblige pour l'instant à considérer avec du recul les comparaisons sur l'impact dû au matériel entre deux scénarios.

Pour calculer l'impact du transfert de données lors du fonctionnement du logiciel, il est nécessaire de connaître l'impact du réseau par lequel transitent les données. Idéalement, il faudrait donc savoir précisément, en fonction du logiciel et de la localisation des participants, quelles infrastructures (data-centers, câbles sous-marins, etc.) sont mobilisées. Devant la difficulté d'accéder à un tel niveau de précision, nous avons dû nous contenter d'estimer l'impact du réseau à partir de son intensité énergétique (cf. 3.2.2 et 3.3.2), qui ne prend en compte que la phase d'utilisation du réseau. En outre, cet indicateur semble être très variable selon la localisation. Une étude suédoise (BORGGREN et al. 2013, p. 131) s'était ainsi basée sur une valeur de 0,42 kWh/Go pour la Suède en 2008, et relevait une autre étude, américaine cette fois-ci, qui avançait 3,5 kWh/Go pour les États-Unis en 2010. Nous avons utilisé une moyenne mondiale (ONG, MOORS et SIVARAMAN 2014, p. 87) pour 2010, qui fournit une estimation basse à 2,17 kWh/Go et haute à 3,61 kWh/Go. Nos calculs ont été réalisés avec l'estimation haute. Une valeur plus récente serait sans-doute plus faible, mais ne ferait que diminuer l'impact du transfert de données, déjà insignifiant dans nos résultats. Comme décrit précédemment, cette intensité énergétique est multipliée par la quantité de données transférées pendant la réunion, puis par l'impact de la production d'un kilowattheure avec le mix électrique français. Comme l'ont fait d'autres études (BORGGREN et al. 2013), notre choix du mix local traduit le fait que nos scénarios de réunion sont supposés se dérouler en France. On retrouve ici le problème d'incertitude sur le

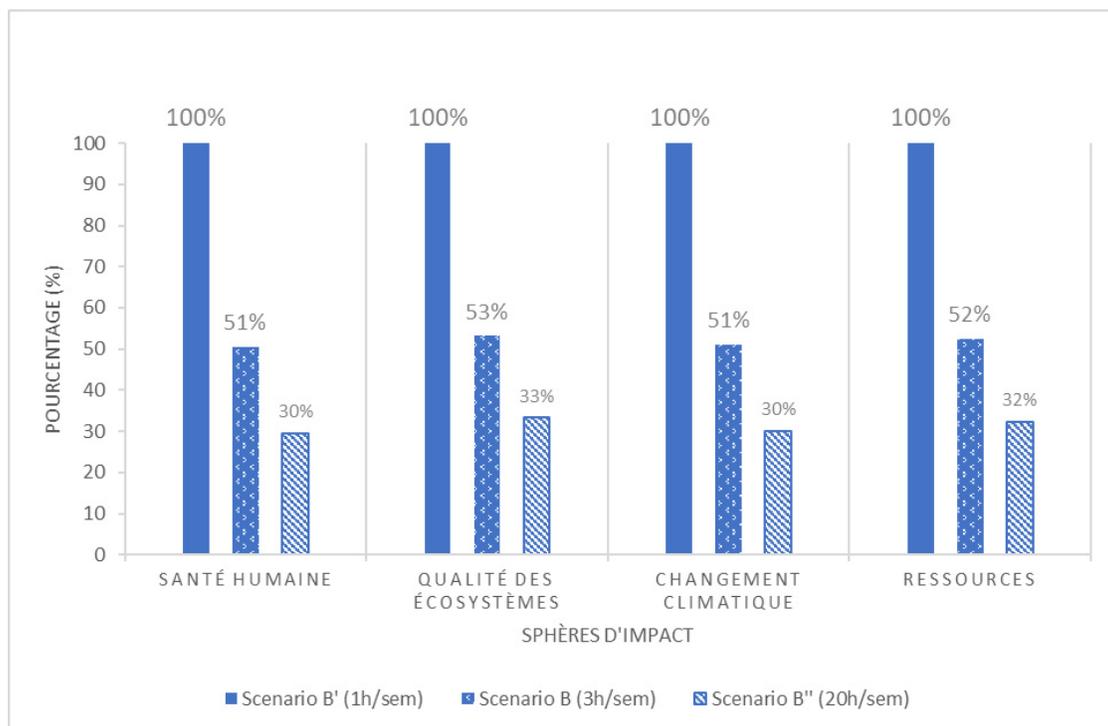


FIGURE 5 : Impacts comparés relatifs des variantes du scénario B

chemin emprunté par les données. Même si les participants sont en France, les données échangées passent très probablement entre plusieurs continents, mobilisant des sources d'énergie sans doute très hétérogènes. Une étude de sensibilité aurait donc pu être réalisée avec le mix européen, voire mondial.

Les données sur le transport sont issues de la base EcoInvent 3.4. Pour la voiture à moteur thermique, nous avons choisi un composant représentant la moyenne européenne de l'impact d'un kilomètre pour des voitures de différentes tailles, normes pollution et type de carburant (cf. 3). Néanmoins les impacts de ces différents modèles peuvent être très différents, variant presque du simple au double entre une petite voiture essence norme Euro 5, et une grosse voiture essence norme Euro 3. Nous aurions ainsi pu inclure dans nos données plusieurs types de voiture, plutôt qu'un processus réalisant une moyenne.

5.1.2 Limites des scénarios

Il a été montré à plusieurs reprises dans la littérature qu'une réunion en présentiel impliquant des déplacements sur de grandes distances est largement plus impactante que son pendant en visio-conférence (COROAMA, HILTHY et BIRTEL 2012; BORGGREN et al. 2013; ONG, MOORS et SIVARAMAN 2012; ONG, MOORS et SIVARAMAN 2014; ARNFALK et al. 2015). Nous avons donc fait le choix d'exclure les déplacements sur de longues distances. En effet, si pour le scénario A, nous remplaçons les 100 km de train régional par ne serait-ce que par 600 km de vol en avion de ligne, les impacts globaux seraient de 4 à 12 fois plus élevés que ceux du scénario initial, selon la catégorie d'impact considérée (cf. figure 7, page 11). Un tel scénario A' serait de loin plus

impactant que les autres.

Nos résultats indiquent qu'à partir de 27 minutes le scénario C est celui dont les impacts sont moindres. Nonobstant ces résultats clairs, les impacts de ce scénario proviennent à la fois du matériel, du transfert de données et des transports. En effet, ce scénario est hybride : les participants se regroupent à plusieurs endroits pour réaliser une visio-conférence. Nous sommes à la fois dans un mode présentiel et avec une médiation numérique. Il nous est difficile de savoir que préférer entre réaliser la réunion complètement en téléprésence (scénario C') avec aucun déplacement, ou, si les participants se trouvent dans la même ville, se retrouver pour faire la réunion au même endroit (scénario C''). Une rapide analyse de ces deux variations du scénario C semble indiquer que pour nos deux heures de réunion, C' serait moitié moins impactant (cf. figure 8). Néanmoins, un transfert d'impact s'opère lorsque cette durée augmente significativement (cf. figure 9). Il est intéressant d'observer que c'est l'usage des ordinateurs portables qui est le seul facteur non négligeable de l'augmentation des impacts en fonction du temps et que les impacts dont ils sont responsables tendent à être prépondérants. Le croisement des impacts des deux scénarios en fonction du temps est donc lié au fait que nous avons assumé que pour C'', il n'était plus nécessaire que chaque participant ait besoin de son ordinateur portable : nous n'en n'avons gardé, dans ce scénario, qu'un pour présenter un éventuel diaporama et un pour la prise du compte-rendu.

Ainsi, il n'y a pas de réponse simple entre préférer se déplacer sur de faibles distances ou rester chez soi et participer à la réunion derrière son écran d'ordinateur portable. Si pour C' et C'', il est préférable d'opter pour la téléprésence.

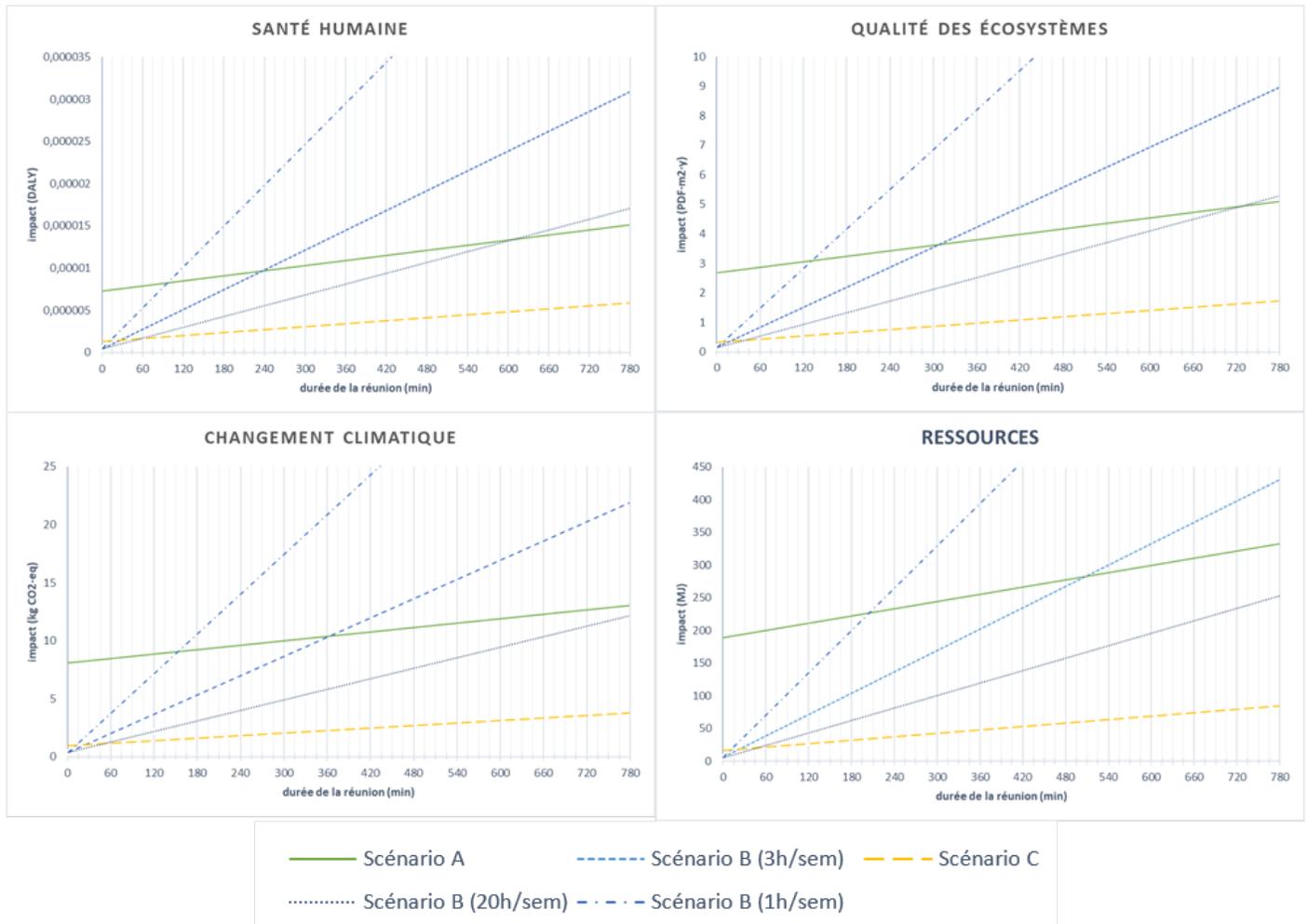


FIGURE 6 : Évolution de l'impact selon la durée de la réunion avec variantes scénario B

sence, il en serait tout à fait autrement si tous les participants étaient venus à pied ou en vélo. Le scénario C est lui-même plus impactant que ses deux alternatives, car tous les participants, en plus de se déplacer, font usage de leur ordinateur portable.⁴

5.1.3 Limites de la méthode proposée

Notre méthode exclut certaines données. L'immobilier et le mobilier nécessaires à une réunion ne sont pas pris en compte. Nous avons fait l'hypothèse que le coût du mobilier était négligeable car réparti sur un grand nombre d'utilisations. Disposer d'une étude sur l'allocation de l'impact environnemental d'un bâtiment à ses utilisations permettrait de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse. Les impacts du mobilier, du chauffage, de l'éclairage et de la climatisation peuvent paraître moins négligeables dans le cas de salles dédiées uniquement à la visio-conférence ou aux réunions. Sans grande difficulté, notre méthode pourrait être enrichie pour les comptabiliser.

Au prix d'un élargissement, notre méthode pourrait

prendre en compte les préparatifs d'une réunion : les multiples envois de mails, les impressions de documents, voire le temps de travail nécessaire à la préparation de la réunion ou le café servi pendant celle-ci.

Le coût du développement du logiciel est lui aussi exclu. Une étude à part entière serait à mener pour en connaître l'impact environnemental, néanmoins nous supposons qu'il est négligeable car réparti sur un très grand nombre d'heures de visio-conférence.

Cette étude pourrait en outre être enrichie en étudiant l'influence du réseau utilisé sur l'impact du transfert de données. Toutes les mesures ont ici été réalisées sur un ordinateur connecté en Wi-Fi, mais il serait intéressant d'avoir des résultats avec un réseau mobile et filaire.

Notre méthode a pour ambition d'informer le choix d'un scénario de réunion parmi d'autres en montrant leurs différences d'impact environnemental. Cependant, son usage comme outil de pilotage opérationnel est limité. La durée de vie des éléments matériels qui sert à calculer la répartition de leurs impacts à une réunion donnée est par exemple le fruit d'une hypothèse. Or, pour calculer, non pas exacte-

⁴Ainsi que noté dans la section 5.1.1, les données d'impact dont nous disposons pour les ordinateurs sont certainement défavorables par rapport à la réalité, en raison de leur ancienneté. Les résultats dont nous discutons seraient donc certainement plus faibles en conditions réelles. C'est d'ailleurs sans parler du cas où le matériel utilisé serait de seconde main, c'est-à-dire encore moins impactant dans notre modélisation.

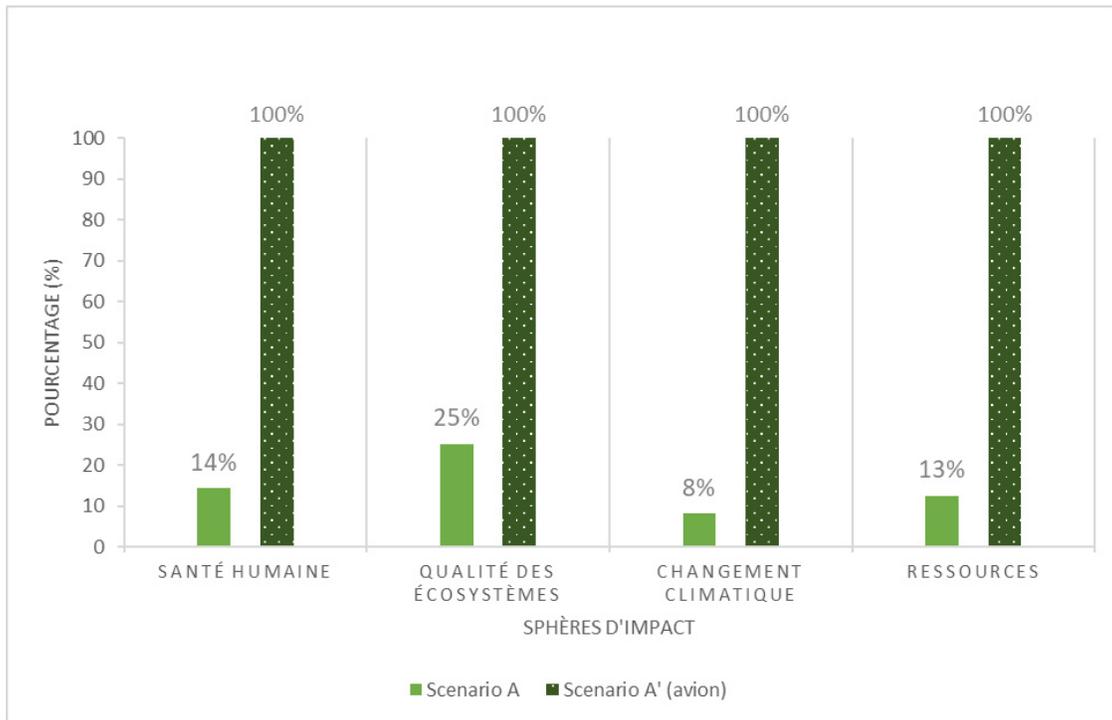


FIGURE 7 : Impacts comparés relatifs du scénario A et d'un scénario A avec un trajet aérien moyen courrier

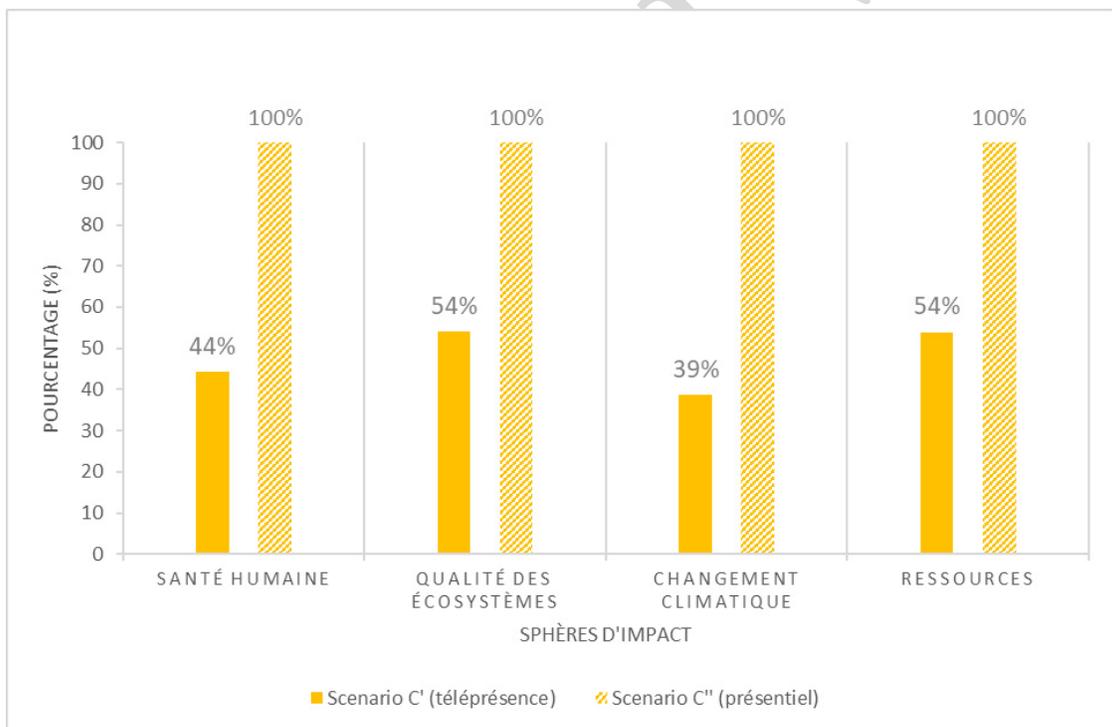


FIGURE 8 : Impacts comparés relatifs des scénarios C' et C''

ment, mais plus précisément l'impact d'un élément matériel, il faudrait connaître sa durée de vie réelle, ce qui n'est possible que plusieurs années après que la réunion ait eu lieu. Il en va de même avec le nombre de réunions sur lesquelles est amorti le téléchargement d'un logiciel. Informer le choix en amont nécessite donc des simplifications.

Enfin, notre méthode sous-entend qu'une visio-

conférence est strictement comparable à une réunion en présentiel. Or, une réunion virtuelle est souvent perturbée par des problèmes de connexion, une mauvaise qualité d'image et de son, l'impossibilité de se regarder dans les yeux ou encore par l'absence de langage corporel (SACASAS 2020). Certains auteurs proposent une quantification de cette perte de temps due à la visio-conférence (ONG, MOORS

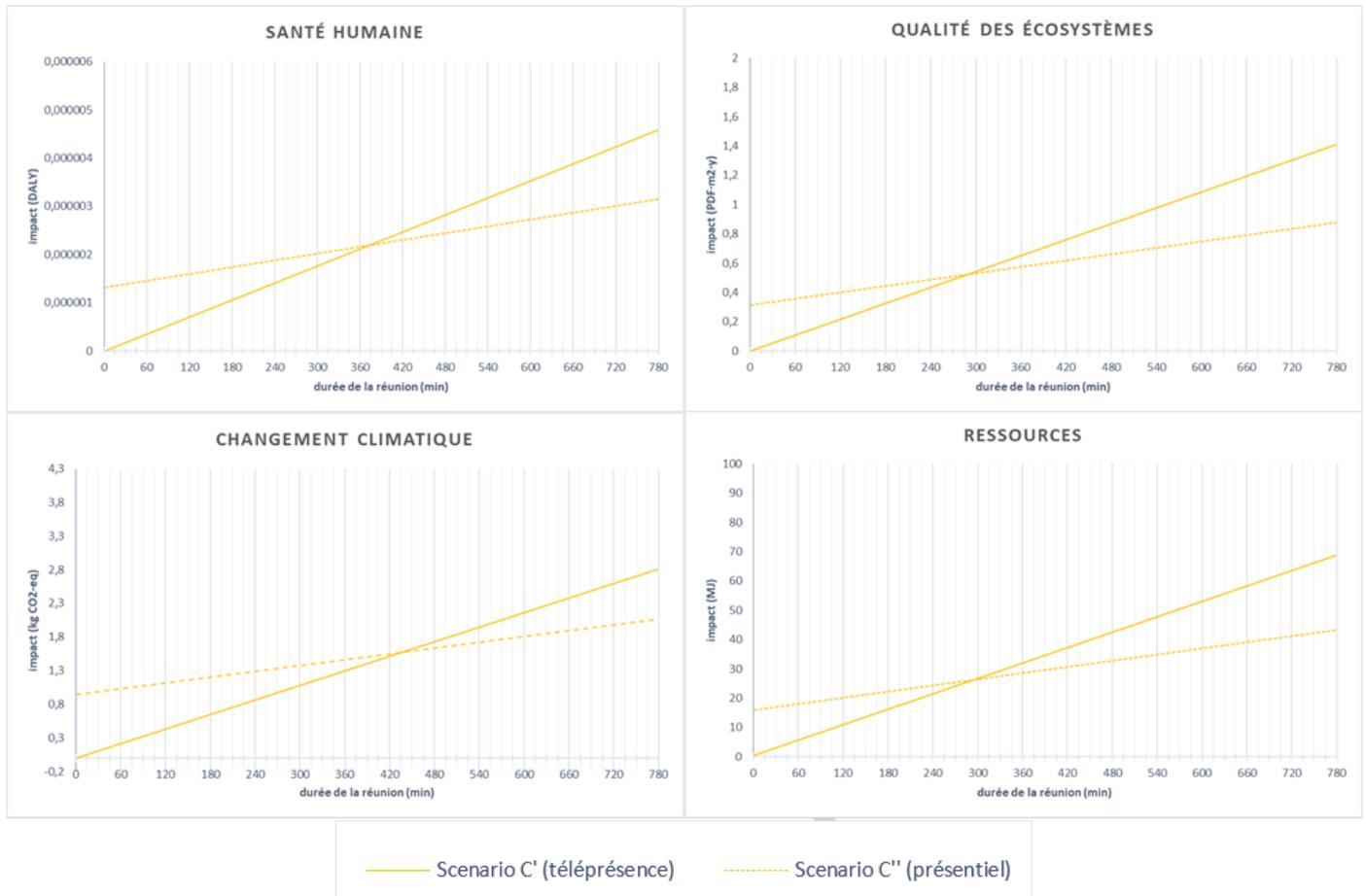


FIGURE 9 : Évolution de l'impact selon la durée de la réunion des scénarios C alternatifs

et SIVARAMAN 2014). Ils appliquent à la durée de la réunion un facteur multiplicatif lors de réunions virtuelles. D'après leurs estimations, celui-ci est compris entre 1 pour un dispositif de téléprésence avancée et 2,5 pour un simple ordinateur, il dépend du matériel utilisé. Un tel facteur pourrait être aisément ajouté à notre modèle. Il faudrait lier un coefficient multiplicateur de la durée à chaque appareil utilisé pour une visio-conférence — et éventuellement effectuer une pondération entre différents coefficients si les plusieurs types de matériels sont utilisés pour la réunion.

6 Perspectives

Notre étude porte sur un objet précis : l'évaluation environnementale de réunions. Or, celui-ci est lié à d'autres dimensions qui mériteraient d'être examinées et prises en compte. En particulier, des études pourraient être menées afin d'anticiper et de connaître les impacts de la diffusion toujours plus large du numérique.

6.1 Effets rebond et effets de seuil

La massification du numérique pourrait par exemple causer des effets rebond. Or, ceux-ci ne sont que peu pris en compte dans l'étude environnementale du numérique, surtout lorsqu'ils prennent place dans un temps long et un espace élargi

(GOSSART 2015 ; LANGE, POHL et SANTARIUS 2020). Les occuper peut conduire à des résultats faussés : « si les technologies numériques ont effectivement un haut rendement énergétique, leur avantage environnemental pourrait être absorbé par des effets rebond jouant à l'échelle de l'économie globale, du fait qu'elles sont des technologies à usage général (*general purpose technologies*) (GOSSART 2015, p. 443) ». En particulier, une étude à l'échelle nationale et régionale (JOYCE et al. 2019) tend à montrer que la généralisation du numérique peut entraîner une diminution de ses impacts environnementaux grâce à des effets rebond. Cependant, une synthèse à l'échelle mondiale (LANGE, POHL et SANTARIUS 2020) suggère l'inverse, à savoir que la numérisation grandissante entraîne une augmentation globale de la consommation d'énergie. Plus précisément, on constate une augmentation de la consommation d'énergie due (i) à la fabrication, l'utilisation et au traitement de fin de vie des appareils numériques, (ii) à la croissance économique engendrée par le numérique. Ces deux effets viennent compenser les impacts environnementaux positifs dus à l'amélioration de l'efficacité énergétique et à la tertiarisation engendrés par le numérique. Il y a fort à parier que ce qui est constaté pour la consommation d'énergie est aussi valable pour la consommation de métaux ou d'eau, ou tout autre indicateur mobilisé lors d'ACV.

La généralisation du numérique peut aussi amener à des

effets de seuil, comme l'illustre le cas de la 5G. Son déploiement peut apparaître comme un changement uniquement quantitatif — augmenter le débit et le nombre d'appareils connectés — mais il constitue en réalité un saut qualitatif. En plus de nécessiter le renouvellement des infrastructures et des terminaux actuels, elle permettra par exemple le déploiement des voitures autonomes et la massification des objets connectés. Ces dispositifs créeront en retour de nouveaux usages, de nouveaux terminaux et de nouvelles infrastructures. Il est de plus assez probable qu'ils causent à terme un redimensionnement du réseau et entraînant un nouvel effet de seuil (CURRAN 2020).

6.2 Évolution des usages du numérique

Avec l'augmentation du trafic internet global (IEA 2020), plus soutenue que celle de sa consommation globale d'énergie, on peut s'attendre à ce que l'intensité énergétique du transfert de données en ligne continue de décroître (BOLLA et al. 2011), d'autant plus avec le déploiement des nouvelles technologies de réseaux mobiles⁵. Or, nous l'avons montré, l'impact lié au transfert de données durant une réunion est déjà complètement négligeable par rapport aux autres sources d'impact. Il apparaît donc que les études comparatives entre logiciels de visio-conférence pour savoir lequel utiliser afin de réduire son impact environnemental (GREENSPECTOR 2020) se focalisent sur une dimension peu significative du problème, aujourd'hui déjà, selon nos résultats, et demain encore plus au vu de la conjoncture.

Un gain d'efficacité qui pourrait se révéler avoir plus d'incidence sur l'impact global d'une réunion est celui qui pourrait être fait sur les transports, notamment lorsque les distances sont trop importantes pour l'utilisation de modes de transport doux.

Par ailleurs, il semble que les dispositifs avancés de visio-conférence se banalisent dans les organisations et que nous assistions à une acculturation rapide à la téléprésence. Quelques signaux laissent penser au franchissement d'un seuil dans cette acculturation : à la veille du premier déconfinement en France, PSA, un des plus gros constructeurs automobiles au monde, a annoncé vouloir faire du télétravail la « référence » pour ses employés dans le tertiaire, le commercial et la recherche-développement. 80 000 d'entre eux (sur 200 000 au total) seraient appelés à passer à une présence sur site d'une à une journée et demie par semaine d'ici

l'été (COLET 2020). Ce genre d'évolution laisse craindre des effets rebond et effets de seuil à moyen et long termes (cf. section 6.1).

Davantage d'évaluations environnementales multicritère doivent toutefois être réalisées à propos des technologies numériques et des infrastructures réseaux. Il y a besoin de méthodes d'évaluations plus poussées et de données en libre accès pour mieux cerner leurs impacts et permettre un débat de société mieux éclairé sur les orientations à donner aux transitions numériques et écologiques.

À ce propos, l'analyse environnementale ne représente qu'un seul des aspects à considérer sur la place de la visio-conférence dans nos organisations contemporaines. En effet, nous l'avons évoqué précédemment, son usage prolongé engendrerait une fatigue supplémentaire, liée entre autres aux décalages son-image et à la réduction significative de la communication non verbale (JIANG 2020).

7 Conclusion

Cette étude a présenté une méthode d'évaluation environnementale de réunion, prenant en compte le plus possible d'étapes du cycle de vie, ainsi qu'une application à plusieurs cas concrets. Nos résultats indiquent que la téléprésence n'est pas toujours préférable au mode présentiel d'un point de vue environnemental.

La visio-conférence est moins impactante pour tous les indicateurs étudiés qu'une réunion ayant nécessité des déplacements nationaux ou internationaux. Lorsque des dispositifs de téléprésence avancée sont utilisés et qu'il s'agit de déplacements régionaux et inter-urbains, cela se montre variable et des transferts d'impact peuvent s'opérer en fonction de la durée de la réunion. Face à ces différents cas de figure, le moins impactant est soit d'effectuer une réunion en présentiel impliquant des déplacements urbains (autosolisme exclu), soit une visio-conférence où chaque participant n'utiliserait que son ordinateur portable ou autre équipement numérique « léger ». Il nous semble dès lors intéressant de développer et promouvoir des outils d'aide à la décision permettant de simuler des variations de scénarios de réunion pour en comprendre les différences d'impacts (c'est dans cette optique que nous avons créé et qu'est en train d'être développé l'*impactomètre*⁶, qui permet de réaliser ses propres applications de la méthode qui nous détaillons dans cet article).

⁵La plupart de l'électricité consommée par les infrastructures réseaux provient des réseaux téléphoniques de transmission de données. Ces réseaux basculent justement rapidement sur la 4G et la 5G, bien plus efficaces pour transmettre une même quantité de données que les générations précédentes — la 4G est plus de 50 fois plus efficace que la 2G. Cependant, le but premier de ces déploiements est de permettre le transfert de plus gros volumes de données (IEA 2019).

⁶Disponible à cette adresse : <https://impactometre.fr/>.

Références

- ADEME (2017a). *Plan de déplacement administration (PDA) de Quimper Communauté*. Consulté le 15/10/2019. URL : <https://bretagne.ademe.fr/sites/default/files/plan-deplacements-administration-quimper-communaute.pdf>.
- (2017b). *Plan de déplacement entreprise (PDE) de la Banque de France (75)*. Consulté le 15/10/2019. URL : <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/eas-pde-plan-deplacements-entreprises-banque-de-france-transport-010147.pdf>.
- (2018). *La face cachée du numérique. Réduire les impacts du numérique sur l'environnement*. Rapport technique. ADEME.
- ARNFALK, Peter et al. (2015). "Green IT in practice : virtual meetings in Swedish public agencies". In : *Journal of Cleaner Production* 123, p. 101-112.
- BABBITT, Callie W. et al. (avr. 2020). "Material composition of consumer electronics". In : DOI : 10.6084/m9.figshare.11306792.v3. URL : https://figshare.com/articles/Material_composition_of_consumer_electronics/11306792.
- BOFFY, William et Jules FARJAS (nov. 2019). "Évaluation environnementale qualitative des technologies dématérialisées : illustration par le streaming musical". URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02357942>.
- BOLLA, R. et al. (2011). "Energy Efficiency in the Future Internet : A Survey of Existing Approaches and Trends in Energy-Aware Fixed Network Infrastructures". In : *IEEE Communications Surveys Tutorials* 13.2, p. 223-244.
- BORGGREN, Clara et al. (2013). "Business meetings at a distance – decreasing greenhouse gas emissions and cumulative energy demand?" In : *Journal of Cleaner Production* 41, p. 126-139.
- CARNINO, Guillaume et Clément MARQUET (2018). "Les datacenters enfoncent le cloud : enjeux politiques et impacts environnementaux d'internet". In : *Zilsel* 3, p. 19-62. DOI : 10.3917/zil.003.0019.
- CHEUNG, Chui Wan, Markus BERGER et Matthias FINKBEINER (2018). "Comparative life cycle assessment of re-use and replacement for video projectors". In : *The International Journal of Life Cycle Assessment* 23, p. 82-94.
- COLET, Valérie (juin 2020). "Coronavirus : PSA compte adopter le télétravail comme règle générale". In : *Le Figaro*. Consulté le : 10/05/2020.
- COROAMA, Vlad C., Lorenz M. HILTY et Martin BIRTEL (2012). "Effects of Internet-based multiple-site conferences on greenhouse gas emissions". In : *Telematics and Informatics* 29, p. 362-374.
- CURRAN, Claire (30 janvier 2020). *What Will 5G Mean For the Environment?* Consulté le 10/05/2020. URL : <https://jsis.washington.edu/news/what-will-5g-mean-for-the-environment/>.
- DATAREPORTAL (2019). *Digital 2019 : Global Digital Overview*. Rapp. tech. Consulté le : 07/03/2020.
- DIGUET, Cécile et Fanny LOPEZ (DIR.) (2019). *L'impact spatial et énergétique des data centers sur les territoires*. Rapport ADEME 666/1999. ADEME.
- DOUGS (2019). *Quel est le nombre de jours travaillés en 2020?* Consulté le 15/10/2019. URL : <https://www.dougs.fr/blog/quel-est-le-nombre-de-jours-travailles-en-2020/>.
- GOSSART, Cédric (2015). "Rebound Effects and ICT : A Review of the Literature". In : *ICT Innovations for Sustainability*. Sous la dir. de Lorenz M. HILTY et Bernard AEBISCHER. Cham : Springer International Publishing, p. 435-448. ISBN : 978-3-319-09228-7.
- GREENSPECTOR (2020). *Quelle application mobile de visioconférence pour réduire votre impact?* Consulté le 10/05/20. URL : <https://greenspector.com/fr/quelle-application-mobile-de-visioconference-pour-reduire-votre-impact/>.
- HALL, Arthur D. (1964). "Developing PICTUREPHONE Service". In : *Bell Telephone magazine* Spring 1964, p. 14-21.
- Hangouts (2019). Consulté le 15/10/2019. URL : <https://support.google.com/hangouts/answer/2944865?hl=fr>.
- IEA (2019). *Tracking Buildings*. Consulté le 10/05/20. URL : <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings>.
- (2020). *Digitalisation. Making energy systems more connected, efficient, resilient and sustainable*. Consulté le 10/05/20. URL : <https://www.iea.org/topics/digitalisation>.
- ISO 14040 (juil. 2006). *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. Standard. Genève, ch : International Organization for Standardization.
- ISO 14044 (juil. 2006). *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. Standard. Genève : International Organization for Standardization.
- JIANG, Manyu (22 avril 2020). "The reason Zoom calls drain your energy". In : *BBC*. Consulté le : 05/05/2020.
- JOLLIET, Olivier et al. (2003). "Impact 2002 : A new life cycle impact assessment methodology". In : *The International Journal of Life Cycle Assessment* 8.6, p. 324-330. DOI : 10.1007/bf02978505.
- JOYCE, P. James et al. (2019). "A multi-impact analysis of changing ICT consumption patterns for Sweden and the EU : Indirect rebound effects and evidence of decoupling". In : *Journal of Cleaner Production* 211, p. 1154-1161.
- LANGE, Steffen, Johanna POHL et Tilman SANTARIUS (2020). "Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand?" In : *Ecological Economics* 176.

- MINISTÈRE DU TRAVAIL (16 mars 2020). *Coronavirus — COVID-19 et monde du Travail*. Communiqué de presse. Consulté le : 03/05/2020.
- OLOGEANU, Roxana (2001). “Visioconférence dans l’enseignement supérieur : expérimentations et usages”. In : *Les Enjeux de l’information et de la communication 2001*, p. 70-82.
- ONG, Dennis, Tim MOORS et Vijay SIVARAMAN (2012). “Complete life-cycle assessment of the energy/CO2 costs of videoconferencing vs face-to-face meetings”. In : *IEEE Online Conference on Green Communications (GreenCom)*, p. 50-55.
- (2014). “Comparison of the energy, carbon and time costs of videoconferencing and in-person meetings”. In : *Computer Communications* 50, p. 86-94.
- PHILIPS (2019). *Présentation écran Philips BDL4220QL/00*. Consulté le 15/10/2019. URL : https://www.philips.fr/c-p/BDL4220QL_00/signage-solutions-ecran-q-line.
- Renaviso (2019). Consulté le 07/03/20. URL : <https://www.renater.fr/fr/RENAvisio>.
- Rendez-vous (2019). Consulté le 07/03/20. URL : <https://www.renater.fr/fr/RENDEZ-VOUS>.
- SACASAS, Michael (21 avril 2020). *A Theory of Zoom Fatigue*. Consulté le 12/05/2020. URL : <https://theconvivialsociety.substack.com/p/a-theory-of-zoom-fatigue>.
- Skype (2019). Consulté le 15/10/2019. URL : <https://support.skype.com/fr/faq/FA1417/quelle-est-la-quantite-de-bande-passante-necessaire-a-skype>.
- TINETTI, B. et al. (2016). *Potentiel de contribution du numérique à la réduction des impacts environnementaux : État des lieux et enjeux pour la prospective – Rapport Final ADEME*. Rapport ADEME. ADEME.

8 Annexes

8.1 Sources pour les calculs d'impacts

Le tableau 3 détaille les sources et les valeurs d'impact de chaque élément pris en compte dans l'étude. Lorsqu'elles proviennent d'un article, la référence de celui-ci est donnée.

Dans la section réservée au matériel, les impacts en fonctionnement et en veille ont été obtenus en multipliant, pour chaque catégorie d'impact, l'impact d'un kilowattheure selon le mix électrique français par l'énergie consommée en une minute par l'appareil considéré. Cette dernière consommation a été calculée grâce à la puissance consommée par l'élément en un temps donné, grâce à un wattmètre et un chronomètre. En l'absence de citation d'une source, la puissance indiquée est issue de nos propres mesures. Pour plusieurs composants, la mesure en fonctionnement ou en veille n'apparaît pas. Soit elle n'a pas été réalisée (par exemple pour les câbles), soit elle est considérée comme intégrée dans l'impact d'un autre composant (par exemple la consommation de la souris et du clavier intégrées dans celle de la tour).

Les impacts du transfert de données sont calculés, pour chaque logiciel, grâce à la borne supérieure de la valeur de l'intensité énergétique du réseau — aussi disponible dans le tableau — et aux quantités de données téléchargées dont les sources sont mentionnées. Le nombre de points de réunion et la vitesse de téléchargement des données, correspondant à la qualité de la bande passante entrante, sont aussi indiquées. Les impacts du transfert de données lors de l'utilisation des logiciels, hors téléchargement préalable ou accès à la visio-conférence, sont données pour une minute d'utilisation. La source des données de chaque logiciel est donnée et la mention « mesure » signifie que la quantité de données a été mesurée par nos soins grâce à la console du navigateur Mozilla Firefox ou au terminal d'Ubuntu.

La partie consacrée aux transports indique si les impacts sont fournis pour un kilomètre ou pour un personne-kilomètre.

La dernière section du tableau regroupe les éléments qui ont permis le calcul de certains impacts : l'intensité énergétique du réseau pour un kilobit, le mix électrique français pour un kilowattheure et un gramme de tour d'ordinateur.

8.2 Durées de service

La durée de service des équipements est utilisée pour calculer l'impact hors-fonctionnement des composants matériels (cf. 3.2.1). Cette valeur est connue pour un équipement, l'écran de télévision : nous utilisons la MTBF (*Mean Time Between Failures*) renseignée pour un écran Philips, à savoir 50 000 heures (PHILIPS 2019). Pour les autres équipements, nous calculons la durée de service à partir de sa fréquence d'utilisation journalière, du nombre de jours travaillés dans une année et de la durée de vie de l'équipement.

Pour la fréquence d'utilisation, nous faisons une distinction entre les équipements considérés comme spécifiques à la visio-conférence (par exemple un vidéo-projecteur) et les autres (par exemple un ordinateur portable). Pour les premiers, nous fixons une valeur de 3h par semaine d'utilisation, fondée sur le taux d'utilisation des salles de réunion dédiées à la visio-conférence à l'Université de Technologie de Compiègne (UTC), où nous avons réalisé notre étude. Pour les autres équipements, nous choisissons 7h par jour d'utilisation, soit le volume horaire journalier d'une semaine salariée de 35 heures.

Le nombre de jours travaillés est fixé à 230, qui correspond au total pour la France en 2020 (DOUGS 2019).

Pour la durée de vie, nous fixons une valeur de 20 ans pour les câbles et leurs prises. Nous assimilons la durée de vie des autres équipements à celle de l'ordinateur de bureau, à savoir 5 ans. Cette valeur correspond à la fréquence de renouvellement de l'équipement informatique de l'Université de Technologie de Compiègne.

8.3 Impacts des scénarios étudiés

Scénario	Catégorie d'impact			
	Santé humaine (DALY)	Qualité des écosystèmes (PDF · m ² · y)	Changement climatique (kg CO ₂ – eq)	Ressources (MJ primaire)
A	$8,51 \cdot 10^{-6}$	3,05	8,84	$2,11 \cdot 10^2$
A'	$5,95 \cdot 10^{-5}$	$1,21 \cdot 10^1$	$1,08 \cdot 10^2$	$1,68 \cdot 10^3$
B	$5,12 \cdot 10^{-6}$	1,51	3,66	$7,08 \cdot 10^1$
B'	$1,01 \cdot 10^{-5}$	2,83	7,19	$1,35 \cdot 10^2$
B''	$2,99 \cdot 10^{-6}$	$9,41 \cdot 10^{-1}$	2,16	$4,35 \cdot 10^1$
C	$2,02 \cdot 10^{-6}$	$5,33 \cdot 10^{-1}$	1,38	$2,67 \cdot 10^1$
C'	$7,07 \cdot 10^{-7}$	$2,17 \cdot 10^{-1}$	$4,33 \cdot 10^{-1}$	$1,08 \cdot 10^1$
C''	$1,60 \cdot 10^{-6}$	$4,02 \cdot 10^{-1}$	1,12	$2,01 \cdot 10^1$

TABLE 2 : Impacts des scénarios étudiés

TABLE 3: Sources détaillées

Procédé	Sources détaillées	Catégories d'impact			
		Santé humaine (DALY)	Qualité des écosystèmes (PDF · m ² · y)	Changement climatique (kgCO ₂ -eq)	Ressources (MJ primaire)
MATÉRIEL					
Écran LCD	Hors-fonctionnement : procédé Ecoinvent « Display, liquid crystal, 17 inches {GLO} market for Cut-off, S » Durée de vie : 5 ans Fréquence d'utilisation : 7 h/j	$4,75 \cdot 10^{-4}$	$1,40 \cdot 10^2$	$3,60 \cdot 10^2$	$4,79 \cdot 10^3$
	Fonctionnement : avec $P = 70W$	$1,04 \cdot 10^{-11}$	$4,77 \cdot 10^{-6}$	$8,25 \cdot 10^{-6}$	$2,13 \cdot 10^{-3}$
	Veille : avec $P = 0,3W$	$2,07 \cdot 10^{-13}$	$9,54 \cdot 10^{-8}$	$1,65 \cdot 10^{-7}$	$4,26 \cdot 10^{-5}$
Tour	Hors-fonctionnement : procédé Ecoinvent « Computer, desktop, without screen {GLO} market for Cut-off, S » Durée de vie : 5 ans Fréquence d'utilisation : 7 h/j	$3,49 \cdot 10^{-4}$	$1,31 \cdot 10^2$	$2,28 \cdot 10^2$	$3,19 \cdot 10^3$
	Fonctionnement : avec $P = 33W$	$3,42 \cdot 10^{-11}$	$1,57 \cdot 10^{-5}$	$2,72 \cdot 10^{-5}$	$7,03 \cdot 10^{-3}$
Clavier	Hors-fonctionnement : procédé Ecoinvent « Keyboard {GLO} market for Cut-off, S » Durée de vie : 5 ans Fréquence d'utilisation : 7 h/j	$5,01 \cdot 10^{-5}$	$1,96 \cdot 10^1$	$3,15 \cdot 10^1$	$4,53 \cdot 10^2$
	Fonctionnement :	cf. Tour			
Souris	Hors-fonctionnement : procédé Ecoinvent « Pointing device, optical mouse, with cable {GLO} market for Cut-off, S » Durée de vie : 5 ans Fréquence d'utilisation : 7 h/j	$1,06 \cdot 10^{-5}$	4,73	6,56	$9,35 \cdot 10^1$
	Fonctionnement :	cf. Tour			
Ordinateur portable	Hors-fonctionnement : procédé Ecoinvent « Computer, laptop {GLO} market for Cut-off, S », 3 m de câble d'alimentation sans fiche et 1 fiche Durée de vie : 5 ans Fréquence d'utilisation : 7 h/j	$2,74 \cdot 10^{-4}$	$8,27 \cdot 10^1$	$1,66 \cdot 10^2$	$2,18 \cdot 10^3$
	Fonctionnement : avec $P = 40W$ (ONG, MOORS et SIVARAMAN 2014)	$4,14 \cdot 10^{-11}$	$1,91 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$8,52 \cdot 10^{-3}$
Équipement d'accès à Internet	Hors-fonctionnement : procédé Ecoinvent « Internet access equipment {GLO} market for Cut-off, S » Durée de vie : 5 ans Fréquence d'utilisation : 7 h/j	$1,26 \cdot 10^{-5}$	5,6	7,21	$1,03 \cdot 10^2$
	Fonctionnement : mesure	$1,01 \cdot 10^{-8}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-3}$	2,26

Suite de la table 3

Microphone	Hors-fonctionnement : assimilé à 1 g de tour d'ordinateur, microphone de 180,3 g (https://bit.ly/32NLEKp) Durée de vie : 5 ans Fréquence d'utilisation : 3 h/sem	cf. 1 g de tour d'ordinateur			
	Fonctionnement : avec $P = 2,5W$ (ONG, MOORS et SIVARAMAN 2014)	$2,59 \cdot 10^{-12}$	$1,19 \cdot 10^{-6}$	$2,06 \cdot 10^{-6}$	$5,33 \cdot 10^{-4}$
Caméra	Hors-fonctionnement : assimilé à 1 g de tour d'ordinateur, caméra de 628 g (https://bit.ly/36LJufg) Durée de vie : 5 ans Fréquence d'utilisation : 3 h/sem	cf. 1 g de tour d'ordinateur			
	Fonctionnement : avec $P = 9,5W$ (ONG, MOORS et SIVARAMAN 2014)	$9,84 \cdot 10^{-12}$	$4,53 \cdot 10^{-6}$	$7,84 \cdot 10^{-6}$	$2,02 \cdot 10^{-3}$
Projecteur	Hors-fonctionnement : CHEUNG, BERGER et FINKBEINER 2018 Durée de vie : 5 ans Fréquence d'utilisation : 3 h/sem	$8,04 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^1$	$5,25 \cdot 10^1$	$8,21 \cdot 10^2$
	Fonctionnement : avec $P = 135W$ (ONG, MOORS et SIVARAMAN 2014)	$8,12 \cdot 10^{-11}$	$3,74 \cdot 10^{-5}$	$6,47 \cdot 10^{-5}$	$1,67 \cdot 10^{-2}$
	Veille : avec $P = 135W$ (ONG, MOORS et SIVARAMAN 2014)	$8,12 \cdot 10^{-11}$	$3,74 \cdot 10^{-5}$	$6,47 \cdot 10^{-5}$	$1,67 \cdot 10^{-2}$
Télévision sans l'écran	Fonctionnement : avec $P = 20W$ (ONG, MOORS et SIVARAMAN 2014)	$2,07 \cdot 10^{-11}$	$9,54 \cdot 10^{-6}$	$1,65 \cdot 10^{-5}$	$4,26 \cdot 10^{-3}$
Écran de télévision ($1 m^2$)	Hors-fonctionnement : calculé d'après l'écran LCD (17 pouces = $0,07967 m^2$) Durée de vie : 5 ans Fréquence d'utilisation : 3 h/sem	$5,96 \cdot 10^{-3}$	$1,76 \cdot 10^3$	$4,52 \cdot 10^3$	$6,01 \cdot 10^4$
	Fonctionnement : avec $P = 172W/m^2$ (ONG, MOORS et SIVARAMAN 2014)	$1,78 \cdot 10^{-10}$	$8,21 \cdot 10^{-5}$	$1,42 \cdot 10^{-4}$	$3,67 \cdot 10^{-2}$
Kit de visio-conférence sans les 4 câbles	Hors-fonctionnement : assimilé à 1 g de tour d'ordinateur, kit de 1811 g (caméra, hub, haut-parleur, télécommande) Durée de vie : 5 ans Fréquence d'utilisation : 3 h/sem	cf. 1 g de tour d'ordinateur			
	Fonctionnement : avec $P = 8,5W$	$8,8 \cdot 10^{-12}$	$4,06 \cdot 10^{-6}$	$7,02 \cdot 10^{-6}$	$1,81 \cdot 10^{-3}$
	Veille : avec $P = 5,7W$	$5,9 \cdot 10^{-12}$	$2,72 \cdot 10^{-6}$	$4,70 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-3}$
Câble du kit	Hors-fonctionnement : procédé Ecoinvent « Cable, network cable, category 5, without plugs {GLO} market for Cut-off, S » et « Plug, inlet and outlet, for network cable {GLO} market for Cut-off, S » Durée de vie : 5 ans Fréquence d'utilisation : 3 h/sem	$3,53 \cdot 10^{-6}$	3,37	1,16	$1,85 \cdot 10^1$
Support métallique des écrans	Hors-fonctionnement : procédé Ecoinvent « Steel, unalloyed {GLO} market for Cut-off, S » (56, 11 kg) Durée de vie : 5 ans Fréquence d'utilisation : 3 h/sem	$1,41 \cdot 10^{-4}$	$2,05 \cdot 10^1$	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^3$

Suite de la table 3

CODEC	Fonctionnement (haut de gamme) : avec $P = 80W$ (ONG, MOORS et SIVARAMAN 2014)	$8,28 \cdot 10^{-11}$	$3,82 \cdot 10^{-5}$	$6,60 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$
	Fonctionnement (bas de gamme) : avec $P = 26W$ (ONG, MOORS et SIVARAMAN 2014)	$2,69 \cdot 10^{-11}$	$1,24 \cdot 10^{-5}$	$2,15 \cdot 10^{-5}$	$5,54 \cdot 10^{-3}$
Câble d'alimentation sans fiche (1 m)	Hors-fonctionnement : procédé Ecoinvent « Cable, connector for computer, without plugs {GLO} market for Cut-off, S » Durée de vie : 20 ans Fréquence d'utilisation : 7 h/j	$1,42 \cdot 10^{-6}$	$8,40 \cdot 10^{-1}$	$4,43 \cdot 10^{-1}$	8,59
Fiche d'un câble d'alimentation	Hors-fonctionnement : procédé Ecoinvent « Plug, inlet and outlet, for computer cable {GLO} market for Cut-off, S » Durée de vie : 20 ans Fréquence d'utilisation : 7 h/j	$8,80 \cdot 10^{-7}$	$5,90 \cdot 10^{-1}$	$3,40 \cdot 10^{-1}$	6,83
Câble Ethernet sans fiche (1 m)	Hors-fonctionnement : procédé Ecoinvent « Cable, network cable, category 5, without plugs {GLO} market for Cut-off, S » Durée de vie : 20 ans Fréquence d'utilisation : 7 h/j	$1,70 \cdot 10^{-6}$	1,63	$5,51 \cdot 10^{-1}$	8,73
Fiche d'un câble Ethernet	Hors-fonctionnement : procédé Ecoinvent « Plug, inlet and outlet, for network cable {GLO} market for Cut-off, S » Durée de vie : 20 ans Fréquence d'utilisation : 7 h/j	$1,42 \cdot 10^{-7}$	$9,99 \cdot 10^{-2}$	$5,34 \cdot 10^{-2}$	1,06
Câble HDMI sans fiche (1 m)	Hors-fonctionnement :	cf. Câble alimentation sans fiche			
Fiche de câble HDMI	Hors-fonctionnement :	cf. Câble fiche câble d'alimentation			
Câble JACK	Hors-fonctionnement :	cf. Câble Ethernet sans fiche			
Câble VGA	Hors-fonctionnement :	cf. Câble alimentation sans fiche			
Fiche de câble VGA	Hors-fonctionnement :	cf. Câble fiche câble d'alimentation			

TRANSFERT DE DONNÉES

Google Hangouts	Deux points, vitesse de téléchargement minimum : 300 kbit/s, (<i>Hangouts</i> 2019)	$5,04 \cdot 10^{-10}$	$2,32 \cdot 10^{-4}$	$4,01 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-1}$
	Deux points, vitesse de téléchargement recommandée : 2 600 kbit/s (<i>Hangouts</i> 2019)	$4,37 \cdot 10^{-9}$	$2,01 \cdot 10^{-3}$	$3,48 \cdot 10^{-3}$	$9,00 \cdot 10^{-1}$
	Cinq points, vitesse de téléchargement minimum : 300 kbit/s (<i>Hangouts</i> 2019)	$5,04 \cdot 10^{-10}$	$2,32 \cdot 10^{-4}$	$4,01 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-1}$
	Cinq points, vitesse de téléchargement recommandée : 3 200 kbit/s (<i>Hangouts</i> 2019)	$5,38 \cdot 10^{-9}$	$2,48 \cdot 10^{-3}$	$4,28 \cdot 10^{-3}$	1,11
	Dix points et plus, vitesse de téléchargement minimum : 300 kbit/s (<i>Hangouts</i> 2019)	$5,04 \cdot 10^{-10}$	$2,32 \cdot 10^{-4}$	$4,01 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-1}$
	Dix points et plus, vitesse de téléchargement recommandée : 4 000 kbit/s (<i>Hangouts</i> 2019)	$6,72 \cdot 10^{-9}$	$3,10 \cdot 10^{-3}$	$5,35 \cdot 10^{-3}$	1,38
Jitsi	Mesure, accès : $2,04 \cdot 10^3$ kbit	$5,71 \cdot 10^{-11}$	$2,63 \cdot 10^{-5}$	$4,54 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$
	Mesure, nombre de points quelconque : 2 963 kbit/s	$4,98 \cdot 10^{-9}$	$2,29 \cdot 10^{-3}$	$3,96 \cdot 10^{-3}$	1,05
RENAvisio	Mesure, téléchargement : $18,8 \cdot 10^3$ kbit	$5,26 \cdot 10^{-10}$	$2,42 \cdot 10^{-4}$	$4,19 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-1}$
	Mesure, nombre quelconque de points : 1 080 kbit/s	$1,81 \cdot 10^{-9}$	$8,36 \cdot 10^{-4}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$3,74 \cdot 10^{-1}$

Suite de la table 3

Skype	Téléchargement : $65,8 \cdot 10^3$ kbit, mesure	$1,84 \cdot 10^{-9}$	$8,49 \cdot 10^{-4}$	$1,47 \cdot 10^{-3}$	$3,80 \cdot 10^{-1}$
	Deux points, vitesse de téléchargement minimum : 128 kbit/s, (<i>Skype</i> 2019)	$2,15 \cdot 10^{-10}$	$9,90 \cdot 10^{-5}$	$1,71 \cdot 10^{-4}$	$4,43 \cdot 10^{-2}$
	Deux points, vitesse de téléchargement recommandée : 1 500 kbit/s, (<i>Skype</i> 2019)	$2,52 \cdot 10^{-9}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$2,01 \cdot 10^{-3}$	$5,20 \cdot 10^{-1}$
	Trois points, vitesse de téléchargement minimum : 512 kbit/s, (<i>Skype</i> 2019)	$8,60 \cdot 10^{-10}$	$3,96 \cdot 10^{-4}$	$6,85 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-1}$
	Trois points, vitesse de téléchargement recommandée : 2 000 kbit/s, (<i>Skype</i> 2019)	$3,36 \cdot 10^{-9}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$	$2,68 \cdot 10^{-3}$	$6,92 \cdot 10^{-1}$
	Cinq points, vitesse de téléchargement minimum : 2 000 kbit/s, (<i>Skype</i> 2019)	$3,36 \cdot 10^{-9}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$	$2,68 \cdot 10^{-3}$	$6,92 \cdot 10^{-1}$
	Cinq points, vitesse de téléchargement recommandée : 4 000 kbit/s, (<i>Skype</i> 2019)	$6,72 \cdot 10^{-9}$	$3,10 \cdot 10^{-3}$	$5,35 \cdot 10^{-3}$	1,38
	Sept points et plus, vitesse de téléchargement minimum : 4 000 kbit/s, (<i>Skype</i> 2019)	$6,72 \cdot 10^{-9}$	$3,10 \cdot 10^{-3}$	$5,35 \cdot 10^{-3}$	1,38
	Sept points et plus, vitesse de téléchargement recommandée : 8 000 kbit/s, (<i>Skype</i> 2019)	$1,34 \cdot 10^{-8}$	$6,19 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-2}$	2,77

TRANSPORT

Avion intercontinental	Procédé EcoInvent « Transport, passager, aircraft {RER} intercontinental Cut-off, S », en personne-kilomètre	$5,85 \cdot 10^{-8}$	$1,08 \cdot 10^{-2}$	$1,09 \cdot 10^{-1}$	1,69
Avion intracontinental	Procédé EcoInvent « Transport, passager, aircraft {RER} intracontinental Cut-off, S », en personne-kilomètre	$8,75 \cdot 10^{-8}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-1}$	2,59
Bus longue distance	Procédé EcoInvent « Transport, regular bus {CH} processing Cut-off, S », en personne-kilomètre	$1,30 \cdot 10^{-7}$	$3,54 \cdot 10^{-2}$	$9,90 \cdot 10^{-2}$	1,49
Bus de ville	Procédé EcoInvent « Transport, passenger coach {CH} processing Cut-off, S », en personne-kilomètre	$6,13 \cdot 10^{-8}$	$2,14 \cdot 10^{-2}$	$4,97 \cdot 10^{-2}$	$7,64 \cdot 10^{-1}$
Voiture électrique	Procédé EcoInvent « Transport, passager car, electric {GLO} market for Cut-off, S », en kilomètre	$3,73 \cdot 10^{-7}$	$8,55 \cdot 10^{-2}$	$2,35 \cdot 10^{-1}$	3,44
Voiture thermique	Procédé EcoInvent « Transport, passager car {RER} market for Cut-off, S », en kilomètre	$2,58 \cdot 10^{-7}$	$8,60 \cdot 10^{-2}$	$3,25 \cdot 10^{-1}$	5,04
Train à grande vitesse	Procédé EcoInvent « Transport, passager train {RER} high-speed Cut-off, S », en personne-kilomètre	$1,76 \cdot 10^{-8}$	$8,44 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-2}$	1,15
Train régional	Procédé EcoInvent « Transport, passager train {CH} regional Cut-off, S », en personne-kilomètre	$1,50 \cdot 10^{-8}$	$7,36 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$	$8,00 \cdot 10^{-1}$
Train urbain	Procédé EcoInvent « Transport, passager train {CH} urban Cut-off, S », en personne-kilomètre	$1,34 \cdot 10^{-8}$	$5,05 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$	$4,77 \cdot 10^{-1}$
Tramway	Procédé EcoInvent « Transport, tram {CH} processing Cut-off, S », en personne-kilomètre	$3,93 \cdot 10^{-8}$	$8,87 \cdot 10^{-3}$	$3,41 \cdot 10^{-2}$	$9,21 \cdot 10^{-1}$

Suite de la table 3

Vélo	Procédé EcoInvent « Transport, passenger, bicycle {CH} processing Cut-off, S », en personne-kilomètre	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$2,51 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-2}$	$1,69 \cdot 10^{-1}$
ÉLÉMENTS DE CALCUL					
Intensité énergétique du réseau	Borne inférieure, (ONG, MOORS et SIVARAMAN 2014, p. 87)	$1,68 \cdot 10^{-14}$	$7,76 \cdot 10^{-9}$	$1,34 \cdot 10^{-8}$	$3,47 \cdot 10^{-6}$
	Borne supérieure, (ONG, MOORS et SIVARAMAN 2014, p. 87)	$2,8 \cdot 10^{-14}$	$1,29 \cdot 10^{-8}$	$2,23 \cdot 10^{-8}$	$5,77 \cdot 10^{-6}$
Mix électrique français	Procédé EcoInvent « Electricity, low voltage {RER} electricity voltage transformation from medium to low voltage Cut-off, S », pour 1 kWh	$6,21 \cdot 10^{-8}$	$2,86 \cdot 10^{-2}$	$4,95 \cdot 10^{-2}$	$1,28 \cdot 10^1$
1 gramme de tour d'ordinateur	Mesure grâce au procédé Ecoinvent « Computer, desktop, without screen {GLO} market for Cut-off, S »	$3,088 \cdot 10^{-8}$	$1,159 \cdot 10^{-2}$	$2,018 \cdot 10^{-2}$	$2,823 \cdot 10^{-1}$

Épreuves