

# Évaluation environnementale des réunions : du présentiel à la visio-conférence ?

Aurélien Béranger, Clément Brizard et Valentin Le Gauche

13 mai 2020

---

## Résumé

Dans un contexte de massification du numérique, la visio-conférence est plébiscitée par des organisations privées et publiques comme support à des politiques d'amélioration des impacts environnementaux par la réduction des déplacements. Or, cette technologie participe au déploiement d'infrastructures matérielles non sans conséquence sur l'environnement. Les différences d'impact entre des situations de téléprésence et des réunions en présentiel sont étudiées par la littérature, notamment dans le champ de l'Analyse de cycle de vie (ACV). Cependant, les études se focalisent souvent sur l'aspect énergétique ou climatique et négligent parfois certaines étapes des cycles de vie. Cet article propose une méthode d'évaluation environnementale générique des réunions inspirée de l'ACV, en modélisant une réunion selon trois composantes : les équipements matériels, les logiciels utilisés et les déplacements nécessaires à la rencontre. Trois scénarios de réunion et plusieurs variations sont comparés et décrivent ces paramètres dans un espace régional ou inter-urbain. Ils révèlent la grande diversité des modalités de réunions et ne permettent pas d'affirmer sans équivoque que la téléprésence est systématiquement préférable au mode présentiel d'un point de vue environnemental.

**Mot-clés :** Analyse de cycle de vie, visio-conférence, réunion, téléprésence

## Abstract

[à régénérer] In a context of digital massification, videoconferencing is favoured by private and public organisations as a support for policies to improve environmental impacts by reducing travel. However, this technology contributes to the deployment of physical infrastructures that are not without consequences on the environment. The differences in impact between telepresence situations and face-to-face meetings are studied in the literature, particularly in the field of Life Cycle Assessment (LCA). However, studies often focus on the energy or climate aspect and sometimes neglect certain stages of the life cycles. This article proposes a generic environmental assessment method for meetings inspired by LCA, by modelling a meeting according to three components : the hardware equipment, the software used and the travel required for the meeting. Three meeting scenarios and several variations are compared and describe these parameters in a regional or inter-urban setting. They reveal the great diversity of meeting modalities and lead to the conclusion that it is impossible to state that telepresence is systematically preferable to face-to-face meetings from an environmental point of view. [à régénérer]

**Keywords :** life-cycle assesment, virtual meeting, meeting, telepresence

---

## 1 Introduction

La première démonstration d'une visio-conférence date de l'exposition universelle de 1958, son application dans l'enseignement supérieur français de 1987. Son usage est désormais massif : Rendez-vous et RENAvizio, deux services du Réseau national de télécommunications pour la technologie, l'enseignement et la recherche (RENATER), sont respectivement le support de plus de 45 000 (*Rendez-vous* 2019) et 160 000 (*Renavizio* 2019) visio-conférences chaque année. Cette technologie et plus généralement le numérique sont devenues 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 confinement, comme l'illustre la crise du Covid-19.

Le 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).

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 (BORGREN 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. Le réseau mondial qu'est internet est constitué de près de 9 milliards d'équipements (smartphones, ordinateurs et objets connectés), 45 000 ser-

veurs et 800 millions d'équipements réseaux (routeurs, box ADSL, etc.) (ADEME 2018, p. 5). À titre d'exemple, une box internet consommerait autant d'électricité qu'un réfrigérateur, cela sans prendre en compte les impacts causés par le traitement de fin de vie de l'appareil et par l'extraction des métaux et terres rares nécessaires à la fabrication des composants électroniques (ADEME 2018, p. 9). 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). En plus de l'achat de nouveaux terminaux, l'intensification de l'utilisation nécessite un redimensionnement permanent des infrastructures existantes pour supporter la constante croissance.

Signe de cette profonde modification matérielle des usages, le nombre de publications scientifiques qui traitent de l'impact environnemental du numérique, notamment dans le champ de l'Analyse de cycle de vie (ACV), a été multiplié par près de huit entre 2001 et 2015 (TINETTI et al. 2016, p. 24). Parmi celles-ci, un certain nombre aborde les impacts des réunions et des visio-conférences. Cependant, elles ne proposent que rarement une analyse environnementale multi-critère 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 vie (COROAMA, HILTHY et BIRTEL 2012 ; ONG, MOORS et SIVARAMAN 2012 ; BORGGREN et al. 2013 ; ONG, MOORS et SIVARAMAN 2014).

## 2 Problématique

La massification de l'usage de la visio-conférence s'est accompagnée d'une diversification des équipements et des formats de réunions virtuelles. De l'appel vidéo sur téléphone portable ou tablette tactile entre deux personnes à la conférence internationale se déroulant en simultané sur plusieurs sites dans différents continents (COROAMA, HILTHY et BIRTEL 2012), l'éventail des possibles est large. 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 comme Jitsi, ou propriétaires à l'instar de Microsoft Skype, Google Hangouts, Gotomeeting, Zoom, Webex, etc.

Considérer tous les formats de réunion virtuelle implique également de prendre en compte les rencontres pour lesquelles une partie des participants se retrouve physiquement au même endroit. 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. Qu'elle qu'en soit sa spécificité, il nous sera toujours possible de l'appréhender par ses principaux paramètres : sa durée, le nombre de ses participants, les équipements matériels et logiciels utilisés et les déplacements nécessaires à la rencontre.

Le but du présent article est d'éclairer la décision quant

au choix des modalités d'une réunion en proposant un modèle d'évaluation et en montrant les différences d'impacts environnementaux qui en découlent. Son apport scientifique est en premier lieu d'ordre méthodologique.

Afin de qualifier ces impacts et de considérer l'ensemble des cycles de vie des composantes d'une réunion, nous proposons une méthode d'évaluation inspirée de l'ACV. Cette méthode de référence, régie par les ISO 14040 et 14044 (ISO 14040 2006 ; ISO 14044 2006), nous permet de dresser un bilan environnemental aussi exhaustif que possible, par l'identification et la quantification des intrants et extrants impliqués.

Du fait de la difficulté et de nos moyens limités pour réaliser une collecte exhaustive des données — l'impact des centres de données numériques, par exemple, est encore difficile à évaluer en raison de l'opacité du milieu (FANNY LOPEZ (DIR.) 2019 ; CARNINO et MARQUET 2018) —, notre étude ne peut être une ACV à proprement parler.

## 3 Proposition d'une méthode d'évaluation

### 3.1 Méthode de calcul et périmètre de l'étude

Afin de comparer l'impact environnemental de deux scénarios de réunion, il nous faut définir un critère pour savoir si deux scénarios sont comparables. En effet, suivant l'objectif de la réunion, ses paramètres peuvent être très variables. Pour que notre méthode puisse couvrir toutes les situations de réunions, nous n'avons pas fixé d'unité fonctionnelle (ISO 14040 2006), mais considérons que deux réunions sont comparables si elles visent à atteindre le même objectif. Par exemple : réaliser un entretien d'embauche, parcourir un ordre du jour, présenter une soutenance de thèse, etc. Tous les objectifs de réunion sont ainsi autant d'unités fonctionnelles potentielles.

Nous proposons la formule suivante pour modéliser l'impact d'une réunion :

$$I_{reunion} = I_{matériel} + I_{logiciel} + I_{transport}$$

Nous notons  $I_{reunion}$  l'impact d'une réunion,  $I_{matériel}$  l'impact des équipements matériels utilisés pour la réunion (par exemple un ordinateur, un câble, une caméra),  $I_{logiciel}$  l'impact du logiciel de visio-conférence utilisé pour la réunion et  $I_{transport}$  l'impact des transports réalisés par les participants.

Tous ces impacts s'expriment en Unité d'impact (UI), par exemple les kg eq. CO<sub>2</sub> pour la catégorie d'impact « changement climatique » de la méthode d'évaluation Impact2002+ (JOLLIET et al. 2003). Dans notre cas, c'est cette méthode qui définira nos UI, voir section 3.3.

### 3.2 Description des termes du modèle

#### 3.2.1 Impact des équipements matériels

Sont compris dans l'impact d'un composant matériel : l'impact dû à son fonctionnement pendant la réunion et d'autre

$$\begin{aligned}
I_{reunion} = & \sum_{m \in M} \left( k_m \cdot (I_{visio\_m} + I_{veille\_m} \cdot r_{veille/visio}) + I_{\neg fct\_m} + I_{\neg fct\_m\_total} \cdot \left( \frac{1}{d_{serv\_m}} + \frac{r_{veille/visio}}{d_{veille\_m}} \right) \right) \cdot t_{reunion} \\
& + \left( n_p \cdot d_{descendant} \cdot t_{reunion} + \sum_{p \in P} k_p \cdot t_{fichier} \right) \cdot In_{NW} \\
& + \sum_{t \in T, p \in P} I_t \cdot dist_{p,t}
\end{aligned}$$

FIGURE 1 : Formule générale de calcul détaillée

part 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 ». On a donc :

$$I_{materiel} = \sum_{m \in M} (I_{fct\_m} \cdot k_m + I_{\neg fct\_m}) \cdot t_{reunion}$$

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  $t_{reunion}$  la durée de la réunion.  $k_m$  correspond au taux (entre 0 et 1) de l'équipement dédié à la visio-conférence pendant la réunion (par exemple, un ordinateur peut en même temps être utilisé avec un éditeur de texte et un navigateur web).

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 logiciel

La notion d'impact environnemental lié à l'utilisation d'un logiciel n'a de sens que dans le cas de l'usage d'un dispositif d'audio-conférence ou de visio-conférence. Dans ce cas de non-nullité, il se décompose ainsi :

$$I_{logiciel} = I_{telechargement} + I_{fct\_l}$$

Nous considérons d'abord  $I_{telechargement}$ , 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 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, il tendra vers 0 lorsque le nombre de réunions effectuées avec ce logiciel augmente.

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

Pour ce qui est de l'impact du transfert de données sur le réseau durant la réunion  $I_{fct\_l}$ , 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  $n_p$ . On obtient finalement :

$$I_{fct\_l} = n_p \cdot d_{descendant} \cdot In_{NW} \cdot t_{reunion}$$

### 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 effectuant ce trajet sur la distance parcourue donnée. 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 données qui peuplent ces formules 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 et hors du fonctionnement. La deuxième partie correspond à sa fabrication, son transport et sa fin de vie. Lorsque cela est possible nous utilisons un composant EcoInvent pour estimer les impacts de ces trois phases. Nous procédons sinon par assimilation massive. L'impact d'un élément matériel inconnu est calculé en multipliant l'impact d'un gramme d'un composant 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 : une pour les équipements considérés comme étant spécifiques à la visio-conférence (par exemple un vidéo-projecteur) et une pour les autres équipements (par exemple un ordinateur portable). Voir section 8.2 pour les valeurs et sources détaillées.

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 Logiciel

L'impact d'un logiciel se décompose en deux parties : le coût dû à l'accès à la visio conférence, qui correspond au téléchargement du logiciel ou au chargement de la page web accueillant la réunion, et le coût de l'utilisation du logiciel lors de la visio-conférence elle-même. Cela revient à chaque fois à mesurer une quantité de données reçues et à quantifier son impact.

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.

Nous négligeons le coût du développement du logiciel. Une étude à part entière serait à mener pour connaître l'impact environnemental de la création d'un logiciel qui nécessite le travail de plusieurs dizaines de personnes pendant plusieurs années. Cependant, ne disposant pas de données, nous supposons qu'il est négligeable car réparti sur un très grand nombre d'heures de visio-conférence.

### 3.3.3 Transport

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

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

## 4 Application de la méthode

Nous proposons une application de notre méthode à trois scénarios distincts, exemplifiant chacun un type de réunion plausible dans un cadre professionnel ou universitaire. Sont considérées comme données communes le nombre de participants et le temps de réunion nécessaire à l'accomplissement de l'objectif de la réunion : respectivement cinq et deux heures. L'objectif de la réunion est de parcourir un ordre du jour afin d'en régler les différents points. L'ensemble des éléments de description des scénarios est réuni dans la table 1.

### 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, venant d'une autre ville, a eu à effectuer 100 km en train régional ainsi que 3,5 km en bus de ville pour parcourir les derniers kilomètres ; deux autres participants, venant de la banlieue ont également parcouru 3,5 km en bus ; un quatrième a effectué 20 km dans sa voiture personnelle pour venir de la campagne environnante ; le dernier est venu à pied.

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

#### 4.1.2 Scénario B

Dans le deuxième scénario, il a été décidé d'utiliser les dispositifs de téléprésence avancée présents dans des salles dédiées 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 visioconférence 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 aura dû charger 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 Résultats et analyses

Notre étude n’a pas pour prétention de fournir des valeurs d’impact rigoureusement exactes — ce qui ne saurait d’ailleurs jamais être véritablement atteignable, en plus d’être inutilement précis. Il nous paraît plus pertinent de privilégier la présentation des impacts relatifs de nos différents scénarios de réunion, dans une perspective comparative (cf. figure 2, page 7).

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. 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 cependant, malgré divers transports urbains, 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.

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. Nous pouvons ici observer, même en restant dans un espace régional, la pluralité et l’hétérogénéité des transports, et donc des impacts, cachés derrière le terme générique de présentiel.

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. Ensuite, l’impact de certains dispositifs matériels peut supplanter celui de certains transports.

Nous constatons aussi que l’impact du 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 grandeurs inférieur à ceux du matériel et des transports.

Finalement, la comparaison des contributions du matériel, du logiciel 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

Si pour une réunion de deux heures, le scénario A est bien le plus impactant, on peut se demander si c’est toujours le cas quand la réunion dure plus longtemps.

Nous constatons d’abord sur la figure 4, à la page 8, qu’au démarrage de la réunion (durée = 0 min), c’est le scénario 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 logiciel 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 logiciel 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 à nos 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 vie des

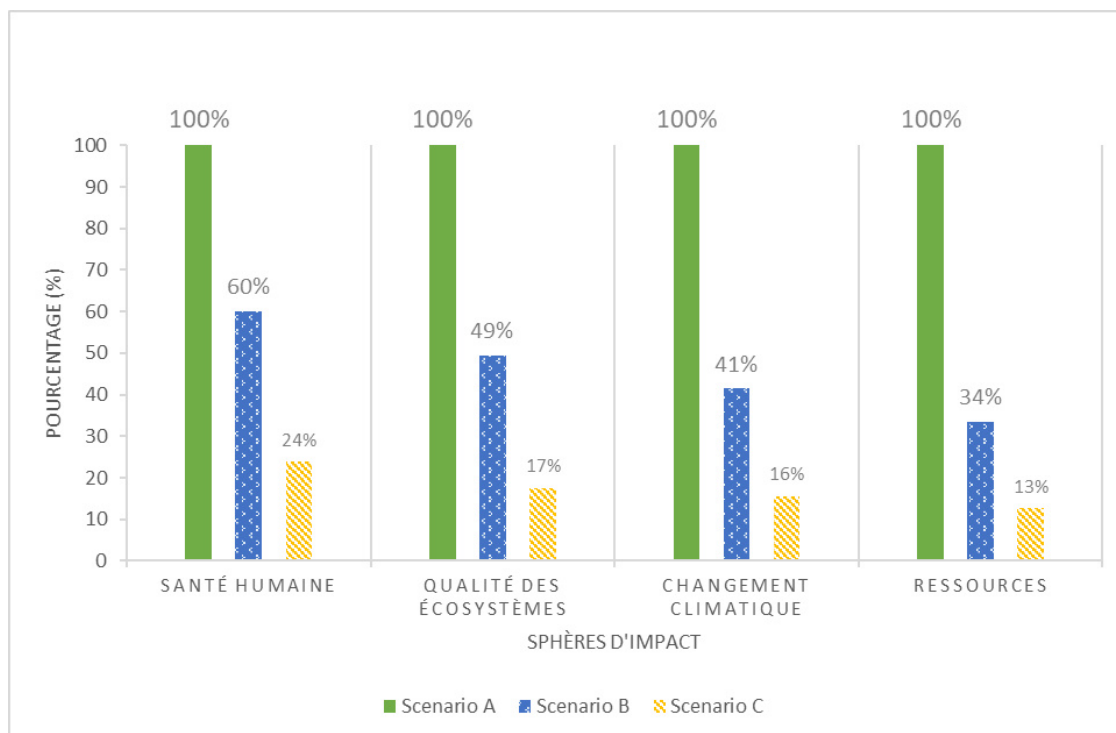


FIGURE 2 : Impacts comparés relatifs des scénarios de réunion

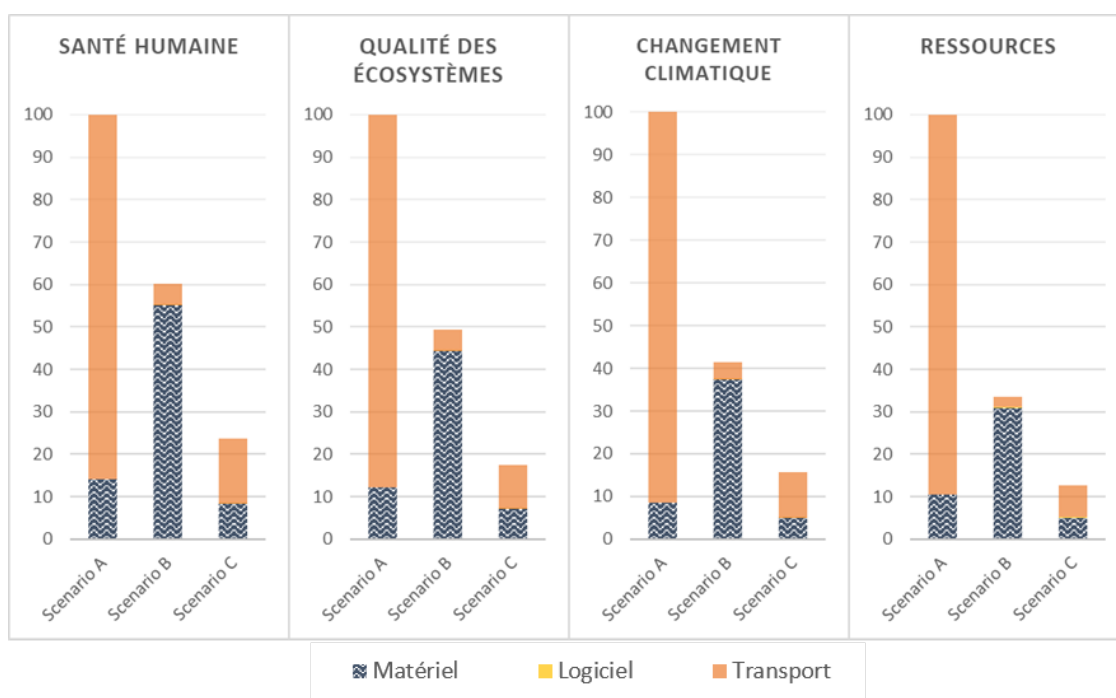


FIGURE 3 : Détails des postes d'impacts relatifs des scénarios de réunion

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 utilisés 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

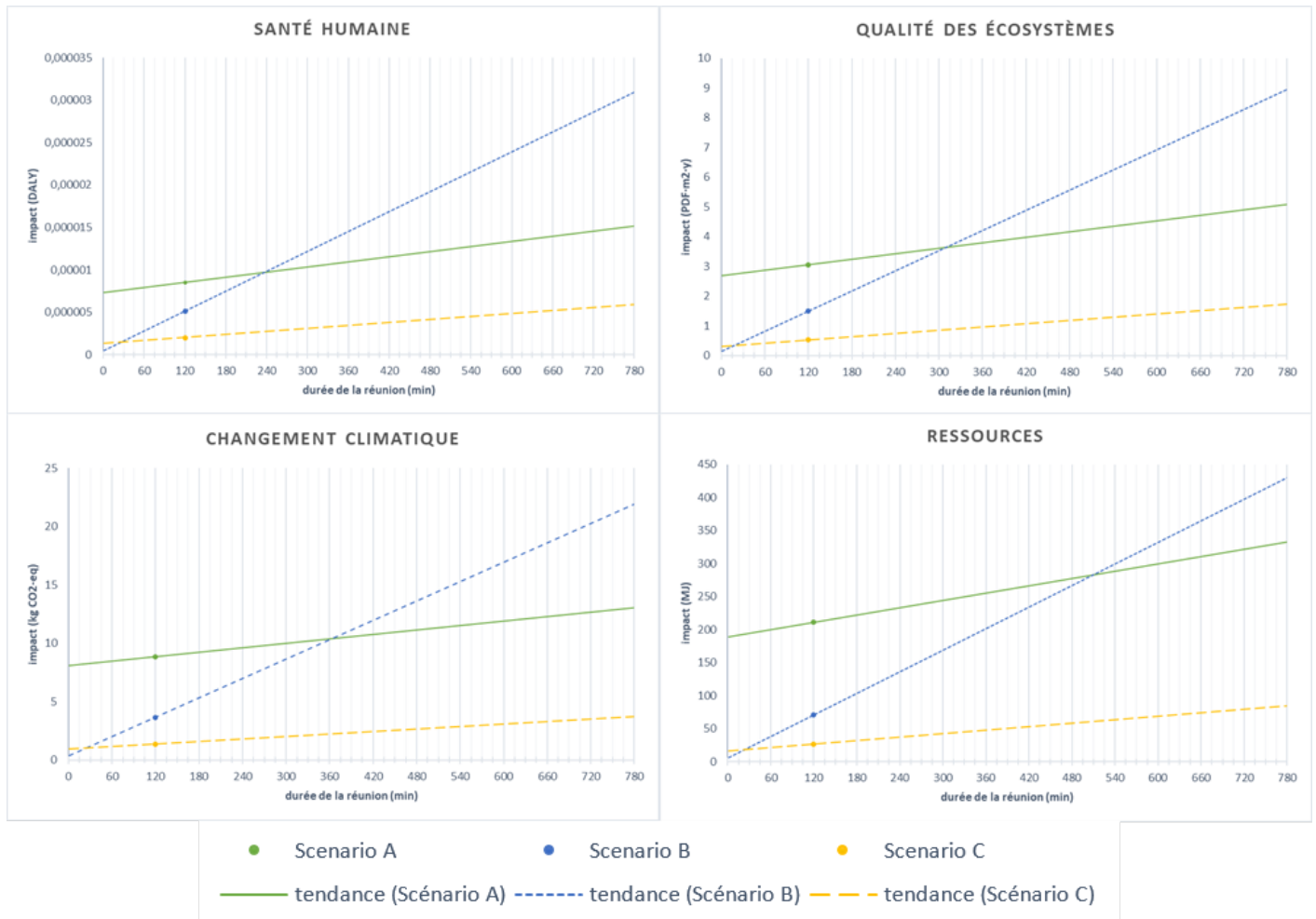


FIGURE 4 : Évolution de l'impact des trois scénarios selon la durée de la réunion

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 consi-

dérer avec du recul les comparaisons sur l'impact dû au matériel entre deux scénarios.

Pour calculer l'impact du logiciel en fonctionnement, 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 (BORGREN 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 logiciel, déjà insignifiant dans nos résultats. Comme décrit précédemment, cette intensité éner-



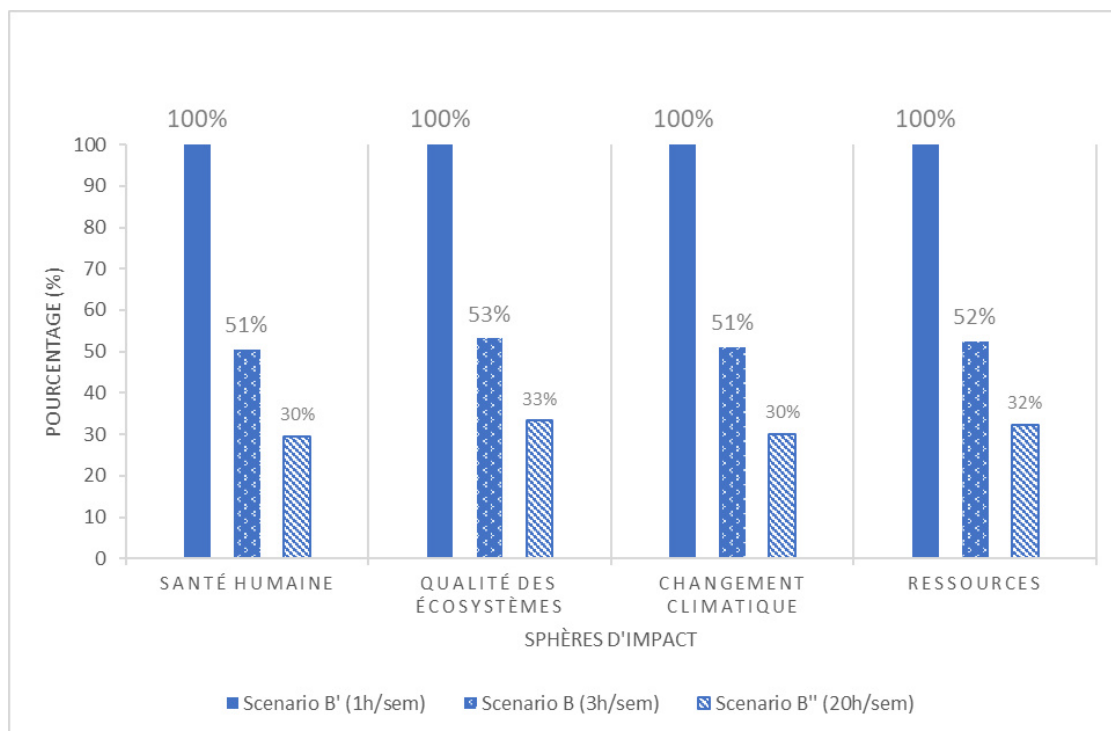


FIGURE 5 : Impacts comparés relatifs des variantes du scénario B

gétique 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 (BORGREN 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 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 de nos scénarios

Nous avons volontairement choisi des scénarios dont l'ordre de grandeur des impacts serait similaire et nous permette de mettre en évidence d'éventuels basculements tendanciers. En plus de ce calibrage, les scénarios envisagés devaient rester simples et plausibles.

Ayant déjà montré dans la littérature qu'une réunion en présentiel impliquant des déplacements sur de grandes

distances serait largement plus impactante que son pendant en visio-conférence nécessitant des déplacements locaux (COROAMA, HILTHY et BIRTEL 2012; BORGREN et al. 2013; ONG, MOORS et SIVARAMAN 2012; ONG, MOORS et SIVARAMAN 2014; ARNFALK et al. 2015), nous avons 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 logiciel 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 pré-

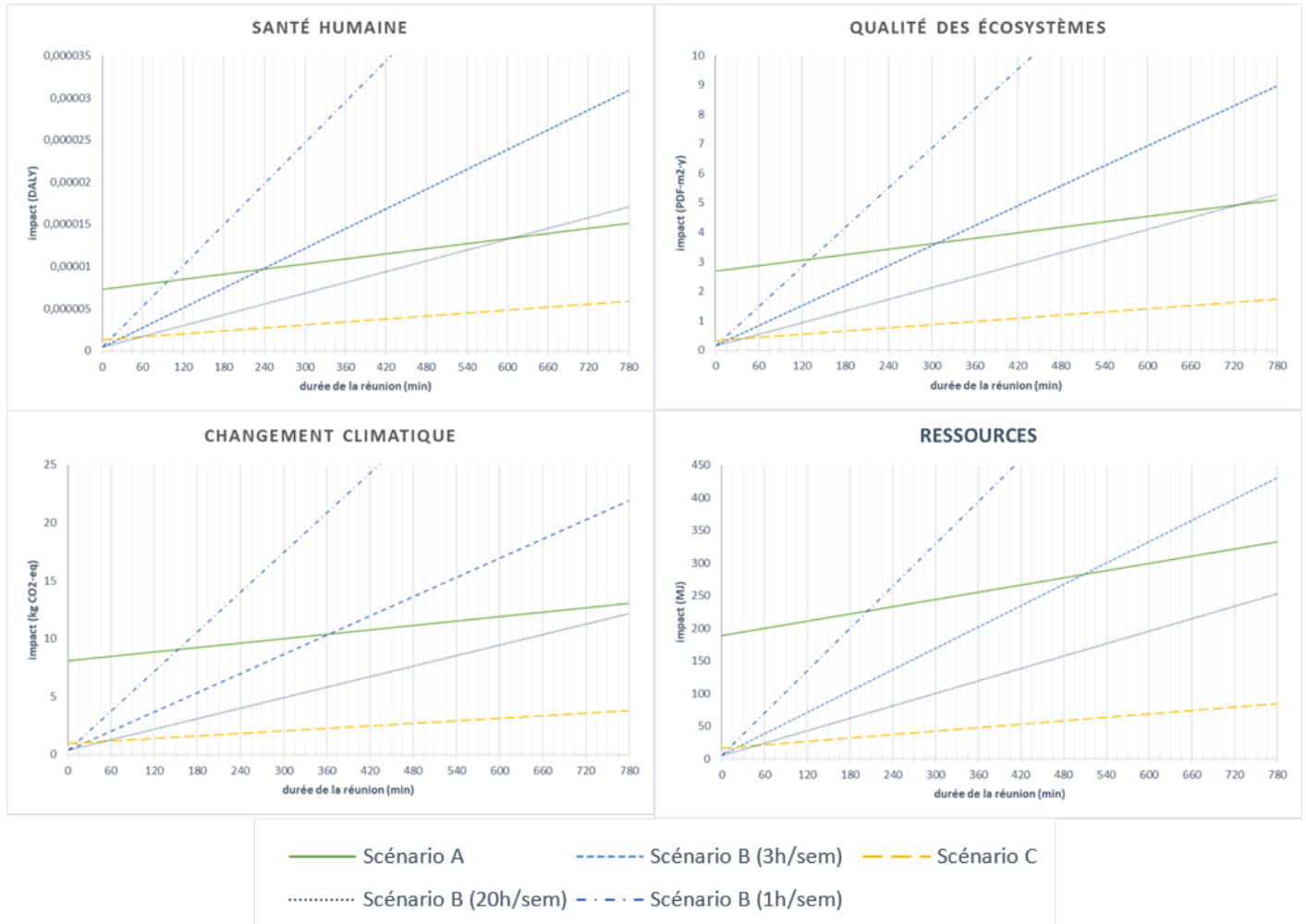


FIGURE 6 : Évolution de l'impact selon la durée de la réunion avec variantes scénario B

pondérants. 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, il en serait tout à fait autrement si tous les participants étaient venus à pied ou en vélo. Dans la même veine, 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.<sup>1</sup>

### 5.1.3 Limites méthodologiques

Notre méthode exclut certaines données. L'immobilier et le mobilier nécessaires à une réunion ne sont pas pris en compte. Nous ne disposons pas d'étude sur l'impact envi-

ronnemental des bâtiments dans lesquels nous avons réalisé nos mesures. De plus, même si nous disposions d'une telle étude, les résultats ne seraient pas généralisables à d'autres types de bâtiment et il n'y aurait donc que peu de sens à ajouter le même impact à chacun des scénarios étudiés. Nous aurions de plus eu à définir une méthode de répartition de cet impact sur l'ensemble des utilisations du bâtiment pour savoir comment l'imputer à une réunion, ce qui mériterait être l'objet d'une étude à part entière. Avec moins de difficultés, notre méthode pourrait être enrichie pour comptabiliser l'impact du mobilier, du chauffage, de l'éclairage et de la climatisation dans le cas de l'utilisation d'une salle dédiée uniquement à la visio-conférence ou aux réunions.

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

<sup>1</sup>Ainsi 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.

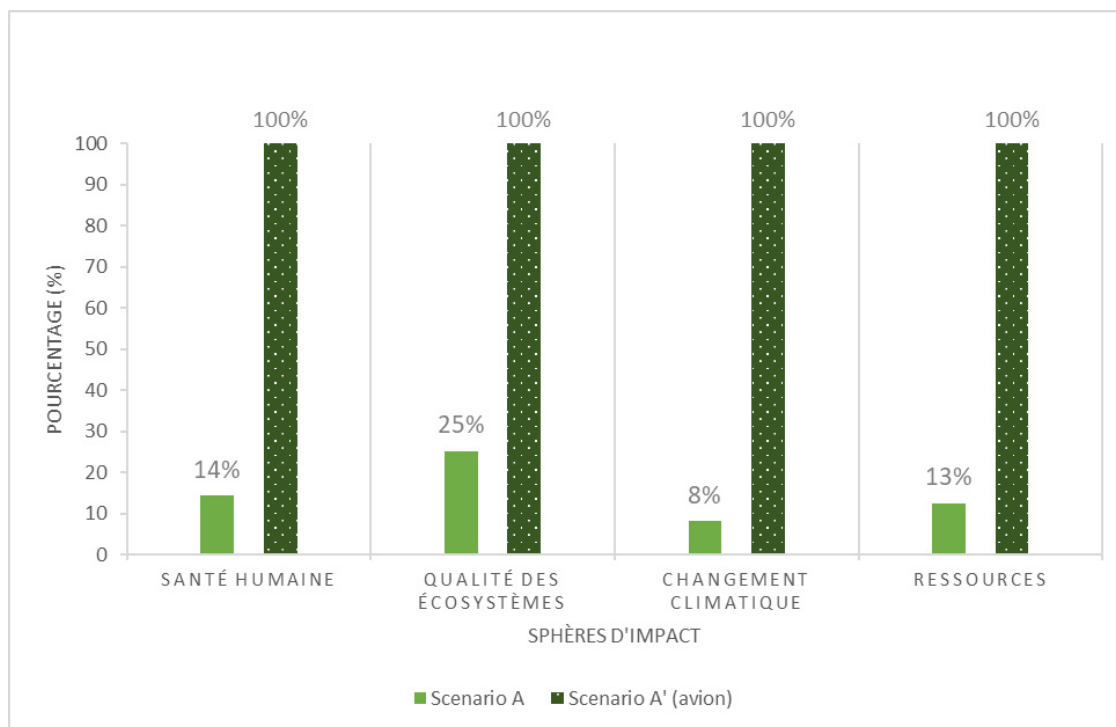


FIGURE 7 : Impacts comparés relatifs du scénario A et d'un scénario A avec un trajet aérien moyen courrier

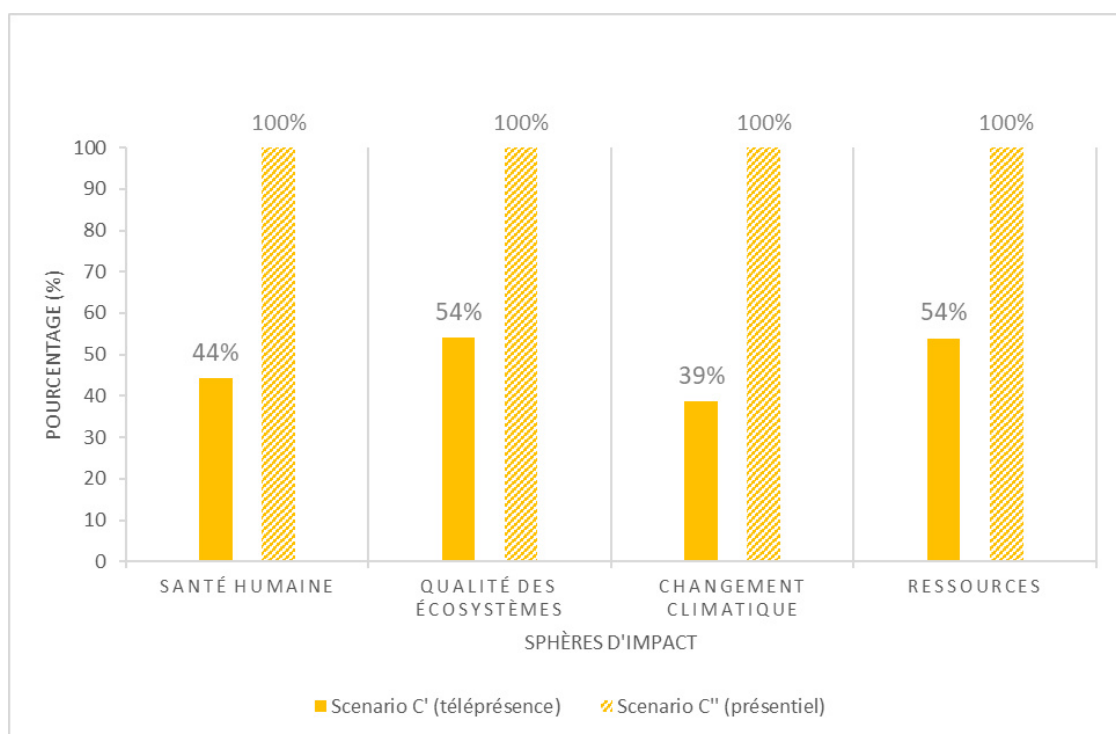


FIGURE 8 : Impacts comparés relatifs des scénarios C' et C''

est négligeable car réparti sur un très grand nombre d'heures de visio-conférence.

Notre méthode a pour ambition d'informer le choix d'une modalité 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 réparti-

tion de leurs impacts à une réunion donnée est par exemple le fruit d'une hypothèse. Or, pour calculer, non pas exactement, 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

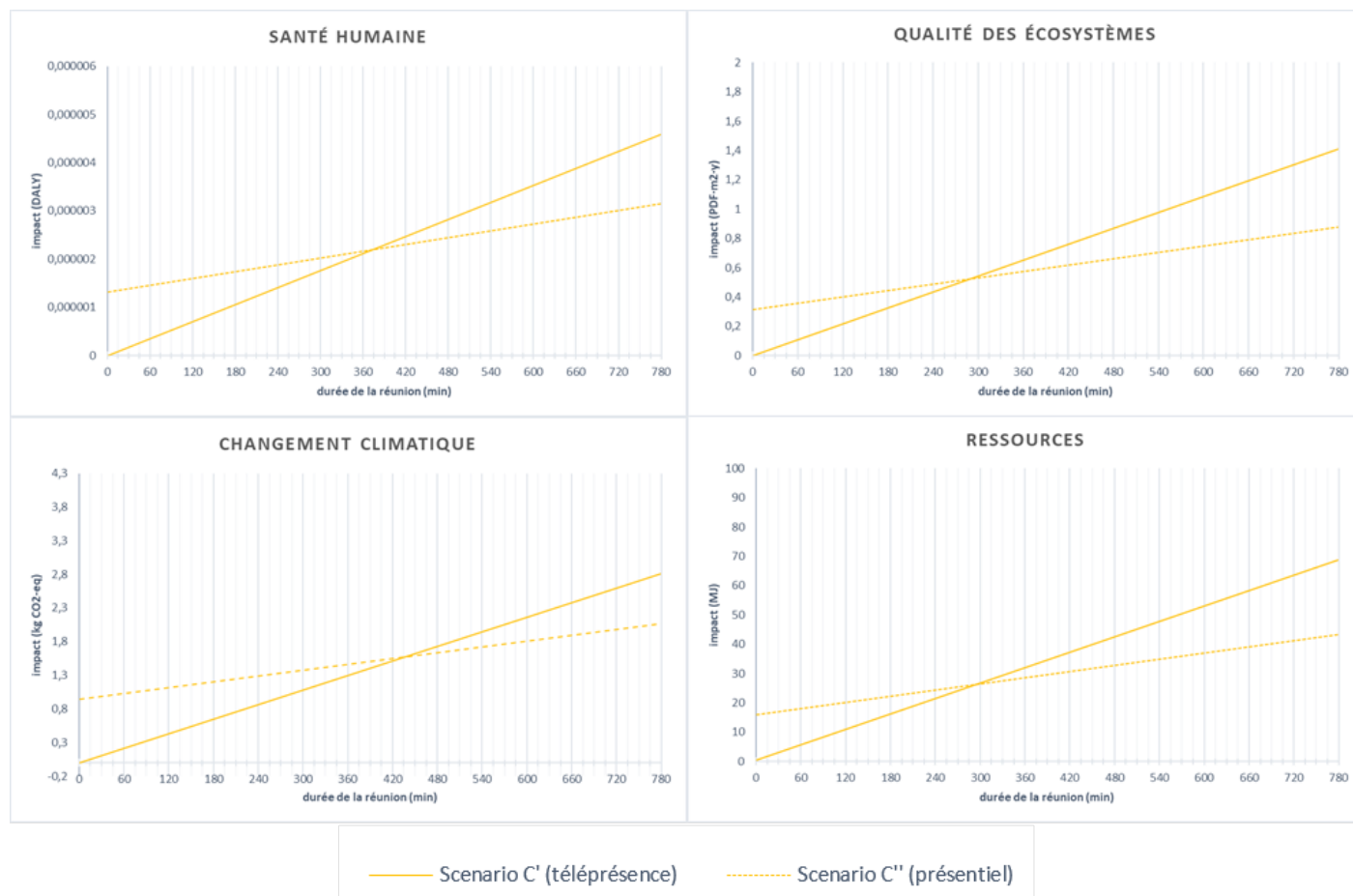


FIGURE 9 : Évolution de l'impact selon la durée de la réunion des scénarios C alternatifs

en amont nécessite donc des simplifications.

Enfin, notre modèle sous-entend qu'une visio-conférence est aussi efficace qu'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 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.

## 5.2 Insuffisances de l'approche quantitative

Le propre d'une approche quantitative est de réduire le réel à des données discrètes. Cela rend possible certaines actions, comme comparer deux impacts grâce à une unité commune, mais invisibilise en retour d'autres aspects, comme les dynamiques technologiques de long terme, dont les effets rebond font partie<sup>2</sup>. Or, ils ne sont que peu pris en compte dans

l'étude de l'impact environnemental du numérique, surtout lorsqu'ils prennent place dans un temps long et un espace élargi (GOSSART 2015). Les occulter 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 outre, l'approche quantitative peut laisser croire à une nature commune des objets qu'elle quantifie et compare. Une réunion où les participants se déplacent à vélo et une autre où chacun utilise un dispositif de téléprésence avancée seront mis sur un pied d'égalité. Cependant, les systèmes techniques qui les rendent possibles ne sont pas les mêmes : datacenters, réseau internet mondialisé, terminaux à bas coup qui reposent sur une économie d'échelle, d'un côté ; usine de production de vélos, vélos que l'on peut réparer soi-même, mode de transport sobre, de l'autre. Le système technique portant la réunion virtuelle semble plus complexe. En particulier, l'autonomie de l'utilisateur ne sera pas la même. Dans le cas de la téléprésence, il doit être relié au réseau électrique, à internet, avoir une connexion efficace et n'aura que peu de possibilité de réparation en cas de panne.

<sup>2</sup>Pour des exemples historiques de l'importance des effets rebond sur les impacts environnementaux, voir GOSSART 2015, p. 435, sur l'intensité énergétique française et JARRIGE et LE ROUX 2017, p. 189, pour les fourneaux fumivores aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles.

À l'inverse, le vélo est utilisable sans ces infrastructures, sur une route ou non, et peut être réparé chez soi. Ne pas voir que différents systèmes techniques sont impliqués invisibilise donc leurs caractéristiques propres et en particulier les effets de seuil dont ils peuvent être porteurs. Or, ceux-ci peuvent avoir d'importantes conséquences environnementales. La 5G en est un exemple. Elle peut apparaître comme un changement uniquement quantitatif — augmenter le débit et le nombre d'appareils connectés — mais est en réalité un saut qualitatif, c'est-à-dire un changement de nature de système technique. 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 nécessitent à terme un redimensionnement du réseau et causent un nouvel effet de seuil (CURRAN 2020). L'impact environnemental de tels effets peut être estimé a posteriori par une méthode quantitative, mais l'anticiper nécessite probablement une autre approche.

## 6 Perspectives futures

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 mobiles<sup>3</sup>. 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. Les études comparatives entre logiciels de visio-conférence pour savoir lequel utiliser afin de réduire son impact (GREENSPECTOR 2020) étant déjà dérisoires, elles vont l'être de plus en plus.

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 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 déconfinement en France, PSA, un des plus gros constructeurs automobiles au monde, annonce qu'il veut 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) pourraient passer à une présence sur site d'une à une journée et demie par semaine d'ici cet été (COLET 2020). Ce genre d'évolution laisse craindre des effets rebond à moyen et long termes (cf. section 5.2).

Davantage d'évaluations environnementales multicritères 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 générique des réunions, la plus complète possible et prenant en compte le plus possible d'étapes du cycle de vie, ainsi qu'une application à plusieurs cas concrets. Nos résultats nous permettent d'affirmer une chose avec certitude : il n'est pas possible d'affirmer sans équivoque qu'en toute situation la téléprésence soit préférable au mode présentiel d'un point de vue environnemental.

La visio-conférence se montre moins impactante à tout point de vue qu'une réunion ayant nécessité des déplacements nationaux ou internationaux. Lorsque des dispositifs de téléprésence avancés sont utilisés et qu'il s'agit de déplacements régionaux et inter-urbains, cela devient 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 (voiture thermique individuelle exclue), soit une visio-conférence où chaque participant n'utiliserait que son ordinateur portable ou autre équipement numérique « léger ». Rappelons qu'une des meilleures façons de diminuer l'empreinte environnementale de sa réunion est de jouer sur la durée de service de ses équipements et l'allongement de leur durée de vie.

Finalement, la réunion exemplaire en termes d'impacts environnementaux est celle à laquelle les participants se rendent avec des moyens de transports doux, c'est-à-dire sans moteur ni batterie (marche, vélo, trottinette, etc.) et pour laquelle un principe de sobriété strict est observé concernant l'usage d'équipements numériques.

<sup>3</sup>La 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).

## Références

- ADEME (2018). *La face cachée du numérique. Réduire les impacts du numérique sur l'environnement*. Rapport technique. Ademe.
- 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-transports-010147.pdf>.
- 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](https://figshare.com/articles/Material_composition_of_consumer_electronics/11306792).
- 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 enfonce 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. HILTHY 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 Environnement ?* 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.
- 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-travaill-es-en-2020/>.
- FANNY LOPEZ (DIR.), Cécile Diguët et (2019). *L'impact spatial et énergétique des data centers sur les territoires*. Rapport Ademe 666/1999. Required institution missing. Ademe.
- 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/>.
- 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.
- JARRIGE, François et Thomas LE ROUX (2017). *La Contamination du monde. Une histoire des pollutions à l'âge industriel*. Paris : Seuil.
- 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.
- MINISTÈRE DU TRAVAIL (16 mars 2020). *Coronavirus — COVID-19 et monde du Travail*. Communiqué de presse. Consulté le : 03/05/2020.
- 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.

- ONG, Dennis, Tim MOORS et Vijay SIVARAMAN (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](https://www.philips.fr/c-p/BDL4220QL_00/signage-solutions-ecran-q-line).
- Renavisio (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'impact

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, la mention « mesure » indique que les valeurs d'impact ont été obtenues 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 une mesure de la puissance consommée par l'élément en un temps donné, grâce à un wattmètre et un chronomètre.

Les impacts des logiciels sont calculés 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 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 Technologique de Compiègne, 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 <sup>2</sup> · y)	Changement climatique (kg CO <sub>2</sub> – 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

Composant	Sources détaillées	Catégories d'impact			
		Santé humaine (DALY)	Qualité des écosystèmes (PDF · m <sup>2</sup> · y)	Changement climatique (kgCO <sub>2</sub> -eq)	Ressources (MJ primaire)
MATÉRIEL					
Écran LCD	Hors-fonctionnement : composant EcoInvent « Display, liquid crystal, 17 inches {GLO}  mar- ket for   Cut-off, S » Durée de service :	$4,75 \cdot 10^{-4}$	$1,40 \cdot 10^2$	$3,60 \cdot 10^2$	$4,79 \cdot 10^3$
	Fonctionnement : mesure	$1,04 \cdot 10^{-11}$	$4,77 \cdot 10^{-6}$	$8,25 \cdot 10^{-6}$	$2,13 \cdot 10^{-3}$
	Veille : mesure	$2,07 \cdot 10^{-13}$	$9,54 \cdot 10^{-8}$	$1,65 \cdot 10^{-7}$	$4,26 \cdot 10^{-5}$
Tour	Hors-fonctionnement : composant EcoInvent « Computer, desktop, without screen {GLO}  market for   Cut-off, S »	$3,49 \cdot 10^{-4}$	$1,31 \cdot 10^2$	$2,28 \cdot 10^2$	$3,19 \cdot 10^3$
	Fonctionnement : mesure	$3,42 \cdot 10^{-11}$	$1,57 \cdot 10^{-5}$	$2,72 \cdot 10^{-5}$	$7,03 \cdot 10^{-3}$
Clavier	Hors-fonctionnement : composant EcoInvent « Keyboard {GLO}  market for   Cut-off, S »	$5,01 \cdot 10^{-5}$	$1,96 \cdot 10^1$	$3,15 \cdot 10^1$	$4,53 \cdot 10^2$
Souris	Hors-fonctionnement : composant EcoInvent « Pointing device, optical mouse, with cable {GLO}  market for   Cut-off, S »	$1,06 \cdot 10^{-5}$	4,73	6,56	$9,35 \cdot 10^1$
LOGICIEL					
Google Hangouts	Deux points, vitesse de téléchargement mini- mum : 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 recom- mandée : 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 mini- mum : 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 recom- mandée : 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 mi- nimum : 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 re- commandée : 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	$1,81 \cdot 10^{-9}$	$8,36 \cdot 10^{-4}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$3,74 \cdot 10^{-1}$
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 mini- mum : 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 recom- mandée : 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 mini- mum : 512 kbit/s, ( <i>Skype</i> 2019)	$8,60 \cdot 10^{-10}$	$3,96 \cdot 10^{-4}$	$6,85 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-1}$

Suite de la table 3					
	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	Composant EcoInvent « Transport, passenger, 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	Composant EcoInvent « Transport, passenger, 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	Composant 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	Composant 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	Composant EcoInvent « Transport, passenger 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	Composant EcoInvent « Transport, passenger 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	Composant EcoInvent « Transport, passenger 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	Composant EcoInvent « Transport, passenger 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	Composant EcoInvent « Transport, passenger 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	Composant EcoInvent « Transport, tram {CH}  processing   Cut-off, S », en personne-kilomètre	$3,93 \cdot 10^{-8}$	$8,87 \cdot 10^{-3}$	$3,41 \cdot 10^{-2}$	$9,21 \cdot 10^{-1}$
Vélo	Composant 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)	$2,8 \cdot 10^{-14}$	$1,29 \cdot 10^{-8}$	$2,23 \cdot 10^{-8}$	$5,77 \cdot 10^{-6}$

Suite de la table 3					
Mix électrique français	Composant 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 composant EcoInvent « Computer, desktop, without screen {GLO}  market for   Cut-off, S »	$3,088 \cdot 10^{-8}$	$1,159 \cdot 10^{-2}$	$2,018 \cdot 10^{-2}$	$2,823 \cdot 10^{-1}$