

Centre Eau Terre Environnement

**EMPREINTE CARBONE DU TÉLÉTRAVAIL :
QUANTIFICATION DES ÉMISSIONS DES GAZ À EFFET DE SERRE
(GES) DU NUMÉRIQUE ET DE L'EFFET REBOND ASSOCIÉ**

Préparé par
Najoua El Abbadi

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès Sciences (M.Sc.)
en sciences de la terre

Jury d'évaluation

Examinatrice interne et présidente du jury	Annie Levasseur École de technologie supérieure - ÉTS Montréal
Examineur externe	Jean-François Boucher Université du Québec à Chicoutimi
Directeur de recherche	Louis-César Pasquier INRS-ETE
Codirectrices de recherche	Louise Hénault-Ethier INRS-ETE Catherine Morency Polytechnique de Montréal

REMERCIEMENTS

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers mes parents dont le soutien indéfectible m'a accompagnée tout au long de ce projet et nourri ma curiosité intellectuelle à travers leur précieux héritage de savoir. Je remercie mes proches et mes ami.e.s, qui m'ont apporté le soutien émotionnel inestimable tout au long de ces deux années, facilitant ainsi mon intégration et mon épanouissement social dans cette nouvelle aventure à la découverte du Québec en particulier et du Canada en général. Une pensée toute particulière pour mes chats d'amour, leur affection m'a été d'un immense réconfort; et je suis infiniment reconnaissante envers mes sœurs qui ont pris soin d'eux durant mon absence.

À l'INRS, je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de recherche, Louis-César Pasquier, pour sa patience et la confiance qu'il m'a accordée. Son regard bienveillant sur mon parcours m'a permis d'évoluer, au fil du temps, en la chercheuse que je suis aujourd'hui. Son encouragement constant à explorer de nouvelles idées, à développer mon autonomie et à poursuivre mes aspirations professionnelles a joué un rôle déterminant dans mon cheminement. Un immense merci également à Louise Hénault-Éthier, ma codirectrice, dont les connaissances et le mentorat ont grandement enrichi cette recherche. Son regard critique, ses conseils avisés et son engagement ont été d'une aide précieuse dans la réalisation de ce travail. Je remercie également mon collègue au doctorat, Samuel Leduc-Frenette, pour son aide dans la planification d'envoi du questionnaire ainsi que les entrevues semi-dirigées.

Ce projet a vu le jour grâce à une collaboration étroite avec l'INRS et le Partenariat Climat Montréal (PCM). Leur engagement financier a été essentiel à la concrétisation de cette étude. Je tiens également à remercier Mitacs et Loto-Québec de leur soutien financier.

À Polytechnique de Montréal, je remercie Catherine Morency ma co-directrice, ainsi que les deux professionnels de recherche, Hubert Verreault et Samuel Duhaime-Morissette, pour leur appui technique lors de la codification du questionnaire et l'extraction des réponses.

Enfin, ma profonde reconnaissance va aux participant.e.s aux questionnaires et aux entrevues semi-dirigées, dont la disponibilité, l'intérêt pour le projet et le partage de leur expérience du télétravail ont permis d'enrichir cette recherche et d'aboutir à des résultats significatifs.

À tous celles et ceux qui ont contribué à cette aventure, de près ou de loin, je vous adresse un immense merci.

LISTE DES ACRONYMES

GES	Gaz à effet de serre
éq. CO ₂	Équivalent de CO ₂
CH ₄	Méthane
N ₂ O	Protoxyde d'azote
HFC	Hydrofluorocarbures
ACV	Analyse du cycle de vie
FE	Facteur d'émission
FC	Facteur de conversion
kg	Kilogramme
g	gramme
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (GIEC en français, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)
PCM	Partenariat Climat Montréal
INRS	Institut national de la recherche scientifique
ETE	Eau Terre Environnement
EMT	Énergie Matériaux Télécommunications
AFSB	Armand-Frappier Santé Biotechnologie
UCS	Urbanisation Culture Société
kWh	Kilowattheure (unité d'énergie)
h	Heure
GO	Gigaoctet (unité de stockage informatique)
TB	Téraoctet (unité de stockage informatique)
SRI	Service des ressources informationnelles

RÉSUMÉ

Le télétravail est devenu une pratique largement adoptée dans la province de Québec, particulièrement depuis son essor rapide à la suite de la pandémie. Toutefois, si la suppression des déplacements domicile-travail représente un gain environnemental notable, la revue de la littérature suggère plusieurs effets susceptibles de réduire cet avantage. Parmi eux, l'augmentation du nombre d'équipements informatiques et la multiplication des visioconférences sont des habitudes marquantes. À notre connaissance, ces impacts n'ont pas encore été quantifiés dans d'autres études.

Notre objectif est donc de quantifier l'effet rebond du télétravail sur les habitudes liées au numérique. L'approche privilégiée ici repose sur l'analyse de cycle de vie-carbone (ACV-carbone), incluant toutes les activités numériques des utilisateurs, même le stockage des données, permettant d'aboutir à une estimation plus précise. Afin d'atteindre cet objectif, une double approche a été mise en place. D'un côté, un questionnaire en ligne a été distribué à la communauté de l'INRS, permettant de recueillir des données quantitatives précises sur les habitudes liées au télétravail. De l'autre, des entretiens semi-directifs ont été menés pour approfondir la compréhension des comportements ou des préférences individuels en matière d'usage du numérique. Parallèlement, une entrevue avec le directeur du Service des ressources informationnelles (SRI) a permis d'explorer la gestion du numérique à l'échelle institutionnelle. Cette combinaison de méthodes offre une vision complète, alliant chiffres et nuances qualitatives, pour mieux cerner les enjeux environnementaux du télétravail. Les données collectées ont ensuite été converties en émissions de GES à l'aide d'équations et de facteurs de conversion. Des analyses ont ensuite exploré comment les activités numériques sont influencées par divers paramètres, notamment les catégories d'emploi, les centres de l'INRS, et même les différents scénarios de télétravail. Chaque perspective a apporté un éclairage détaillé, révélant des tendances précieuses pour mieux comprendre les dynamiques à l'œuvre et identifier des pistes d'amélioration. En effet, cette méthodologie de ce projet ne se limite pas à une simple étude : elle s'impose comme un véritable projet pilote, conçu pour être reproduit et adapté par d'autres organisations et entreprises partenaires du Partenariat Climat Montréal (PCM), un partenaire central de cette étude.

Les résultats montrent que les émissions de GES liées au numérique s'élèvent à 33 946 kg éq. CO₂ pour la population échantillonnée (n = 319, soit 106,48 kg éq. CO₂ par personne) et à 142 717 kg éq. CO₂ pour la population totale (N = 1 558, 91,60 kg éq. CO₂ par personne). Ces émissions proviennent principalement de l'acquisition de nouveaux équipements, représentant 96,4% du total, tandis que l'usage des appareils existants ne contribue qu'à 3,6%. Ce déséquilibre s'explique par la fabrication de ces équipements dans des pays à forte intensité carbone, où les processus

industriels sont fortement émetteurs, alors que l'électricité québécoise, majoritairement décarbonée, rend les émissions liées à l'utilisation négligeable, même en cas d'augmentation du temps d'utilisation pour certains participant.e.s.

Enfin, nos analyses révèlent que des facteurs psychologiques, comme l'adolescence technologique (désir de nouveauté et perception de besoins technologiques accrus), jouent un rôle déterminant dans la motivation à acquérir de nouveaux équipements. Cependant, éviter les achats superflus ou prolonger la durée de vie des équipements informatiques pourrait réduire jusqu'à 96% des émissions de GES liées au numérique.

Mots clés : Télétravail, Gaz à effet de serre, effet rebond, numérique, TIC, quantification des GES, Analyse de cycle de vie.

ABSTRACT

Telework has become a widely adopted practice in the province of Quebec, particularly since its rapid growth following the pandemic. However, while eliminating commuting represents a significant environmental gain, the literature review suggests several effects that could reduce this advantage. Among them, the increase in the number of computer equipment and the proliferation of videoconferences are significant trends. To our knowledge, these impacts have not yet been quantified in other studies.

Our objective is therefore to quantify the rebound effect of telework on habits related to digital activities. To do this, a mixed approach was adopted: an online questionnaire collected quantitative data, while semi-structured interviews provided a more detailed understanding of the behaviours of the INRS community. The data collected were then converted into GHG emissions using specific equations and conversion factors.

The approach favored here is based on Life Cycle Assessment (LCA), including all users' digital activities—even data storage—to provide a more accurate estimate. To achieve this goal, a dual approach was implemented. On one hand, an online questionnaire was distributed to the INRS community to gather precise quantitative data on teleworking habits. On the other hand, semi-structured interviews were conducted to gain deeper insight into individual behaviors and preferences related to digital usage. In parallel, an interview with the director of the IT Department (SRI) provided an institutional perspective on digital management.

This combination of methods offers a comprehensive view, blending quantitative figures with qualitative nuance to better grasp the environmental issues linked to telework. The collected data was then converted into GHG emissions using equations and conversion factors. Further analyses explored how digital activities are influenced by various parameters, including job categories, INRS centers, and even different teleworking scenarios.

Each perspective offered detailed insight, revealing valuable trends that help illuminate the underlying dynamics and identify areas for improvement. Indeed, the methodology of this project goes beyond a simple study: it stands as a true pilot project, designed to be replicated and adapted by other organizations and partner companies of the PCM, a central partner in this study.

The results show that digital-related GHG emissions amount to 33,946 kg eq. CO₂ for the sampled population (n = 319) and 142,717 kg eq.CO₂ for the total population (N = 1,558). These emissions come mainly from the acquisition of new equipment, representing 96.4% of the total, while the use

of existing devices contributes only 3.6%. This imbalance is explained by the manufacture of this equipment in carbon-intensive countries, where industrial processes are high emitters, while Quebec electricity, which is mostly decarbonized, makes emissions related to use negligible, even in the event of an increase in screen time for some participants. Finally, our analyses reveal that psychological factors, such as technological adolescence (desire for novelty and the perception of increased technological needs), play a determining role in the motivation to acquire new equipment. However, avoiding unnecessary purchases or extending the lifespan of IT equipment could reduce digital-related GHG emissions by up to 96%.

Keywords: Telework, Greenhouse gases , rebound effect, digital , GHG quantification, Life Cycle Analysis.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
LISTE DES ACRONYMES.....	V
RÉSUMÉ	VII
ABSTRACT.....	X
TABLE DES MATIÈRES.....	XIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XVII
LISTE DES FIGURES.....	XIX
LISTE DES ÉQUATIONS.....	XXII
LISTE DES ANNEXES.....	XXIV
1. INTRODUCTION ET MISE EN CONTEXTE.....	1
2. REVUE DE LA LITTÉRATURE	6
2.1. Concept de l’empreinte carbone	6
2.2. Émissions directes et indirectes des GES et périmètres de comptabilisation	7
2.3. Télétravail et effets rebond	9
2.3.1. Télétravail : Définition et contexte	9
2.3.2. Ambiguïté des effets du télétravail	11
2.3.3. Mobilité et transport durant le télétravail	13
2.3.4. Consommation énergétique	15

2.3.5.	Numérique et effets environnementaux	17
2.3.6.	Effet rebond, une menace pour l'efficacité énergétique	22
2.3.7.	Effets rebond liés au télétravail	23
2.4.	INRS : Définition, mission et rôle	25
2.5.	Description de la politique de télétravail de l'INRS	25
3.	PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS.....	26
4.	MÉTHODOLOGIE.....	28
4.1.	Questionnaire en ligne	28
4.2.	Entretiens semi-dirigés	35
4.2.1.	Gestionnaire	35
4.2.2.	Employé.e.s et étudiant.e.s	35
4.3.	Calcul des émissions des GES	37
4.3.1.	Cadrage méthodologie de l'ACV-carbone utilisée : Fonction, unité fonctionnelle et flux de référence	37
4.3.2.	Descriptions de la limite du système étudié	38
4.3.3.	Potentiel de réchauffement planétaire	41
4.3.4.	Facteurs d'émission	41
4.3.5.	Modélisation des émissions de GES liées au numérique	42
4.3.6.	Incertitude liée aux données et aux facteurs d'émission	47
4.4.	Traitement des données et analyse des résultats	49
4.4.1.	Traitement des données qualitatives : entrevues semi-dirigées des employé.e.s	49
4.4.2.	Traitement des données quantitatives : questionnaire	49
4.4.3.	Analyse des résultats	50
4.4.4.	Régression pas à pas	51
4.4.5.	Pondération des résultats pour la communauté de l'INRS	52
5.	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	54
5.1.	Aperçu sur le numérique au sein de l'INRS : résultats des entretiens semi-dirigés avec les gestionnaires	54

5.2.	Taux des réponses et représentativité d'échantillonnage	56
5.3.	Profil des répondant.e.s	59
5.4.	Émissions de GES liées au numérique en télétravail	60
5.4.1.	Caractérisation des résultats selon l'activité du numérique liée au télétravail	61
5.4.2.	Caractérisation des résultats selon le type d'emploi	68
5.4.3.	Caractérisation des résultats selon les centres de l'INRS	72
5.4.4.	Caractérisation des résultats selon le mode et les jours de travail	73
5.4.5.	Régression pas à pas	74
5.4.6.	Résultats de la pondération des GES de l'INRS	77
6.	CONCLUSION, DISCUSSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVE.....	78
6.1.	Conclusion et discussions	78
6.2.	Perspectives d'amélioration et recommandations	80
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	84
	ANNEXES	95

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Effets du télétravail sur la santé physique, morale et le bien-être social. (WHO et ILO, 2021).....	12
Tableau 2 : Effets rebond du télétravail (Greenworking et ADEME, 2020).....	24
Tableau 3 : Aperçu des questions utilisées dans le questionnaire en ligne.....	33
Tableau 4 : Sources d'émissions incluses et exclues.....	39
Tableau 5 : Potentiels de réchauffement planétaire sur un horizon de 100 ans. (Solomon <i>et al.</i> , 2007).....	41
Tableau 6 : Fiabilité des données utilisées de la présente étude.....	48
Tableau 7 : Distribution des réponses par catégorie d'emploi.....	58
Tableau 8 : Distribution des réponses par centre de l'INRS.....	59
Tableau 9 : Empreinte carbone du numérique individuelle de la population échantillonnée (n = 319).....	61
Tableau 10 : Émissions GES liés à la consommation électrique des terminaux avec ou sans télétravail.....	64
Tableau 11 : Taux de variation d'envoi des courriels en contexte de télétravail plutôt qu'en contexte de travail en présentiel.....	65
Tableau 12 : Taux d'augmentation du stockage des données en lien avec le télétravail (n = 41). 66	66
Tableau 13 : Nombre des réponses sur le stockage des données dans l'infonuagique parmi les répondants de l'INRS (n = 319).	66
Tableau 14 : Nombre de réponses sur le stockage des données hors infonuagique parmi les répondants de l'INRS (n = 48).	67
Tableau 15 : Moyennes des GES en fonction du centre INRS.....	73
Tableau 16 : Coefficients des variables utilisées dans la régression pas à pas.....	76

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Variation de la température mondiale observée et projections issues des modèles climatiques (GIEC, 2013).....	1
Figure 2 : Schéma des catégories (scope) des émissions des GES (GHG Protocol, 2011)	8
Figure 3 : Pics de télétravail dans différents pays (RA : France, SWE : Suède, GBR : Royaume-Uni, USA : États-Unis, ITA : Italie, JPN : Japon) pendant la pandémie de COVID-19 par secteur (OCDE, 2020)	10
Figure 4 : Ambiguïté des effets du télétravail (Gingras et Belleau, 2015).	13
Figure 5: Comparaison de la consommation énergétique par habitant du Québec avec celle d'autres pays en 2020 (Chaire de gestion du secteur de l'énergie, 2023).	15
Figure 6 : Consommation de différentes formes d'énergie par secteur d'activité au Québec en 2020 (Chaire de gestion du secteur de l'énergie, 2023).	16
Figure 7 : Évolution de la part du numérique dans les émissions de GES mondiales, entre la période 2013-2025 (The Shift Project, 2021).....	18
Figure 8: Évolution mondiale de la consommation énergétique associée au numérique pour les années de 2013, 2020 et 2025 de chaque catégorie (trafic de données (a et c, bleu) ou nombre d'appareils (d et e, orange) en parallèle de l'évolution de l'efficacité énergétique (gris). (a) Réseaux fixes échelle : 2013 = 1. Les chiffres (relatifs) sont similaires pour le Canada et le Québec, sauf pour le trafic des centres de données où le cas du Québec est indiqué en hachuré (The Shift Project, 2021).....	19
Figure 9 : Schéma représentatif de processus de contact avec la communauté de l'INRS (*liste fournie par le service des ressources humaines (employé.e.s) et par le service des études supérieures et de la réussite étudiante (étudiant.e.s))	30
Figure 10 : Schéma d'identification de la population de l'étude.....	57
Figure 11 : Nombre de réponses en fonction des tranches d'âge (n = 362).....	60
Figure 12 : Nombre de réponses en fonction du genre (n = 362).....	60
Figure 13 : nombre de réponses par centre de l'INRS	60
Figure 14 : Nombre de réponses par type d'emploi (n = 364)	60
Figure 15 : Empreinte carbone individuelle des activités du numérique pour la population échantillonnée (n =319).....	62
Figure 16 : Nombre de terminaux acquis en lien avec le télétravail (n = 267).....	63
Figure 17 : Nombre de terminaux disposés dans le lieu de télétravail (n = 267)	63

Figure 18 : Taux des GES liés aux visioconférences en télétravail (n=319).....	64
Figure 19 : Empreinte carbone individuelle du numérique en fonction des catégories d'emploi pour la population échantillonnée (n=319).....	68
Figure 20 : Répartition de la moyenne des GES associés aux activités du numérique en fonction de type d'emploi (n=319).	69
Figure 21 : Répartition des terminaux acquis en fonction de type d'emploi (n=267).....	70
Figure 22 : Répartition du taux et de la nature des terminaux acquis pour le télétravail, en fonction du type d'emploi (n=319).	71
Figure 23 : Empreinte carbone du numérique en fonction des centres INRS (n=319).....	72
Figure 24 : Empreinte carbone du numérique en fonction de jours de télétravail (n=272).....	74
Figure 25 : comparaison entre les valeurs observées et estimées, diagramme de dispersion.....	76
Figure 26 : Répartition des taux de l’empreinte carbone du numérique pour la population totale de l’INRS (N=1558), résultats de la pondération.....	77

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1 : Estimation des émissions de GES des terminaux	42
Équation 2 : Conversion de l'alimentation électrique des terminaux en GES	42
Équation 3 : GES associés aux visioconférences	43
Équation 4 : Conversion des courriels envoyés en GES	44
Équation 5 : Calcul des GES associés au stockage des données dans l'infonuagique de l'INRS ..	45
Équation 6 : Calcul des GES associés au stockage des données dans l'infonuagique personnelle	45
Équation 7 : Calcul des GES associés au stockage des données dans l'espace personnel physique	46
Équation 8 : Calcul des GES associés au stockage des données	46
Équation 9 : Formule explication de la régression pas à pas (Hilton et Armstrong, 2011; Woltman <i>et al.</i> , 2012).....	51

LISTE DES ANNEXES

Annexe I : Questions utilisées pour le questionnaire en ligne de la partie du numérique	95
Annexe II : Grille des questions de l'entretien semi-dirigé pour le directeur du SRI.....	100
Annexe III : Grille des questions des entretiens semi-dirigés pour les employé.e.s	101
Annexe IV : Courriel envoyé au directeur du SRI pour l'invitation de participation à l'entretien semi-dirigé.....	103
Annexe V : Statistiques des GES individuels par type d'emploi : Moyenne, Médiane, Min, Max, Écart Type	103
Annexe VI : Explications des catégories d'emploi	105
Annexe VII : Répartition des GES en fonction des activités du numérique associées au télétravail (n = 319).....	106
Annexe VIII : Répartition des GES en fonction du mode d'emploi et catégorie de télétravail ...	107
Annexe IX : Résultats pondérés des GES de la population totale de l'INRS (N = 1558)	109
Annexe X : Résultats de la régression pas à pas de type (vers l'avant).....	110
Annexe XI : Volume consommé (GO/heure) par type de visioconférence utilisé	114
Annexe XII : Les terminaux acquis par centre avec leurs GES et consommation électrique associée	115
Annexe XIII : Comparaisons multiples entre les différents scénarios de jours de télétravail par test de Dunn	118

1. INTRODUCTION ET MISE EN CONTEXTE

Les changements climatiques impliquent une hausse des températures, une fonte accélérée des glaciers, une montée du niveau de la mer et une recrudescence des phénomènes météorologiques extrêmes. Ces transformations bouleversent les écosystèmes terrestres et marins ainsi que les sociétés humaines, comme le souligne le 6^e rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) publié en mars 2023 (IPCC, 2023). Le rapport souligne les principales répercussions que constituent la hausse des températures moyennes mondiales, la fonte des glaciers, l'augmentation du niveau de la mer, l'acidification des océans et les événements météorologiques extrêmes causés par les changements climatiques. Selon le même rapport, les gaz à effet de serre (GES) issus des activités anthropiques sont la principale cause du réchauffement global du climat depuis 1850 puisque, depuis la période préindustrielle, les GES et les polluants atmosphériques se sont ajoutés aux causes naturelles de la hausse des températures.

La température moyenne mondiale a augmenté en moyenne de 0,25 °C par décennie entre les années 1960 et 2017 (GIEC, 2019). Actuellement, nous rapprochant dangereusement du seuil de 1,5°C fixé par les accords climatiques (GIEC, 2019). Cette tendance devrait se poursuivre et probablement s'accélérer si des mesures appropriées ne sont pas mises en œuvre (figure 1). L'accord de Paris ratifié en 2015 a fixé comme objectif une hausse moyenne des températures du globe de maximum 1,5°C aux dessus des températures préindustrielles, afin de limiter l'effet global des actions humaines sur la planète. Pour atteindre cet objectif, différents scénarios suggèrent l'importance de réduire les émissions de 7,6% par année entre 2020 et 2030 afin de limiter le réchauffement planétaire (IPCC, 2023).

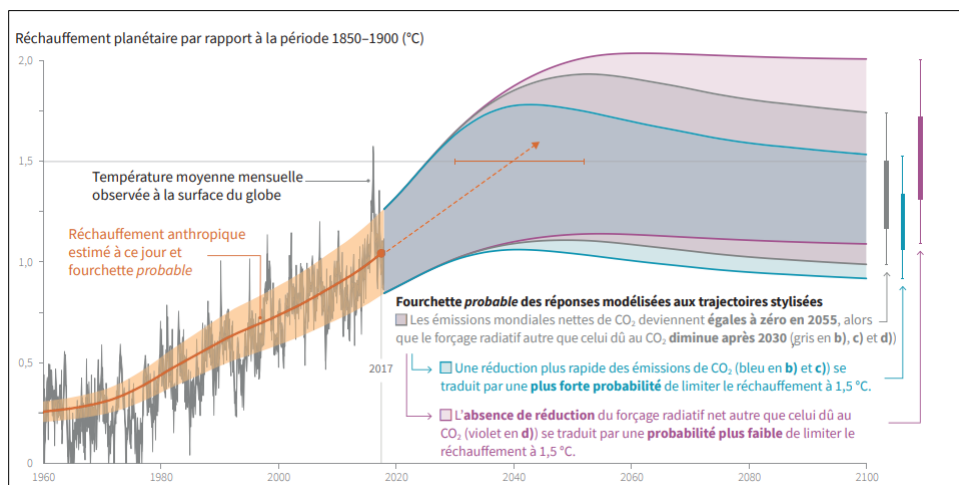


Figure 1: Variation de la température mondiale observée et projections issues des modèles climatiques (GIEC,2013)

Le Canada s'est fixé en 2021 l'objectif de réduire de 40 à 45% ses émissions de GES d'ici 2030, par rapport au niveau de 2005, et d'éliminer les émissions de GES d'ici 2050 (ECCC, 2023). Le pays a mis en place depuis 2019 un système de tarification fondé sur le rendement pour les industries, offrant un incitatif financier visant à encourager les émetteurs industriels à réduire leurs émissions de GES, à favoriser l'innovation et à préserver leur compétitivité. Ce mécanisme vise également à limiter les fuites de carbone, c'est-à-dire le déplacement d'industries vers des régions où la pollution carbone est moins coûteuse (ECCC, 2025). Pour les particuliers, une redevance carbone est imposée dans les provinces qui n'ont pas de programmes équivalents, avec des remboursements versés directement aux citoyens comme incitation à agir pour le climat (ARC, 2023). Ces mesures financent des initiatives de réduction des GES et soutiennent l'économie en redistribuant les revenus aux ménages (ECCC, 2025).

De son côté, le gouvernement du Québec s'est engagé en 2017 à réduire de 37,5% ses émissions de GES à l'horizon de 2030 par rapport au niveau de 1990, à s'adapter aux changements climatiques et à soutenir la transformation de la société et de l'économie (Gouvernement du Québec, 2024). Cet engagement s'inscrit dans une démarche opérationnelle qui fixera d'une part la vision, les grandes orientations et d'autre part un cadre de mise en cohérence des programmes, des plans et des politiques sectorielles, notamment :

- Système de plafonnement et d'échange de droits d'émission (SPEDE) : adopté dès 2013, ce mécanisme de marché flexible établit un prix du carbone dans l'économie servant la prise de décisions d'affaires, des réductions des GES à moindre coût et la mise en place de technologies propres. Le niveau de réduction désiré sera atteint sur la période 2021-2030 dans l'ensemble régional couvert, soit le Québec et la Californie (Ministère des Finances du Québec, 2024).
- Plan pour une économie verte (PEV) 2030 : Le plan comprend une série de mesures pour encourager l'électrification des transports, l'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables. Un investissement de 5 M\$ a été consacré au PEV entre 2021 et 2023. Parmi les différentes actions proposées figure l'adoption du télétravail afin de réduire les émissions associées aux déplacements des travailleurs et des travailleuses (Gouvernement du Québec, 2024).
- Le programme ÉcoPerformance (Transition énergétique Québec, 2023) s'inscrit dans le plan de mise en œuvre du PEV 2030 en mettant en place les mesures suivantes :
 - Appuyer la réalisation de projets en efficacité énergétique et en conversion énergétique;
 - Soutenir la conversion vers l'électricité et d'autres énergies renouvelables dans les bâtiments commerciaux et institutionnels;

- Appuyer la conversion des systèmes d'halocarbures vers des solutions moins émissives.

Le télétravail a connu une explosion sans précédent au Canada et au Québec à la suite de la pandémie de COVID-19. En 2016, seulement 7% de la population canadienne travaillait à distance, mais ce chiffre a grimpé à 24% en juillet 2022 avant de redescendre légèrement à 21% en juillet 2023 (Statistique Canada, 2024). Cette augmentation significative s'est particulièrement manifestée dans des secteurs déjà familiarisés avec les technologies de l'information et des communications (TIC) (Haider et Anwar, 2023) avec des plateformes numériques comme Microsoft Office 365, Google Workspace et Zoom et des solutions infonuagiques comme Amazon Web Services ou Microsoft Azure sont largement utilisés. En optimisant la collaboration à distance, la gestion documentaire et le stockage en ligne, ces technologies ont grandement facilité l'essor du télétravail.

Au Québec, cette transition vers le télétravail révèle les nombreux avantages du télétravail, tant pour le bien-être que pour les finances des employé.e.s. Selon une étude de l'Institut national de santé publique du Québec (2022), 94% des personnes sondées se disent « assez » ou « très » satisfaites de leur expérience de télétravail. Parmi elles, 40% estiment jouir d'une meilleure conciliation entre le travail et la vie personnelle, 33% valorisent la diminution du temps de déplacement, 9% notent une hausse de leur productivité et 9% mettent en avant les économies réalisées sur les repas, les transports et l'habillement.

Toutefois, à l'échelle fédérale, le gouvernement du Canada a décrété au printemps 2023 un retour obligatoire au bureau pour un minimum de 3 jours par semaine pour les fonctionnaires, et au moins 4 jours pour les cadres, une mesure qui pourrait limiter les gains environnementaux liés à la réduction du transport (SCT, 2024). Cette décision s'inscrit dans un contexte de réévaluation des pratiques de travail post-pandémie et pourrait influencer les politiques provinciales sur le télétravail.

En effet, pendant la pandémie, la réduction de l'utilisation des transports publics et privés a contribué à une diminution notable de la congestion urbaine et des émissions polluantes dans les grandes villes canadiennes (Haider et Anwar, 2023). À l'échelle mondiale, l'année 2020 a été marquée par une réduction du smog et l'amélioration de la qualité de l'air dans plusieurs grandes villes, une baisse de 65 à 95% de la congestion aux heures de pointe, une diminution du trafic routier de 50 à 75% ainsi qu'une chute significative de la consommation de pétrole, avec 9 millions de barils en moins par jour (Crow et Millot, 2020).

Si les effets positifs sur la réduction des déplacements domicile-travail sont évidents, les nouvelles habitudes de consommation énergétique à domicile – notamment l’augmentation de l’usage de l’eau chaude, du chauffage et de l’électricité – ont partiellement atténué ces gains environnementaux, bien que l’augmentation globale de la consommation d’électricité demeure relativement faible (moins de 2%) (Rouleau et Gosselin, 2021). Grâce à l’utilisation d’hydroélectricité moins polluante d’Hydro-Québec, l’effet de cette hausse de consommation résidentielle reste limité au Québec comparativement aux régions où l’électricité est produite à partir de sources plus polluantes et entraînerait des conséquences environnementales bien plus graves.

Sur le volet numérique, l’augmentation de l’usage des technologies et la nécessité d’acquérir de nouveaux équipements pour le travail à domicile entraînent une hausse des émissions des GES. En effet, la fabrication de ces équipements repose sur des métaux rares (le néodyme, le terbium et le dysprosium), dont l’extraction est à la fois énergivore et polluante, générant des émissions de CO₂ et contaminant les sols et les eaux (Garcia, 2019; Mondillo *et al.*, 2019). Encore plus, la courte durée de vie technique réelle d’utilisation des équipements – moyennement, 2 ans pour les téléphones cellulaires et de 2,5 à 5 ans pour les ordinateurs (ADEME, 2012), malgré une durée de vie potentielle souvent plus longue – peut aggraver l’effet environnemental en augmentant la demande en ressources et en générant des déchets électroniques. En parallèle, le déploiement de nouvelles technologies comme la 5G et la future 6G exige des infrastructures énergivores, avec une multiplication des antennes et une forte consommation électrique en augmentant le nombre de capteurs connectés et la demande en centres de données (Hetzer *et al.*, 2019).

Si des études ont déjà examiné l’effet du télétravail, certaines présentent certaines lacunes : Greenworking et ADEME (2020) ont évoqué l’effet rebond du télétravail (y compris le numérique) sans quantifier les émissions de GES, tandis que Tao *et al.* (2023) ont omis des activités comme la fabrication d’équipement informatique. Ainsi, l’effet du télétravail sur l’empreinte carbone reste mal cerné. À notre connaissance, cette étude est la première à réaliser une analyse dans une perspective cycle de vie, en considérant des étapes, de la fabrication à la fin de vie des équipements du numérique en contexte de télétravail avec des recherches approfondies pour évaluer les répercussions réelles de ces pratiques. L’analyse de l’empreinte carbone du télétravail présentée ici ne couvre pas les effets liés aux déplacements ni à la consommation énergétique résidentielle. Ces deux volets font l’objet d’un projet de doctorat mené par l’étudiant Samuel Leduc-Frenette au sein du même institut et de la même équipe de recherche.

La présente étude propose un premier état des lieux de l’empreinte carbone dans le milieu institutionnel et l’enseignement supérieur à travers une étude de cas menée à l’Institut national de la recherche scientifique (INRS). Cet acteur, dont la mission première est la recherche et la formation aux cycles supérieurs, est engagé dans des actions de développement durable et la réduction des GES. Il a notamment réalisé 4 bilans d’émissions des GES. D’abord, un en 2019-2020 pour le centre Eau Terre Environnement, puis en les trois autres bilans pour 2020-2021, 2021-2022 et 2022-2023, couvrant les quatre centres de recherche et l’administration. En 2021, l’INRS adoptait une politique de télétravail principalement pour des motivations liées à la gestion des ressources humaines, mais aussi en aspirant à réduire son empreinte carbone. En 2022, l’INRS modernisait ses technologies de l’information avec le passage vers l’infonuagique. En 2024, un calculateur des GES pour les déplacements professionnels ainsi qu’un plan de gestion de déplacement ont été élaborés. L’INRS vise ainsi à réaliser un diagnostic de mobilité à l’échelle institutionnelle et à mettre en place des mesures incitatives pour le transport durable. En 2025, l’INRS a participé à la journée mondiale du nettoyage numérique pour sensibiliser sa communauté à l’effet environnemental du numérique et encourager des pratiques plus responsables et durables afin de réduire son empreinte carbone.

Dans le cadre du projet de l’*Empreinte carbone du télétravail*, l’INRS souhaite évaluer l’effet des nouveaux modes de travail afin de mesurer les avantages écologiques de sa politique de télétravail adoptée en 2021. Ce projet vise le développement d’une méthodologie transférable auprès d’autres organisations partenaires du PCM, un acteur central de ce projet. Le PCM a lancé en 2021 l’initiative « les grands gestes » avec une trentaine de membres en constituant une alliance inédite regroupant des acteurs économiques, philanthropiques, institutionnels et environnementaux montréalais, afin d’accélérer l’atteinte des objectifs de carboneutralité et de résilience climatique fixés par la métropole.

L’étude s’appuie sur une approche d’ACV-carbone pour évaluer les émissions de GES associées au numérique en contexte de télétravail pour la communauté de l’INRS. La méthodologie combine des données issues d’un questionnaire quantitatif et d’entretiens semi-directifs, permettant de caractériser à la fois les usages numériques (visioconférences, courriels, stockage, etc.) et les équipements mobilisés (ordinateurs, écrans supplémentaires) mobilisés pour faire le télétravail. Les résultats sont ensuite extrapolés à l’ensemble de la population étudiée afin de fournir une estimation globale des émissions. Ce cadre méthodologique permet d’identifier les éléments les plus émetteurs et d’apporter des éléments concrets pour orienter les recommandations en matière de réduction des impacts environnementaux liés au numérique en pratiquant le télétravail.

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

Le travail en général, mais aussi le télétravail, occasionne différentes émissions de GES qui affectent l’empreinte carbone de ces pratiques. Dans la revue de la littérature suivante, les différentes émissions GES associées aux activités humaines sont définies, en mettant en lumière les principales sources d’émissions. Ensuite, nous abordons la définition du télétravail en explorant son effet environnemental potentiel. L’effet rebond, qui se manifeste par des comportements compensatoires susceptibles d’annuler les gains environnementaux estimés, est aussi défini et pris en considération. Enfin, le rôle du numérique dans l’augmentation des émissions de GES est analysé en examinant les habitudes qui facilitent le télétravail, mais contribuent également à l’augmentation de l’empreinte carbone à travers la consommation d’énergie des infrastructures numériques.

2.1. Concept de l’empreinte carbone

À l’origine, le concept de l’empreinte carbone est dérivé de l’empreinte écologique telle que définie par Wackernagel et Rees (1998). Celle-ci est considérée comme un outil qui quantifie l’utilisation des ressources naturelles et la génération de déchets résultant des activités humaines (consommation, production, transport, etc.) en quantifiant la surface bioproductive nécessaire pour les soutenir. Elle est exprimée en équivalent CO₂, une unité représentant le CO₂ lui-même ainsi que d’autres GES avec un potentiel de réchauffement climatique variable. Au fil du temps, le concept d’empreinte carbone a gagné en popularité, notamment grâce à la prise de conscience accrue des enjeux environnementaux et des changements climatiques, et a commencé à devenir synonyme d’une comptabilité complète des GES sur les étapes du cycle de vie de tout produit ou activité (East, 2008). Parallèlement, Wiedmann et Minx (2008) ont proposé que la méthode de calcul de l’empreinte carbone, calculée selon des méthodologies adaptées aux frontières de l’étude, comme l’ACV-carbone, puisse être évaluée à différentes échelles (individuelle, organisationnelle ou nationale) afin de guider les politiques climatiques, les stratégies de durabilité et la sensibilisation publique. Wright *et al.* (2011) ont suggéré que l’empreinte carbone devrait inclure le CO₂ et le CH₄ ainsi que d’autres gaz à effet de serre émis tout au long du cycle de vie d’un produit ou d’une activité.

La présente étude analyse en détail l’empreinte carbone du numérique en période de télétravail pour la communauté de l’INRS pour une évaluation plus complète et approfondie.

2.2. Émissions directes et indirectes des GES et périmètres de comptabilisation

2.2.1. Inventaire territorial

Le guide élaboré par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) à l'attention des pays comprend la méthodologie pour aider les pays à établir des inventaires nationaux de GES (GIEC, 2019). Initialement publié en 2006, il a été révisé en 2019 afin de mettre à jour les lignes directrices en intégrant les avancées scientifiques et méthodologiques récentes. Cette révision a été adoptée lors de 43^e session du GIEC en avril 2016 et officiellement publiée en 2019.

2.2.2. Inventaire organisationnel

La norme de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) 14064-1 et -2, qui guide les entreprises et les organisations dans la comptabilité des émissions directes et indirectes (ISO, 2018). Les exigences de l'ISO 14064-1 couvrent la conception, le développement, la gestion, la déclaration et la vérification de l'inventaire des GES d'une organisation, pour assurer la crédibilité des déclarations de GES. Elle sert de base à d'autres référentiels clés, tels que l'ISO 14067 (empreinte carbone des produits et services). Tandis que l'ISO 14064-2 destinées aux projets GES, qui adoptent également une approche empreinte carbone.

On distingue les trois catégories d'émissions suivantes (figure 2) :

Catégorie 1 : Émissions directes de GES, se produisent à partir de sources appartenant à l'organisation ou sous son contrôle, comme les émissions de combustion provenant du chauffage, de véhicules, etc.

Catégorie 2 : Émissions indirectes de GES liées à la production d'énergie achetée et consommée par l'organisation. L'énergie achetée est définie comme l'énergie qui est achetée ou fournie d'une autre manière dans les limites organisationnelles de l'entreprise. Les émissions de la catégorie 2 se produisent physiquement à l'installation où l'énergie est produite.

Catégorie 3 : Toutes les autres émissions indirectes en amont et en aval de l'activité de l'organisation. Les émissions de la catégorie 3 sont une conséquence des activités de l'entreprise, mais présentent des sources qui ne sont pas possédées ou contrôlées par l'entreprise. On y retrouve par exemple l'extraction et la production de matériaux achetés, le transport de combustibles achetés et l'utilisation des produits et services vendus.

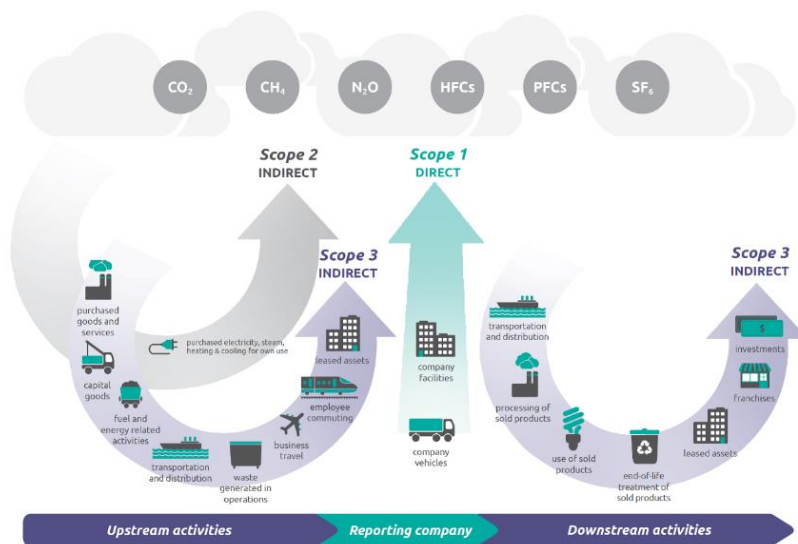


Figure 2 : Schéma des catégories (scope) des émissions des GES (GHG Protocol, 2011)

2.2.3. Analyse de cycle de vie (ACV)

L'ACV est encadrée par la série de normes ISO 14040 (ISO, 2006), qui en définit les principes, la structure et les exigences méthodologiques. Il existe deux types d'ACV- carbone (pour les calculs des GES exclusivement) : l'ACV-carbone attributionnelle (ACVA) et l'ACV-carbone conséquentielle (ACVC) (Ekvall, 2019). L'ACVA attribue les effets environnementaux actuels à un produit ou service en analysant son cycle de vie moyen dans une chaîne d'approvisionnement à l'aide de données statiques (Dandres, 2012; Schaubroeck *et al.*, 2021). Quant à lui, l'ACVC évalue les effets environnementaux des décisions ou changements systémiques, comme l'augmentation de la demande d'un produit, en utilisant des données marginales pour modéliser des effets indirects tels que les changements de marché ou d'utilisation des terres (Ekvall, 2019), ou les conséquences potentielles des décisions concrètes, par exemple le remplacement des énergies fossiles par des sources renouvelables (Finnveden *et al.*, 2009).

L'ACVA est considérée pertinente à notre objectif, car elle fournit une vue détaillée des effets actuels, sans modélisation de scénarios futurs ou hypothèses incertaines. À la différence de l'ACVC, notre approche attribue les émissions à chaque phase du cycle de vie des équipements numériques, depuis leur fabrication jusqu'à leur fin de vie, en tenant compte des interactions entre ces étapes, telles que le transport et leur utilisation (Guinée, 2002).

- **Critique des approches alternatives**

De nombreuses études sur l’empreinte carbone du numérique utilisent des méthodologies variées, telles que des bilans énergétiques simplifiés ou des modèles économiques globaux. Certaines analyses se limitent à la consommation énergétique des centres de données ou des équipements numériques (Andrae et Edler, 2015) ou aux bilans carbone conformes à la norme ISO 14064-1, en excluant les émissions indirectes liées à la fabrication, au transport et à la fin de vie des appareils. Cette omission peut sous-estimer les effets réels, soulignant l’importance d’inclure toutes les étapes du cycle de vie pour une évaluation complète.

D’autres études privilégient les ACVC pour analyser les effets de politiques numériques ou de transitions technologiques. Si cette méthode est utile dans une perspective prospective, elle repose souvent sur des hypothèses spéculatives, comme les taux d’adoption technologique ou les scénarios énergétiques futurs, ce qui peut réduire la fiabilité des résultats (Pehnt, 2006) et en limiter la pertinence pour la présente étude.

Certaines recherches se concentrent sur des indicateurs précis, tels que l’intensité énergétique des services numériques (Malmodin et Lundén, 2016), mais omettent l’effet rebond, où l’utilisation accrue des technologies peut indirectement augmenter les émissions globales (Hilty et Aebischer, 2015). Ces limites montrent l’intérêt de l’ACVA, qui offre une analyse plus complète et rigoureuse des effets actuels.

Il est à noter que les norme ISO 14064-1 de la quantification des GES et la norme ISO 14040 n’ont pas été suivie pour nos calculs, puisque cette étude adopte une approche exploratoire visant à établir une première quantification des GES du télétravail associé au numérique plutôt qu’une estimation normalisée de ces émissions.

2.3. Télétravail et effets rebond

2.3.1. Télétravail : Définition et contexte

En général, le télétravail, qu’il soit à temps plein ou à temps partiel, repose sur trois caractéristiques communes : 1- le lieu du travail (à domicile, dans un tiers-lieu ou dans d’autres locaux des organisations en dehors de l’espace de travail dédié à l’employé lui-même); 2- la fréquence de travail (nombre des jours de télétravail par semaine, travail hybride); et 3- les moyens techniques (l’utilisation des TIC) (Guechati et Elakry, 2021).

Le Ministère du Travail Québec (2002) définit le télétravail de la manière suivante : « le télétravail permet à un employé d'accomplir une partie ou la totalité de son travail à l'extérieur de l'établissement appartenant à l'employeur. L'employé exécute normalement ses tâches à partir de son domicile et transmet les résultats de ses activités lors de son passage au bureau ou en utilisant les moyens de télécommunication disponibles (télécopieur, téléphone, courrier électronique, etc.) ». Le télétravail a initialement été développé dans les années 1970 (Nilles, 1975) et s'est d'abord largement répandu dans le monde anglo-saxon, où il a connu une adoption précoce. Dès les années 1990, son usage s'est progressivement généralisé (Huissier et Turbe-Suetens, 2010), puis il a connu une croissance significative avec l'arrivée de la pandémie de COVID-19 en 2020. Selon l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE, 2021), cette pratique a enregistré une augmentation exponentielle dans de nombreux pays. Par exemple, entre mars et mai 2020, environ 47 % des employé.e.s en France et au Royaume-Uni ont eu recours au télétravail pendant les périodes initiales de confinement. L'Australie a également atteint ce même pourcentage en décembre 2020. Au niveau national d'après Statistique Canada (2024), la proportion d'employé.e.s faisant du télétravail est passée de 7% en mai 2016 à environ 24% en juillet 2022, puis à 21% en juillet 2023.

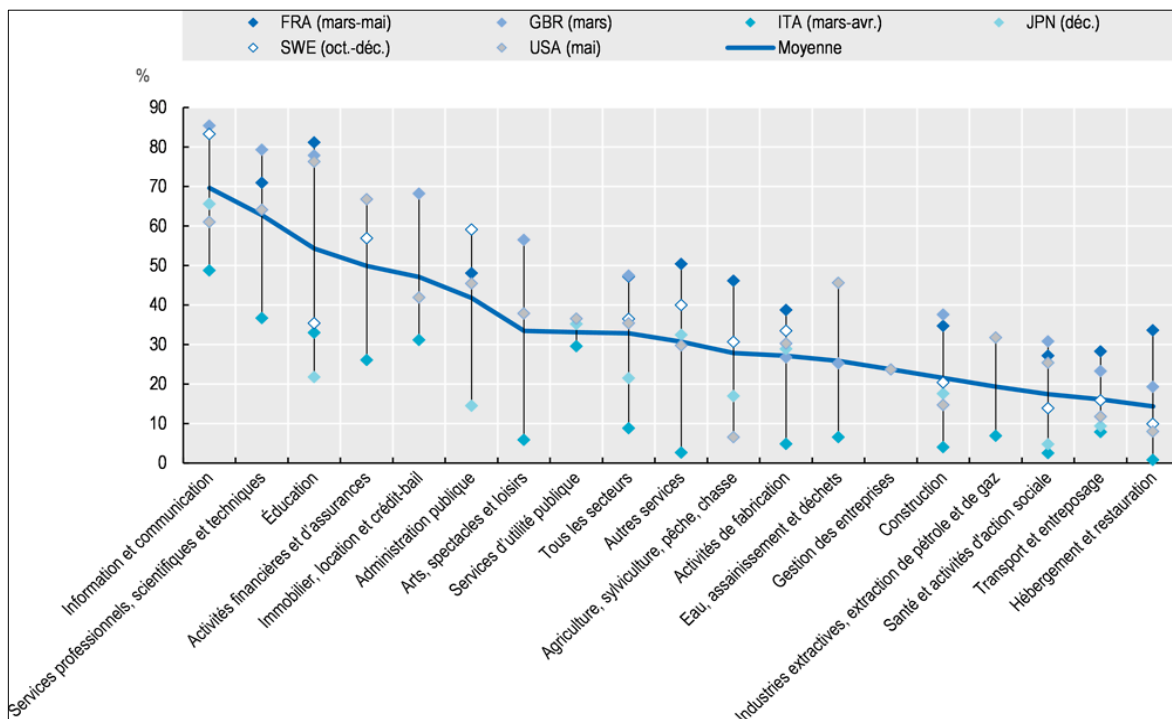


Figure 3 : Pics de télétravail dans différents pays (RA : France, SWE : Suède, GBR : Royaume-Uni, USA : États-Unis, ITA : Italie, JPN : Japon) pendant la pandémie de COVID-19 par secteur (OCDE, 2020)

Selon une étude de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), tous les secteurs du travail ont pris part à du télétravail pendant la pandémie de COVID-19 (figure 3). La proportion de télétravail était plus importante dans des secteurs comme l'information et les communications, où la transition vers le télétravail à grande échelle a été relativement fluide (OCDE, 2021) comparativement, à l'autre bout du spectre, aux secteurs comme l'hébergement et la restauration. Cet écart s'explique par une adoption de la technologie numérique dans les grandes entreprises et les PME pour des secteurs moins compatibles avec le travail à distance (l'hôtellerie-restauration, le tourisme ou le commerce) (OCDE, 2021). De façon intéressante pour la présente étude, le télétravail dans le secteur de l'éducation de différents pays a varié entre 20% et 80 %. Par exemple, en Italie, il a été moins répandu, contrairement au Royaume-Uni et en France. Cela peut s'expliquer notamment par le degré d'intégration des outils numériques dans les systèmes éducatifs, la formation des enseignants aux technologies numériques, la disponibilité des infrastructures (comme les connexions internet haut débit), ainsi que les politiques publiques mises en place pour soutenir l'enseignement à distance. Cette variabilité géographique met en évidence l'intérêt d'une étude spécifique au Québec pour nos organisations.

2.3.2. Ambiguïté des effets du télétravail

Les effets du télétravail sur la santé physique et mentale ont été largement étudiés dans de nombreux ouvrages (Hallépée et Mauroux, 2019; Planchard et Velagic, 2020; Registre *et al.*, 2022). De son côté l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et l'Organisation internationale du travail (OIT) ont également abordé ces effets dans leur dernier rapport publié en 2021 résumant les avantages et les inconvénients du télétravail sur la santé (tableau 1).

Tableau 1: Effets du télétravail sur la santé physique, morale et le bien-être social. (WHO et ILO, 2021)

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Équilibre entre travail et vie personnelle • Possibilité d’effectuer des horaires de travail flexibles et de l’activité physique • Réduction du trafic routier et des temps de navettage pour se rendre au travail • Diminution de la pollution atmosphérique pouvant améliorer la santé physique et mentale et le bien-être social • Augmentation de la productivité • Réduction des coûts de fonctionnement de nombreuses entreprises 	<ul style="list-style-type: none"> • Isolement / dépression • Épuisement professionnel • Allongement du temps passé en position assise et devant un écran / fatigue oculaire • Violence domestique • Lésions musculo-squelettiques • Prise de poids malsaine • Augmentation de la consommation de tabac et d’alcool

Dans le même contexte, l’étude de Saba et Cachat-Rosset (2020) réalisée sur un échantillon de 3 239 répondants provenant essentiellement du Québec (figure 4) révèle que le télétravail a des effets positifs, notamment grâce au temps économisé sur les transports. La majorité des personnes sondées rapportent que leurs conditions de télétravail sont bonnes (85%) et qu’ils en sont satisfaits (82%). En plus, 62 % estiment pouvoir concilier efficacement le travail et la vie familiale. De même, près de la moitié des répondants (46%) ont constaté une augmentation de leur productivité, tandis qu’un tiers rapportent une capacité accrue d’innovation grâce à l’utilisation des TIC.

Par ailleurs, l’étude a révélé l’ambiguïté des conséquences du télétravail, relevant le sentiment d’isolement qui se manifeste sous deux formes : l’isolement social (déclaré chez 56% des répondants et lié au manque de contacts humains entre les collègues) et l’isolement organisationnel (déclaré chez 14% et lié aux sentiments d’être isolé des décisions organisationnelles ou des réunions importantes).

Un autre facteur significatif qui a affecté la santé de 12% des télétravailleurs est le stress. En effet, comme le soulignent Ragu-Nathan *et al.* (2008), la surexposition aux univers virtuels a provoqué le sentiment de stress chez les individus, connus sous le nom de « technostress », qui affecte négativement la performance du travail et engendre des comportements d’autodiminution en percevant des difficultés à utiliser la technologie (Favart, 2019).

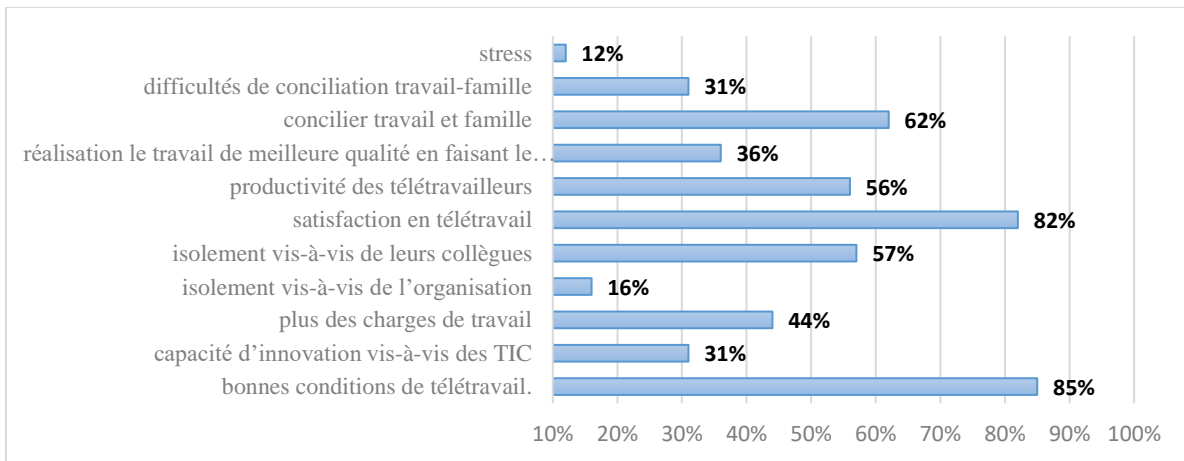


Figure 4 : Ambiguïté des effets du télétravail. Adaptée de Gingras et Belleau (2015).

2.3.3. Mobilité et transport durant le télétravail

Le secteur des transports se distingue comme le principal contributeur aux émissions de GES du Québec. En effet, en 2022, ses émissions s'élevaient à 34,29 Mt éq. CO₂, soit 43,3% du total des émissions québécoises. Plus spécifiquement, le transport routier à lui seul a émis 25,58 Mt éq. CO₂, soit 74,6 % des émissions totales provenant du secteur des transports (MELCCFP, 2024). Toutefois, les auteurs Crow et Millot (2020) soulignent les conséquences surprenantes de la période de confinement à l'échelle mondiale. En effet, il y a eu une diminution significative du trafic routier, allant de 50% à 75%, ainsi qu'une baisse de la consommation d'essence et de diesel de l'ordre de 9 et 6 millions de barils par jour, respectivement. De plus, la congestion aux heures de pointe a été réduite de 65% à 95%. Ces chiffres démontrent l'effet indéniable du confinement sur les déplacements et la consommation de carburant. De plus, de nombreuses entreprises ont opté pour la mise en place de la politique du télétravail, tout comme le gouvernement du Québec qui, dans son plan pour une économie verte 2030, a investi 5 M\$ entre 2021 et 2023 afin de promouvoir son adoption (Gouvernement de Québec, 2020).

Par ailleurs, d'autres auteurs nuancent le gain environnemental du télétravail, soulignant que la réduction du navettage domicile-travail est contrebalancée par une augmentation de la mobilité liée à un changement des modes de déplacement comme les déplacements de loisirs, de commerce de proximité ou les déplacements d'accompagnement pour emmener les enfants à l'école (Greenworking et ADEME, 2020). L'étude de Tissandier et Mariani-Rousset (2019), qui repose sur une modélisation des déplacements domicile-travail, montre que le télétravail peut encourager la marche, notamment parce que les salariés se rendent plus souvent dans des tiers-lieux ou espaces de coworking proches de leur domicile. Cette proximité rend les trajets plus courts et réalisables à

ped, ce qui peut partiellement compenser la baisse plus marquée de l'usage des transports en commun par rapport à celui de la voiture individuelle. Une des raisons qui explique cela est la proximité accrue entre le domicile et le lieu de télétravail, notamment avec l'accès aux tiers-lieux. En plus, les études menées dans différents pays montrent qu'en raison de la crainte sanitaire, l'utilisation de la voiture privée a pris une grande importance (De Haas *et al.*, 2020; Eisenmann *et al.*, 2021). En Allemagne, par exemple, environ 80% des adultes ont utilisé la voiture, à la fois dans leur comportement de déplacement typique et pendant la période de confinement la plus stricte (Eisenmann, Nobis *et al.* 2021).

Les télétravailleurs tendent à effectuer plus de déplacements non professionnels autour de leur domicile. Cependant, en raison d'un accès limité aux transports en commun dans leur zone résidentielle, ils privilégient les modes actifs (marche, vélo) pour les courts trajets ou la voiture, dont le taux de possession est plus élevé, ce qui peut conduire à des voyages plus fréquents utilisant des modes de transport moins durables et plus polluants (De Abreu e Silva et Melo, 2018).

Dans un même ordre d'idée, selon Greenworking et ADEME (2020), des déplacements totaux sont susceptibles d'augmenter en raison des « mobilités en étoile » de certains télétravailleurs qui font des allers-retours vers d'autres destinations (comme déposer les enfants à l'école ou faire des courses) autant durant la semaine que les fins de semaine.

2.3.4. Consommation énergétique

Le Québec se classe en 2020 au 3e rang dans le monde, après les États-Unis et le Canada, en matière de consommation d'énergie par habitant, avec 183 GJ au Québec, contre 52 GJ en moyenne mondiale. Cette consommation, largement supérieure à celle de nombreux pays européens, est principalement dominée par le secteur industriel, qui en représente environ 33%.

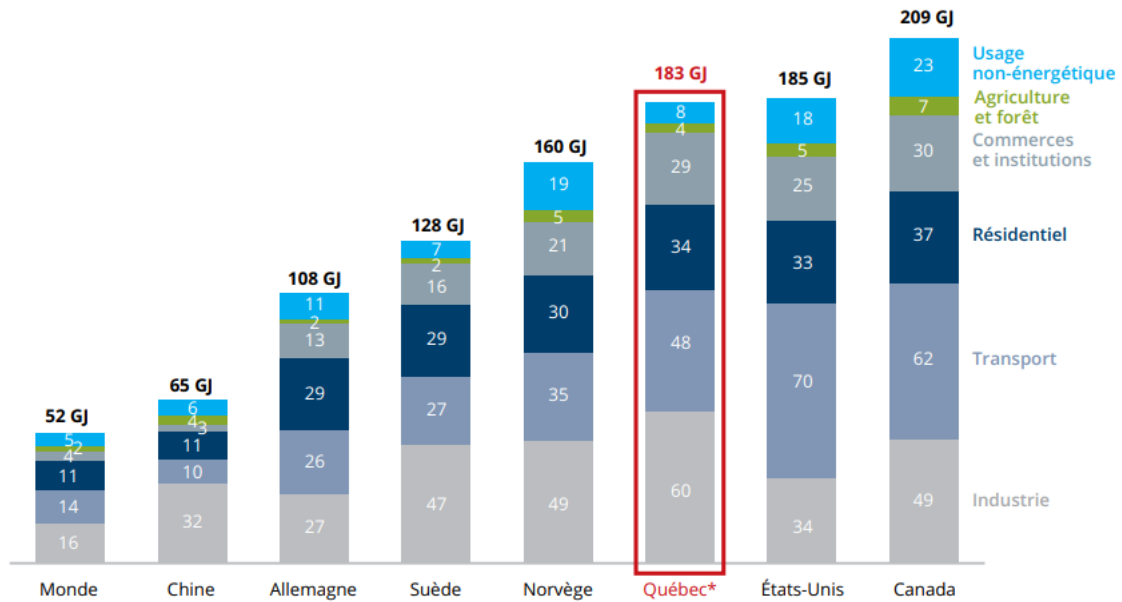


Figure 5: Comparaison de la consommation énergétique par habitant du Québec avec celle d'autres pays en 2020 (Chaire de gestion du secteur de l'énergie, 2023).

Cela s'explique par l'attractivité des industries énergivores qui tirent avantage de l'hydroélectricité abondante de la province. En parallèle, le transport, les bâtiments et le secteur industriel affichent également des niveaux de consommation élevés par rapport à ceux observés en Europe (figure 5) (Chaire de gestion du secteur de l'énergie, 2023).

Sur le plan sectoriel, la consommation énergétique au Québec se distingue par des particularités marquées (figure 6). Le transport domine avec 97% de son énergie provenant des produits pétroliers, reflétant une forte dépendance aux combustibles fossiles. L'industrie est le deuxième secteur en importance en termes de consommation énergétique, avec une forte dépendance à l'électricité (50%), cette tendance se retrouve également dans les secteurs résidentiel (74%) et commercial /institutionnel (53%), ce qui reflète l'abondance de l'hydroélectricité au Canada ainsi que les efforts pour favoriser des sources d'énergie moins émettrices de CO₂.

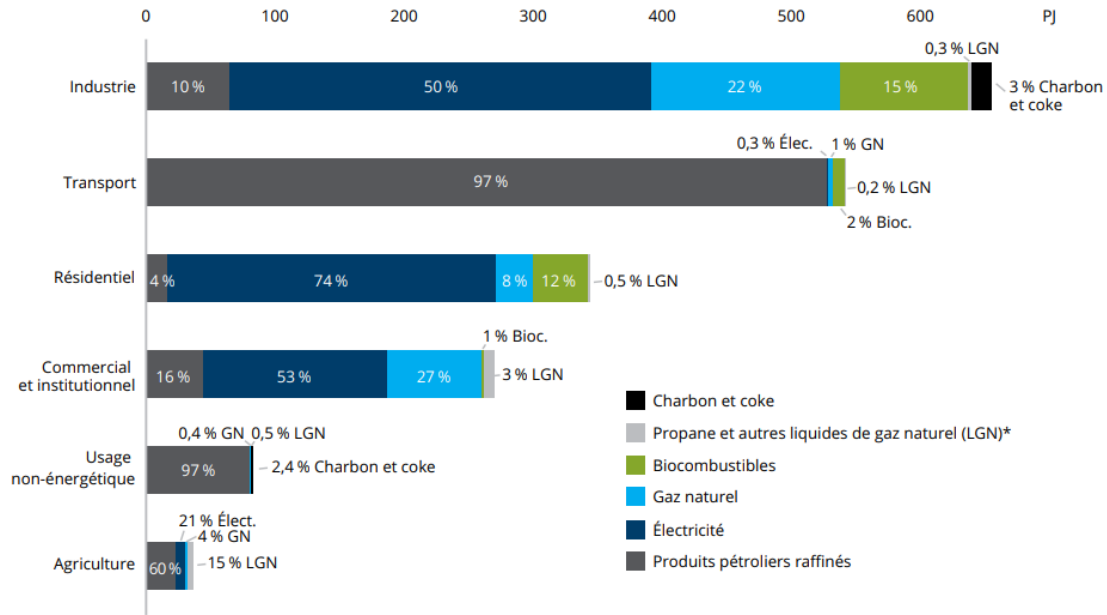


Figure 6 : Consommation de différentes formes d'énergie par secteur d'activité au Québec en 2020 (Chaire de gestion du secteur de l'énergie, 2023).

La consommation électrique a nettement augmenté au niveau résidentiel pendant la période de télétravail. Aux États-Unis, par exemple, en période de confinement, la consommation moyenne d'électricité résidentielle en semaine a bondi de 20 à 30%. La demande en énergie fossile a également augmenté de 8,2 kWh en hiver contre 1,6 kWh en été, sur une journée de télétravail pour un ménage individuel, à cause de l'utilisation du chauffage par les télétravailleurs (Crow et Millot, 2020). D'ailleurs, la surconsommation en énergie augmente automatiquement à la suite des activités domiciles de télétravail : chauffage, cuisson, eau chaude, etc. (Greenworking et ADEME, 2020; Lacoursière, 2021). En effet, la répartition de la consommation résidentielle totale au Québec en 2020 montre que 61% sont dédiés principalement au chauffage du logement, suivi de 19% pour les appareils ménagers, 14% pour le chauffage de l'eau et 5% et 2% respectivement pour l'éclairage et la climatisation (Chaire de gestion du secteur de l'énergie, 2023).

De plus, l'étude menée par Greenworking et ADEME (2020) souligne que même lorsque les télétravailleurs occupent leur domicile, celui-ci peut aussi être occupé par d'autres membres de la famille. Par ailleurs, les télétravailleurs ont tendance à réduire leur consommation énergétique, étant responsables des charges financières liées à leur domicile. Par ailleurs, une autre variable significative entraîne une hausse de la consommation énergétique lorsque les télétravailleurs optent pour des agrandissements de logement ou l'achat de logements plus grands pour disposer d'un espace de travail (Greenworking et ADEME, 2020).

Concernant la consommation énergétique du bâtiment des bureaux, le chauffage représente 43% de la consommation énergétique, tandis que 20% sont destinés aux équipements auxiliaires et 17% à l'éclairage. La consommation d'énergie a diminué de 8 à 11% pendant le premier confinement. Cela s'oppose au télétravail et au *flex-office* offrant des avantages environnementaux par l'amélioration dans le cas des bâtiments contrôlés par la technologie, obtenue grâce à une gestion précise de l'éclairage, du chauffage, de la climatisation et des équipements de bureau en fonction de l'occupation particulière (Chaire de gestion du secteur de l'énergie, 2023).

2.3.5. Numérique et effets environnementaux

2.3.5.1. Définition et évolution du numérique

Le terme « numérique » est apparu dans les années 1980, remplaçant progressivement les classifications par appui technique (papier, audio, audiovisuel, numérique) ou par média (livre, radio, télévision, web) (Albero, 2010). Avec le web 2.0 dans les années 2000, l'expression « nouvelles technologies de l'information et de la communication » (NTIC) s'est imposée, avant que l'adjectif « nouvelles » ne disparaisse (Grenon, 2007). Pour Bourgeois et Ntebutse (2020), le numérique désigne l'ensemble des technologies, pratiques et usages liés au traitement, à la transmission et à l'exploitation de l'information sous forme numérique. Il ne se limite pas aux outils technologiques (ordinateurs, Internet, intelligence artificielle, etc.), mais inclut également les transformations sociales, économiques et culturelles qu'ils provoquent. Il s'agit d'un objet technique socialement construit, dont les usages sont influencés par les inégalités sociales, ce qui révèle des effets variés selon les contextes. Enfin, Dieye (2020) insiste sur la manière dont le numérique transforme les pratiques professionnelles, notamment en matière d'organisation et de gestion de l'information. Ainsi, le numérique ne se résume pas à une avancée technologique, mais incarne une mutation globale qui redéfinit les interactions humaines et économiques.

2.3.5.2. Coûts environnementaux du numérique

Le Canada compte parmi les grands consommateurs mondiaux des données numériques (Statistique Canada, 2022) et affiche un taux de connectivité élevé (93,5%) de sa population. La même observation est constatée au Québec avec 100% de la population ayant accès à internet (Statistique Canada, 2023). Cette numérisation croissante s'accompagne d'une hausse alarmante des déchets électroniques : un Canadien en produisait en moyenne 8,3 kg en 2000, contre 25,3 kg en 2020, portant la production nationale annuelle de 252 kt à 954 kt sur la même période.

À l'échelle mondiale, la consommation d'énergie finale du secteur numérique a progressé de 6,2% par an entre 2015 et 2019, et les émissions de GES, quant à elles, sont passées de 2, en 2013 à 3,5% en 2019 et pourraient atteindre entre 3,9% et 7% d'ici deux ans (figure 7) (The Shift Project, 2021). En parallèle, le numérique représente 4,2% de la consommation d'énergie primaire, 0,2% de la consommation d'eau et environ 5,5% de l'électricité mondiale (IEA, 2019; The Shift Project, 2021).

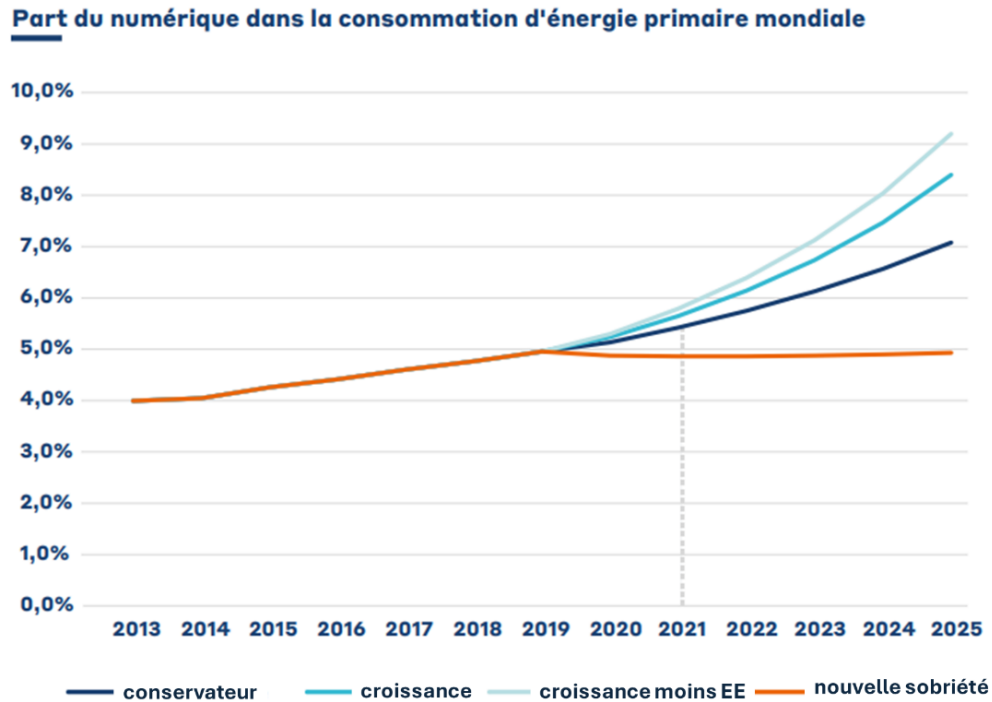


Figure 7 : Évolution de la part du numérique dans les émissions de GES mondiales, entre la période 2013-2025 (The Shift Project, 2021).

Le rapport de The Shift Project (2021) souligne l'augmentation de la consommation des TIC au Canada et au Québec. Bien que les gains en efficacité énergétique permettent de compenser partiellement cette hausse pour les réseaux fixes (figure 8a) et mobiles (figure 8 b), cela ne suffit pas pour équilibrer l'accroissement de la consommation des centres de stockage (figure 8c) et des appareils utilisateurs (figure 8e). Ces derniers ne bénéficient pas d'une compensation efficace par l'amélioration de l'efficacité énergétique, malgré les progrès technologiques, les politiques et les spécificités locales. Par ailleurs, même si l'électricité canadienne est cinq fois moins carbonée et celle du Québec trente fois moins carbonée que la moyenne mondiale, l'empreinte carbone du numérique reste élevée dans ces régions. Elle représentait 4% de l'empreinte carbone totale en 2020, soit un pourcentage équivalent à celui observé à l'échelle mondiale, en raison du renouvellement

fréquent des équipements et de l'expansion des infrastructures comme les centres de données et les nouveaux réseaux.

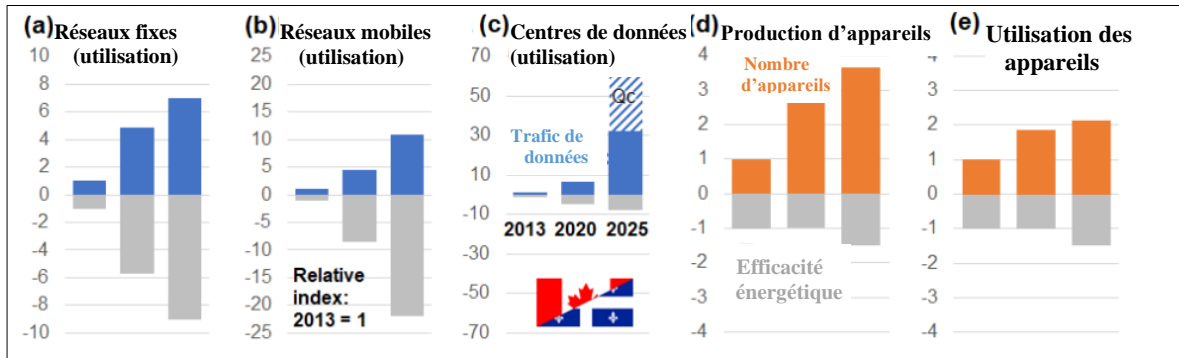


Figure 8: Évolution mondiale de la consommation énergétique associée au numérique pour les années de 2013, 2020 et 2025 de chaque catégorie (trafic de données (a et c, bleu) ou nombre d'appareils (d et e, orange) en parallèle de l'évolution de l'efficacité énergétique (gris). (a) Réseaux fixes échelle : 2013 = 1. Les chiffres (relatifs) sont similaires pour le Canada et le Québec, sauf pour le trafic des centres de données où le cas du Québec est indiqué en hachuré (The Shift Project, 2021).

Selon l'ADEME et Arcep (2022a), les terminaux désignent les équipements utilisés par les utilisateurs finaux et sont classés parmi leurs biens personnels. Selon la norme *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) L.1450*, ces équipements incluent :

- Ordinateurs fixes et périphériques (claviers, souris, écrans).
- Équipements de communication (téléphones, tablettes, ordinateurs portables).
- Objets connectés à usage communicatif.

La phase de production et l'assemblage des terminaux est responsable de 78% de l'empreinte environnementale du secteur numérique en matière d'émissions de GES (ADEME et Arcep, 2022b). Cette étape nécessite une extraction importante de métaux rares, principalement réalisée dans des pays où le mix énergétique dépend fortement des combustibles fossiles, sources majeures d'émissions de CO₂. Par exemple, la Chine, premier contributeur à la valeur ajoutée manufacturière mondiale (Dai, 2018) dont le mix énergétique repose à 61% sur le charbon, à 17,9% sur le pétrole, à 7,8% sur le gaz naturel, à 2,9% sur le nucléaire, à 3% sur l'hydroélectricité et à 7,4% sur les énergies renouvelables (IEA, 2022).

Au niveau mondial, si l'on considère le cycle de vie d'un ordinateur portable comme un *Lenovo ThinkPad E15 Gen 2*, qui émet 280 +/- 61 kg éq. CO₂, la production de l'appareil constitue 78% de son empreinte énergétique, tandis que son alimentation représente 19% et son transport 3%

(Lenovo, 2020). Il convient également de prendre en compte l'effet énergétique des centres de stockage et du réseau utilisé par les terminaux.

À elle seule, la consommation électrique pour entreposer les données dans les centres de stockage représente 1% de la consommation mondiale (Masanet *et al.*, 2020). Par exemple, un centre de données typique peut consommer 100 à 200 fois plus d'énergie qu'un bureau standard de même taille et consommer autant d'énergie que 25 000 foyers (Poess et Nambiar, 2008). Actuellement, les centres de données représentent 4,5% de la consommation énergétique mondiale, devenant ainsi l'un des secteurs les plus énergivores (Liu *et al.*, 2020; Su, 2018).

Le nombre de centres de données hypersclae et leur capacité sont en croissance constante. Selon l'inventaire de *Synergy research group* (2025), 1103 centres de données sont actuellement en activité, et les projets en développement prévoient une capacité totale qui pourrait doubler celle des centres existants. Cette croissance s'explique par l'essor des technologies et services de l'Intelligence artificielle générative énergivore. Parallèlement, la charge informatique moyenne par centre augmente, ce qui entraîne une hausse régulière du nombre de centres hypersclae opérationnels. Les infrastructures existantes sont également modernisées pour accroître leur capacité. Au total, la capacité combinée de tous les centres de données hypersclae devrait presque tripler d'ici 2030, reflétant une demande exponentielle en ressources numériques (Synergy research group, 2025).

Les centres de données contiennent quatre principaux composants : les équipements d'alimentation, les équipements de refroidissement, les équipements informatiques et les composants divers (Dai *et al.*, 2014). En outre, étant donné l'augmentation de leur taille, les centres de données voient leur consommation en climatisation augmenter chaque année. Environ 90% de la consommation énergétique totale d'un centre de données est attribuable à l'équipement informatique et l'équipement de refroidissement (Vasques *et al.*, 2019). Les grandes entreprises mondiales telles que Google, Facebook et Amazon ont choisi de construire des centres de données dans la région panarctique afin de réduire leur consommation d'énergie. Google, par exemple, a établi en 2011 un centre de données en Finlande. Ce centre se distingue par son système de refroidissement innovant, qui utilise l'eau de mer du golfe de Finlande, ainsi que par son alimentation énergétique entièrement renouvelable, provenant d'un nouveau parc éolien terrestre. La Finlande, de son côté, possède un mix énergétique diversifié, dominé par les biocarburants et déchets (31,3 %), le nucléaire (27,6 %) et le pétrole (21,9 %) (IEA, 2023a). Bien que les énergies renouvelables comme l'éolien et le solaire ne représentent encore qu'une part limitée (4,1 %) (IEA, 2023a), le pays intensifie ses

investissements dans ces domaines, comme en témoigne le parc éolien qui alimente le centre de données de Google (Vasques *et al.*, 2019).

Concernant l'usage du numérique en lien avec le télétravail, l'adoption croissante des plateformes de vidéoconférence a explosé au début de la pandémie de COVID-19; Greenworking et ADEME (2020) l'ont d'ailleurs considéré comme un des effets de rebond du télétravail. Il était prévu que les réunions présentielles diminuent de 25% dans les zones de l'Amérique du Nord et de l'Europe en 2024. En 2020, le nombre quotidien de participant.e.s à des réunions virtuelles Zoom a augmenté pour atteindre 200 millions, comparé à 10 millions en 2019 (Zoom blog, 2020).

L'effet du numérique sur l'environnement et sur les changements climatiques dépend du bouquet énergétique, de l'efficacité d'utilisation et du trafic internet. Plusieurs études ont examiné l'empreinte carbone liée au stockage, à la transmission et à l'utilisation des données. Les auteurs Obringer *et al.* (2021) soulignent qu'à l'échelle mondiale l'empreinte carbone de l'utilisation d'internet varie de 28 à 63 g éq. CO₂/Go. Par exemple, une heure de visioconférence consomme environ 2,5 Go, soit une émission d'environ 157 g éq. CO₂ par heure et la réalisation de 15 réunions d'une heure par semaine entraînent une émission totale de 9,47 kg éq. CO₂ par mois. Cependant, la désactivation de la caméra, l'empreinte carbone de la visioconférence réduit de 34%, principalement en raison d'une réduction significative du flux de données transmises. Cette baisse s'explique par la sollicitation moindre des infrastructures réseau (serveurs, centres de données) et des terminaux utilisateurs, dont la consommation électrique est directement corrélée à l'utilisation de la caméra (Berthoud et Fischer, 2022). Selon Viana *et al.* (2022), le changement du comportement des utilisateurs de services numériques exerce une influence sur la réduction de l'empreinte carbone. Par exemple, pour le Québec, les émissions de GES d'un utilisateur intensif peuvent être jusqu'à 2,7 fois plus élevées que celles d'un utilisateur consciencieux. Cette contribution tient notamment au nombre, au type des produits électroniques possédés par l'utilisateur et à la durée d'utilisation de ces dispositifs (Viana *et al.*, 2022). Par ailleurs, hormis l'impact de la fabrication des appareils électroniques, l'alimentation électrique des équipements informatiques a un effet plus important que l'utilisation des services numériques. Par exemple, l'usage d'un ordinateur portable pendant 3 min consomme plus d'électricité que de transmettre et de stocker un courriel de 30 Mo (0,00135 kWh contre 0,0002 kWh). De même, l'utilisation des vidéos dépend de la fréquence et la quantité des données mobilisées. Par exemple, la consommation des données lors d'une visioconférence peut varier de 0,027 Go/h avec audio uniquement à 2,4 Go/h en appel de groupe avec vidéo 1080p) (Viana *et al.*, 2022).

2.3.6. Effet rebond, une menace pour l'efficacité énergétique

L'amélioration de l'efficacité énergétique est considérée comme une stratégie clé pour atténuer les changements climatiques. Cependant, il existe des doutes quant à sa capacité à réduire réellement les effets environnementaux, car les gains d'efficacité peuvent être annulés par un effet rebond entraînant une augmentation de la consommation.

Avant d'analyser les facteurs qui influencent les effets environnementaux du télétravail, il est essentiel de comprendre le concept d'effet rebond, qui constitue un risque majeur pour ces enjeux. L'étude de Brockway *et al.* (2021) a mis en évidence trois points clés. Premièrement, les effets rebond liés aux activités économiques peuvent réduire de plus de la moitié les économies d'énergie attendues grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Deuxièmement, les modèles utilisés par le GIEC sous-estiment ces effets, ce qui peut fausser les prévisions de croissance de la demande énergétique mondiale. Enfin, négliger l'impact de ces effets peut compromettre la réussite des politiques énergétiques et climatiques, en laissant des objectifs cruciaux hors de portée.

La notion d'effet rebond est apparue au cours de la période de la révolution industrielle en 1856 et l'utilisation croissante des énergies fossiles y a joué un rôle majeur. Grâce aux progrès technologiques, les machines sont devenues plus efficaces, ce qui a conduit à une réduction de la quantité de charbon nécessaire pour accomplir le même travail. On aurait pu s'attendre à ce que cela entraîne une diminution de la demande en charbon. Cependant, l'économiste William Stanley Jevons a souligné que, sur le plan macroéconomique, cette amélioration de l'efficacité n'a pas entraîné une réduction de la demande en charbon, mais au contraire une augmentation. Cela a créé un problème majeur, connu sous le nom de paradoxe de Jevons, qui est lié à l'épuisement des ressources de charbon (Jevons, 1866; Missemmer, 2012).

L'effet rebond pourrait être défini comme : « l'augmentation de consommation liée à la réduction des limites à l'utilisation d'une technologie, ces limites pouvant être monétaires, temporelles, sociales, physiques, liées à l'effort, au danger, à l'organisation, etc. » (Schneider *et al.*, 2001). Il est mesuré en pourcentage des économies d'énergie escomptées résultant d'une amélioration de l'efficacité énergétique. Par exemple, un effet rebond de 20% indique que seuls 80% des économies d'énergie prévues sont effectivement réalisées (Sorrell, 2007).

Les économistes distinguent deux types d'effet rebond : l'effet rebond direct et l'effet rebond indirect. Par exemple, lorsque les véhicules consomment moins de carburant, les coûts des déplacements sont réduits, ce qui peut inciter les consommateurs à parcourir de plus longues distances ou à voyager plus fréquemment, annulant ainsi une partie des économies d'énergie

réalisées. De la même manière, une utilisation plus efficace de l'énergie dans une usine peut accroître sa rentabilité, ce qui encourage de nouveaux investissements et une production accrue. On parle alors d'effet rebond direct (Sorrell, 2007). L'effet rebond indirect, pour sa part, peut se manifester même si la consommation des services énergétiques reste inchangée. Cela se traduit par une augmentation de la demande pour d'autres services énergétiques à la suite de la réduction du coût d'un service. Par exemple, une personne qui a réalisé des économies en isolant les murs de sa maison pourra désormais se permettre de voyager plus fréquemment en avion ou d'utiliser sa voiture plus souvent. Cela peut aussi se traduire par des changements intrinsèques dans le comportement de la société engendrée par des innovations dans les téléphones intelligents, les réfrigérateurs ou les voitures.

2.3.7. Effets rebond liés au télétravail

L'implémentation du télétravail s'accompagne d'effets rebond notables dont 16 principaux ont été identifiés à travers l'étude de Greenworking et ADEME (2020) (tableau 2). Ils sont classés en deux catégories, dont quatre effets rebond favorables pouvant apporter un bénéfice environnemental, et douze autres défavorables qui enregistrent des effets environnementaux négatifs, notamment l'augmentation des déplacements annexes, la relocalisation des domiciles, l'usage intensif de la visioconférence et la hausse de la consommation énergétique résidentielle. En conséquence, ces effets rebond diminuent en moyenne de 31% les gains environnementaux potentiels attendus du télétravail (soit dans le contexte français une augmentation de 84 kg éq. CO₂ annuels/jour hebdomadaire (Greenworking et ADEME, 2020)). Malgré cela, le bilan reste positif avec 187 kg éq. CO₂ nets économisés contre 271 kg éq. CO₂ estimés (Tinetti, 2015), bien que ces résultats demeurent propres à un contexte particulier et ne puissent être généralisés. Le tableau 2 résume l'effet rebond du télétravail avec son effet enregistré : le numérique ne contribue qu'à deux effets défavorables, soit le dédoublement de l'achat des nouveaux équipements informatiques et l'augmentation des visioconférences. Cependant, ces effets rebond restent des narratifs et l'on ne connaît pas l'effet quantifiable et chiffré en GES émis.

Tableau 2 : Effets rebond du télétravail (Greenworking et ADEME, 2020).

Activités	Type d'effet rebond	Catégorie	Effet enregistré
Transport	Effet direct modal	Favorable	Effets environnementaux liés aux déplacements réguliers entre le domicile et le lieu de travail
	Chaîne modale	Défavorable	Plusieurs allers-retours : mobilité en étoile au lieu d'une mobilité en chaîne
	Nouvelles mobilités quotidiennes	Défavorable	Création des nouvelles mobilités quotidiennes et des nouveaux modes de déplacement : p. ex. micromagasinage et transfert des activités du weekend vers la semaine
	Relocalisation	Défavorable	Utilisation du véhicule du travail par les autres membres de la famille
	Congestion routière	Favorable	Réduction des embouteillages routiers
	Nouvelles mobilités longues	Défavorable	Création des schémas de repos et loisirs : weekend en famille, séjours courts dans une résidence secondaire
	Agrandissement des horizons professionnels	Défavorable	Étendre l'aire géographique des relations professionnelles générant de nouveaux déplacements plus longs
	Pouvoir d'achat	Défavorable	Gain de pouvoir d'achat qui peut être réalloué à d'autres activités polluantes, par exemple des déplacements supplémentaires
	Vie quotidienne	Favorable	Accroissement de la fréquence de commerce à proximité, hausse des achats d'e-commerce et réduction du gaspillage alimentaire
	Télécentre et espaces de cotravail	Défavorable	Maintenir les déplacements résiduels et multiplier les surfaces d'immobilier pour se diriger vers les tiers lieux de télétravail : télécentres, bureaux distribués, espaces de coworking.
Consommation énergétique	Logement	Défavorable	Éloignement du lieu de travail pour un avantage économique (prix réduit) et une meilleure qualité de vie
	Bureau à la demande	Défavorable	Augmentation de la consommation de l'énergie durant la journée de travail à domicile
	Dématérialisation de l'entreprise	Favorable	Réduction de la consommation des entreprises : papiers, gobelets, vidéoprojecteurs, etc.
	Bureau à la maison	Défavorable	Construction des extensions de logement ou acquisition des logements plus grands
Numérique	Visioconférences	Défavorable	Utilisation croissante des services de visioconférence entraînant une augmentation de la consommation énergétique nécessaire pour alimenter les serveurs, ce qui a généré des émissions de GES, soit 2,6 kg éq. CO ₂ / jour de télétravail hebdomadaire
	Équipement	Défavorable	Achats et dédoublement de nouveaux équipements informatiques et bureautiques complémentaires pour le télétravail

2.4. INRS : Définition, mission et rôle

L'INRS est fondé en 1969 par le gouvernement de Québec. Il est dédié exclusivement à la recherche et à la formation aux cycles supérieurs, sa mission principale est définie dans l'article 1 des lettres patentes de l'INRS : « L'Institut a pour objet la recherche fondamentale et appliquée, les études de cycles supérieurs et la formation de chercheurs. Dans le cadre de cet objet et tout en poursuivant les finalités propres de la recherche universitaire, l'Institut doit, de façon particulière, orienter ses activités vers le développement économique, social et culturel du Québec, tout en assurant le transfert des connaissances et des technologies dans l'ensemble des secteurs où il œuvre» (INRS,2024). Il regroupe quatre centres de recherche et de formation thématiques et interdisciplinaires, répartis dans deux pôles géographiques (Québec et Montréal) :

- Eau Terre Environnement (ETE à Québec)
- Énergie Matériaux Télécommunications (EMT à Varennes et à Montréal)
- Urbanisation Culture Société (UCS à Montréal)
- Armand-Frappier Santé Biotechnologie (AFSB à Laval)

Selon l'horaire à temps plein de l'INRS, les participant.e.s (hormis la communauté étudiante) travaillent 48 semaines par an, hors jours fériés et vacances, avec 7 heures de travail par jour.

2.5. Description de la politique de télétravail de l'INRS

La politique de télétravail de l'INRS, qui a été adoptée le 15 juin 2021, vise à offrir une plus grande flexibilité au personnel (les personnes recrutées à l'INRS, à l'exception des cadres supérieurs et des membres du corps professoral) dont les tâches peuvent être réalisées à distance, permettant ainsi un meilleur équilibre entre vie professionnelle et personnelle. Ce mode de travail peut être majoritaire à plus de 50% du temps, auquel cas une entente écrite est requise et renouvelable annuellement (INRS,2022). L'INRS met à disposition le matériel informatique, les logiciels requis. Tandis que les employé.e.s doivent s'équiper d'un mobilier ergonomique avec un remboursement unique de 500 \$ pour l'achat d'équipements de bureau.

3. PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Aujourd'hui, des entreprises québécoises considèrent le télétravail comme une stratégie prometteuse pour réduire les émissions des GES liées aux déplacements quotidiens entre le domicile et le travail (Crow et Millot, 2020). Effectivement, les télétravailleurs réduisent leur empreinte carbone en limitant leurs déplacements en voiture ou en transport en commun pour se rendre sur les lieux de travail (Crow et Millot, 2020). Cependant, il est important de prendre en compte les effets rebond potentiels qui pourraient contrecarrer cette réduction des GES (Greenworking et ADEME, 2020). En effet, lorsque les travailleurs n'effectuent pas leurs déplacements quotidiens liés au travail, ils peuvent être enclins à utiliser les économies de temps et d'argent pour d'autres activités qui, à leur tour, génèrent des émissions de GES supplémentaires, comme les déplacements de long navettage lors de fins de semaine les courses au cours de la semaine, ou les voyages récréatifs plus fréquents (Greenworking et ADEME, 2020). De plus, le télétravail augmente la consommation d'énergie résidentielle, ce qui englobe des aspects tels que le chauffage, la climatisation, l'éclairage, ainsi que l'utilisation cumulée d'appareils électroniques, sans parler des périodes plus longues à domicile qui sont susceptibles d'augmenter leur consommation d'énergie, ce qui pourrait neutraliser partiellement les économies réalisées en matière de déplacements. Enfin, l'usage accru vers les technologies numériques, comme les visioconférences, a entraîné des conséquences environnementales significatives (Greenworking et ADEME, 2020).

- **Originalité de la recherche**

De nombreuses études ont caractérisé la prévalence du télétravail et sa fluctuation depuis la pandémie (Crow et Millot, 2020; Institut de la statistique du Québec, 2024; OCDE, 2021; Statistique Canada, 2021b) ainsi que son effet sur le transport (De Haas *et al.*, 2020; Eisenmann *et al.*, 2021; Tissandier et Mariani-Rousset, 2019), mais peu d'études se sont penchées sur son effet sur l'empreinte carbone (Carbon trust, 2021; Tao *et al.*, 2023).

L'effet rebond lié au numérique dans le contexte du télétravail est généré par l'acquisition de nouveaux équipements informatiques ainsi que par l'augmentation des visioconférences (Greenworking et ADEME, 2020). Toutefois, il existe un manque notable d'études sur la quantification précise des émissions associées à cet effet rebond. Enfin, la revue de littérature suggère que l'obtention de bénéfices environnementaux grâce au télétravail nécessite une

adaptation adéquate du mode de vie des individus, ainsi qu'une configuration optimisée de l'environnement domestique et professionnel (Tao *et al.*, 2023).

Ce travail s'inscrit plus largement dans le projet de l'empreinte carbone du télétravail qui a pour objectif de quantifier l'empreinte carbone de cette nouvelle forme de travail de différentes activités, soit le transport, la consommation énergétique à domicile et le numérique. Essentiellement, cette étude, s'intéresse à analyser et quantifier l'effet du numérique pour l'INRS. Quatre objectifs spécifiques sont employés afin d'atteindre l'objectif principal :

- Quantifier les émissions GES du numérique liés au télétravail.
- Explorer l'effet rebond contribuant à augmenter l'empreinte carbone du télétravail associé au numérique.
- Définir le meilleur scénario, le plus sobre en carbone, en matière des jours de télétravail.
- Développer une méthodologie applicable à l'INRS, transposable pour d'autres institutions et entreprises.

À notre connaissance, cette étude est la première à évaluer, dans un contexte organisationnel québécois, l'effet rebond du numérique sur l'empreinte carbone, en intégrant une ACV-carbone. Cette approche systémique révèle une vision novatrice des effets rebonds liés au numérique, particulièrement dans une région nordique où l'hydroélectricité domine le mix énergétique, réduisant ainsi l'empreinte carbone globale.

4. MÉTHODOLOGIE

L'étude porte sur l'année scolaire 2023-2024 et concerne l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), composé de quatre centres de recherche et de formation spécialisés (voir section 2.4). La démarche s'appuie sur une méthodologie mixte combinant des approches quantitatives (au niveau de la comptabilisation des GES) et des approches qualitatives des données (axées sur l'analyse des comportements des individus échantillonnés). L'approche mixte est soutenue par de nombreux travaux (Anadón, 2019; Creswell et Clark, 2017; Karsenti, 2006; Tashakkori *et al.*, 1998) et constitue une base solide pour une investigation approfondie et multidimensionnelle.

La méthodologie s'articule autour de cinq étapes principales tenant compte des processus de collecte des données réelles et d'autres pour la conversion de ces données en GES en utilisant des équations explicites. Ces étapes sont définies dans les sections suivantes : le questionnaire en ligne est détaillé dans la section 4.1. Les entretiens semi-dirigés pour le gestionnaire et les employé.e.s sont traités dans la section 4.2. Ensuite, la section 4.3 traite des calculs des émissions des GES. Enfin, la section 4.4 se concentre sur l'approche du traitement des données et l'analyse des résultats.

4.1. Questionnaire en ligne

Le questionnaire s'adresse à l'ensemble de la communauté de l'INRS afin de recueillir des données quantitatives nécessaires sur les habitudes individuelles liées au télétravail, qui sont ensuite converties en émissions de GES. Pour cette collecte, la méthode d'échantillonnage non probabiliste et volontaire sans sélection déterminée a été choisie pour sa rapidité, son faible coût et sa facilité de mise en œuvre, permettant d'atteindre l'ensemble de la population cible (Brick, 2014).

Avant sa diffusion, le questionnaire a été testé auprès d'individus aux profils variés, incluant les personnes occupant différents types d'emploi (annexe VI), affiliés à différents centres de recherche, et pratiquants différents mode de travail. Ces tests visaient à vérifier la clarté des questions, estimer la durée de réponse, et collecter des remarques, qui ont ensuite été analysées et intégrées à une version optimisée.

Dans le but de recueillir des données représentatives, l'échantillonnage cible à la fois les employé.e.s en présentiel et en télétravail, tout en intégrant les spécificités liées aux différents types d'emploi. Les employeurs concernés ont donné l'accord pour que leurs employé.e.s remplissent le sondage pendant leurs heures de travail. De plus, un tirage au sort de chèques-cadeaux a été mis en

place, offrant trois prix de 150 \$, afin d'encourager un plus grand nombre de participant.e.s à répondre au questionnaire.

Les participant.e.s ont été contactés par un courriel qui incluait une brève présentation du projet, un lien vers le questionnaire, des informations sur le tirage du chèque-cadeau, la durée estimée de remplissage du questionnaire ainsi que le numéro du certificat d'éthique et les coordonnées des personnes responsables du projet. Le certificat éthique a été obtenu auprès du comité d'éthique en recherche avec des êtres humains de l'INRS le 16 janvier 2023 (numéro de projet CER-22-695) afin de garantir le respect des principes éthiques fondamentaux, assurant ainsi la confidentialité et la protection des droits des répondants. En plus, tout au long du questionnaire, la lettre d'information et le formulaire de consentement étaient accessibles, détaillant les conditions de participation.

Plusieurs vagues d'envoi (voir figure 9) sont effectuées, visant à optimiser les réponses (relances ciblées), à s'adapter aux contraintes des participant.e.s (congés, charge de travail), et à limiter les biais de non-réponse, contribuant ainsi à la robustesse des résultats. Cette démarche assure une représentativité accrue des données tout en tenant compte des réalités opérationnelles des participant.e.s (présentiel, télétravail, horaires variables).

Le temps estimé pour remplir le questionnaire est d'environ 20-30 minutes. Les données sont stockées dans un serveur Google Cloud sécurisé au Québec, sur la plateforme d'enquête Évolution, développée par la Chaire Mobilité de Polytechnique Montréal. Cette plateforme a été développée pour des enquêtes d'envergure du type Origine-Destination (Morency *et al.*, 2019).

Le questionnaire est demeuré accessible pendant un mois, du 7 février au 6 mars 2024. Durant cette période, deux courriels de rappel ont été envoyés afin de maximiser le taux de participation (figure 9). Les rappels sont destinés uniquement aux personnes n'ayant pas cliqué sur le lien du questionnaire. Cette technique ciblée vise à maximiser le taux de réponse en évitant de solliciter ceux qui ont déjà répondu, tout en encourageant les participant.e.s potentiels à s'engager. Le questionnaire était disponible en français (la langue d'usage officielle de l'INRS) et en anglais pour rendre accessible le contenu aux membres de la communauté provenant de l'international.

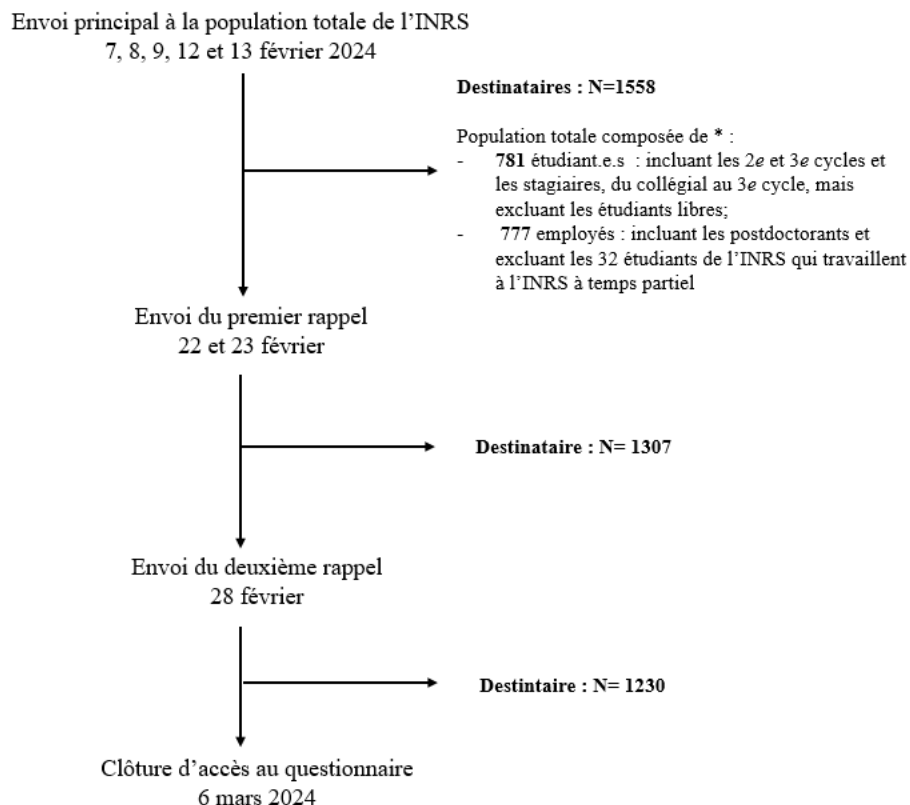


Figure 9 : Schéma représentatif de processus de contact avec la communauté de l'INRS (*liste fournie par le service des ressources humaines (employé.e.s) et par le service des études supérieures et de la réussite étudiante (étudiant.e.s))

Parallèlement, une campagne publicitaire a été menée via les réseaux sociaux de l'association étudiante du centre ETE, ainsi que par des courriels d'information diffusés sur le babillard du Centre ETE et par la fédération étudiante de l'INRS.

Puisque le sondage n'était pas obligatoire, il est possible qu'un biais soit introduit dans les réponses si les volontaires surreprésentent une partie bien précise de la population (Letourmy, 2017; Statistique Canada, 2021a). En l'occurrence, cette partie désigne les gens qui se sentent les plus intéressés par la question environnementale, par exemple des personnes qui adoptent des pratiques écologiques dans leur quotidien ou qui sont motivées ou intéressées par le sujet. Cependant, il est possible de surmonter cet écueil en se basant sur la pondération (voir section 4.4 sur la pondération) pour une meilleure représentativité.

▪ **Contenu du questionnaire en ligne :**

Afin d'atteindre nos objectifs, il a été nécessaire d'inclure une variété de questions. Ces questions sont structurées en sept parties : en plus des activités sur le numérique (annexe I), le questionnaire

inclut aussi des sections relatives aux activités du transport, la consommation énergétique résidentielle et les caractéristiques du ménage. Le présent mémoire concentre son analyse uniquement sur les activités du numérique liées au télétravail. Les sections du questionnaire comprennent :

- **Introduction, domicile, ménage et répondant** : Ces parties abordent des questions portant sur les informations personnelles et professionnelles des participant.e.s, détaillées ci-dessous :
 - À quelle organisation êtes-vous affilié(e) ?
 - À quel centre êtes-vous affilié(e) avec l'INRS ?
 - En lien avec l'organisation sélectionnée à la première question, quel est votre domaine d'emploi ou de profession/occupation ? Optez pour le rôle le plus représentatif et important pour vos fonctions (un seul rôle). Attention : Si vous êtes étudiant(e), considérez, pour toutes les questions de ce sondage, que vos études sont un emploi et que votre employeur est votre institution universitaire.
 - Pouvez-vous faire du télétravail ?
 - Faites-vous du télétravail ?
 - Code postal de votre domicile au Québec
 - Adresse de votre domicile au Québec (facultatif). Pour améliorer nos calculs de distances, nous avons besoin de connaître votre adresse. Soyez assuré(e) que toutes les informations collectées seront détruites après le traitement.
 - Positionnement de votre domicile. Recherchez votre domicile en utilisant son code postal ou son adresse en cliquant sur le bouton ci-dessous, ou veuillez positionner le lieu sur la carte en naviguant, en zoomant et en cliquant. Une fois le lieu localisé, vous pouvez déplacer le point pour plus de précision. Chercher le lieu.
 - Quelle était la tranche de revenu de votre ménage avant impôt (brut) en 2022 ? Pour ce faire, vous pouvez additionner le montant apparaissant à la ligne 199 de la déclaration de revenus du Québec des adultes du ménage.
 - Âge
 - Genre
 - Occupation principale
 - Quel est votre diplôme scolaire le plus élevé obtenu ?
 - Nom ou adresse de votre lieu de travail habituel (ou de votre institution universitaire si vous répondez à titre d'étudiant(e) au Québec

- Positionnement de votre lieu de travail habituel (ou de votre institution universitaire si vous répondez à titre d'étudiant(e)). Recherchez votre lieu de travail habituel en utilisant son nom ou son adresse en cliquant sur le bouton ci-dessous, ou veuillez positionner le lieu sur la carte en naviguant, en zoomant et en cliquant. Une fois le lieu localisé, vous pouvez déplacer le point pour plus de précision.
- **Transport et télétravail:** Cette partie concerne les questions relatives aux habitudes de transport et déplacements adoptées à la suite de la pratique du télétravail, y compris le nombre de jours de télétravail.
- **Consommation :** Cette section regroupe les questions portant sur la consommation énergétique sur le lieu de télétravail et les changements de comportement liés à l'adoption du télétravail.
- **Outils de télétravail :** Cette partie regroupe les questions relatives au numérique (Annexe I). Elles sont formulées sous forme de questions à choix multiples (QCM) avec des cases à cocher ou avec des échelles de pourcentage, portant par exemple sur le type des équipements acquis pour le télétravail, ceux laissés sur le lieu de télétravail et au bureau, les outils et la durée des visioconférences, le nombre des courriels envoyés et les variations de stockage de données dans les infrastructures informatiques (Tableau 3). Nous avons précisé dans ces questions que certaines réponses doivent être liées uniquement au contexte du télétravail pour faciliter l'interprétation des résultats.
- La partie finale offre aux participant.e.s la possibilité, d'abord, de s'inscrire à un concours en inscrivant leurs coordonnées pour tenter de gagner des chèques-cadeaux. Ensuite, l'option de consentir à être recontactés pour de futures enquêtes ou à participer à des entretiens semi-dirigés est offerte. Pour ceux qui souhaitent suivre de près la recherche, une option leur permet de recevoir des mises à jour sur les avancées. De plus, ils peuvent tester une application *Ma mobilité* dédiée à l'analyse de l'empreinte carbone de leurs déplacements (partie du transport). Enfin, un espace est réservé pour leurs commentaires et suggestions, favorisant ainsi une amélioration continue du processus.

Nous avons retenu uniquement les réponses des participant.e.s ayant rempli le questionnaire en entier, du début à la fin. Les réponses incomplètes ont été exclues, car elles ne fournissent pas suffisamment d'informations pour permettre une analyse fiable, notamment en ce qui concerne les croisements de variables et l'établissement de relations significatives.

Tableau 3 : Aperçu des questions utilisées dans le questionnaire en ligne.

Objectif des questions	Nature et contenu des questions	Type des questions
GES de l'utilisation des terminaux dans les lieux de travail	Terminaux disposés uniquement sur le lieu de travail par ex. : ordinateur portable, deuxième écran, autre, etc.	QCM : une case à cocher (possibilités de choisir plusieurs réponses et en ajouter d'autres au besoin)
GES de l'utilisation des terminaux dans les lieux de télétravail	Terminaux disposés uniquement sur le lieu de télétravail, p. ex : ordinateur portable, deuxième écran, autre, etc. Terminaux déplacés entre le lieu de travail et le lieu de télétravail	
GES des terminaux achetés/acquis	Terminaux achetés et acquis exclusivement pour le télétravail	
GES des visioconférences	Logiciels de télécommunication utilisés pour les tâches de travail (Microsoft Teams, Zoom, autre, etc.)	
	Durée (min) de visioconférences par jour	Espace libre avec une réponse unique : saisis des chiffres
GES des courriels	Nombre des courriels envoyés par jour	QCM : une seule réponse à choisir
	Changement du nombre des courriels envoyés à la suite du télétravail	
	Taux d'augmentation Taux de diminution	
GES du stockage des données	Connaissance de l'endroit de stockage des données :	QCM : une seule réponse à choisir
	- Dans l'infonuagique de l'INRS :	Espace libre avec une réponse unique : saisis des chiffres
	- Dans l'infonuagique personnelle	

	- Dans l'espace physique personnel	
Réseaux d'internet	Taux (%) du réseau utilisé pour le télétravail, p. ex. : wifi, données cellulaires, autres, etc.	Curseur de pourcentage allant de 0% à 100%
Durée d'utilisation des terminaux	Durée (heures) passée devant l'écran des terminaux pour le : - Travail au bureau - Télétravail	Espace libre avec une réponse unique : saisis des chiffres

4.2. Entretiens semi-dirigés

L'objectif des entretiens semi-dirigés est d'approfondir l'évaluation qualitative en explorant en profondeur les perceptions et les choix des habitudes qui ne peuvent pas être totalement capturées par des données quantitatives. Cette méthode permet d'analyser en détail un phénomène, des opinions, ou des expériences vécues des participant.e.s en détail (Veal, 2017). Les entrevues sont menées individuellement en virtuel (par Microsoft Teams) et avec des gestionnaires et employé.e.s de l'INRS, à l'aide d'une grille de questions pour guider l'entretien tout en permettant aux participant.e.s d'approfondir leurs réponses. Les entrevues sont enregistrées avec le consentement des participant.e.s, tout en garantissant leur confidentialité, puis retranscrites afin d'en extraire des données qualitatives.

4.2.1. Gestionnaire

Avant l'entrevue, le directeur du service des ressources informationnelles (SRI) a reçu par courriel le formulaire de consentement, la lettre d'invitation, la lettre d'information et la grille des questions (annexe II). L'entretien, réalisé le 10 août 2023, a duré environ 40 minutes et visait à brosser un portrait détaillé selon son champ d'expertise, en se focalisant sur le domaine du numérique dans le cadre du présent projet.

Les thèmes abordés incluaient :

- La gestion du parc informatique et les partenariats avec les fournisseurs de TIC.
- La gestion des serveurs et des centres de données.
- L'effet de la politique de télétravail sur l'utilisation des TIC.
- Les plans pour un numérique plus sobre en carbone.

En parallèle, les données sur le numérique ont été collectées à partir des rencontres virtuelles avec des employé.e.s et gestionnaires, dont le directeur adjoint du SRI, pour obtenir des informations ciblées sur l'infonuagique de l'INRS. Une collaboration avec les gestionnaires administratifs des quatre centres de l'INRS a également permis de compiler la marque et le modèle des terminaux les plus utilisés et les plus achetés et/ou utilisés pour chaque centre (annexe XII).

4.2.2. Employé.e.s et étudiant.e.s

Pour certains employé.e.s et étudiant.e.s ayant consenti à prendre part à des entretiens semi-dirigés après avoir rempli le questionnaire en ligne, des entrevues ont permis d'enrichir la compréhension des comportements individuels liés aux activités numériques dans le contexte du télétravail. Plus

précisément, elles permettent d'explorer en détail les résultats quantitatifs en enrichissant l'analyse de certains comportements ou en examinant l'effet rebond lié au télétravail.

Sur les 132 participant.e.s ayant manifesté leur intérêt pour les entrevues, seuls 18 ont été interviewés pour éviter une saturation empirique n'apportant pas de nouveauté estimée au-delà du seuil de 15 participant.e.s (Paillé et Mucchielli, 2008). Il en résulterait selon ces derniers une « totalité hétérogène » où chaque groupe sociodémographique (genre, âge, catégorie socioprofessionnelle, etc.) est représenté par plus d'un cas. Néanmoins, la limite de cette approche est qu'il existe trop peu de cas ayant les mêmes traits pour que l'on puisse faire des comparaisons étoffées entre les membres d'un même groupe. L'intérêt est de renforcer la représentativité du discours des membres d'un même groupe en mettant en exergue les différences existantes entre leurs discours et celui d'un autre groupe.

Le formulaire de consentement et la lettre d'information ont été envoyés par courriel aux participant.e.s ayant rempli le questionnaire et ayant exprimé leur intérêt à participer aux entretiens semi-dirigés. Le formulaire de consentement permettait aux participant.e.s de choisir leur préférence d'identification parmi les options suivantes : rester anonyme, utiliser un pseudonyme accompagné de la mention de leur profil d'emploi, ou utiliser leur prénom. Cette approche visait à respecter leur confidentialité tout en offrant une flexibilité pour s'adapter à leurs préférences personnelles. Avant chaque entretien, nous avons demandé aux participant.e.s de remplir une fiche avec des informations démographiques et professionnelles afin de mieux cerner leur profil. L'entretien a duré 1 heure, la grille d'entretien (Annexe III) était organisée selon les sections suivantes :

1. **Renseignements généraux** : la description d'une journée type de télétravail, afin de saisir leurs habitudes
2. **Renseignements liés à la politique de télétravail** : leur avis sur la politique de télétravail
3. **Habitudes de mobilité** : les déplacements liés au télétravail
4. **Consommation énergétique** : gestion de la consommation d'énergie à domicile
5. **Empreinte du numérique et consommation de biens matériels** : influence du télétravail sur le comportement et les habitudes quotidiennes.

À la fin de chaque entretien, des questions de bilan ont été posées afin de recueillir les impressions des participant.e.s. Il s'agissait notamment de savoir si le questionnaire en ligne avait suscité de nouvelles réflexions sur le télétravail, s'ils souhaitaient participer à l'étude les années suivantes ou encore quels aspects du télétravail ils auraient aimé voir aborder. De plus, une évaluation sur une

échelle de 1 à 10 a permis d'estimer leur perception des avantages du télétravail pour l'environnement. Cette méthode a permis non seulement d'enrichir la collecte de données, mais aussi encouragé une réflexion sur leurs pratiques et leurs effets. La majorité des participant.e.s ont apprécié l'entrevue et ont manifesté leur intérêt pour une éventuelle participation à un prochain cycle ou pour recevoir des informations complémentaires.

4.3. Calcul des émissions des GES

La présente section détaille la méthodologie employée pour calculer l'empreinte carbone du numérique à partir des données quantitatives issues du questionnaire en convertissant l'utilisation des ressources numériques (équipements, courriels, visioconférences, stockage des données) en équivalents CO₂. Premièrement, elle aborde les équations utilisées pour convertir les comportements en émissions de GES qui sont explicitées, en intégrant les facteurs de conversion ainsi que l'incertitude associée aux données recueillies. Deuxièmement, une brève description du traitement des résultats des GES, ainsi que des tests et approches statistiques appliquées est présentée.

L'étude se concentre exclusivement sur les émissions de GES générées par la pratique du télétravail. Aucune estimation ni comparaison n'a été réalisée pour les émissions associées au travail en présentiel

4.3.1. Cadrage méthodologie de l'ACV-carbone utilisée : Fonction, unité fonctionnelle et flux de référence

La fonction englobe l'ensemble des activités et ressources requises pour permettre à un individu de l'INRS d'être en télétravail. Cela inclut aussi l'achat et l'utilisation d'équipements informatiques ainsi que l'utilisation des outils de télécommunication.

L'unité fonctionnelle : une année de télétravail réalisée par un individu de la communauté de l'INRS. Elle permet de donner un cadre clair à l'étude, en fixant une référence temporelle (1 an), une échelle individuelle (un.e étudiant.e / employé.e) et une activité précise (le télétravail, dans les conditions de l'INRS).

Unité déclarée : exprimé en kg d'équivalent CO₂ (éq.CO₂) par année de télétravail.

Le flux de référence représente donc tout ce qu'un.e étudiant.e / employé.e mobilise ou consomme pour télétravailler pendant un an, ainsi que les émissions qui en découlent. Cela inclut par exemple

la consommation électrique liée à l'usage du poste de travail à domicile, ou encore l'impact de la fabrication du matériel utilisé, etc.

4.3.2. Descriptions de la limite du système étudié

Certaines sources ont dû être omises, car les données requises n'étaient pas disponibles. Le tableau 4 détaille les sources incluses et celles qui ont été exclues de l'ACV-carbone.

Tableau 4 : Sources d'émissions incluses et exclues

Source d'émission	Processus de l'ACV-carbone	Inclusion ou exclusion	Commentaire et justification
Fabrication	Terminaux <ul style="list-style-type: none"> • Écran • Batterie • SSD (Solid State Drive) • Puce et processeur • Carte mère • Emballage • Châssis (cadre physique d'un terminal) • Bloc d'alimentation 	Incluses	Données estimées à partir de la fiche technique de l'empreinte carbone de l'équipement
	Réseaux <ul style="list-style-type: none"> • Routeurs, • Câbles en fibre optique 	Exclus	Donnée non disponible
	Centres de données (<i>des données stockées dans l'infonuagique de l'INRS</i>) <ul style="list-style-type: none"> • Serveurs • Construction des centres des données 	Inclus	Données estimées à partir du tableau de bord de l'infonuagique de l'INRS (<i>Dashbord for Microsoft 365</i>)
	Centres de données des (<i>données stockées hors l'infonuagique de l'INRS</i>) <ul style="list-style-type: none"> • Serveurs • Construction des centres des données 	Exclus	Donnée non disponible
Transport	Terminaux <ul style="list-style-type: none"> • Transport aérien, maritime ou terrestre des produits entre les installations de fabrication et depuis les installations fabrication vers les clients 	Incluses	Données estimées à partir de la fiche technique de l'empreinte carbone de l'équipement

	Réseaux	Exclus	Donnée non disponible
	Centre des données	Exclus	Donnée non disponible
Utilisation	Terminaux • Consommation électrique pendant l'utilisation des terminaux	Incluses	Les données estimées à partir de la fiche technique de l'utilisation des terminaux, le nombre d'heures de travail officiel et le facteur d'émission (FE)
	Infrastructure et réseaux • Consommation électrique lors des visioconférences et l'envoi des courriels	Incluses	Les données estimées à partir de la revue de la littérature sur la conversion de la transmission des données en GES
	Centres des données • Consommation électrique liée à la transmission des données et le stockage des données	Incluses	Les données estimées à partir de la revue de la littérature sur la conversion du stockage des données en GES t à partir de tableau de bord de Microsoft 365 pour le stockage dans les OneDrive de l'INRS
Fin de vie	Terminaux • Recyclage/élimination des déchets électroniques	Incluses	Données estimées à partir de la fiche technique de l'empreinte carbone de l'équipement
	Réseaux	Exclus	Donnée non disponible
	Centres de stockage	Exclus	Donnée non disponible

Les émissions de GES des terminaux ont été analysées selon une approche du berceau au tombeau, englobant toutes les étapes de leur cycle de vie : extraction des matières premières, production, transport, utilisation et fin de vie. Pour les infrastructures réseau et les centres de stockage, seules les émissions liées à leur utilisation ont été prises en compte en raison du manque de données sur les autres phases.

4.3.3. Potentiel de réchauffement planétaire

Le potentiel de réchauffement planétaire (PRP) est une mesure qui permet d'évaluer la capacité d'un gaz à emprisonner la chaleur dans l'atmosphère et donc à contribuer au réchauffement climatique. Ainsi, dans le cadre de cette étude, les potentiels de réchauffement présentés dans le tableau 5 permettent de rapporter les émissions globales en éq. CO₂ (Solomon *et al.*, 2007).

Tableau 5 : Potentiels de réchauffement planétaire sur un horizon de 100 ans. (Solomon *et al.*, 2007)

Gaz à effet de serre	Potentiel de réchauffement
CO ₂	1
CH ₄	25
N ₂ O	298

4.3.4. Facteurs d'émission

Pour une meilleure précision des calculs, nous avons utilisé le facteur d'émission provincial du Québec pour l'hydroélectricité. Ce facteur permet de convertir la consommation électrique en émissions de GES en tenant compte de l'ensemble des émissions associées à la production d'hydroélectricité conformément aux principes de l'ACV-carbone. Les émissions biogéniques nettes de GES de tous les réservoirs hydroélectriques de la province estimées sont de 16,5 (14,7-18,6) g éq. CO₂/kWh et de 0,29 (0,23-0,35) g éq. CO₂/kWh, les intervalles de confiance de 2,5 % et 97,5 % étant entre parenthèses. et il est estimé à 34,5 g éq. CO₂/kWh (Levasseur *et al.*, 2021).

Dans le cadre de cette étude, des facteurs de conversion sont utilisés afin de transformer certaines données en équivalents de CO₂ ou en consommation électrique. Il s'agit notamment des informations issues des fiches techniques sur l'empreinte carbone des terminaux (annexe I), ainsi que des facteurs permettant de convertir les données numériques liées au transfert et au stockage, exprimées en Go/h, en kWh. Estimé par Obringer *et al.* (2021). Les détails relatifs à ces facteurs de conversion sont présentés dans la section 4.3.5.

4.3.5. Modélisation des émissions de GES liées au numérique

Après la collecte des données à travers le questionnaire, les réponses quantitatives des participants sont analysées et traitées pour estimer les émissions de GES. Cette étape nécessite le recours à de nombreux calculs qui sont basés sur l'équation suivante, extraite du rapport de Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, 2006) :

Données (unité) * Facteur d'émission (kg éq. CO₂/unité) = Émissions de GES (kg éq. CO₂)

De ce fait, les émissions ont spécifiquement été calculées à partir des formules détaillées dans la partie suivante.

- **Terminaux**

Les types et modèles des terminaux les plus achetés ont été recensés auprès des gestionnaires administratifs de chaque centre de l'INRS (annexe XII). Les émissions de GES correspondantes ont été extraites à partir des fiches techniques des fabricants. Pour certains modèles, tels que l'imprimante HP, les données de GES ont été directement obtenues auprès des fabricants. Les émissions prennent en compte toutes les étapes de l'ACV-carbone et nous avons exclu la phase d'utilisation afin de la calculer séparément selon le mix énergétique québécois. Enfin, les émissions totales ont ensuite été divisées par la durée de vie des équipements pour calculer les émissions annuelles (Équation 1).

Équation 1 : Estimation des émissions de GES des terminaux

$$\text{GES Terminaux (kg. éq CO}_2\text{)} = \frac{\text{GES total en ACV carbone (kg)} - \text{GES Utilisation (kg)}}{\text{Durée de vie (ans)}}$$

- Alimentation électrique des terminaux

Les émissions liées à la consommation électrique des terminaux ont été calculées en utilisant la quantité d'énergie électrique (indiquée dans les fiches techniques d'utilisation de l'équipement), multipliée par la durée quotidienne d'utilisation (7 heures par jour), le nombre de jours selon le mode de travail, et par 48 semaines par an, en excluant les jours fériés, congés et vacances. Cette consommation a ensuite été multipliée par le facteur d'émission en ACV-carbone.

Équation 2 : Conversion de l'alimentation électrique des terminaux en GES

$$\text{GES Alimentation (kg. éq CO}_2\text{)} = \sum_{i=1}^{\text{N.model}} \text{QÉ} * \text{D} * \text{FE} * \text{J} * 48$$

Où :

QÉ : Quantité d'énergie électrique du terminal (kWh)

D : Durée d'utilisation du terminal (h)

FE : Facteur d'émission d'électricité (soit 0,0345 g éq. CO₂/kWh)

J : Nombre des jours de travail ou télétravail

48 : Semaines officielles de travail durant une année régulière

▪ Visioconférences

En nous appuyant sur la méthodologie et les facteurs de conversion en consommation électrique proposés par Obringer *et al.* (2021), l'estimation des GES liés à l'utilisation des visioconférences tient compte de la transmission et du stockage des données via le réseau Wifi.

Pour ce faire, il a d'abord été nécessaire de déterminer le volume de données nécessaires pour une réunion virtuelle. Cette analyse a ensuite été affinée en prenant en compte les différents logiciels de télécommunications utilisés par les participant.e.s de l'échantillon. Sur la base des observations des comportements des membres de la communauté et des discussions avec les gestionnaires, il a été considéré que les réunions à distance se déroulaient avec caméra et audio activés, et une moyenne des consommations entre les réunions individuelles et en groupe a été calculée. Les volumes de données par opérateur ont été recueillis à partir de l'article de MacMillan *et al.* (2021), et celles pour Adobe et Webex à partir de leurs sites officiels (annexe XI). Ensuite, ces volumes de données, multipliés par la durée des visioconférences, ont été convertis en émissions de GES à l'aide d'un facteur d'émission issu de l'ACV-carbone, comme illustré dans l'équation 3.

Équation 3 : GES associés aux visioconférences

$$\text{GES Visioconférence (kg. éq CO}_2\text{)} = \sum_{i=1}^{N \text{ logiciels}} V * D * (FC_s + FC_t) * FE * N_v * J * 48$$

Où :

V : Volume des données lors d'une visioconférence par chaque opérateur de télécommunication (Go/h)

D : Durée moyenne de la visioconférence (h)

FCs: Facteur de conversion du volume des données en consommation électrique (kWh/Go) pour le stockage. Estimé par Obringer *et al.* (2021)

FCt: Facteur de conversion du volume des données en consommation électrique (kWh/Go) pour le transfert. Estimé par Obringer *et al.* (2021)

Nv : Nombre des visioconférences effectuées pendant une journée typique de travail

FE : Facteur d'émission d'électricité (soit 0,0345 g éq. CO₂/kWh)

J : Nombre des jours de travail ou télétravail

48 : Semaines officielles de travail pendant un an

- **Courriel**

Figiera (2024) a estimé les émissions de GES liées aux courriels en fonction de divers paramètres : taille du message, type de réseau (Wifi ou 4G), nombre de destinataires (individuel ou en groupe) et type d'appareil utilisé (ordinateur ou téléphone mobile). En l'absence de ces données spécifiques, nous avons adopté une méthodologie basée sur le mix énergétique britannique (charbon 3,0%, pétrole 35,8%, gaz naturel 37,8%, nucléaire 7,3%, hydroélectricité 0,3%, géothermie, solaire, éolienne, etc. 5,7%, biocarburants et déchets, 10,1% (IEA, 2023b)) qui établit qu'un courriel génère en moyenne 0,04 g éq. CO₂ (Berners-Lee, 2020). Cette estimation intègre les émissions liées à l'utilisation de l'appareil, au réseau de transmission, au stockage des données, ainsi qu'à l'utilisation de l'appareil de réception (Équation 4).

Équation 4 : Conversion des courriels envoyés en GES

$$\text{GES Courriels (kg. éq CO}_2) = \sum_{i=1}^N N_c * T_x * F_{C_c} * 48$$

Où

N_c : Nombre des courriels envoyés durant une semaine de travail typique

T_x : Taux de variation (augmentation ou diminution) des courriels envoyés liée au télétravail

F_{Cc} : Facteur de conversion des courriels envoyés en GES (kg)

48 : Semaines officielles de travail pendant un an

- **Stockage des données**

Stockage des données infonuagiques de l'INRS : Ces informations ont été obtenues à partir du tableau de bord Microsoft 365, l'abonnement de services bureautiques utilisé par l'INRS. Cet outil permet de suivre et d'estimer les GES émis par les utilisateurs connectés à ce service. Sur cette base, la moyenne annuelle des émissions est estimée à 0,1666 kg éq. CO₂ par utilisateur. La méthodologie adoptée repose sur une ACV-carbone qui englobe toutes les étapes du cycle de vie des équipements matériels des centres de données, qu'ils soient la propriété de Microsoft 365 ou loués : fabrication, emballage, transport, utilisation et fin de vie. Les services pris en compte dans le calcul des émissions incluent Exchange Online, SharePoint, OneDrive, Microsoft Teams, ainsi que les logiciels bureautiques Word, Excel, PowerPoint et Outlook (annexe XI). Afin d'éviter un double comptage des émissions entre le stockage et les visioconférences, nous avons réduit les émissions de stockage en soustrayant celles liées au stockage des données de visioconférence (Équation 5). Cependant, pour les courriels, il n'a pas été possible de dissocier ces émissions, car le facteur de conversion utilisé dans l'ACV-carbone ne permet pas de préciser la part liée à la transmission des courriels envoyés.

Équation 5 : Calcul des GES associés au stockage des données dans l'infonuagique de l'INRS

$$\text{GES Stockage INRS (kg. éq CO}_2) = \sum_{i=1}^N (0,166 - \text{GES SV}) * \text{Tx}$$

Où

0,166 : la moyenne annuelle des émissions GES par utilisateur de l'infonuagique de l'INRS

GES SV : les émissions des GES associées au stockage des données lors des visioconférences (kg)

Tx : Taux de variation (augmentation ou diminution) du volume de stockage des données liées au télétravail

Stockage dans l'infonuagique personnelle : Nous avons utilisé les mêmes facteurs de conversion que pour la transmission et le stockage des données présentés précédemment dans la partie des visioconférences. L'équation 6 représente la méthode de calcul.

Équation 6 : Calcul des GES associés au stockage des données dans l'infonuagique personnelle

$$\text{GES Stockage personnel (kg. éq CO}_2) = \sum_{i=1}^N V * \text{FCs} * \text{FE} * \text{Tx}$$

Où

V : Volume des données stockées dans l'infonuagique personnelle (Go)

FCs : Facteur de conversion du volume des données en consommation électrique (kWh/Go) pour le stockage dans l'infonuagique. Estimé par Obringer *et al.* (2021)

FE : Facteur d'émission d'électricité (soit 0,0345 g éq. CO₂/kWh)

Tx : Taux de variation (augmentation ou diminution) du volume de stockage des données liées au télétravail

Stockage dans l'espace physique : Les données stockées dans l'espace physique (tel que le disque dur interne des ordinateurs et le disque dur personnel externe) nécessitent 0,000005 kWh/Go pour sauvegarder les données numériques selon Adamson (2017). L'équation 7 indique la méthode de calcul utilisé.

Équation 7 : Calcul des GES associés au stockage des données dans l'espace personnel physique

$$\text{GES. Stockage physique (kg. éq CO}_2) = \sum_{i=1}^N V * FC_p * FE * Tx$$

Où

V : Volume des données stockées dans l'espace physique personnel (Go)

FCt : Facteur de conversion du volume des données en consommation électrique (kWh/Go) pour le stockage dans l'espace physique. Estimé par Adamson (2017)

FE : Facteur d'émission d'électricité (soit 0,0345 g éq. CO₂/kWh)

Tx : Taux de variation (augmentation ou diminution) du volume de stockage des données liées au télétravail

Lorsque les répondants déclarent utiliser plusieurs lieux de stockage (deux ou trois endroits de stockage parmi ceux mentionnés précédemment) et précisent les volumes associés, nous additionnons ces catégories pour obtenir les émissions de GES totales liées au stockage des données. Pour les courriels, notre objectif étant de mesurer l'effet du télétravail sur les activités numériques, nous avons pris en compte uniquement les émissions de stockage, ajustées en les multipliant par le taux de variation lié au télétravail (Équation 8).

Équation 8 : Calcul des GES associés au stockage des données

GES Stockage total(Kg. éq CO2)

$$= \sum_{i=1}^N \text{GES S. INRS} + \text{GES Stockage personnel} + \text{GES Stockage physique}$$

4.3.6. Incertitude liée aux données et aux facteurs d'émission

Dans le cadre de cette étude, les différentes données sur les habitudes du télétravail ont été recueillies par le questionnaire en ligne (considérées comme primaires) provenant des mesures directes ou d'estimations réelles et sont considérées comme fiables. Cependant, il a été nécessaire de les convertir et de recourir à des données secondaires pour estimer les émissions de GES des participant.e.s .

Comme cité précédemment, une estimation détaillée est effectuée pour déterminer l'empreinte carbone des marques et modèles d'équipement les plus utilisés ou achetés dans chaque centre de l'INRS, apportant ainsi une bonne précision à nos résultats. Cependant, l'incertitude majeure concerne essentiellement les données liées à la fabrication, au transport et à la fin de vie des terminaux, comme indiqué dans les fiches techniques du modèle de l'équipement. Ces estimations de l'empreinte carbone comportent des marges d'erreur pour certains terminaux (annexe XII). Puisqu'elles sont notre unique source d'information, nous avons basé nos calculs sur ces informations, tout en soulignant la nécessité d'améliorer leur précision pour des analyses ultérieures plus fiables.

Dans le même ordre d'idée, les informations demandées dans le questionnaire comme la durée des visioconférences concernent une semaine type de travail, considérant que cette semaine est représentative de toutes les semaines de l'année.

Pour une meilleure précision, nos calculs pour les visioconférences (décrits précédemment) ont été adaptés en fonction des logiciels les plus utilisés par les participant.e.s. Pour estimer la consommation électrique lors d'une réunion virtuelle, nous avons additionné les consommations en amont (*upstream*) _ c.-à-d. l'énergie utilisée pour l'envoi des données (caméra, micro, partage d'écran) _ incluant l'appareil de l'émetteur et son réseau. et en aval (*downstream*) _ c.à.d l'énergie consommée pour recevoir ces données, du serveur jusqu'au terminal des autres participants _ et la conversion des volumes de données vers la consommation électrique a été convertie en utilisant des facteurs de conversion tenant compte à la fois de la transmission dans les infrastructures réseau et du stockage des données dans les centres de données. Cependant, une certaine incertitude repose sur les émissions associées, puisque nous supposons que toutes les réunions virtuelles se déroulaient avec la caméra activée.

Pour le stockage des données, nous avons attribué une valeur de GES par individu aux participant.e.s utilisant l'infonuagique de l'INRS en nous appuyant sur le tableau de bord de Microsoft 365. Pour les autres participant.e.s, dont les données étaient stockées dans un espace infonuagique personnel ou sur un support physique, des facteurs de conversion globaux ont été appliqués. Lorsque le stockage était réparti entre ces trois options, les émissions correspondantes ont été cumulées. Lorsque des participant.e.s ne connaissent pas le volume de leurs données stockées, leurs réponses ont été exclues des calculs pour cette catégorie, introduisant ainsi un niveau d'incertitude dans les résultats liés au stockage.

Une autre incertitude subsiste concernant la conversion des courriels envoyés en émissions de GES. Nous avons recueilli le nombre de courriels envoyés. Toutefois, les informations sur des éléments précis, tels que les pièces jointes, le nombre de destinataires et le type d'appareil utilisé, restaient hors de notre portée. D'après Berners-Lee (2020), l'empreinte carbone d'un courriel envoyé varie entre 0,05 g à 29 g par courriel en fonction de types de courriel envoyé. Dans la présente étude, la valeur de 0,4 g CO₂ .éq par courriel se situe dans le bas de la fourchette, mais reste représentative d'un usage courant. Elle correspond à un courriel court sans pièce jointe entre deux ordinateurs. Ce choix évite les extrêmes pour limiter les risques de sous- ou surestimation.

Enfin, les résultats présentés dans cette analyse reposent sur des données comportant un certain degré d'incertitude, qu'il s'agisse de facteurs d'émissions ou de PRG. Même lorsque ces données proviennent de sources reconnues comme le GIEC ou des organismes gouvernementaux, elles sont souvent accompagnées de marges d'erreur significatives. De plus, l'application de ces valeurs dans un contexte différent de celui pour lequel elles ont été établies peut amplifier cette incertitude.

Tableau 6 : Fiabilité des données utilisées de la présente étude

Classe des données	Sources des données	Fiabilité
Primaires	Données collectées à partir du questionnaire	Moyenne
Secondaires	Facteur d'émission (ACV-carbone) d'hydroélectricité	Moyenne
	Potentiel de réchauffement planétaire	Moyenne à faible
	Empreinte carbone des terminaux	Moyenne à faible
	Émission GES par courriel envoyé	Moyenne

	Conversion la durée des visioconférences en GES	Moyenne
	Conversion des données stockées (Go) en GES	Faible
	Conversion de la consommation électrique de l'utilisation des terminaux en GES	Moyenne

Ces hypothèses et incertitudes ont donc été identifiées afin de déterminer les limites de l’empreinte carbone calculée, les sources d’erreurs et d’améliorations proposées.

4.4. Traitement des données et analyse des résultats

4.4.1. Traitement des données qualitatives : entrevues semi-dirigées des employé.e.s

Dans un premier temps, les entretiens ont été intégralement transcrits, puis nettoyés afin de ne conserver que les éléments liés au numérique et d’éliminer les répétitions. Ensuite, les documents ont été importés dans le logiciel *NVIVO* pour une analyse thématique du contenu, s’appuyant sur l’approche de Feng et Behar-Horenstein (2019). Un codage intuitif a permis d’explorer les discours des participant.e.s et d’identifier les éléments clés, en croisant ces observations avec la littérature existante et les résultats quantitatifs obtenus. Certaines réponses confirmaient les hypothèses initiales tout en apportant des nuances, tandis que d’autres s’en écartaient.

Les codes obtenus ont ensuite été regroupés en grandes catégories, généralement alignées avec la structure du guide d’entretien. Enfin, les idées similaires ont été organisées sous des thèmes afin de structurer les résultats et d’apporter une meilleure compréhension des discours recueillis. Cette démarche a abouti à l’identification de cinq thèmes principaux : l’acquisition des terminaux, les visioconférences, les courriels, le stockage des données et l’alimentation des terminaux à domicile.

4.4.2. Traitement des données quantitatives : questionnaire

Les réponses du questionnaire sont codifiées et ont été organisées sous forme de matrice dans un fichier Excel. La première colonne contient l’identifiant des participant.e.s en utilisant un code pour l’anonymat et la confidentialité des participant.e.s, suivie des colonnes correspondant aux réponses. Chaque choix de réponse est structuré dans une colonne, avec une valeur de 1 si le participant a

coché cette option, et 0 s'il ne l'a pas fait. Pour les questions nécessitant la saisie d'un chiffre ou d'un taux (%), les valeurs saisies sont directement inscrites dans la cellule correspondante.

4.4.3. Analyse des résultats

La matrice des résultats a initialement codifié, puis corrigée dans Excel, puis importé dans le logiciel R Studio version R 4.2.3 (Posit team, 2023). Les équations présentées précédemment ont été réalisées pour les calculs des GES. Par la suite, les tests statistiques ont été nécessaires afin de guider la démarche à suivre de manière appropriée.

Dans un premier temps, deux tests ont été effectués pour déterminer si les données avaient une distribution normale et que la distribution des variances était égale. Le cas échéant, des analyses non paramétriques ont été effectuées. Les résultats obtenus ont orienté le choix des tests appropriés à appliquer par la suite. Plus précisément :

- Le **test de Shapiro-Wilk** a été employé pour évaluer si la distribution des variables suit une loi normale.
- Le **test de Levene** a été utilisé pour vérifier (c'est-à-dire s'assurer que la dispersion des données est similaire entre les groupes) ou, autrement dit, l'égalité des variances (les écarts par rapport à la moyenne sont comparables d'un groupe à l'autre).

Avec l'analyse de la somme des GES individuels, nous avons obtenu un p (*p-value* en anglais) de $3,58 \times 10^{-19}$ pour le test de Shapiro-Wilk et de 0,81 pour le test de Levene. Ces résultats indiquent que les données ne suivent pas une distribution normale, justifiant ainsi l'utilisation de tests non paramétriques pour leur analyse. De ce fait, le test de Kruskal-Wallis est le plus approprié pour traiter les résultats. Il permet de comparer plusieurs groupes indépendants sans nécessiter que les données suivent une distribution normale. Cette caractéristique le rend adapté aux échantillons non paramétriques ou en cas de variances inégales entre les groupes (McKight et Najab, 2010; Ostertagova *et al.*, 2014).

Des analyses univariées pour les émissions de GES sont effectuées, en calculant la somme, la moyenne, la médiane, l'écart-type, ainsi que les valeurs minimale et maximale. Des analyses bivariées ont été réalisées pour comparer les émissions entre deux groupes. Par exemple, la comparaison des GES des individus pratiquant le télétravail et les GES des non-télétravailleurs. Enfin, des analyses multivariées ont permis d'examiner les émissions en fonction de plusieurs variables, notamment le type d'emploi, le centre, et les activités numériques.

4.4.4. Régression pas à pas

Dans l'optique de créer un modèle de prédiction des GES du numérique lié au télétravail, une régression pas à pas de type vers l'avant (*forward*) a été appliquée pour identifier les variables continues les plus statistiquement influentes sur la somme individuelle des émissions de GES numériques associées au télétravail. Les variables dichotomiques (qui ne prennent que deux valeurs possibles, comme des réponses avec "oui" ou "non") sont mésadaptées à ce type de régression et elles ont été retirées (ex : genre, faire ou non le télétravail). Ces variables sont souvent moins appropriées car leur faible variabilité limite leur pouvoir explicatif. Elles risquent ainsi d'être écartées rapidement par les critères statistiques et, lorsqu'elles sont nombreuses et peuvent accentuer la colinéarité entre variables.

Les variables continues (centre, emploi, terminaux acquis, terminaux restants dans le lieu de télétravail, visioconférences, stockage des données, courriels envoyés, âge, jours de télétravail) ont été considérées dans le modèle afin de garantir la validité des résultats statistiques.

Dans un premier temps, une standardisation des données a été réalisée : pour chaque valeur de chaque variable indépendante, la moyenne de la variable a été soustraite, puis le résultat divisé par son écart-type. Cette étape est essentielle, car sans elle, les coefficients de la régression peuvent être biaisés par les différences d'unités entre les variables explicatives, ce qui rend toute comparaison entre les effets respectifs impossibles. Ensuite, la méthode vers l'avant a été déployée, qui consiste à incorporer progressivement, à partir d'un modèle vide, les variables explicatives en fonction de leur contribution significative à la réduction de l'erreur du modèle. À chaque étape, le critère d'ajout repose sur des tests statistiques, comme le critère d'information d'Akaike (AIC), permettant de conserver uniquement les facteurs explicatifs. L'AIC permet de comparer plusieurs modèles entre eux pour voir lequel explique le mieux les données. Un score plus bas indique un meilleur modèle.

L'équation finale obtenue peut s'exprimer ainsi :

Équation 9 : Formule explication de la régression pas à pas (Hilton et Armstrong, 2011; Woltman *et al.*, 2012)

$$GES_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_k \cdot x_k + \varepsilon_i$$

Où

GES_i : les émissions individuelles de GES pour l'individu i

x_1 à x_k : les variables continues sélectionnées

β_0 à β_k : les coefficients estimés

ε_i : terme d'erreur aléatoire.

L'analyse des coefficients permet de quantifier l'effet marginal de chaque variable retenue sur les émissions de GES.

Pour valider la robustesse du modèle, des tests complémentaires ont été essentiels, tels que le diagramme dispersion (*scatter plot*) et le calcul de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Le diagramme de dispersion permet de visualiser l'ordre d'importance des variables intégrées dans la régression, tandis que le RMSE a pour but d'évaluer la qualité de la prédiction en mesurant l'écart moyen entre les valeurs observées et celles prédites.

4.4.5. Pondération des résultats pour la communauté de l'INRS

Pour estimer les émissions de GES de l'ensemble de la population de l'INRS, nous avons appliqué une pondération par redressement des non-réponses, permettant d'extrapoler les résultats de l'échantillon aux effectifs totaux. Cette méthode est particulièrement adaptée aux sondages non probabilistes, avec la sélection des participant.e.s non aléatoire et permet d'améliorer la validité des inférences statistiques malgré certaines limites d'échantillonnage (Kern *et al.*, 2021).

La représentativité de l'échantillon a été évaluée en comparant ses caractéristiques (type d'emploi, centre d'affiliation) avec celles de la population générale (Durand, 2013). Huit groupes ont été définis selon le centre d'affiliation et la catégorie d'emploi. Toutefois, en raison d'un faible taux de réponse dans certaines catégories, nous avons fusionné certains centres (UCS et EMT_Montréal), ainsi que les deux groupes d'emplois concernés (étudiant.e.s et employé.e.s pour EMT_Varenes), afin d'obtenir des effectifs suffisants pour une estimation plus robuste.

- UCS_employé.e.s (excluant UCS_Québec) et EMT_Montréal_employés
- EMT_Varenes
- ETE_étudiants (incluant UCS_Québec)
- ETE employé.e.s (incluant UCS_Québec)
- Administration
- AFSB_étudiants
- AFSB_employés

Le coefficient de pondération est basé sur le taux de réponse obtenu, défini comme suit :

$$Coef = \frac{n}{N}$$

Où :

N : Taille de la population totale

n : Nombre de répondants

Le coefficient est ensuite multiplié par les émissions de GES associées au même groupe, ce qui permet d'estimer les émissions globales pour l'ensemble de la population cible.

5. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Cette section représente les résultats obtenus à partir des différents calculs réalisés. D'abord, les résultats relatifs aux profils des individus qui ont participé aux questionnaires sont présentés brièvement. Ensuite, une attention particulière est portée à l'analyse des émissions des GES à l'aide des tests statistiques et de l'analyse descriptive. La dernière partie inclut l'analyse descriptive et l'analyse des facteurs contribuant à l'augmentation des GES.

5.1. Aperçu sur le numérique au sein de l'INRS : résultats des entretiens semi-dirigés avec les gestionnaires

L'entrevue réalisée avec le directeur du SRI a permis de mieux comprendre la gestion des logiciels, des infrastructures et des équipements informatiques à l'INRS. Le SRI gère environ 60 à 70% des logiciels de l'INRS grâce à des ententes particulières. Environ 40 logiciels sont pris en charge par le SRI, incluant Office 365, portail IDÉ (plateforme de gestion des dossiers étudiants), SOFE (plateforme de gestion comptable et RH) et Antidote. Cependant, 30 à 40% des logiciels sont gérés par les usagers en dehors de la structure institutionnelle. Ceci entraîne un manque de visibilité sur les logiciels installés, notamment ceux utilisés par les équipes de recherche du centre EMT à Varennes, déployés par les techniciens du SRI. Le nombre exact de logiciels gérés individuellement par les utilisateurs reste inconnu, bien qu'il puisse être conséquent.

Concernant l'infrastructure de stockage, 80 à 85% des données sont hébergées dans deux salles de serveurs dédiés à Québec et Laval, tandis qu'une partie des données des équipes de recherche est stockée ailleurs à l'INRS ou en dehors, sans suivi précis par le SRI. Certaines salles de stockage, comme celles de Bonaventure et UCS, sont en cours de décommissionnement afin de centraliser les serveurs à Québec et Laval. La transition vers l'infonuagique a également marqué une étape clé en 2022 avec la migration des courriels vers Office 365, renforçant ainsi la sécurité et la confidentialité des informations. Par le passé, une plateforme en ligne dédiée à la gestion de la maintenance des bâtiments a également été transférée vers l'infonuagique pour une gestion plus efficace, malgré des coûts plus élevés. Aujourd'hui, Microsoft Teams est devenue un outil incontournable, utilisé aussi bien en présentiel qu'en télétravail.

D'après le directeur du SRI, le passage au télétravail n'a pas entraîné de modification significative dans le stockage des données puisque l'accès aux fichiers sur les serveurs locaux reste possible via le VPN et tous les fichiers sur l'espace infonuagique sont accessibles grâce à une simple connexion internet. Actuellement, l'INRS compte 181 Téraoctets (TB) de données qui sont hébergées sur les

serveurs de fichiers situés à Québec et Laval, tandis que 41,36 TB sont stockés sur OneDrive et 8,91 TB sur SharePoint. Par ailleurs, un espace libre d'environ 47 TB est encore disponible dans l'infonuagique. Cependant, le volume exact des données stockées par les équipes de recherche demeure inconnu du SRI, rendant difficile une évaluation précise de la capacité et de l'optimisation des infrastructures de stockage.

Du côté des télécommunications, l'analyse du temps passé en visioconférence montre une évolution des pratiques de communication, mais son lien direct avec le télétravail reste incertain. Par exemple, l'équipe du SRI ne pratique pas le télétravail, et l'usage des visioconférences sur Microsoft Teams est principalement dû à l'éparpillement géographique des équipes et à la non-disponibilité des salles de réunion. Entre le mois de septembre 2023 et février 2024 (6 mois), 6 020 477 courriels ont été échangés, illustrant une forte activité numérique. De plus, une transition marquée des réunions en présentiel vers des modes virtuels a été constatée, avec une préférence accrue pour le *clavardage* (chat) sur Microsoft Teams plutôt que pour les visioconférences. Cette tendance s'explique en partie par la familiarité des utilisateurs avec Microsoft Teams, l'INRS étant un client institutionnel de Microsoft Office 365.

En ce qui a trait au parc informatique, les équipements sont renouvelés tous les quatre ans pour l'administration, avec une collaboration avec des fournisseurs reconnus pour assurer leur recyclage en fin de vie. Cependant, durant la pandémie, des achats ont été réalisés pour soutenir le télétravail et certains équipements ont été acquis de manière informelle, sans traçabilité, notamment par des employé.e.s utilisant leurs propres appareils portatifs. Un inventaire des équipements informatiques est en cours de réalisation, basé sur la collecte de données via SOFE et l'analyse des factures, bien que ces dernières ne soient pas encore toutes disponibles. Par ailleurs, dans le cadre de la politique de télétravail, un remboursement de 500 \$ pour l'achat de mobilier de bureau a été mis en place.

Enfin, sur les perspectives, le gestionnaire a indiqué qu'une migration des données vers l'infonuagique est prévue dans les 7 à 8 prochaines années. Cette transition s'articulera autour de deux modes principaux : le stockage via le modèle *Software as a Service* (ex. : Office 365, applications de gestion des bâtiments via des serveurs canadiens) et le choix de l'espace et la localisation de stockage des données, avec des fournisseurs comme Microsoft ou Amazon. Cependant, il est à noter que les critères de sélection de ces fournisseurs n'intègrent pas encore la dimension de carboneutralité, un aspect qui pourrait gagner en importance à l'avenir.

5.2. Taux des réponses et représentativité d'échantillonnage

Le taux de réponse au questionnaire est de 23,36% ($n = 364$) pour un échantillon sondé de $N = 1558$ composée de 781 étudiant.e.s et 777 employé.e.s (figure 10). Sur les 364 personnes ayant initié le questionnaire, deux répondants ont été exclus en raison d'une interruption du questionnaire (ces répondants ont choisi l'option « Travailler sur la route », ce qui les rendait inadmissibles à l'étude. L'échantillon analysé selon l'âge et le genre est ainsi réduit à 362 individus. Ensuite, 45 observations ont été retirées des calculs des GES, car ces personnes n'avaient pas la possibilité de télétravailler, réduisant l'échantillon à 319. Enfin, 47 autres observations ont été exclues des calculs des GES en fonction du nombre de jours de télétravail, car bien que ces individus puissent télétravailler, ils ne le faisaient pas, aboutissant à un échantillon final de 272 personnes pratiquant le télétravail.

Au moment de la distribution du questionnaire (mars 2024), la population totale éligible était de $N = 1558$. Cependant, les données détaillées par type d'emploi (ex. : étudiant.e.s, personnel de recherche, etc.) n'étaient pas disponibles pour cette période. Pour analyser la représentativité de l'échantillon (tableau 7), nous avons donc utilisé un jeu de données antérieur de $N = 1566$, collecté durant la même période de session d'étude d'hiver (janvier 2023), mais qui n'avait pas été actualisé pour refléter les dernières variations démographiques (ex. : départs, embauches, étudiants diplômés, etc.). Les données de $N = 1566$ incluent des informations sur les types d'emploi, mais ne correspondent pas exactement à la population actuelle au moment du questionnaire.

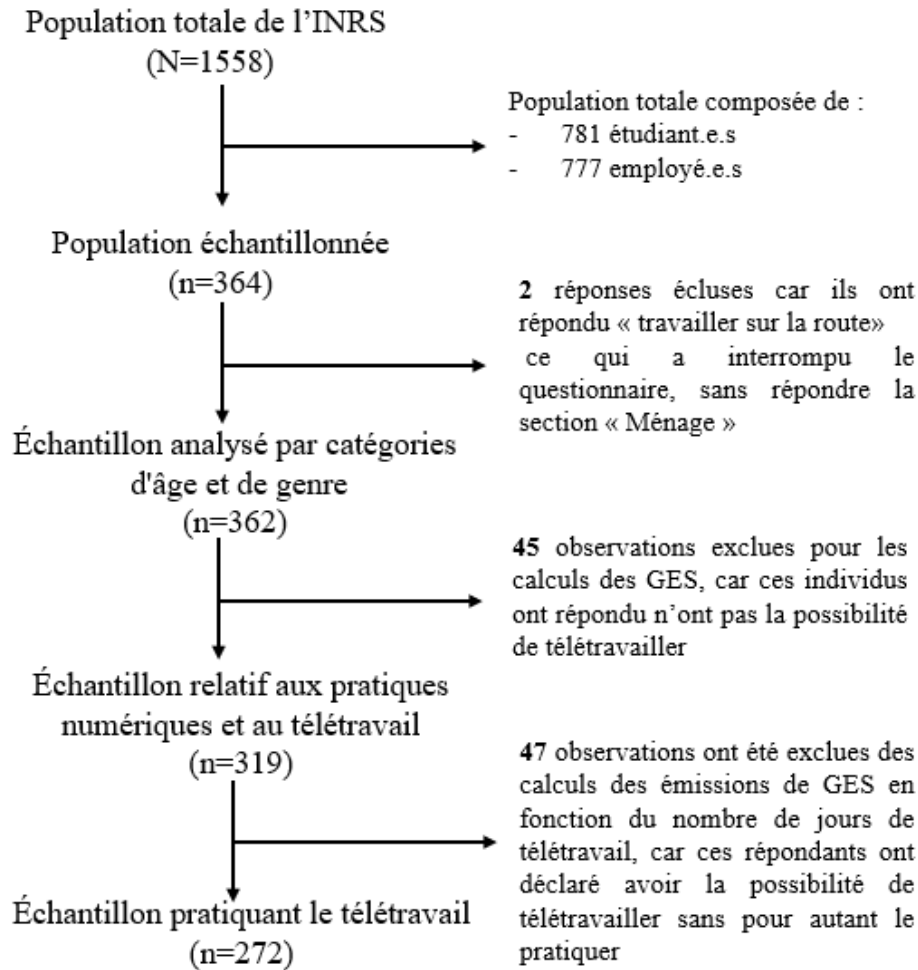


Figure 10 : Schéma d'identification de la population de l'étude.

Pour la représentativité, certaines catégories d'emploi affichent une forte participation, comme les membres du soutien administratif avec 87,67% et les cadres supérieur.e.s ou dirigeant.e.s avec 75%. Toutefois, la présence des cadres supérieur.e.s et dirigeant.e.s demeure nettement sous-représentée par rapport au poids de la population de l'INRS (Tableau 7).

Tableau 7 : Distribution des réponses par catégorie d'emploi

Catégorie d'emploi	Population échantillonnée (n)	% de (n)	Population totale (N)	% de (n)	Représentativité (n/N)
Soutien administratif	64	17,6	73	4,6	87,6
Technicien.ne Production ou Maintenance	35	9,6	168	10,7	20,8
Professionnel.le	40	11	79	5,1	50,6
Cadre intermédiaire	8	2,2	26	1,6	30,78
Cadre supérieur ou dirigeant	3	0,8	4	0,2	75
Professeur.e	37	10,2	166	10,6	22,3
Personnel de recherche	47	13	165	10,5	28,5
Étudiant.e de 1 ^{er} cycle ou de cégep	4	1,1	29	1,8	13,8
Étudiant.e de 2 ^e cycle	38	10,4	302	19,3	12,6
Étudiant.e de 3 ^e cycle	69	18,9	450	28,7	15,3
Stagiaire postdoctoral	19	5,2	104	6,6	18,3
Total	364	100	1566	100	

Les taux de réponse liés aux centres de l'INRS allant de 12,8% à 29,5% révèlent une représentativité inégale (Tableau 8). L'administration et le centre ETE représentent les taux les plus élevés, 29,55% et 28,22% respectivement, et offrent une base plus fiable pour l'analyse statistique. Les centres de l'EMT à Varennes et EMT à Montréal enregistrent des taux plus faibles de représentativité (14,7% et 12,8% respectivement) ce qui limite la généralisation des résultats. Les centres AFSB (21,8%) et UCS (25,2%) sont intermédiaires, ce qui suggère une représentativité modérée.

Tableau 8 : Distribution des réponses par centre de l'INRS

Centres de l'INRS	Population échantillonnée (n)	% de (n)	Population totale (N)	% de (N)	Représentativité (n/N)
AFSB	75	20,6	344	22,1	21,8
EMT_Montréal	11	3,0	86	5,5	12,8
EMT_Varennes	39	10,7	266	17,1	14,7
ETE	114	31,3	404	25,9	28,2
UCS	60	16,5	238	15,3	25,2
Administration	65	17,9	220	14,1	29,5
Total	364	100	1 558	100	23,4

5.3. Profil des répondant.e.s

L'analyse des profils révèle que la catégorie des jeunes (20-30 ans) a le plus participé au questionnaire avec un taux de 42% – 153 réponses –, suivi par la tranche 35-49 ans à 36% – 132 réponses – (figure 11). La tranche 50-60 ans atteint 20% – 72 réponses –, tandis que les répondants au-delà de 65 ans ne représentent que 1% – 4 réponses –, ce qui est conforme à l'âge de la retraite moyenne des employés.

Du côté des genres, les femmes participent davantage avec 57% – 207 réponses – contre 42% – 151 réponses – pour les hommes, et 1% des répondants – 3 réponses – choisissent de ne pas indiquer leur genre (figure 12).

Le centre ETE enregistre le plus grand nombre de réponses avec 31% – 141 réponses –, suivi par AFSB à 21% – 75 réponses –. L'administration et l'UCS ont enregistré respectivement 18% – 65 réponses – et 16% – 39 réponses –. Les centres EMT Varenne et EMT Montréal enregistrent quant à eux 11% – 39 réponses – et 3% – 11 réponses – (figure 13). Enfin, les étudiant.e.s de 3^e

cycle dominant avec 19% –69 réponses–, suivis des employé.e.s du soutien administratif à 18%, – 64 réponses – tandis que les cadres et les étudiant.e.s de 1^{er} cycle ou du cégep participent très peu en raison de leur faible effectif (figure 14).

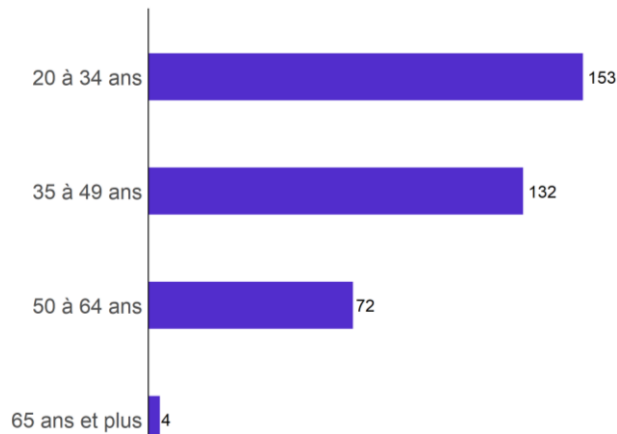


Figure 11 : Nombre de réponses en fonction des tranches d'âge (n = 362)

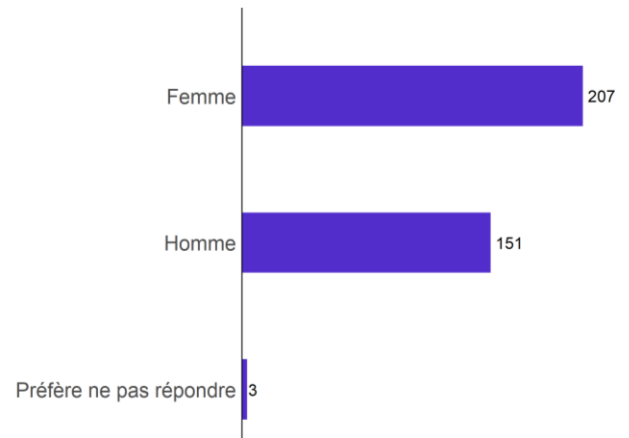


Figure 12 : Nombre de réponses en fonction du genre (n = 362)

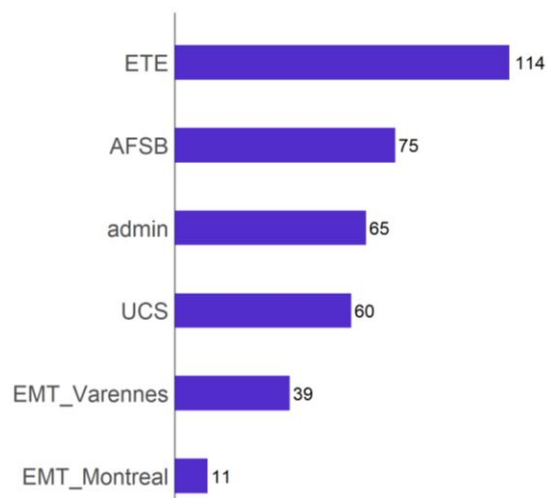


Figure 13 : nombre de réponses par centre de l'INRS (N = 364)



Figure 14 : Nombre de réponses par type d'emploi (n = 364)

5.4. Émissions de GES liées au numérique en télétravail

Dans le contexte du télétravail, l'empreinte carbone du numérique de la population échantillonnée (n = 319) s'élève à un total de 33 946 kg éq. CO₂ (ces émissions sont associées au télétravail

uniquement). En moyenne, chaque individu a une empreinte numérique d'environ 106 kg éq. CO₂ (tableau 9). Cependant, la variabilité des données est remarquable, en allant de 0 kg éq. CO₂ au minimum à 491 kg éq. CO₂ au maximum et une médiane de 14 kg éq. CO₂. L'écart type, évalué à 129 kg éq. CO₂, illustre une dispersion modérée autour de la moyenne et une hétérogénéité extrême dans les variables des émissions de GES.

Tableau 9 : Empreinte carbone du numérique individuelle de la population échantillonnée (n = 319)

	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Écart-type
GES (kg éq. CO ₂ année ⁻¹)	0	491,10	106,41	14,07	128,97

Afin de mieux interpréter ces résultats, cette partie propose une analyse détaillée selon des angles différents, incluant les activités numériques, les types d'emploi, les jours et les modes du travail adoptés.

5.4.1. Caractérisation des résultats selon l'activité du numérique liée au télétravail

L'acquisition des terminaux, qui inclut à la fois la fabrication, le transport et la fin de vie des terminaux, représente 96,6% de l'empreinte carbone du numérique (figure 16). Avec une moyenne de 104 kg éq. CO₂ et 128 kg éq. CO₂ de l'écart type, cette catégorie démontre une forte dispersion et est significativement supérieure aux équipements disposés dans le lieu de télétravail, visioconférences, courriels, et le stockage des données, dont l'impact est presque négligeable et beaucoup plus homogène ($p = 1,5e-05$, figure 15). Quelques valeurs aberrantes s'expliquent par l'acquisition d'au moins deux terminaux, comme un deuxième écran et un ordinateur portable.

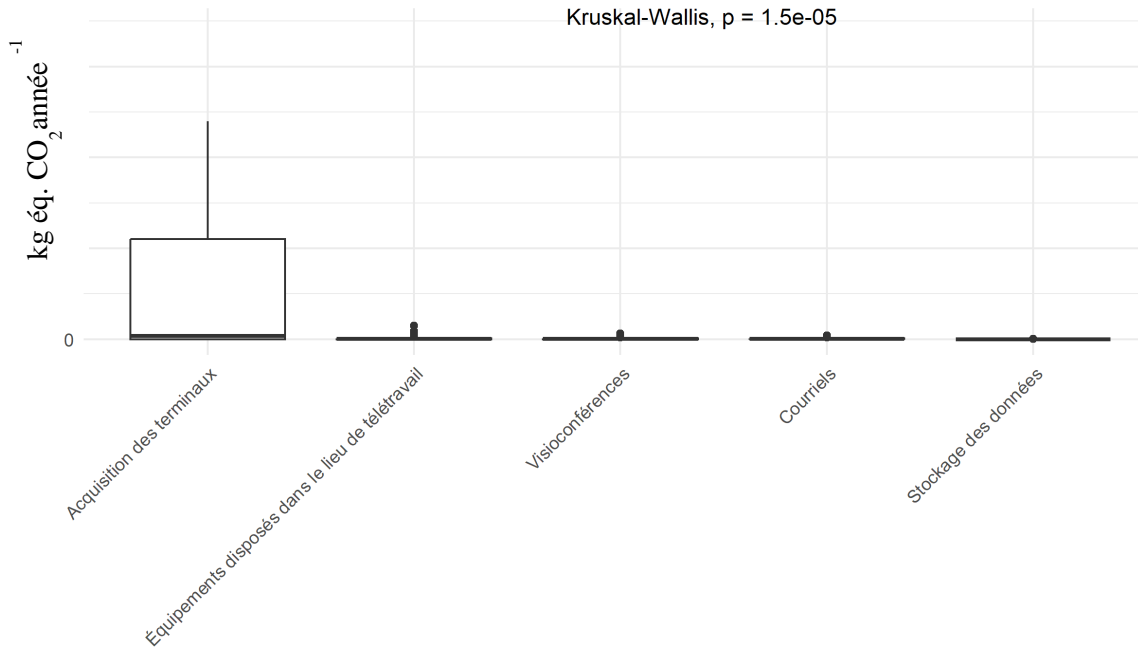


Figure 15 : Empreinte carbone individuelle des activités du numérique pour la population échantillonnée (n =319)
 Parmi les équipements achetés spécifiquement pour le télétravail (figure 17), ce sont les deuxièmes écrans (63%) suivis des ordinateurs portables (29%) qui dominent l’empreinte carbone liée aux acquisitions de terminaux. Ces deux catégories présentent l’empreinte carbone la plus élevée et qui varie entre 81 et 220 kg éq. CO2 par terminal (annexe XII). En revanche, les accessoires comme les claviers et souris génèrent des émissions négligeables.

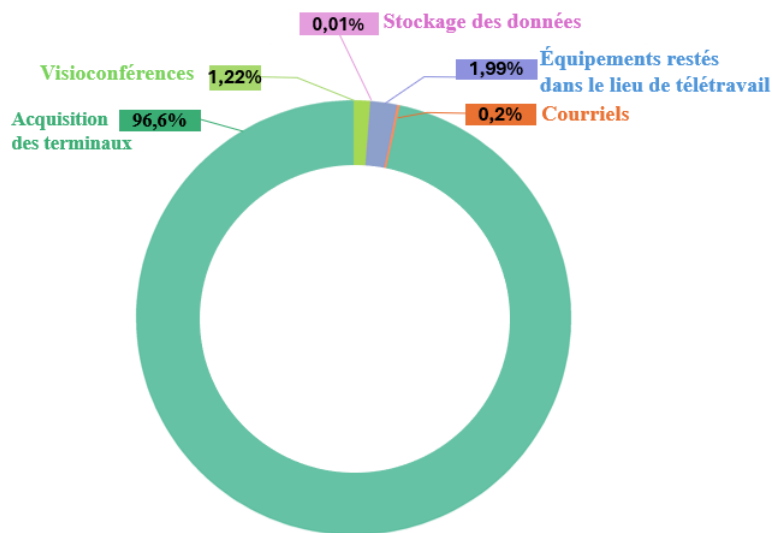


Figure 16 : Répartition des GES selon les activités du numérique liées au télétravail

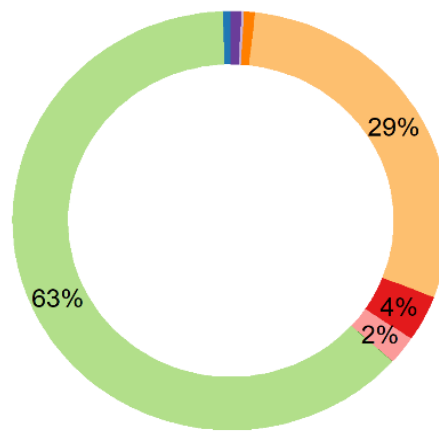


Figure 17 : Répartition des GES en fonction des terminaux acquis pour le télétravail

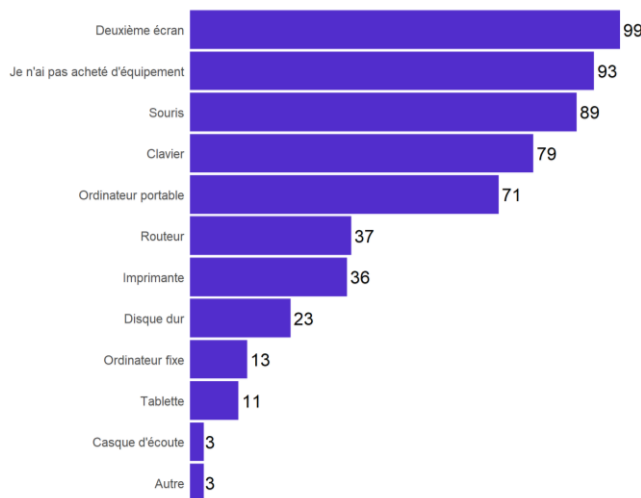


Figure 16 : Nombre de terminaux acquis en lien avec le télétravail (n = 267)

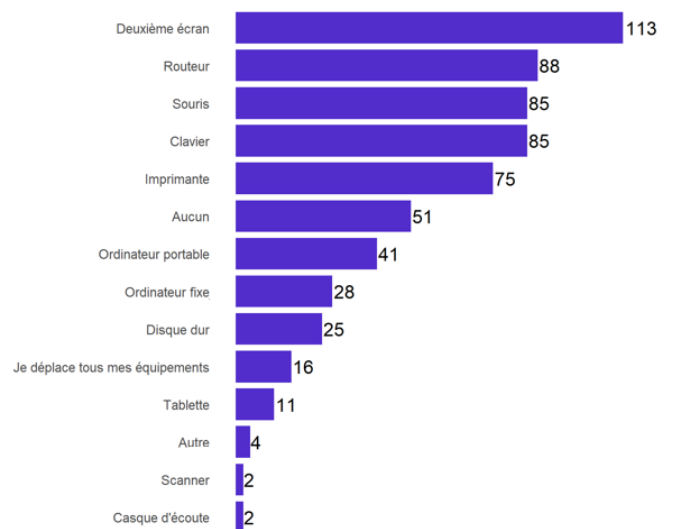


Figure 17 : Nombre de terminaux disposés dans le lieu de télétravail (n = 267)

L'utilisation des équipements en télétravail – deuxième rang en ordre décroissant d'importance – bien que ne représente seulement 2% des émissions du numérique totales de l'INRS permettent d'éviter 673 kg éq. CO₂ qui aurait autrement été émis par l'INRS si le travail s'effectuait entièrement sur site (tableau 10). L'équipement le plus utilisé est le deuxième écran, suivi du clavier et de la souris.

Par ailleurs, 6% des participant.e.s déplacent tous leurs équipements entre leur bureau et le lieu de télétravail, suggérant qu’une majorité des utilisateurs ne considèrent pas encore le déplacement de leurs équipements comme une pratique systématique pour réduire leur empreinte environnementale, ce qui pourrait limiter l’achat de nouveaux équipements informatique et contribue ainsi à réduire l’empreinte carbone du numérique.

Tableau 10 : Émissions GES liés à la consommation électrique des terminaux avec ou sans télétravail

Sources d'émission	GES (kg éq. CO ₂ année ⁻¹)
Équipements disposés dans le lieu de télétravail	673
Équipements disposés dans le lieu de travail	1 250
Équipements restés en veille	12

Au troisième rang de l’empreinte du numérique viennent les visioconférences qui génèrent 414 kg éq. CO₂ . année⁻¹. Près de la moitié de ces émissions provient de Microsoft Teams (46%) et plus du tiers provient de l’utilisation de Zoom (39%) (figure 18). L’utilisation de Slack (6%), Google Meet (5%), Adobe Connect (2%) et WebEx (1%) sont marginales. En moyenne, chaque participant

(n = 319) passe 57 minutes par jour en réunion virtuelle (avec un écart type de 63 min par jour). D’après les entretiens semi-dirigés, la généralisation du télétravail a intensifié le recours aux réunions virtuelles, remplaçant les interactions en présentiel par des conversations en ligne. Pour assurer la coordination et préserver la cohésion des équipes, les appels se multiplient, compensant l’absence de discussions informelles au bureau. De plus, certaines discussions, qui auraient été brèves en face à face, s’allongent en raison des contraintes techniques et d’une dynamique conversationnelle différente. Comme c’est le cas pour un technicien en informatique et multimédia :

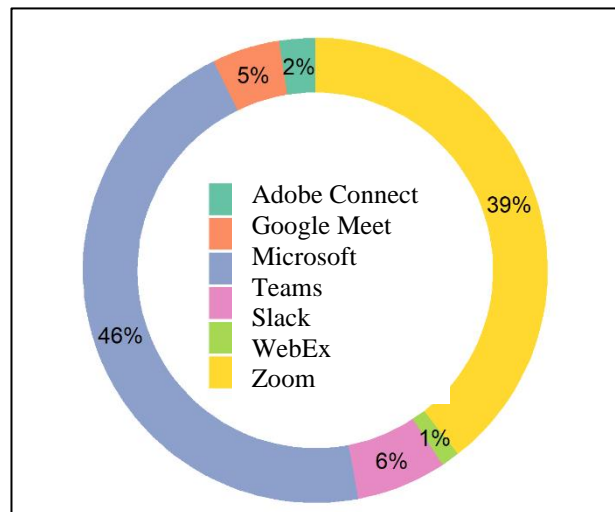


Figure 18 : Taux des GES liés aux visioconférences en télétravail (n=319).

Avant la pandémie, je faisais deux téléconférences par mois. Actuellement, j'en fais six par semaine. D'ailleurs, même lorsque je suis au travail en présentiel, on trouvera [à] en ajouter une à ce moment-là. Je suis certain que si vous aviez fait ce projet-là il y a cinq ans

vous seriez venu ici en présentiel me questionner. [...] Aujourd'hui, c'est rendu presque impossible de planifier une rencontre en présentiel. [Il] y a toujours au moins une personne en télétravail, alors les réunions deviennent hybrides par défaut. Sauf qu'avec le temps, on commence à voir que les gens sont tannés et qu'on se force à se planifier une journée si l'on a une rencontre pour se voir en personne.

La plupart des participant.e.s aux entretiens semi-dirigés ont confirmé une hausse de participation des visioconférences avec le télétravail. Même lorsque les membres de la communauté se trouvent dans les locaux de l'INRS, les réunions se font souvent en virtuel par accommodement lorsqu'il y a une personne à distance. Le virtuel est désormais une norme, quel que soit le mode de travail.

Du côté des courriels – quatrième usage en ordre décroissant d'importance –, l'effet du télétravail est minime (68 kg éq. CO₂). La majorité des participant.e.s du questionnaire (81%) affirment n'avoir constaté aucun changement dans leur fréquence d'envoi de courriels (tableau 11). En revanche, 17,4% estiment que le télétravail a entraîné une augmentation du nombre de courriels, tandis que seulement 2% ont observé une diminution.

Tableau 11 : Taux de variation d'envoi des courriels en contexte de télétravail plutôt qu'en contexte de travail en présentiel

	% Variation d'envoi des courriels
Aucun changement	80,15
Augmentation	17,28
Diminution	1,84

À travers les entretiens semi-dirigés, l'absence de changements significatifs dans le nombre de courriels acheminés est expliquée par le fait que les échanges par courriel sont déjà bien ancrés dans les habitudes de travail, qu'ils soient à distance ou en présentiel. Un professeur-chercheur explique :

J'ai peut-être un peu moins de courriels. Nous, en télétravail, nous avons un moyen de communication [autre]. Nous avons beaucoup, beaucoup, beaucoup de messages instantanés entre les membres de l'équipe.

En effet, pour ce professeur-chercheur, les outils collaboratifs incluant du clavardage comme Microsoft Teams ou Zoom ont pris en charge une partie des communications, limitant ainsi les courriels. De plus, les tâches et processus restant globalement les mêmes entre le travail en

présentiel et le télétravail. Ainsi, les besoins en communication par courriel n'ont pas été directement impactés.

Au cinquième et dernier rang de l’empreinte carbone du numérique figure le stockage des données qui génère une quantité presque nulle d’émissions, soit 2,44 kg éq. CO₂, ou 0,01% des GES du numérique. La majorité des participant.e.s (68%) affirment que le télétravail n’a pas influencé leur volume de stockage, tandis que 27% estiment qu’il a augmenté depuis qu’ils pratiquent le télétravail (tableau 12). En matière d’espace de stockage, 70% des participant.e.s sauvegardent leurs données dans l’espace infonuagique de l’INRS, mais 15% les stockent ailleurs (tableau 13) : 4% sauvegardent dans l’infonuagique personnelle, 14,6% sur un support physique et 27% à la fois dans un espace infonuagique et un espace physique personnel (tableau 14).

Tableau 12 : Taux d’augmentation du stockage des données en lien avec le télétravail (n = 41).

	% augmentation du stockage des données
Je ne sais pas	4,88
Non	68,3
Oui	26,83

Tableau 13 : Nombre des réponses sur le stockage des données dans l’infonuagique parmi les répondants de l’INRS (n = 319).

	Nombre des répondant.e.s	% des répondant.e.s
Infonuagique de l’INRS	223	70%
Infonuagique personnelle	48	15%
Je ne sais pas	48	15%

Tableau 14 : Nombre de réponses sur le stockage des données hors infonuagique parmi les répondants de l'INRS (n = 48).

Endroit du stockage des données	Nombre des réponses	% des répondant.e.s
Infonuagique personnelle	2	4%
Infonuagique et espace physique personnel	13	27%
Espace physique	7	14%
Je ne sais pas	12	25%
Non	14	29%

Les solutions infonuagiques comme OneDrive et SharePoint sont de plus en plus utilisées pour centraliser les données et améliorer le travail collaboratif, selon les pratiques documentées auprès des participants aux entretiens semi-dirigés. Cependant, les répondant.e.s ont aussi exprimé une certaine préférence pour le stockage local dû à de précédents problèmes de synchronisation. Pour le technicien en informatique et multimédia du SRI interviewé, il est clair que la transition vers l'infonuagique est inévitable et s'intègre progressivement dans son environnement professionnel :

Je dirais qu'on utilise [...] plus les données centralisées, les OneDrive, les SharePoint, des trucs comme ça, et qu'au lieu d'avoir plusieurs copies d'un document, on va l'avoir sur notre SharePoint. Comme ça, on est capable de travailler à cinq en synchronie. [...] Ben moi, j'aime mieux les espaces physiques parce que c'est comme mon expérience, ça doit faire 35 ans que je travaille sur un ordinateur [...]. Si aujourd'hui, comme je dis c'est de plus en plus efficace, le cloud, mais j'ai comme trop eu de mauvaises expériences de synchronisation de copies, etc. Mais ça transitionne vraiment de plus en plus vers l'infonuagique, fait que c'est sûr, mettons ma préférence. Je suis plus porté à préférer un local sur un disque, sur une clé ou sur l'ordinateur, mais c'est de moins en moins là.

La sécurité du stockage des données est considérée parmi les raisons de privilégier l'espace physique. Dans le cas d'un professeur-chercheur qui a vécu une expérience difficile avec l'infonuagique de l'INRS, ayant perdu l'accès à ses données à la suite d'une cyberattaque, il a depuis, par mesure de précaution, opté pour des solutions privées comme Dropbox, tout en maintenant l'usage d'un disque externe :

J'ai utilisé le [réseau de serveurs] de l'INRS. Je l'utilisais avant la cyberattaque. J'ai regretté, parce que j'ai perdu l'accès à mes données pendant quatre mois, donc là [...] je m'étais converti un peu à Dropbox, donc privé pour ne pas être pris avec un problème

encore comme une cyberattaque. Maintenant peut-être que je vais utiliser plus le cloud de Microsoft, le OneDrive... Je suis en transition là, pour l'instant je suis encore avec un disque externe [...]. Le VPN, [...] c'est pour une partie de mes données en Dropbox une partie de mes données dans OneDrive. Je suis en transition ... Ou est-ce que je vais mettre mes œufs dans le même panier ou pas? Là, après avoir vécu une mauvaise expérience de quatre mois sans données à cause de la cyberattaque.

Enfin, les 15 % d'individus qui ignorent le volume de données qu'ils génèrent dans l'infonuagique en dehors de l'INRS (tableau 14) sous-estiment l'empreinte carbone réelle du stockage des données.

5.4.2. Caractérisation des résultats selon le type d'emploi

L'empreinte carbone du numérique ne varie pas significativement selon la profession ($p=0,22$, figure 19). La médiane individuelle à 244 kg éq.CO₂ année⁻¹ pour les cadres dirigeants ne diffère donc pas statistiquement de celle à 184 kg éq.CO₂ année⁻¹ pour les cadres intermédiaires (Annexe V), ni d'ailleurs avec aucune autre catégorie d'emploi (professeurs, professionnels, etc.).

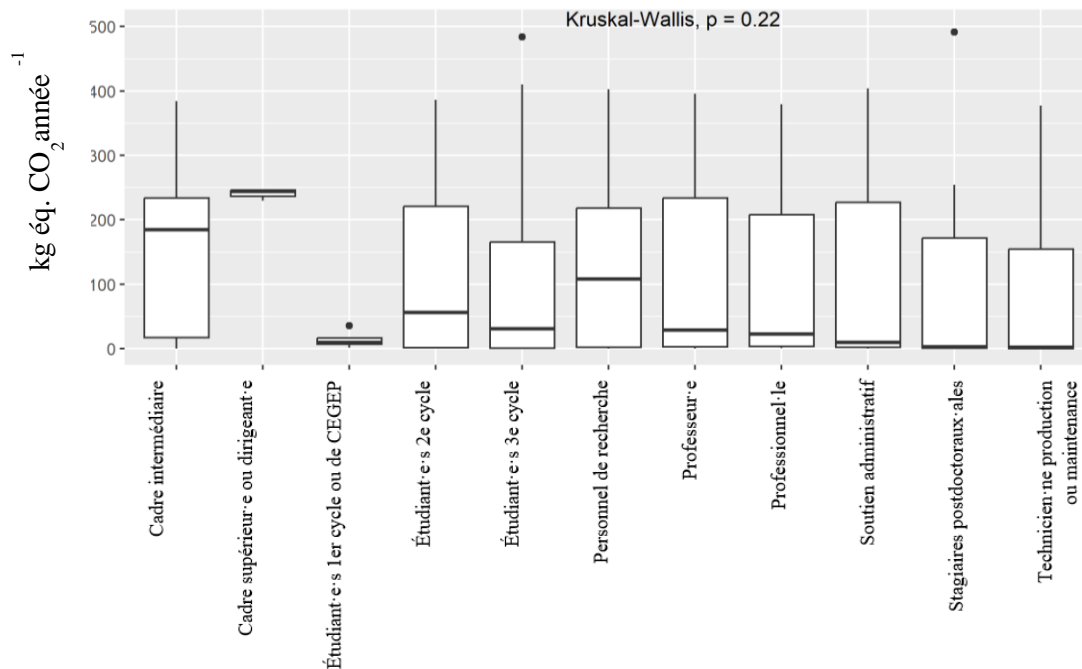


Figure 19 : Empreinte carbone individuelle du numérique en fonction des catégories d'emploi pour la population échantillonnée (n=319)

Globalement, toutes les catégories d'emploi enregistrent des émissions de GES dominées par l'acquisition de nouveaux terminaux qui représentent entre 94% à 97% des émissions du numérique. Toutefois, pour les étudiant.e.s de 1^{er} cycle ou du cégep, cette part est réduite à 41 %, tandis que l'utilisation des terminaux en télétravail contribue à hauteur de 44-55 %. (figure 20).

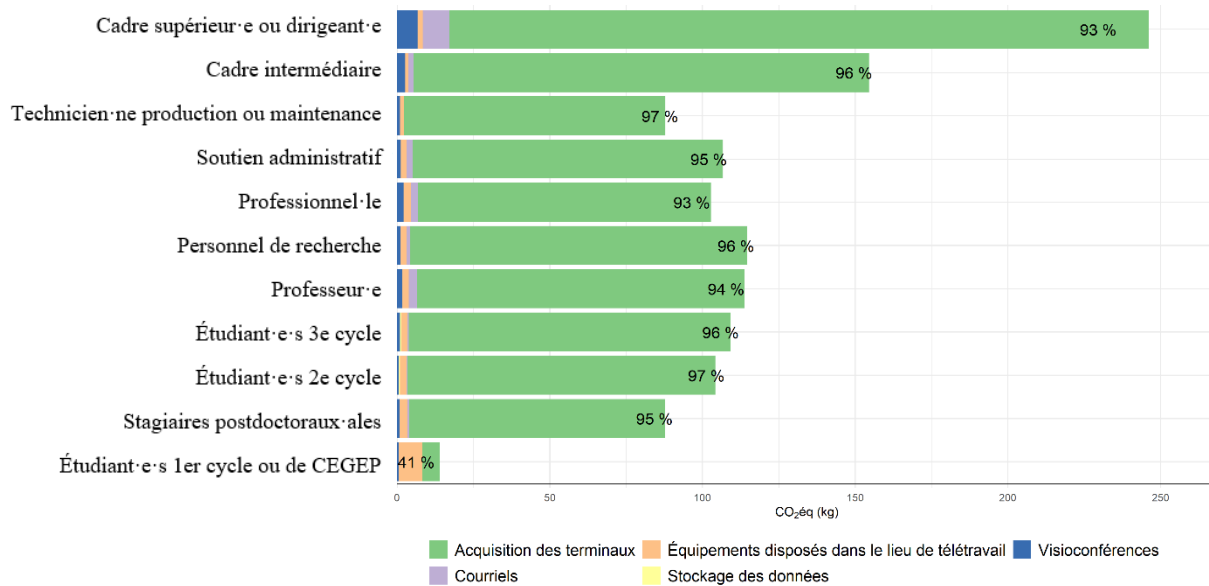


Figure 20 : Répartition de la moyenne des GES associés aux activités du numérique en fonction de type d'emploi (n=319).

Concernant l'équipement acquis pour le télétravail, le personnel de soutien administratif, les étudiant.e.s de 3^e cycle et les professionnels de recherche sont les principaux acheteurs, représentant chacun 18% des acquisitions. Viennent ensuite les professionnel.le.s et les professeur.e.s, avec 13% chacun. En revanche, les cadres supérieurs, les technicien.n.e.s et les postdoctoraux.ales ont des proportions plus faibles, entre 2 et 3% (figure 21).

Le fait que les cadres supérieur.e.s ou dirigeant.e.s affichent une moyenne d'émissions élevée (figure 20), et ce malgré un effectif moins important et un nombre réduit d'acquisitions d'équipements, est notable (figures 21 et 22) s'explique par la nature des terminaux acquis, qui ont une forte empreinte carbone, comme les deuxièmes écrans et les ordinateurs portables, ainsi que par leur faible effectif dans la population totale (n = 4 pour N = 1558).

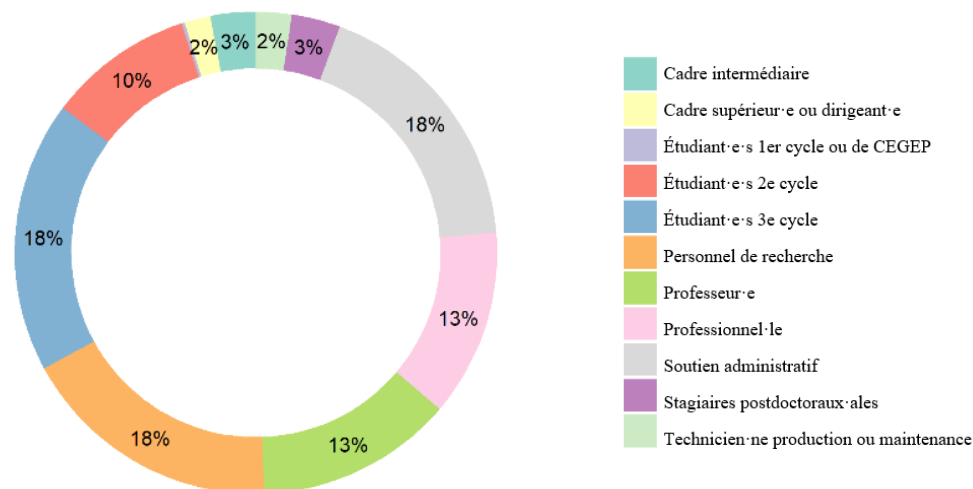


Figure 21 : Répartition des terminaux acquis en fonction de type d'emploi (n=267)

Les cadres supérieur.e.s et intermédiaires sont les plus équipés en matériel informatique de télétravail. Environ 27% à 38% ont investi dans un deuxième écran, un choix qui alourdit leur empreinte carbone numérique (figure 22). Ils se distinguent également par l'achat d'accessoires tels que claviers et souris (13% à 25%). Pour plusieurs participant.e.s, l'acquisition de ces terminaux était principalement liée au télétravail, mais également à l'offre disponible. Comme l'explique un.e participant.e anonyme :

Il y a mon employeur qui m'a fourni un écran supplémentaire pour la maison, une station d'accueil supplémentaire, un clavier supplémentaire, un casque aussi. Alors oui, tu vas créer un dédoublement de matériel... C'était spécifiquement pour le télétravail.

Les résultats dans la figure 22 illustrent que les catégories exerçant des responsabilités accrues ou un besoin d'équipement spécifique pour le travail à distance ont davantage investi dans du matériel, ce qui influence directement leur empreinte carbone numérique.

Les professeur.e.s et professionnel.le.s ont également renforcé leur équipement pour le télétravail, bien que de manières plus modérées. Les deuxièmes écrans représentent 17% à 18% de leurs acquisitions, tandis que 8% à 9% ont opté pour les ordinateurs portables. Ils sont aussi parmi ceux qui ont le plus investi dans les claviers et les souris (13% à 20%), ce qui témoigne d'un besoin plus technique et spécifique pour assurer la continuité de leurs activités à distance.

Du côté du personnel de recherche et des technicien.n.e.s, l'achat d'équipements varie davantage. Près de 13% du personnel de recherche a acquis un deuxième écran, et 11% ont opté pour un

ordinateur portable. Les technicien.n.es, quant à eux, déclarent ne pas acheter de terminaux spécifiques au télétravail (31%). Cela s'explique par un accès limité aux ressources à cause du non-télétravail et un moindre besoin de matériel supplémentaire comparé aux autres catégories d'emploi. Toutefois, 50% des technicien.n.es ont acquis des ordinateurs portables et des deuxièmes écrans.

Enfin, les étudiant.e.s de 2^e et 3^e cycles se situent à un niveau intermédiaire, avec 16% à 22% d'entre eux ayant acheté un ordinateur portable et 11% à 16% pour l'ordinateur portable. Les étudiant.e.s de 1^{er} cycle ou de cegep, en revanche, sont ceux qui ont le moins investi, avec 67% déclarant ne pas avoir acheté d'équipement, cela s'explique par leur passage court de stage à l'INRS (4 à 6 mois).

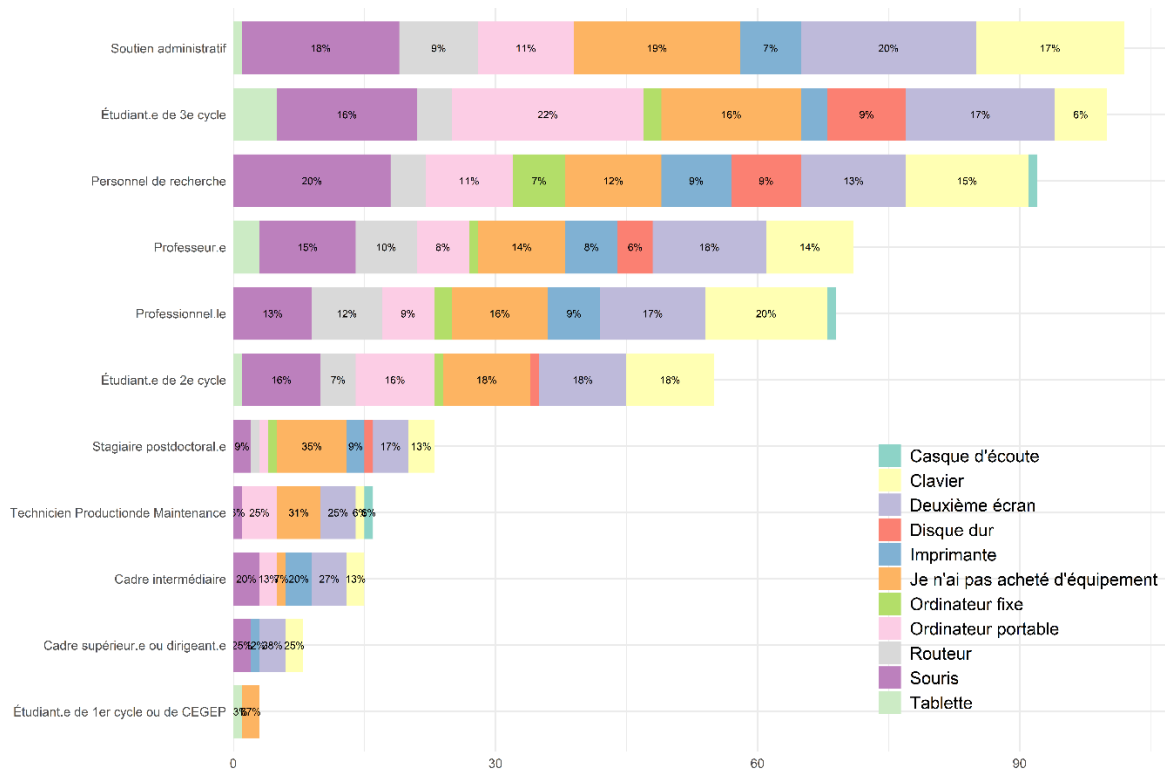


Figure 22 : Répartition du taux et de la nature des terminaux acquis pour le télétravail, en fonction du type d'emploi (n=319).

Bien que la politique de télétravail de l'INRS permette l'acquisition de nouveaux équipements pour le télétravail, un agent de recherche interrogé préfère conserver son matériel existant afin d'éviter tout encombrement inutile. Estimant que son équipement actuel lui suffit, il utilise son ordinateur personnel et, si nécessaire, envisage simplement d'emprunter un écran du bureau :

On a eu l'offre et l'on a la possibilité d'avoir des écrans, des claviers, des souris à la maison. Moi je ne l'ai pas pris, donc j'ai déjà mon propre ordinateur à la maison que je ne devrais peut-être pas utiliser. Si je voulais vraiment avoir un 2^e écran à la maison, je prendrais un de mes deux écrans au bureau. Je l'amènerais à la maison plutôt que d'en faire acheter un autre, donc je n'ai pas nécessairement besoin de trois écrans quand je suis ici. [...] Soit que c'était déjà acheté ou je n'en avais pas besoin. Donc j'avais déjà mon laptop, mais j'aurais pu aussi avoir un 2^e écran payé par l'INRS à la maison, avoir un 2^e clavier externe, avoir une 2^e souris. Puis j'ai dit non à tout, je travaille sur le clavier de l'ordinateur. J'utilise le pavé plutôt qu'une souris. De toute façon, quand je suis à la maison ici, j'utilise une souris.

5.4.3. Caractérisation des résultats selon les centres de l'INRS

Les émissions de GES varient significativement selon les centres de l'INRS ($p = 0,012$, figure 23). En effet, une disparité marquée est observée pour les centres ETE et UCS qui affichent des valeurs extrêmes proches de 500 kg éq. CO₂ année⁻¹, contrastant avec l'EMT dont la médiane est nettement inférieure et la plage de variation plus restreinte, reflétant des émissions plus stables et limitées.

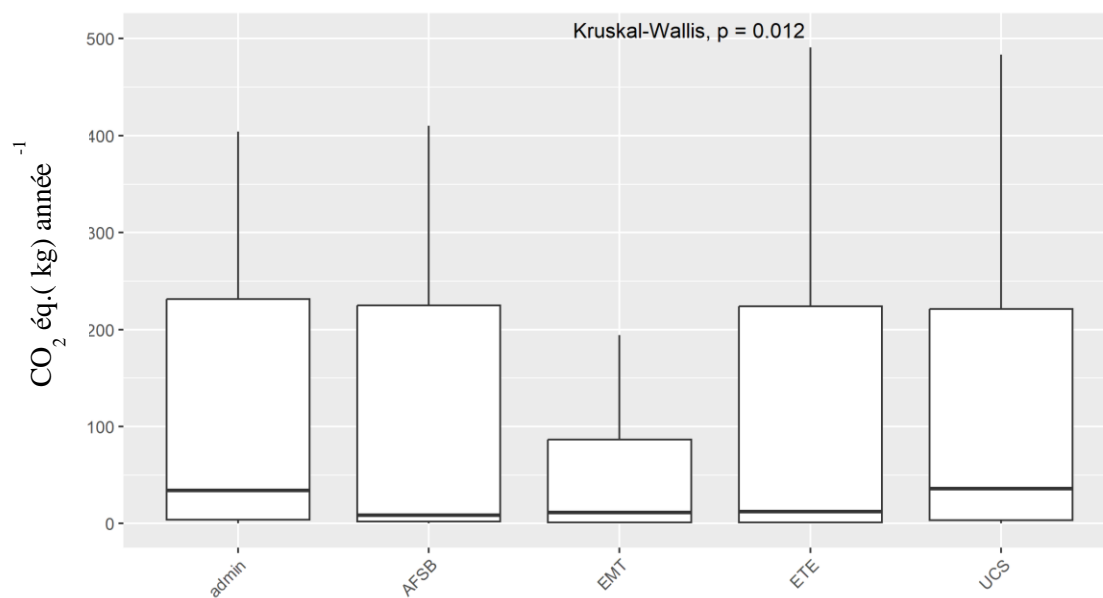


Figure 23 : Empreinte carbone du numérique en fonction des centres INRS (n=319).

La répartition des moyennes des GES selon les centres (tableau 15) montre que l'administration se distingue avec la moyenne la plus élevée, atteignant 131 kg éq. CO₂ année⁻¹, cela s'explique par le fait que les équipes administratives ont été dotées de terminaux pour télétravailler. Les centres ETE

et UCS affichent des moyennes similaires, tandis que EMT se positionne en dernier avec 47 kg eq.CO_2 année⁻¹.

Tableau 15 : Moyennes des GES en fonction du centre INRS

Centre	GES (kg eq. CO_2 année ⁻¹)
Administration	131
AFSB	101
EMT	47
ETE	112
UCS	117

5.4.4. Caractérisation des résultats selon le mode et les jours de travail

Le choix des jours de télétravail n'a pas d'influence sur l'empreinte carbone du numérique liée à cette pratique (test de Kruskal-Wallis, $p = 0,33$, figure 24). Généralement, les médianes des émissions se situent dans une fourchette similaire, entre environ 90 à 110 kg eq. CO_2 année⁻¹, mais avec une dispersion marquée dans tous les scénarios des jours de télétravail. Cela suggère que l'impact du télétravail sur les émissions reste relativement stable, quel que soit le nombre de jours de télétravail concernés (test de Dunn de post-hoc, $p = 1$ pour la comparaison entre les scénarios de jours de télétravail, annexe II). Il convient de préciser que le scénario « 0 jour de télétravail » désigne les situations où le temps de télétravail hebdomadaire est inférieur à une journée complète (quelques heures ou une demi-journée).

La comparaison des émissions de GES entre les différents scénarios de télétravail (de moins d'un jour jusqu'à 5 jours par semaine) et le scénario sans télétravail montre des écarts significatifs pour les situations allant de moins d'un jour à 4 jours de télétravail (test post-hoc de Dunn, $p < 0,05$; voir annexe III). À partir de 5 jours de télétravail, les émissions deviennent comparables à celles observées sans télétravail, suggérant une stabilisation de l'impact environnemental.

Les faibles émissions de GES observées pour certains scénarios de télétravail (cinq jours ou plus et moins de télétravail) s'expliquent par une acquisition réduite des terminaux, notamment d'écrans et d'ordinateurs portables.

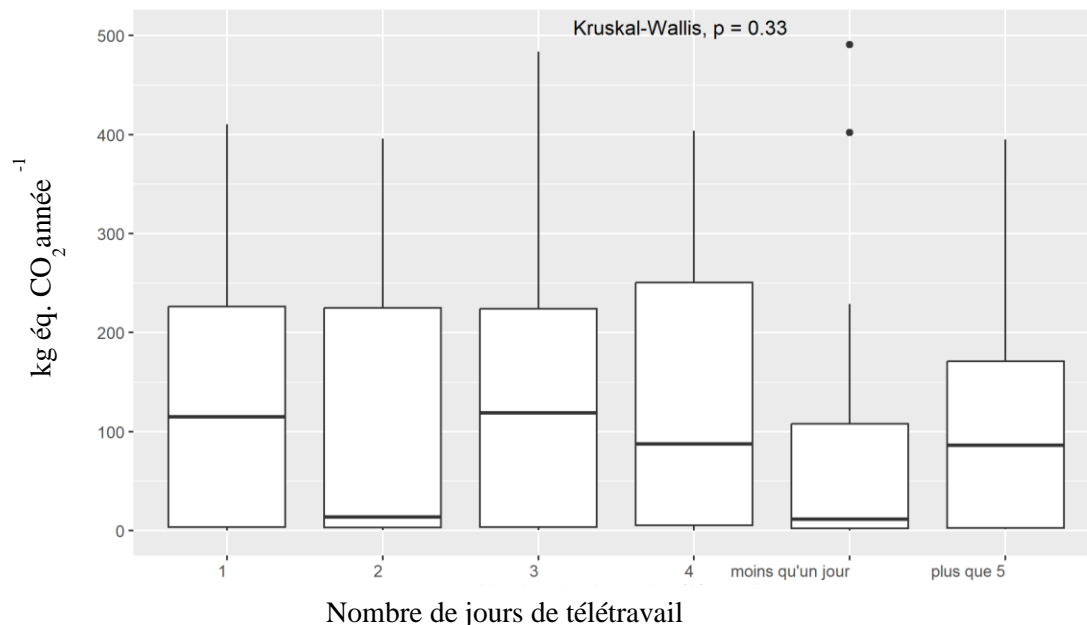


Figure 24 : Empreinte carbone du numérique en fonction de jours de télétravail (n=272)

5.4.5. Régression pas à pas

Les résultats issus de la régression pas à pas (annexe X), représentent la hiérarchisation de l'importance des variables explicatives en fonction de leur contribution à la réduction de l'AIC et sur la significativité statistique des variables. En effet, les variables retenues présentent toutes des p très faibles ($2,2e-16$), ce qui désigne un lien statistiquement très significatif avec la variable dépendante et justifie leur intégration dans le modèle.

Le modèle initial, vide, présente un AIC de 2644,88. Après l'intégration de la variable « acquisition des terminaux » une diminution très significative de ce critère avec un AIC ramené à 777,75 a été démontrée. Cette baisse, témoigne d'une capacité explicative majeure, justifiant pleinement son inclusion prioritaire. La deuxième variable introduite, « terminaux restants dans le lieu de télétravail » permet une amélioration supplémentaire, avec un AIC réduit à 391,67. Bien que la baisse soit moins spectaculaire, elle reste substantielle, soulignant un effet complémentaire pertinent. L'ajout de la variable « visioconférences » poursuit cette dynamique avec un AIC qui atteint -60,59, confirmant un rôle explicatif significatif dans le cadre du modèle. La variable « courriels envoyés » s'avère particulièrement influente, entraînant une diminution marquée de l'AIC jusqu'à -1289,92. Cette progression confirme son impact déterminant sur la performance prédictive du modèle. L'introduction finale de « stockage des données » optimise le modèle, avec un AIC atteignant -15894,49. Ce résultat indique un ajustement quasi parfait, laissant très peu de variance inexpliquée. En revanche, les autres variables testées, telles que « jours de

télétravail », « âge », « centre » et « type d'emploi », n'ont pas permis d'amélioration notable du critère AIC aux différentes étapes de sélection. Leur contribution est donc jugée négligeable dans le contexte de cette modélisation et peuvent être écartées sans perte significative de précision.

En définitive, les variables qui constituent les piliers du modèle final sont successivement : « acquisition des terminaux », « terminaux restants dans le lieu de télétravail », « visioconférences », « stockage des données » et « courriels envoyés » et se distinguent comme les plus explicatives.

Sur le plan des coefficients estimés (tableau 16), l'ordonnée à l'origine (interception) est de 125,11, représentant la valeur attendue de la variable dépendante lorsque toutes les variables explicatives sont nulles. La variable acquisition des terminaux présente le coefficient le plus élevé (131,08), indiquant un impact dominant : chaque unité supplémentaire est associée à une augmentation moyenne de 131 unités d'émissions. Les terminaux restants dans le lieu de télétravail (3,66) et visioconférences (1,56) ont un effet positif plus modéré, suggérant une contribution additionnelle liée à l'usage ou à la conservation des équipements et aux outils de communication. Les courriels envoyés (0,93) et stockage des données (0,09) ont un effet marginal, mais leur significativité statistique confirme leur rôle complémentaire dans la précision du modèle.

Tableau 16 : Coefficients des variables utilisées dans la régression pas à pas

Variabes	Coefficients
Interception	125,11
Acquisition des terminaux	131,08
Terminaux restants dans le lieu de télétravail	3,66
Visioconférences	1,56
Courriels envoyés	0,92
Stockage des données	0,09

Les résultats obtenus à travers la comparaison graphique entre les valeurs observées et estimées montrent une concordance quasi parfaite (figure 25). L'ajustement est visuellement confirmé par un alignement quasi parfait entre valeurs observées et estimées. L'erreur quadratique moyenne proche de zéro ($3,71e-26$) témoigne d'une précision prédictive exceptionnelle.

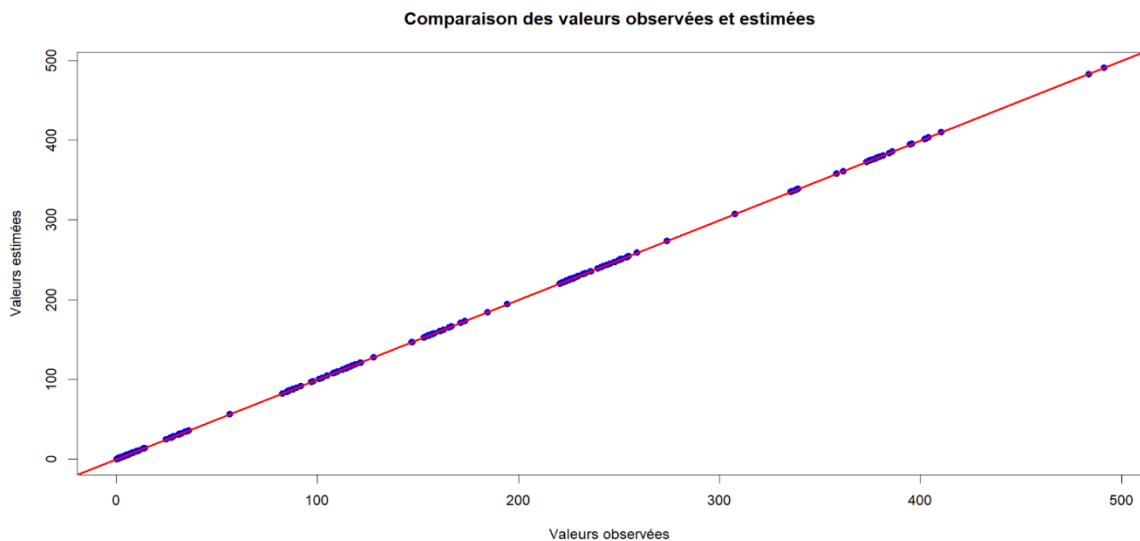


Figure 25 : comparaison entre les valeurs observées et estimées, diagramme de dispersion

5.4.6. Résultats de la pondération des GES de l'INRS

Pour l'ensemble de la population de l'INRS (N=1558), les émissions totales des GES liées au numérique pour le télétravail s'élèvent à 142 717 kg CO_2 année⁻¹ avec 140 563 kg CO_2 année⁻¹ sont liés uniquement à l'acquisition des nouveaux terminaux (annexe IX). L'analyse des résultats pondérés révèle (comme pour la population échantillonnée au questionnaire) que certaines catégories ont une empreinte carbone plus marquée. Par exemple, l'administration de l'INRS constitue la part dominante, avec 19% des GES. Les étudiant.e.s (des centres de l'UCS_EMT de Montréal, l'ETE et l'AFSB) suivent avec respectivement 17%, 16% et 14%. Tandis que les employé.e.s (des centres de l'UCS_EMT de Montréal, l'ETE et l'AFSB) affichent une part légèrement moins élevée, entre 8 à 9% (figure 26).

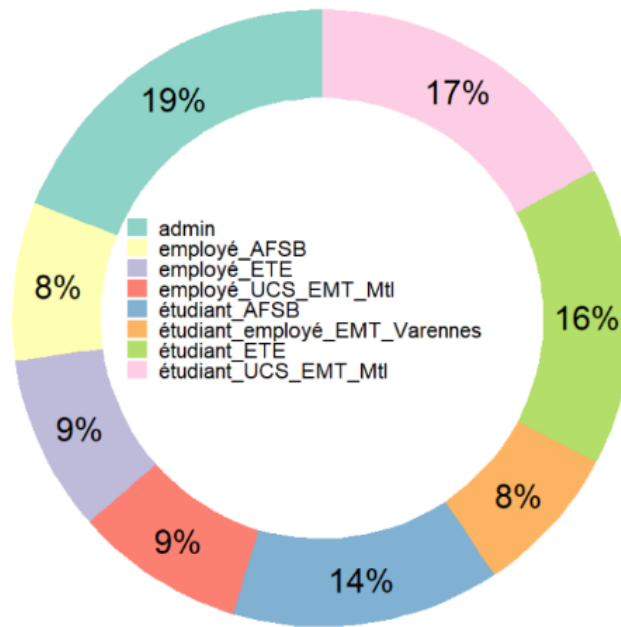


Figure 26 : Répartition des taux de l'empreinte carbone du numérique pour la population totale de l'INRS (N=1558), résultats de la pondération

6. CONCLUSION, DISCUSSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVE

6.1. Conclusion et discussions

L'analyse de l'empreinte carbone du télétravail en mettant l'accent sur le numérique est un sujet novateur, encore peu exploré. Dans le cadre de la présente étude, l'empreinte carbone du numérique liée au télétravail a été étudiée au sein d'une institution universitaire (INRS) qui regroupe une communauté de 1558 individus au sein de quatre centres de recherches situés dans les grandes régions de Montréal et de Québec. Le mémoire a pour objectif de mieux comprendre les nouvelles habitudes qui émergent avec le télétravail, afin de les traduire en émissions de GES et de quantifier l'effet rebond associé.

Les résultats démontrent que l'effet rebond du télétravail associé aux activités du numérique de l'INRS est de 33 946 kg éq. CO₂ année⁻¹ pour la population échantillonnée (n=319) et 142 717 kg éq. CO₂ année⁻¹ pour l'ensemble de la communauté de l'INRS (N=1 558) pour l'année académique 2023-2024. En moyenne, chaque individu de l'INRS représente environ 106 kg éq. CO₂ année⁻¹. Cependant, la variabilité des données est remarquable, allant de 0 kg éq. CO₂ année⁻¹ au minimum à 491 kg éq. CO₂ année⁻¹ au maximum, avec une médiane de 14 kg éq. CO₂ année⁻¹.

L'analyse statistique des résultats des GES pour la population échantillonnée a permis de soulever les conclusions suivantes :

- **Pour les activités du numérique** : l'acquisition de nouveaux terminaux pour le télétravail est responsable à elle seule de 96,6% des GES du numérique, provenant principalement des deuxièmes écrans et des ordinateurs portables, tandis que l'utilisation (visioconférences, courriels envoyés, stockage des données et l'alimentation des terminaux à domicile) ne représente que 3,4% de ses émissions. Cette disproportion s'explique par la fabrication des terminaux, un processus énergivore qui implique des transports internationaux et l'extraction de matériaux rares, deux sources majeures d'émissions de CO₂. À l'inverse, l'hydroélectricité du Québec, avec une énergie propre et renouvelable, permet de réduire les émissions liées à l'utilisation. Il est important de noter que, si l'étude de Tao *et al.* (2023) conclut à des effets négligeables de TIC en période de télétravail, c'est parce que leur méthodologie ne prend pas en compte l'analyse du cycle de vie du numérique principalement celle de la fabrication des terminaux. La présente étude confirme certes que l'usage de TIC a un impact limité, mais révèle surtout le poids

- dominant de la phase d'acquisition - un élément déterminant absent des conclusions précédentes.
- **Sur le plan individuel :** Les cadres sont les principaux contributeurs aux émissions numériques, en tête des moyennes et médianes individuelles. Cela s'explique par leur accès facilité à des terminaux, notamment les deuxièmes écrans et ordinateurs portables dans le cadre du télétravail.
 - **Sur le plan institutionnel :** Les émissions varient selon les centres de l'INRS. Les centres ETE et UCS ont un total des émissions individuelles extrêmes proches de 500 kg éq. CO₂ année⁻¹, tandis que l'administration a la moyenne individuelle la plus élevée avec 131 kg éq. CO₂ année⁻¹, due à l'équipement des équipes en terminaux pour le télétravail.
 - **Selon les différents scénarios de télétravail :** Le choix de nombre de jours de télétravail n'a pas d'influence marquée sur l'empreinte carbone du numérique. Les émissions restent globalement stables, malgré une forte variabilité entre individus. Toutefois, en comparant aux personnes sans télétravail, celles qui télétravaillent entre 0 (moins qu'une journée de télétravail : une demi-journée ou quelques heures de télétravail) à 4 jours génèrent des émissions plus élevées. Au-delà de 5 jours, les niveaux tendent à se stabiliser et rejoignent ceux observés sans télétravail.
 - **La significativité :** Le facteur le plus influent est l'acquisition de nouveaux équipements, en particulier l'achat d'un deuxième écran, qui augmente fortement l'empreinte carbone du numérique.
 - L'approche par régression pas à pas de type vers l'avant a permis d'identifier un modèle optimal de variables continues, toutes statistiquement significatives ($p < 0,05$), et expliquant de manière robuste la somme individuelle des émissions numériques liées au télétravail (variable dépendante). La sélection progressive, guidée par la réduction de l'AIC, a révélé une amélioration notable à chaque étape, passant d'un AIC initial de 2644,88 à -15894,49 dans le modèle final, traduisant un ajustement exceptionnel composé de cinq variables : terminaux acquis, terminaux restants dans le lieu de télétravail, visioconférences, stockage des données, courriels envoyés. L'analyse des coefficients met en évidence un poids dominant pour l'acquisition des terminaux (131,08), soulignant le rôle central de l'équipement matériel nouvellement acquis dans l'empreinte carbone numérique. Les coefficients des autres variables liées à l'utilisation, bien que marginales en valeur absolue, apportent une précision complémentaire au modèle.

En guise de conclusion, l'effet rebond associé au numérique en contexte de télétravail résulte principalement de la multiplication des terminaux, motivée par des exigences fonctionnelles de

productivité et d'ergonomie. Cette pratique a entraîné une hausse significative de la demande en équipements neufs, exacerbant les impacts environnementaux, en particulier au cours de la phase de fabrication, fortement consommatrice de ressources et d'énergie. Par ailleurs, les politiques organisationnelles de renouvellement systématique appliquées (tous les quatre ans pour assurer la sécurité des terminaux), renforcent cette tendance. L'analyse s'est donc focalisée sur ces facteurs structurels d'émissions, identifiés comme des leviers d'action prioritaires pour une optimisation de la gestion des équipements et une réduction de l'empreinte carbone du secteur.

En revanche, le comportement des utilisateurs joue un rôle déterminant, en particulier lorsqu'il s'agit de l'acquisition de nouveaux équipements. Nous vivons dans une ère de surabondance technologique (Rumpala, 2018), où l'offre de nouveaux dispositifs alimente un cycle sans fin de renouvellement du matériel. Cependant, cette abondance ne peut pas être dissociée des dimensions émotionnelles et de l'obsolescence psychologiques (Nahapétian, 2017) qui guident nos choix et façonnent nos usages numériques. Le concept de *Digital Use Supply Chains* révèle que l'empreinte carbone générée par nos comportements numériques dépasse largement celle de la production des équipements, pouvant même être multipliée par mille dans certains cas (Shi *et al.*, 2024).

Bien que les résultats obtenus soient statistiquement solides, leur transférabilité à d'autres organisations professionnelles constitue une limite notable. Le modèle a été construit à partir d'un échantillon aux caractéristiques spécifiques (institution universitaire, type de télétravail, culture numérique), ce qui implique que son application à d'autres entreprises nécessite une adaptation préalable et un recalibrage méthodologique tenant compte des réalités locales.

6.2. Perspectives d'amélioration et recommandations

Réduire l'empreinte carbone du numérique en télétravail nécessite une réflexion critique sur le mode de consommation actuel et une transition vers des pratiques plus sobres en carbone. À la lumière des résultats obtenus, des pistes d'amélioration suivantes peuvent émerger pour réduire l'effet rebond du numérique (les deux premiers - a) et b) - concernent l'administration de l'INRS et le SRI, tandis que la dernière piste - c) - concerne la communauté de l'INRS):

a) Gestion sobre en carbone du parc informatique : Il est essentiel d'encourager des choix plus durables dans les cahiers des charges en privilégiant l'achat d'équipements ayant une faible empreinte carbone. Étant donné qu'aujourd'hui les fabricants des terminaux fournissent des informations sur l'empreinte carbone de leurs produits, cela facilite la prise de décision pour une politique d'achat plus responsable. Par ailleurs, il est important de promouvoir une gestion plus

réfléchi des équipements en évitant, par exemple, l'acquisition excessive d'écrans ou d'accessoires, sauf en cas de besoin réel.

b) Prolongation de la durée de vie des équipements : L'une des actions les plus efficaces pour réduire l'empreinte carbone est de maximiser la durée de vie des terminaux. Par exemple, un écran dont la durée de vie est de cinq ans génère un effet significatif en matière de GES liés à sa fabrication et à son transport. En prolongeant son utilisation d'un an supplémentaire, ces émissions seront largement amorties, et les bénéfices environnementaux seront considérables.

c) Sensibilisation aux bonnes pratiques numériques : Former toute la communauté de l'INRS - en télétravail ou en présentiel - aux enjeux environnementaux du numérique pourrait être considéré comme une étape clé pour encourager des comportements écoresponsables, ainsi qu'une prise de conscience des répercussions des habitudes numériques quotidiennes. Cela pourrait contribuer à un numérique plus respectueux de l'environnement.

Voici des exemples concrets de gestes écoresponsables liés aux bonnes pratiques numériques, qui pourraient être inclus dans une démarche de sensibilisation pour la communauté de l'INRS :

1. **Éviter les doubles terminaux inutiles** : mutualisation des périphériques (imprimantes partagées, deuxièmes écran et ordinateurs utilisés selon les besoins réels).
2. **Allonger la durée de vie des terminaux** en favorisant la réparation plutôt que le remplacement systématique.
3. **Optimiser les visioconférences** : privilégier les appels audios quand la vidéo n'est pas nécessaire et désactiver la caméra par défaut pour les réunions internes.
4. **Éteindre les équipements inutilisés** (ordinateurs, écrans, imprimantes) en fin de journée ou lors d'absences prolongées et au lieu de les laisser en mode veille.
5. **Limiter l'envoi des courriels inutiles**, en particulier les réponses de type "merci" ou les envois en copie multiple (CC), afin de réduire le trafic de données et la charge des serveurs.
6. **Réduire la taille des pièces jointes** (compression des fichiers, partage de liens de téléchargement temporaires).
7. **Nettoyer régulièrement les boîtes de courriels et l'espace de stockage infonuagique et physique** pour supprimer les courriels inutiles et limiter le stockage superflu.

Bien que toutes ces recommandations et perspectives soient utiles pour réduire les GES liés au télétravail au sein de la communauté de l'INRS, elles contribuent de manière significative à une réduction des émissions liées au numérique en télétravail et minimiser son effet rebond . En effet, en choisissant des équipements à faible empreinte carbone dès l'achat et en allongeant leur durée de vie, on obtient des réductions massives des émissions liées à la fabrication, au transport et à la gestion des équipements. Ces actions ciblées permettent non seulement de diminuer les émissions directes, mais aussi de créer une culture plus responsable et plus sobre en carbone vis-à-vis des effets environnementaux des technologies.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adamson J (2017) Carbon and the Cloud. Hard facts about data storage. *Stanford Magazine*. <https://stanfordmag.org/contents/carbon-and-the-cloud>
- ADEME (2012) *Durée de vie des équipements électriques et électroniques (EEE)*. 100 p https://librairie.ademe.fr/ged/3531/84636_Duree_de_vie_des_EEE.pdf
- ADEME, Arcep (2022a) *Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective, Etat des lieux et pistes d'action 1er volet de l'étude*, p https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/etude-numerique-environnement-ademe-arcep-volet01_janv2022.pdf
- ADEME, Arcep (2022b) *Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective. Evaluation environnementale des équipements et infrastructures numériques en France*. 264 p <https://librairie.ademe.fr/cadic/6700/impact-environnemental-numerique-rapport2.pdf>
- Agence du revenu du Canada (2023) Formulaire 5000-S14, Annex 21F - Informations supplémentaires pour les déclarations de revenus. (Gouvernement du Canada,).
- Albero B (2010) Une approche sociotechnique des environnements de formation. Rationalités, modèles et principes d'action. *Éducation et didactique* (4-1):7-24.
- Anadón M (2019) Les méthodes mixtes: implications pour la recherche «dite» qualitative. *Recherches qualitatives* 38(1):105-123.
- Andrae AS, Edler T (2015) On global electricity usage of communication technology: trends to 2030. *Challenges* 6(1):117-157.
- Berners-Lee M (2020) *How bad are bananas?: the carbon footprint of everything*. Profile Books. 232 p. <https://howbadarebananas.com/>
- Berthoud F, Ficher M (2022) *Évaluation de l'empreinte carbone d'une visioconférence entre deux utilisateurs du service rendez-vous*. (CNRS-EcoInfo). <https://cnrs.hal.science/hal-03605638/document>
- Bourgeois C, Ntebutse JG (2020) L'ambiguïté autour du numérique. *Canadian Journal of Education/Revue canadienne de l'éducation* 43(3):715-739.
- Brick JM (2014) Explorations in non-probability sampling using the web. *Proceedings of Statistics Canada Symposium*.
- Brockway PE, Sorrell S, Semieniuk G, Heun MK, Court V (2021) Energy efficiency and economy-wide rebound effects: A review of the evidence and its implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 141:110781.
- Carbon trust (2021) *Homeworking report. An assessment of the impact of teleworking on carbon savings and the longer-term effects on infrastructure services*. p https://www.vodafone-institut.de/wp-content/uploads/2021/06/CT_Homeworking-report-June-2021.pdf

- Chaire de gestion du secteur de l'énergie HM (2023) *État de l'énergie au Québec. Édition 2023.* . p https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2023/05/EEQ2023_WEB.pdf
- Cisco Webex (2023) *What are the Minimum Bandwidth Requirements for Sending and Receiving Video in Cisco Webex Meetings?*, <https://help.webex.com/en-us/article/WBX22158/What-are-the-Minimum-Bandwidth-Requirements-for-Sending-and-Receiving-Video-inCisco-Webex-Meetings>
- Creswell JW, Clark VLP (2017) *Designing and conducting mixed methods research.* Sage publications,
- Crow D, Millot A (2020) Working from home can save energy and reduce emissions. But how much? *International Energy Agency.* <https://www.iea.org/commentaries/working-from-home-can-save-energy-and-reduce-emissions-but-how-much>
- Dai J, Ohadi MM, Das D, Pecht MG (2014) *Optimum cooling of data centers.* Springer,
- Dai Q (2018) La Chine et la prochaine révolution de la production. *La prochaine révolution de la production Conséquences pour les pouvoirs publics et les entreprises: Conséquences pour les pouvoirs publics et les entreprises* :443. <https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=LipjDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA443&dq=fabrication+des+%C3%A9quipements+informatique,+chine&ots=ZQyL3i92qy&sig=Ougax4HC3RFwHT3iK2CX7024PY#v=onepage&q&f=false>
- Dandres T (2012) *Développement d'une méthode d'analyse du cycle de vie conséquentielle prospective macroscopique: évaluation d'une politique de bioénergie dans l'Union Européenne à l'horizon 2025.* (École Polytechnique de Montréal).
- De Abreu e Silva J, Melo PC (2018) Home telework, travel behavior, and land-use patterns. *Journal of Transport and Land Use* 11(1):419-441.
- De Haas M, Faber R, Hamersma M (2020) How COVID-19 and the Dutch 'intelligent lockdown' change activities, work and travel behaviour: Evidence from longitudinal data in the Netherlands. *Transportation research interdisciplinary perspectives* 6:100150.
- DELL (2018a) *Dell U2415 Monitor.* Dell Inc. 3 p https://i.dell.com/sites/csdocuments/CorpComm_Docs/en/carbon-footprint-U2415-monitor.pdf?newtab=true
- DELL (2018b) *OptiPlex 7460 All-in-One Desktop.* 3 p https://i.dell.com/sites/csdocuments/Corporate_corp-Comm_Documents/en/carbon-footprint-optiplex-7460.pdf
- DELL (2021) *Dell Docking Station WD19DCS. Report produced August, 2021.* 2 p <https://www.delltechnologies.com/asset/en-ca/products/electronics-and-accessories/technical-support/docking-station-wd19dcs-pcf-datasheet.pdf>
- Dell Technologies (2023) Product Carbon Footprint, Dell Inspiron 14 7430 2-in-1. (Dell Inc), p 2.
- Dieye M (2020) L'impact du numérique sur le traitement des documents pour organiser, gérer et représenter les connaissances: Une médiation à comprendre. *Ishara= Iṣārāī.*

- Durand C (2013) Les sondages Internet, défis nouveaux et revisités. *Produire des estimations fiables à partir de bases imparfaites* :210-217.
- East AJ (2008) What is a carbon footprint? An overview of definitions and methodologies. *Vegetable industry carbon footprint scoping study—Discussion papers and workshop, 26 September 2008*. Horticulture Australia Limited Sydney.
- Eisenmann C, Nobis C, Kolarova V, Lenz B, Winkler C (2021) Transport mode use during the COVID-19 lockdown period in Germany: The car became more important, public transport lost ground. *Transport policy* 103:60-67.
- Ekvall T (2019) Attributional and consequential life cycle assessment. *Sustainability Assessment at the 21st century*, IntechOpen.
- Favart J (2019) Le technostress et le nouveau JDR model.
- Feng X, Behar-Horenstein L (2019) Maximizing NVivo utilities to analyze open-ended responses. *The Qualitative Report* 24(3):563-571.
- Figliera B (2024) *Empreinte carbone d'un e-mail : mythes, réalités et solutions*. <https://www.sami.eco/blog/empreinte-carbone-email#1-limpact-co2-des-courriers-electroniques-donnees-les-plus-recentes>
- Finnveden G, Hauschild MZ, Ekvall T, Guinée J, Heijungs R, Hellweg S, Koehler A, Pennington D, Suh S (2009) Recent developments in life cycle assessment. *Journal of environmental management* 91(1):1-21.
- Garcia AC (2019) *Thermal decomposition of a rare earth ore*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada),
- GHG Protocol (2011) *Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard*. 152 p https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard_041613_2.pdf
- GIEC (2019) *Réchauffement planétaire de 1,5 °C. Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté .Résumé à l'intention des décideurs*. 32 p https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_fr.pdf
- Gingras M-È, Belleau H (2015) Avantages et désavantages du sondage en ligne comme méthode de collecte de données: une revue de la littérature.
- Gouvernement de Québec (2020) *Gagnant pour le Québec. Gagnant pour la planète. Plan pour une économie verte 2030. Plan de mise en œuvre 2021-2026*. . p <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-economie-verte/plan-mise-oeuvre-2021-2026.pdf>
- Gouvernement du Canada (2023) Émissions de gaz à effet de serre – Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement.).

- Gouvernement du Canada (2025) *Système de tarification fondé sur le rendement*, <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/fonctionnement-tarification-pollution/systeme-tarification-fonde-rendement.html>
- Gouvernement du Québec (2024) *Plan pour une économie vert - Plan de mise en œuvre 2024-2029*. 66 p <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-economie-verte/plan-mise-oeuvre-2024-2029.pdf>
- Greenworking et ADEME (2020) *Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail*. (ADEME Paris).
- Grenon V (2007) *Impact de la formation en milieu de pratique sur les stagiaires quant au développement de leur niveau d’alphabétisation informatique, de leur sentiment d’auto-efficacité et de leurs attitudes de stress et d’utilité perçue au regard des TIC* [Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke], Savoirs UdeS.).
- Groupe d’experts intergouvernemental (2013) *changements climatiques 2013. Les éléments scientifiques. Résumé à l’intention des décideurs, résumé technique et foire aux questions. GTI, contribution du groupe de travail i au cinquième rapport d’évaluation du groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat*. 198
- Guechati M, Elakry E (2021) *Le télétravail au Maroc: Entre état actuel et implémentation*», *Revue Française d’Economie et de Gestion*. Volume 2:289-313. <https://www.revuefreg.fr/index.php/home/article/view/249/154>
- Guinée J (2002) *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Kluwer Academic Publisher,
- Haider M, Anwar AI (2023) *The prevalence of telework under Covid-19 in Canada*. *Information Technology & People* 36(1):196-223.
- Hallépée S, Mauroux A (2019) *Le télétravail permet-il d’améliorer les conditions de travail des cadres*. *Insee Références* 19:43-54.
- Hetzer D, Muehleisen M, Kousaridas A, Alonso-Zarate J (2019) *5G connected and automated driving: Use cases and technologies in cross-border environments*. *2019 European conference on networks and communications (EuCNC)*. IEEE, p 78-82.
- Hilton A, Armstrong RA (2011) *Statnote 25: Stepwise multiple regression*.
- Hilty LM, Aebischer B (2015) *ICT innovations for sustainability*. Springer,
- Huissier PM, Turbe-Suetens N (2010) *Le télétravail en France: les salariés sont prêts*. Pearson Education France,
- IEA (2019) *World Energy Outlook 2019*. 810 p <https://iea.blob.core.windows.net/assets/98909c1b-aabc-4797-9926-35307b418cdb/WEO2019-free.pdf>
- IEA (2022) *Energy system of China*. <https://www.iea.org/countries/china>
- IEA (2023a) *Finland*. <https://www.iea.org/countries/finland/energy-mix>

- IEA (2023b) *Royaume-Uni*. <https://www.iea.org/countries/united-kingdom/energy-mix#where-does-united-kingdom-get-its-energy>
- Institut de la statistique du Québec (2024) *Portrait du télétravail au Québec : plus du tiers des personnes en emploi télétravaillent, mais cette proportion varie selon les régions*. <https://statistique.quebec.ca/fr/communiqu/portrait-teletravail-quebec>
- Institut National de la Recherche Scientifique (2022) *Politique de télétravail*. 15 p <https://inrs.ca/wp-content/uploads/POL-Teletravail-VFP.pdf>,
- Institut national de la recherche scientifique (2024) *Plan stratégique 2025-2030*. 24 p https://inrs.ca/wp-content/uploads/INRS_Plan-Strategique-2025-2030-VF_web.pdf
- Institut national de santé publique du Québec (2022) *COVID-19 – Pandémie et travail en 2021*. p <https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/3195-pandemie-travail.pdf>
- IPCC (2006) *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. 30 p <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- IPCC (2023) *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 42 p https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf
- ISO (2006) *Gestion environnementale — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre*.
- ISO (2018) *Greenhouse gases -Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals*.
- Jabra (2023) *Measuring carbon footprint through Life Cycle Assessments (LCAs)*. 2 p [https://www.bing.com/ck/a?!&&p=c7b2e9bfcf0447c1b3517b3939b67fb2077e47b6e14874fab21e4e28f3c82920JmltdHM9MTc0MDYxNDQwMA&ptn=3&ver=2&hsh=4&fclid=22211c56-bc2e-6188-00e1-0ef0bd2f60ad&psq=Measuring+carbon+footprint+through+Life+Cycle+Assessments+\(LCAs\)+Sustainability+starts+with+transparency.+That%e2%80%99s+why+we+carry+out+LCAs+on+our+products%2c+to+understand+their+impact+on+the+environment.++So+you+can+see+the+carbon+footprint+of+your+product+at+a+glance%2c+and+we+can+work+to+make+future+products+more+sustainable.+Everybody+wins&u=a1aHR0cHM6Ly93d3cuamFicmEuY29tL2ZyLWNhLy0vbWVkaWEvRmlsZXMvc3VzdGFpbmFiaWxpdkpHkvbGNhL3YyNDA3MjMvSW5mb2dyYXBoaWMtU3BIYWsyLTc1LnBkZg&ntb=1](https://www.bing.com/ck/a?!&&p=c7b2e9bfcf0447c1b3517b3939b67fb2077e47b6e14874fab21e4e28f3c82920JmltdHM9MTc0MDYxNDQwMA&ptn=3&ver=2&hsh=4&fclid=22211c56-bc2e-6188-00e1-0ef0bd2f60ad&psq=Measuring+carbon+footprint+through+Life+Cycle+Assessments+(LCAs)+Sustainability+starts+with+transparency.+That%e2%80%99s+why+we+carry+out+LCAs+on+our+products%2c+to+understand+their+impact+on+the+environment.++So+you+can+see+the+carbon+footprint+of+your+product+at+a+glance%2c+and+we+can+work+to+make+future+products+more+sustainable.+Everybody+wins&u=a1aHR0cHM6Ly93d3cuamFicmEuY29tL2ZyLWNhLy0vbWVkaWEvRmlsZXMvc3VzdGFpbmFiaWxpdkpHkvbGNhL3YyNDA3MjMvSW5mb2dyYXBoaWMtU3BIYWsyLTc1LnBkZg&ntb=1)
- Jevons WS (1866) *The Coal Question; An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal-Mines*. *Fortnightly* 6(34):505-507.
- Karsenti T (2006) *Pragmatisme et méthodologie de recherche en sciences de l'éducation: passons à la version 3.0*. *Formation et profession* 13(1):2-5.
- Kern C, Li Y, Wang L (2021) *Boosted kernel weighting—using statistical learning to improve inference from nonprobability samples*. *Journal of Survey Statistics and Methodology* 9(5):1088-1113.

Lacoursière J (2021) ANALYSE SYSTÉMIQUE DES ENJEUX DU TÉLÉTRAVAIL DANS LA COMMUNAUTÉ MÉTROPOLITAINE DE MONTRÉAL.

Lenovo (2018) *Lenovo Product Carbon Footprint (PCF) Information Sheet. PC/Notebook/Monitor/Tablet.* 2 p https://p4-ofp.static.pub/ShareResource/compliance/eco-declaration/pdfs/Batch3/PCF_ThinkCentre_M720_SFF.pdf

Lenovo (2020) *ThinkPad E15 2nd Gen (Lenovo Product Carbon Footprint (PCF) Information Sheet. PC/Notebook/Monitor/Tablet).* 2 p <https://static.lenovo.com/ww/docs/regulatory/eco-declaration/pcf-thinkpad-e15-2nd-intel.pdf>

lenovo (2022a) *Lenovo Product Carbon Footprint (PCF) Information Sheet. PC/Notebook/Monitor/Tablet* 2p <https://static.lenovo.com/ww/docs/regulatory/eco-declaration/pcf-thinkcentre-m80s-gen-3.pdf>

Lenovo (2022b) *Product Carbon Footprint Report for ThinkBook 16 Gen 4 IAP.* 2 p <https://p4-ofp.static.pub/ShareResource/compliance/eco-declaration/pdfs/Batch7/pcf-thinkbook-16-gen-4-iap.pdf>

Lenovo (2022c) *Product Carbon Footprint. Lenovo Tab M9.* 2 p <https://p1-ofp.static.pub/ShareResource/compliance/eco-declaration/pdfs/Batch8/pcf-lenovo-tab-m9.pdf>

Letourmy P (2017) Recueil planifié des données: compléments sur l'échantillonnage.

Levasseur A, Mercier-Blais S, Prairie Y, Tremblay A, Turpin C (2021) Improving the accuracy of electricity carbon footprint: Estimation of hydroelectric reservoir greenhouse gas emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 136:110433.

Liu Y, Wei X, Xiao J, Liu Z, Xu Y, Tian Y (2020) Energy consumption and emission mitigation prediction based on data center traffic and PUE for global data centers. *Global Energy Interconnection* 3(3):272-282. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096511720300761>

Logitech (2021a) *Product Carbon Footprint. Critical review acc. ISO 14067:2018 by DEKRA, B100.* 2 p <https://www.logitech.com/content/dam/logitech/en/sustainability/carbon-labeling-messaging/carbon-clarity/pdf/carbon-footprint-b100-mouse.pdf>

logitech (2021b) *Product Carbon Footprint. Critical review acc. ISO 14067:2018 by DEKRA, K120 Keyboard.* 2 p <https://www.logitech.com/content/dam/logitech/en/sustainability/carbon-labeling-messaging/carbon-clarity/pdf/carbon-footprint-k120-keyboard.pdf>

logitech (2023a) *Product Carbon Footprint. Critical review acc. ISO 14067:2018 by DEKRA, Wireless Keyboard K275.* 2 p <https://www.logitech.com/content/dam/logitech/en/sustainability/carbon-labeling-messaging/carbon-clarity/pdf/carbon-footprint-k275-wireless-keyboard.pdf>

- logitech (2023b) *Product Carbon Footprint. Critical review acc. ISO 14067:2018 by DEKRA.* Logitech K580. 2 p
<https://www.logitech.com/content/dam/logitech/en/sustainability/carbon-labeling-messaging/carbon-clarity/pdf/carbon-footprint-k580-keyboard.pdf>
- Logitech (2024) *Product Carbon Footprint. Critical review acc. ISO 14067:2018 by DEKRA.* 2 p
<https://www.logicool.co.jp/content/dam/logitech/en/sustainability/carbon-labeling-messaging/carbon-clarity/pdf/carbon-footprint-webcam-c925e.pdf>
- MacMillan K, Mangla T, Saxon J, Feamster N (2021) Measuring the performance and network utilization of popular video conferencing applications. *Proceedings of the 21st ACM Internet Measurement Conference.* p 229-244.
- Malmodin J, Lundén D (2016) The energy and carbon footprint of the ICT and E&M sector in Sweden 1990-2015 and beyond. *ICT for Sustainability 2016.* Atlantis Press, p 209-218.
- Masanet E, Shehabi A, Lei N, Smith S, Koomey J (2020) Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science* 367(6481):984-986.
- McKight PE, Najab J (2010) Kruskal-wallis test. *The corsini encyclopedia of psychology* :1-1.
- Ministère de l'environnement dlclcc, de la faune et des parcs, (2024) *GES 1990-2022, Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2022 et leur évolution depuis 1990.* 66 p
<https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2022/inventaire-ges-1990-2022.pdf>
- Ministère des Finances du Québec (2024) *Système de plafonnement et d'échange de droits d'émission.*
https://www.finances.gouv.qc.ca/ministere/environnement_economie_verte/mesures-ecofiscales/fiches/systeme_plafonnement_echange_droits_emission.asp
- Ministère du Travail Québec (2002) *Télétravail.*
<https://www.travail.gouv.qc.ca/publications/archives/conciliation-travail-famille/teletravail/>
- Missermer A (2012) William stanley Jevons' the coal question (1865), beyond the rebound effect. *Ecological Economics* 82:97-103.
- Mondillo N, Balassone G, Boni M, Chelle-Michou C, Cretella S, Mormone A, Putzolu F, Santoro L, Scognamiglio G, Tarallo M (2019) Rare earth elements (REE) in Al-and Fe-(oxy)-hydroxides in bauxites of provence and languedoc (Southern France): Implications for the potential recovery of rees as by-products of bauxite mining. *Minerals* 9(9):504.
- Morency C, Verreault H, Bourbonnais P-L, Laviolette J, Chabin V (2019) *Conception et administration d'une enquête sur la mobilité durable -Questionnaire en ligne sur ce que les Montréalais sont prêts à faire et ce dont ils ont besoin pour adopter des habitudes quotidiennes de mobilité durable.* Polytechnique Montréal,
- Nahapétian N (2017) Stop à l'obsolescence programmée! *Les dossiers d'alternatives économiques* 9(2):7-7.

- Nilles J (1975) Telecommunications and organizational decentralization. *IEEE Transactions on Communications* 23(10):1142-1147.
- Obringer R, Rachunok B, Maia-Silva D, Arbabzadeh M, Nateghi R, Madani K (2021) The overlooked environmental footprint of increasing Internet use. *Resources, Conservation and Recycling* 167:105389.
- OCDE (2021) *Le télétravail pendant la pandémie de COVID-19: tendances et perspectives*. 12 p https://read.oecd-ilibrary.org/view/?ref=1121_1121020-hp4db68gns&title=Le-teletravail-pendant-la-pandemie-de-COVID-19
- Ostertagova E, Ostertag O, Kováč J (2014) Methodology and application of the Kruskal-Wallis test. *Applied mechanics and materials* 611:115-120.
- Paillé P, Mucchielli A (2008) L'analyse qualitative en sciences humaines et sociales, Collection U. *Sciences humaines et sociales, 2e édition, Paris, Armand Colin*.
- Pehnt M (2006) Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable energy* 31(1):55-71.
- Planchard JH, Velagic Z (2020) Évaluation de l'impact psychologique du télétravail. <https://www.rst-sante-travail.fr/rst/dms/dmt/ArticleDMT/VuDuTerrain/TI-RST-TF-276/tf276.pdf>
- Poess M, Nambiar RO (2008) Energy cost, the key challenge of today's data centers: a power consumption analysis of TPC-C results. *Proceedings of the VLDB Endowment* 1(2):1229-1240.
- Posit team (2023) RStudio: Integrated Development Environment for R. (Posit Software, PBC).
- Ragu-Nathan T, Tarafdar M, Ragu-Nathan BS, Tu Q (2008) The consequences of technostress for end users in organizations: Conceptual development and empirical validation. *Information systems research* 19(4):417-433.
- Registre J, Danthine É, Ouellet A-M, Cachat-Rosset G, Saba T (2022) Effet du télétravail sur la santé psychologique et la performance des travailleurs durant la pandémie de la Covid-19. *Psychologie du Travail et des Organisations* 28(3):151-165.
- Rouleau J, Gosselin L (2021) Impacts of the COVID-19 lockdown on energy consumption in a Canadian social housing building. *applied energy* 287:116565.
- Rumpala Y (2018) *Hors des décombres du monde: écologie, science-fiction et éthique du futur*. Editions Champ Vallon,
- Saba T, Cachat-Rosset G (2020) COVID-19 et télétravail: un remède universel ou une solution ponctuelle. Québec et comparaison internationale. *The Journal of Business Communication* 34(4):343-369.
- Samsung (n.d) Product Carbon Footprint.).
- Schaubroeck T, Schaubroeck S, Heijungs R, Zamagni A, Brandão M, Benetto E (2021) Attributional & consequential life cycle assessment: definitions, conceptual characteristics and modelling restrictions. *Sustainability* 13(13):7386.

- Schneider F, Hinterberger F, Mesicek R, Luks F (2001) Eco-info-society: strategies for an ecological information society. *Sustainability in the Information Society*.
- Seagate (2020a) *IronWolf Pro. Sustainability Report*. Seagate Technology LLC. Ap <https://www.seagate.com/content/dam/seagate/migrated-assets/www-content/global-citizenship/shared/product-sustainability/ironwolf-pro-report/shared/masters/ironwolf-pro-report-en-us.pdf>
- seagate (2020b) *IronWolf. Sustainability Report*. Seagate technology LLCp <https://www.seagate.com/content/dam/seagate/migrated-assets/www-content/global-citizenship/shared/product-sustainability/ironwolf-sustainability-report/shared/master/ironwolf-sustainability-report-en-us.pdf>
- Secrétariat du Conseil du Trésor du Canada (2024) *Modèle de travail hybride commun*. <https://www.canada.ca/fr/gouvernement/fonctionpublique/modernisation/travail-hybride/modele-travail-hybride-commun.html>
- Shi L, Brandt A, Iancu D, Mach KJ, Field C, Cho M-J, Ng M, Chey KJS, Ram N, Robinson T (2024) Climate impacts of digital use supply chains. *Environmental Research: Climate* 3(1):015009.
- Solomon S, D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann BH, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J., Overpeck GR, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt, (2007) *Technical Summary*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth*.
- Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA,
- Sorrell S (2007) The Rebound Effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency. (UK Energy Research Centre London).
- Source interne chez HP Canada (2024) l'empreinte carbone de l'imprimante HP.).
- Statistique Canada (2021a) *Échantillonnage*. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/edu/power-pouvoir/ch13/nonprob/5214898-fra.htm>
- Statistique Canada (2021b) *Travail à domicile : productivité et préférences*. Statistique Canada,, <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/45-28-0001/2021001/article/00012-fra.htm>
- Statistique Canada (2022) *Technologie numérique et utilisation d'Internet, 2021*. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/220913/dq220913b-fra.htm>
- Statistique Canada (2023) *Tableau de bord d'accès à Internet haute vitesse*,. <https://www.ic.gc.ca/app/scr/stsidcr/web/acces-internet-haute-vitesse-canada/fr/acces-universel/tableau-de-bord-a-large-bande.html>
- Statistique Canada (2024) *Télétravail, emploi du temps et bien-être : données probantes tirées de l'Enquête sur l'emploi du temps de 2022*.

- Su N (2018) The proportion of central energy consumption in the global total energy consumption is increasing year by year.).
- Synergy research group (2025) *Hyperscale Data Center Capacity to Triple by 2030, Driven by Generative AI*. <https://www.srgresearch.com/articles/hyperscale-data-center-capacity-to-triple-by-2030-driven-by-generative-ai>
- Tao Y, Yang L, Jaffe S, Amini F, Bergen P, Hecht B, You F (2023) Climate mitigation potentials of teleworking are sensitive to changes in lifestyle and workplace rather than ICT usage. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 120(39):e2304099120. <https://www.pnas.org/doi/epub/10.1073/pnas.2304099120>
- Tashakkori A, Teddlie C, Teddlie CB (1998) *Mixed methodology: Combining qualitative and quantitative approaches*. sage,
- The Shift Project (2021) *Impact environnemental du numérique : tendances à 5 ans et gouvernance de la 5G. Mise à jour des scénarios prospectifs des impacts du numérique mondial et propositions pour le déploiement d'une 5G raisonnée*. 41 p https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2021/03/Note-danalyse-Numerique-et-5G_30-mars-2021.pdf
- Tinetti B, de Veron, S., Duvernois, P.-A., Brun, O., Roucher, C., Olagne, R., et Chamignon, D. (2015) *Evaluation de l'impact du télétravail et des tiers-lieux sur la réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre, et sur l'organisation des entreprises*. 207 p <https://www.ademe.fr/evaluation-limpact-teletravail-tiers-lieux-reductionconsommations-denergie-emissions-gaz-a-effet-serre-lorganisation>
- Tissandier P, Mariani-Rousset S (2019) Les bénéfices du télétravail. Mobilité modérée: réduction du stress et des émissions de gaz à effets de serre. *Revue francophone sur la santé et les territoires*.
- tp-link (2018) *AC1750. Wireless Dual Band. Gigabit Router C7. High-Speed Wi-Fi for Faster Connections Across Your Home*. <https://files.bbystatic.com/gyiAnWMHdNtormmZySHBRA%3D%3D/60e4e1bd-0bf1-4610-8d89-016765931565.pdf>
- Transition énergétique Québec (2023) *ÉcoPerformance*. <https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/affaires/programmes/ecoperformance#:~:text=Le%20programme%20C3%89coPerformance%20vise%20C3%A0,dans%20le%20secteur%20des%20affaires>.
- Vasques TL, Moura P, de Almeida A (2019) A review on energy efficiency and demand response with focus on small and medium data centers. *Energy Efficiency* 12:1399-1428.
- Veal AJ (2017) *Research methods for leisure and tourism*. Pearson UK,
- Viana LR, Cheriet M, Nguyen K-K, Marchenko D, Boucher J-F (2022) Sending fewer emails will not save the planet! An approach to make environmental impacts of ICT tangible for Canadian end users. *Sustainable Production and Consumption* 34:453-466.
- Wackernagel M, Rees W (1998) *Our ecological footprint: reducing human impact on the earth*. New society publishers. <https://faculty.washington.edu/stevehar/footprint.pdf>

- WHO et ILO (2021) *Healthy and safe telework: technical brief*. 32 p
<https://www.who.int/publications/i/item/9789240040977>
- Wiedmann T, Minx J (2008) A definition of ‘carbon footprint’. *Ecological economics research trends* 1(2008):1-11.
https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=GCKU1p_6HNwC&oi=fnd&pg=PA1&dq=footprint+carbon+definitions&ots=D2B0KG4nOl&sig=ps_wjEGU53niROjb9_A6Q7V71wo&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Woltman H, Feldstain A, MacKay JC, Rocchi M (2012) An introduction to hierarchical linear modeling. *Tutorials in quantitative methods for psychology* 8(1):52-69.
- Wright LA, Kemp S, Williams I (2011) Carbon footprinting?: towards a universally accepted definition. *Carbon management* 2(1):61-72.
- Zoom blog (2020) *A Message to Our Users*. <https://blog.zoom.us/a-message-to-our-users/>

ANNEXES

Annexe 1 : Questions utilisées pour le questionnaire en ligne de la partie du numérique

Parmi les équipements suivants, quels sont ceux qui restent uniquement sur votre lieu de travail (ex. espace de bureau chez l'employeur ou à l'institution universitaire si vous êtes étudiant(e)) ?

- Je déplace tous mes équipements d'un lieu à un autre
- Ordinateur portable
- Ordinateur fixe
- Tablette
- Souris
- Clavier
- Deuxième écran
- Imprimante
- Disque dur
- Autre

Parmi les équipements suivants, quels sont ceux que vous déplacez entre vos différents lieux de travail (ex. espace de bureau chez l'employeur ou à l'institution universitaire si vous êtes étudiant(e)) ?

- Ordinateur portable
- Ordinateur fixe
- Tablette
- Souris
- Clavier
- Deuxième écran
- Disque dur
- Autre
- Aucun

Parmi les équipements suivants, quels sont ceux dont vous disposez uniquement sur votre lieu de télétravail (ex. domicile ou autre lieu de télétravail) ?

- Je déplace tous mes équipements d'un lieu à un autre
- Ordinateur portable
- Ordinateur fixe

- Tablette
- Souris
- Clavier
- Deuxième écran
- Disque dur
- Routeur pour une connexion Internet
- Imprimante
- Autre
- Aucun

Parmi les équipements informatiques que vous utilisez sur votre lieu de télétravail, lesquels avez-vous acquis (payés ou non par votre employeur ou votre institution universitaire si vous êtes étudiant(e)) pour vous adapter aux conditions de télétravail ? Excluez tout équipement prêté par l'employeur.

- Je n'ai eu à acheter aucun équipement pour m'adapter aux conditions de télétravail
- Ordinateur portable
- Ordinateur fixe
- Tablette
- Souris
- Clavier
- Deuxième écran
- Imprimante
- Disque dur
- Routeur pour une connexion Internet
- Autre

Parmi le matériel, le mobilier ou les services suivants, lequel ou lesquels avez-vous achetés (payé(s) ou non par votre employeur ou votre institution universitaire si vous êtes étudiant(e)) pour faire du télétravail ?

- Aucun
- Chaise de bureau
- Table de bureau
- Imprimante
- Papeterie

- Instruments d'écriture
- Décoration
- Machine à café
- Abonnement à un service de livraison de repas
- Nouvel abonnement à Internet
- Autre
- Je ne sais pas

Parmi les équipements que vous utilisez au bureau, lesquels restent en veille lorsque vous ne les utilisez pas ?

- Aucun équipement ne reste en veille
- Ordinateur portable
- Ordinateur fixe
- Tablette
- Souris
- Clavier
- Deuxième écran
- Disque dur
- Autre

Quelles sont les applications bureautiques (celles liées aux communications) pour vos tâches de travail ?

- Microsoft Teams
- Zoom
- Webex
- Google Meet
- Adobe Connect
- Slack
- Autre
- Aucune
- Je ne sais pas

Votre stockage de données numériques est-il relié à un réseau informatique géré ou contracté par votre organisation ?

- Oui
- Non
- Je ne sais pas

Connaissez-vous vos capacités totales de stockage en espace infonuagique personnel (ex. Cloud, Drive, etc.) et en espace physique personnel (ex. USB, disque dur, etc.) ?

- Oui, je connais mes capacités de stockage infonuagique et physique
- Oui, mais je connais seulement ma capacité de stockage infonuagique
- Oui, mais je connais seulement ma capacité de stockage physique
- Non
- Je ne sais pas

Quelle est la capacité totale de stockage en gigaoctet (Go) dans votre espace infonuagique personnel (ex. Cloud, Drive, etc.) ?

Quelle est la capacité totale de stockage en gigaoctet (Go) dans votre espace physique personnel (ex. USB, disque dur, etc.) ?

Pour le télétravail seulement avez-vous augmenté la capacité ou acheté du stockage de données ?

- Oui
- Non
- Je ne sais pas

Quelle est l'augmentation en pourcentage de cette capacité de stockage de données ?

0%

500%

En moyenne, combien de minutes par jour passez-vous en rencontres virtuelles ?

En moyenne, combien d'**heures** passez-vous devant un **écran** (ordinateur ou tablette électronique) et en tout durant une journée typique ?

Au bureau de l'employeur:

Vous pouvez utiliser le nombre d'heures en utilisant des chiffres décimaux (ex. 4.5)

En télétravail (ex. à votre résidence ou autre lieu de télétravail):

Vous pouvez utiliser le nombre d'heures en utilisant des chiffres décimaux (ex. 4.5)

Quel est environ le nombre de **courriels envoyés** durant une journée de travail typique ?
Pour ceux qui peuvent, vous pouvez utiliser cet outil et ramener le résultat à une journée: [voir Viva Insights](#)

Précisez s'il y a eu un changement dans le nombre de courriels envoyés durant une journée de travail typique en télétravail comparé à une journée au bureau de l'employeur (ou à votre institution universitaire si vous êtes étudiant(e)).

- Le nombre de courriels a augmenté
- Le nombre de courriels a diminué
- Aucun changement

Quelle est la **diminution** du nombre de **courriels envoyés** durant une journée de travail typique en **télétravail** en pourcentage?

Lorsque vous êtes en **télétravail**, quel **pourcentage du temps** utilisez-vous **chaque type de réseaux internet** (sur un total de 100%)?

Internet avec routeur wi-fi
Placez le curseur au début du dégradé pour débiter l'échelle.
0% 100%

Internet filaire seulement
Placez le curseur au début du dégradé pour débiter l'échelle.
0% 100%

Réseau de données cellulaires (LTE, 3G, 4G, 5G)
Placez le curseur au début du dégradé pour débiter l'échelle.
0% 100%

Annexe II : Grille des questions de l'entretien semi-dirigé pour le directeur du SRI

- Est-ce que les licences des applications de bureautique ou de stockage de données sont gérées par votre organisation ? Quelles sont ces applications ?
- Pouvez-vous nous quantifier les données stockées sur les différents serveurs en lien avec le télétravail ? (en télétravail ou non)
- Pouvez-vous nous quantifier le nombre d'heures passées par vos employé(e)s en télétravail en visioconférence sur les différentes applications installées sur les ordinateurs des employé(e)s ?
- Localisation des serveurs utilisés par l'organisation :
- Quantité de données stockées sur les différents serveurs en lien avec le télétravail :
- Nombre d'heures annuelles totales passées par les employés(e)s en télétravail sur des applications de visioconférence :
- Nombre d'heures annuelles totales passées par les employés(e)s en télétravail sur un ordinateur :
- Nombre de courriels envoyés depuis des adresses de votre organisation par année :
- Comment gérez-vous le parc informatique de l'INRS?
- Quelles sont vos perspectives, planifiez-vous intégrer les choix environnementaux dans votre politique d'achat?

Annexe III : Grille des questions des entretiens semi-dirigés pour les employé.e.s

Empreinte du numérique et consommation de biens matériels

Questions principales	Questions complémentaires	Questions de clarification
<p>Commentez les aspects du télétravail suivants liés à l’informatique. Y a-t-il eu... :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Dédoublément et achat de nouveaux équipements informatiques (question ADEME 11)? b. Difficulté accrue ou réduite à sauvegarder et stocker des données dans le cloud (SharePoint, OneDrive, etc.)? c. Augmentation des visioconférences. Détaillez (question ADEME 6)? d. Envoi accru de courriels? e. Plus de temps passé devant l'ordinateur? 		<p>Pouvez-vous m’en dire un peu plus ?</p> <p>Pouvez-vous me donner des exemples ?</p>
<p>Quels outils informatiques, autant les logiciels que les appareils, utilisez-vous quotidiennement ?</p>	<ul style="list-style-type: none"> a. Quels outils informatiques, parmi ceux que vous avez à votre disposition, utilisez-vous peu ou pas ? b. En termes d’équipements informatiques, comment se différencie votre lieu de télétravail et votre lieu de travail? 	
<p>Parlez-nous du stockage des données dans le cloud</p>	<ul style="list-style-type: none"> c. Préférez-vous sauvegarder les données dans l’informatique de l’INRS, dans l’espace physique (ordinateur, disque dur, USB) ou dans le cloud personnel? Pourquoi ? 	
<p>Avez-vous un compte de dépenses payées pour le télétravail par l’employeur ?</p>	<ul style="list-style-type: none"> d. Détaillez les dépenses admissibles et les dépenses faites et à faire. e. Détaillez la composition des biens matériels acquis ou à acquérir. 	

Parlez-nous de l'impact du télétravail sur les papiers imprimés.	f. Le télétravail a-t-il réduit ou augmenté votre nombre de papiers imprimés ? En moyenne, combien de papiers imprimez-vous par semaine en télétravail ?	
--	--	--

Annexe IV : Courriel envoyé au directeur du SRI pour l'invitation de participation à l'entretien semi-dirigé

Objet : Invitation à participer aux réunions sur le projet de l'empreinte carbone du télétravail

Bonjour « Monsieur le Directeur »,

Dans le cadre de notre projet de recherche portant sur l'empreinte carbone du télétravail, nous sollicitons votre participation pour collecter des données pertinentes et approfondies pour évaluer l'impact environnemental de nos pratiques de télétravail de l'INRS. Nous pensons que votre expertise et vos connaissances en tant que Directeur seront précieuses pour éclairer notre projet. Nous aimerions vous inviter à participer à une réunion en virtuelle et d'une durée approximative de 15 minutes à 1 heure via la plateforme Teams Microsoft.

Vous trouverez en pièce jointe la liste des questions qui seront posées lors de ces rencontres. Vous pourrez trouver les réponses pour y répondre avant la rencontre et nous réviserons ensemble lors de notre entretien.

Nous vous prions de bien vouloir prendre connaissance de la lettre d'information de même que signer le formulaire de consentement, puis de nous les renvoyer avant la date prévue pour la réunion.

Merci de choisir le moment de la rencontre selon votre disponibilité :

- **Directeur du SRI :** Date [29 ou 30 août], Heure : [11.00 ou 14 :30]

Si aucune de ces propositions ne vous convient, n'hésitez pas à nous faire part de vos disponibilités, et nous nous efforçons de trouver un créneau qui vous convienne.

Nous croyons que votre contribution sera inestimable pour l'avancement de ce projet et nous sommes impatients de collaborer avec vous!

Cordialement,

Pour l'équipe de recherche sur l'empreinte carbone du télétravail

Empreinte.carbone.teletravail@inrs.ca

Annexe V : Statistiques des GES individuels par type d'emploi : Moyenne, Médiane, Min, Max, Écart Type

Emploi	Min (Kg éq. CO₂/an)	Max (Kg éq. CO₂/an)	Moyenne (kg éq. CO₂/an)	Mediane (Kg éq. CO₂/an)	écart_type (Kg éq. CO₂/an)
Cadre intermédiaire	0,03	384,33	152,98	184,40	146,20
Cadre supérieur ou dirigeant	229,62	247,62	240,38	243,92	9,51
Éudiant.e 1 ^{er} cycle ou de cegep	1,28	35,86	13,96	9,35	15,10
Étudiant.e 2 ^e cycle	0	385,93	103,54	55,92	113,82
Étudiant.e 3 ^e cycle	0	483,61	108,53	30,91	133,26
Personnel de recherche	0	402,49	113,84	108,13	117,18
Professeur	0,41	395,68	111,45	28,98	130,87
Professionnel	0,87	379,65	100,69	22,50	127,53
Soutien administratif	0,04	403,88	104,96	10,00	136,78
Stagiaire postdoctoral	0	491,10	87,14	2,58	152,15
Technicien production ou maintenance	0	377,51	87,88	1,92	145,33

Annexe VI : Explications des catégories d'emploi

Professionnel : une personne qui a généralement un baccalauréat, et dont le diplôme est exigé pour le poste, qui peut être membre d'un ordre professionnel, et qui travaille généralement dans le domaine dans lequel elle est formée. P. ex. : avocat, comptable, travailleur social, ingénieur, etc.

Technicien, production, maintenance : une personne qui a généralement un DES, DEP ou DEC, dont l'un ou l'autre diplôme est exigé pour le poste, et qui travaille auprès d'utilisateurs ou sur le terrain dans un domaine autre que celui du travail de bureau. P. ex. : technicien en informatique ou technicien en laboratoire (technicien), ouvrier ou manœuvre (production), concierge ou technicien en bâtiment (maintenance).

Soutien administratif : une personne qui travaille dans le milieu administratif, dans un bureau, et généralement en collaboration avec les gestionnaires. P. ex. : adjoint administratif ou secrétaire.

Cadre intermédiaire : cadre dont le champ d'action se situe entre les chefs d'équipe ou les gestionnaires de premier niveau et la haute direction.

Cadre supérieur : cadre à la tête de services ou membre de la haute direction.

Annexe VII : Répartition des GES en fonction des activités du numérique associées au télétravail (n = 319)

Catégorie	Total (kg éq. CO₂/an)	Pourcentage
Visioconférences	413,92	1,22
Stockage des données	2,44	0,01
Équipements disposés dans le lieu de télétravail	673,21	1,98
Courriels	68,00	0,20
Acquisition des terminaux	32788,01	96,59

Annexe VIII : Répartition des GES en fonction du mode d'emploi et catégorie de télétravail

Emploi	Catégorie	Moyenne GES (kg éq. CO₂/an)	%
Cadre intermédiaire	Acquisition des terminaux	149,05	96,49
Cadre intermédiaire	Courriels	1,75	1,13
Cadre intermédiaire	Visioconférences	2,66	1,72
Cadre intermédiaire	Équipements disposés dans le lieu de télétravail	1,01	0,66
Cadre supérieur ou dirigeant	Acquisition des terminaux	229,03	93,04
Cadre supérieur ou dirigeant	Courriels	8,68	3,53
Cadre supérieur ou dirigeant	Visioconférences	6,74	2,74
Cadre supérieur ou dirigeant	Équipements disposés dans le lieu de télétravail	1,73	0,70
Étudiant e 1 ^{er} cycle ou de cégep	Acquisition des terminaux	5,73	40,84
Étudiant e 1 ^{er} cycle ou de cégep	Courriels	0,09	0,62
Étudiant e 1 ^{er} cycle ou de cégep	Visioconférences	0,54	3,82
Étudiant e 1 ^{er} cycle ou de cégep	Équipements disposés dans le lieu de télétravail	7,67	54,72
Étudiant.e 2 ^e cycle	Acquisition des terminaux	100,69	96,67
Étudiant.e.s 2e cycle	Courriels	0,26	0,25
Étudiant.e 2 ^e cycle	Stockage des données	0,40	0,39
Étudiant.e 2 ^e cycle	Visioconférences	0,55	0,53
Étudiant.e 2 ^e cycle	Équipements disposés dans le lieu de télétravail	2,26	2,17
Étudiant.e 3 ^e cycle	Acquisition des terminaux	105,38	96,48
Étudiant.e 3 ^e cycle	Courriels	0,56	0,51
Étudiant.e 3 ^e cycle	Stockage des données	0,29	0,27
Étudiant.e 3 ^e cycle	Visioconférences	0,99	0,91
Étudiant.e 3 ^e cycle	Équipements disposés dans le lieu de télétravail	2,01	1,84
Personnel de recherche	Acquisition des terminaux	110,44	96,26
Personnel de recherche	Courriels	1,18	1,02
Personnel de recherche	Stockage des données	0,00	0,00

Personnel de recherche	Visioconférences	1,11	0,97
Personnel de recherche	Équipements disposés dans le lieu de télétravail	2,01	1,75
Professeur.e	Acquisition des terminaux	107,17	94,21
Professeur.e	Courriels	2,78	2,44
Professeur.e	Stockage des données	0,00	0,00
Professeur.e	Visioconférences	1,74	1,53
Professeur.e	Équipements disposés dans le lieu de télétravail	2,07	1,82
Professionnel.le	Acquisition des terminaux	95,99	93,37
Professionnel.le	Courriels	2,37	2,30
Professionnel.le	Visioconférences	2,13	2,07
Professionnel.e	Équipements disposés dans le lieu de télétravail	2,32	2,26
Soutien administratif	Acquisition des terminaux	101,55	95,17
Soutien administratif	Courriels	1,92	1,80
Soutien administratif	Visioconférences	1,24	1,17
Soutien administratif	Équipements disposés dans le lieu de télétravail	1,99	1,87
Stagiaire postdoctoral	Acquisition des terminaux	83,74	95,44
Stagiaire postdoctoral	Courriels	0,70	0,80
Stagiaire postdoctoral	Stockage des données	0,00	0,00
Stagiaire postdoctoral	Visioconférences	0,81	0,93
Stagiaire postdoctoral	Équipements disposés dans le lieu de télétravail	2,48	2,83
Technicien.ne production ou maintenance	Acquisition des terminaux	85,58	97,38
Technicien.ne production ou maintenance	Visioconférences	0,95	1,08
Technicien.ne production ou maintenance	Équipements disposés dans le lieu de télétravail	1,35	1,54

Annexe IX : Résultats pondérés des GES de la population totale de l'INRS (N = 1558)

	Acquisition des terminaux (kg éq. CO ₂ /an)	Consommation électrique des terminaux dans le lieu de télétravail (kg éq. CO ₂ /an)	Visioconférences (kg éq. CO ₂ /an)	Stockage des données (kg éq. CO ₂ /an)	Courriels (kg éq. CO ₂ /an)	Total (kg éq. CO ₂ /an)
ÉTUDIANTS_UCS_EM TM	19005	465	168	9	12	19659
EMPLOYES_UCS_EMT M	10126	296	165	0	16	10602
ÉTUDIANTS_employés_ EMTV	10865	414	194	0	18	11491
Étudiant_ETE	25279	543	168	6	13	26008
Employes_ETE	14525	213	178	0	40	14955
Étudiants_AFSB	19678	493	209	0	28	20408
Employes_AFSB	11649	269	152	0	45	12115
Administration	26595	383	433	0	69	27480
Totale	137721	3076	1665	15	241	142717

Annexe X : Résultats de la régression pas à pas de type (vers l'avant)

Start: AIC=2644.88

somme.numerique ~ 1

AIC

+ acquisition des terminaux	777.75
+ courriels envoyés	2641.40
<none>	2644.88
+ visioconférences	2645.22
+ jours de télétravail	2645.86
+ terminaux restants dans le lieu de télétravail	2646.68
+ âge	2646.69
+ stockage des données	2646.85
+ emploi	2648.23
+ centre	2656.12

Step: AIC=777.75

somme.numerique ~ acquisition des terminaux

AIC

+ terminaux restants dans le lieu de télétravail	391.67
+ visioconférences	732.52
+ courriels envoyés	736.52
+ âge	775.89
+ jours de télétravail	777.33
<none>	777.75

+ stockage des données 779.44

+ centre 779.64

+ emploi 786.56

Step: **AIC=391.67**

somme.numerique ~ acquisition des terminaux + terminaux restants dans le lieu de télétravail

AIC

+ visioconférences -60.59

+ courriels envoyés 222.80

+ centre 330.67

+ âge 386.19

+ Emploi 389.27

+ stockage des données 391.08

<none> 391.67

+ jours de télétravail 393.61

Step: **AIC=-60.59**

somme.numerique ~ acquisition des terminaux + terminaux restants dans le lieu de télétravail+ visioconférences

AIC

+ courriels envoyés -1289.92

+ stockage des données -65.25

+ jours de télétravail -60.88

<none> -60.59

+ âge -58.92
+ centre -56.65
+ Emploi -52.11

Step: **AIC=-1289.92**

somme.numerique ~ acquisition des terminaux + terminaux restants dans le lieu de télétravail+
visioconférences +

courriels envoyés

AIC

+ stockage des données -15894.5

+ âge -1290.8

<none> -1289.9

+ jours de télétravail -1289.7

+ Emploi -1283.4

+ centre -1279.4

Step: **AIC=-15894.49**

somme.numerique ~ acquisition des terminaux + terminaux restants dans le lieu de télétravail+
visioconférences + courriels envoyés + stockage des données

AIC

<none> -15894

+ jours de télétravail -15893

+ âge -15893

+ emploi -15887

+ centre -15884

- F-statistic: $2.824e+31$ on 5 and 265 DF, p-value: $< 2.2e-16$

Annexe XI :Volume consommé (GO/heure) par type de visioconférence utilisé

Application de rencontre virtuelle	Total (Go/heure)	Référence
Google Meet	0,79	(MacMillan <i>et al.</i> , 2021)
Microsoft Teams	1,44	
Zoom	0,76	
WebEx	1,32	(Cisco Webex, 2023)

Annexe XII : Les terminaux acquis par centre avec leurs GES et consommation électrique associée

Centre de l'INRS	Type de terminal acquis	Marque	Modèle	Empreinte carbone en ACV-carbone kg éq. CO ₂ /an)	Empreinte carbone sans la phase d'utilisation (kg éq. CO ₂ /an)	Consommation (W)	Références
EMT	ordinateur portable	Dell	Inspiron 14 7430 – 2 in 1	368	82,15	65	(Dell Technologies, 2023)
	premier moniteur	Dell	LCD U2415b	625	81,14	23	(DELL, 2018a)
	ordinateur fixe	Dell	W19C	642	96,3	240	(DELL, 2018b)
	imprimante	HP	LJ P2035	125	20	550	(Source interne chez HP Canada, 2024)
	clavier	Logitech	Advanced MK540	5,38	2,28	0,5	(logitech, 2023a)
	disque dur	Seagate	8TB 5.4K SATA 3.5in HDD	2,36	0,15	4,8	(Seagate, 2020a)
	souris	Logitech	B100	1,73	0,76	0,5	(Logitech, 2021a)
AFSB	ordinateur portable	Lenovo	E14 GEN 5 Core i7	888	152,73	65	(lenovo, 2022a)
	premier moniteur	Samsung	F2380	592,6	220,2	45	(Samsung, n.d)
	ordinateur fixe	Lenovo	ThinkCentre M720s	1154	83,08	260	(Lenovo, 2018)
	imprimante	HP	LJ P2035	125	20	550	(Source interne chez HP Canada, 2024)
	clavier	Logitech	K120	4,02	1,97	0,5	(logitech, 2021b)
	disque dur	Seagate	8TB 5.4K SATA 3.5in HDD	2,36	0,16	4,8	(Seagate, 2020a)
	souris	Logitech	B100	1,73	0,76	0,5	(Logitech, 2021a)

ETE	ordinateur portable	Lenovo	Thinkbook 14	888	152,74	65	(lenovo, 2022a)
	premier moniteur	Samsung	F2380	592,6	220,2	45	(Samsung, n.d)
	ordinateur fixe	Lenovo	ThinkCentre M720s	1154	83,09	260	(Lenovo, 2018)
	imprimante	HP	LJ P2035	125	20	550	(Source interne chez HP Canada, 2024)
	clavier	Logitech	Wireless 2.4G K235	5,38	2 ,48	0,5	(logitech, 2023a)
	disque dur	Seagate	8TB 5.4K SATA 3.5in HDD	2,36	0,16	4,8	(Seagate, 2020a)
	souris	Logitech	B100	1,73	0 ,76	0,5	(Logitech, 2021a)
UCS	ordinateur portable	Lenovo	Lenovo ThinkBook 16 G6	541	112,93	65	(Lenovo, 2022b)
	premier moniteur	Samsung	24'' Professional Monitor S24A400VEN	592,6	220,2	15	(Samsung, n.d)
	ordinateur fixe	Lenovo	Lenovo ThinkCentre M80s Gen 3	1076	105,44	260	(lenovo, 2022a)
	imprimante	HP	LJ P2035	125	20	550	(Source interne chez HP Canada, 2024)
	clavier	Logitech	Advanced MK540	6,43	2 ,92	0,5	(logitech, 2023b)
	disque dur	Seagate	IronWolf ST1000VN0004	3,42	0,6	4,8	(seagate, 2020b)
	souris	Logitech	B100	1,73	0 ,76	0,5	(Logitech, 2021a)
Tous les centres	webcam	Logitech	Webcam C925E	10,97	4 ,33	8	(Logitech, 2024)
	station d'accueil	Dell	WD19DCS	40,95	8,57	90	(DELL, 2021)
	scanner	ScanSnap	iX1600	29,95	4,792	17	(Source interne chez HP Canada, 2024)

	casque d'écoute	Logitech	EVOLVE2 65	12,32	6,13	2,5	(Jabra, 2023)
	tablette	Lenovo	M9	80	22 ,91	10	(Lenovo, 2022c)
	routeur	tp-link	AC1750	334,71	7,14	1,8	(tp-link, 2018)

Annexe XIII : Comparaisons multiples entre les différents scénarios de jours de télétravail par test de Dunn

Comparaison entre deux scénarios de jours de télétravail		Statistique Z	P
0	1	0,30	1
0	2	0,78	1
1	2	0,69	1
0	3	-0,63	1
1	3	-1,32	1
2	3	-1,95	1
0	4	-0,31	1
1	4	-0,86	1
2	4	-1,51	1
3	4	0,43	1
0	5	-0,17	1
1	5	-0,38	1
2	5	-0,69	1
3	5	0,20	1
4	5	0,00	1
0	6	0,91	1
1	6	0,85	1
2	6	0,73	1
3	6	1,08	1
4	6	1,00	1
5	6	0,94	1
0	7	-0,56	1
1	7	-0,60	1
2	7	-0,72	1
3	7	-0,36	1
4	7	-0,44	1
5	7	-0,42	1

6	7	-1,03	1
0	sans télétravail	3,44	0,02
1	sans télétravail	4,35	4,80e-04
2	sans télétravail	3,63	9,80e-03
3	sans télétravail	5,41	2,26e-06
4	sans télétravail	4,99	2,09e-05
5	sans télétravail	2,42	0,55
6	sans télétravail	-0,03	1
7	sans télétravail	1,41	1