

Stage de fin d'année

Master 1

Energie – Matériaux

Bilan carbone de l'institut d'Alembert



Institut Jean Le Rond D'Alembert

Tour 65- 5^e étage, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05

Du 14/03/2022 Au 29/07/2022

Madame Lydie STARON

Tél : 01 44 27 80 34

Email : Lydie.staron@upmc.fr

Contents

1 Remerciements	4
2 Introduction	4
2.1 Qu'est ce qu'une empreinte carbone?	4
2.2 Comment mesurer le bilan carbone de l'institut	4
2.3 Le collectif labos 1point5	4
3 Emission liées à la climatisation: étude générale	4
3.1 Recyclage de climatiseurs	5
3.2 Durée de vie moyenne d'un climatiseur	5
4 Emissions liées au chauffage: étude générale	6
4.1 Le chauffage au Gaz	6
4.2 Le chauffage électrique	6
4.3 Le chauffage au fioul	6
4.4 Chaudière à bois	6
4.5 Pompes à chaleur	7
5 Empreinte carbone des équipements informatiques : étude générale	7
5.1 Émissions liées à l'utilisation des ordinateurs portables et fixes	7
5.2 Empreinte carbone amont des ordinateurs portables	7
5.3 Comment expliquer cette empreinte carbone ?	9
6 Empreinte carbone du papier et généralités sur le papier recyclé	9
6.1 Généralités sur le papier recyclé	9
6.2 Pourquoi recycler du papier ?	9
6.3 Les différents logos et labels du papier recyclé	10
6.4 Papier ou numérique	10
7 Émissions liées aux transports	10
7.1 Transport aérien	11
7.2 Déplacement en voiture	11
7.3 Déplacement en train	11
7.4 Train ou voiture	11
8 Le bilan carbone de l'institut d'Alembert.	12
8.1 Difficultés rencontrées	12
8.2 Les statistiques des émissions carbone de l'institut d'Alembert	12
8.2.1 Empreinte carbone totale de d'Alembert	12
8.2.2 Empreinte carbone des déplacements	13
8.2.3 Empreinte carbone du chauffage	15
8.2.4 Empreinte carbone des achats informatiques	16
9 Conclusion	16
10 Bibliographie	17

Abstract

Pour participer à l'effort collectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'institut d'Alembert souhaite commencer sa comptabilité carbone, avec notamment l'établissement de son bilan. Tout au long de ce stage, j'ai donc pour mission d'évaluer les émissions carbone de l'institut pour l'année 2021. Les résultats obtenus vont ensuite être partagés avec le groupe de recherche labos 1point5, afin de participer à l'évaluation de l'empreinte carbone de la recherche française. J'ai été enchanté et ravi de participer à cette initiative et d'aider à construire un premier bilan carbone de l'institut d'Alembert.

To participate in the collective effort to reduce greenhouse gas emissions, the d'Alembert Institute wishes to begin its carbon accounting, in particular with the establishment of its balance sheet. Throughout this internship, my mission is therefore to evolve the institute's carbon emissions for the year 2021, the results obtained will then be shared with the 1point5 labs research group, in order to participate in the evaluation. of the carbon footprint of French research. I was delighted and delighted to take part in this initiative and to help construct a first carbon balance sheet for the Institut d'Alembert.

1 Remerciements

J'adresse mes remerciements à ma tutrice de stage Madame Lydie Staron, qui s'est beaucoup investie dans ce projet et qui a su partager ses connaissances de manière très pédagogique, et également pour sa disponibilité et la qualité de son encadrement.

Je souhaite également adresser mes remerciements à Madame Otarasanu, madame Bandeira, Evelyne Mignon, Catherine Dejancourt, Céline Sakho et monsieur Labbey, qui nous ont permis d'avoir les données nécessaires pour l'établissement du bilan carbone, ainsi qu'à l'équipe administrative du site Saint-Cyr qui nous ont fourni des documents complets sur les m2 du site et les différents modes de chauffages utilisés, sans oublier les chercheurs et tous les membres de l'institut qui ont été très réceptives faces à nos sollicitations.

Enfin, j'exprime ma reconnaissance envers mes amis et membres de ma famille qui ont su m'apporter un soutien moral et intellectuel tout au long du stage.

2 Introduction

Dans le cadre de la transition énergétique, et pour aider à comprendre et à réduire l'impact des activités de recherche scientifique sur l'environnement et le climat, il est nécessaire d'établir le bilan carbone de l'institut (plus généralement Gaz à Effet de Serre). Dans ce rapport, nous allons aborder de façon générale, les émissions carbone afin d'arriver à identifier des actions concrètes de réduction des émissions et donc de l'impact global. En dernier, nous présenterons les statistiques des émissions carbone de l'institut.

2.1 Qu'est ce qu'une empreinte carbone?

L'empreinte carbone est un indicateur qui vise à mesurer l'impact d'une activité sur l'environnement, particulièrement les émissions de gaz à effet de serre de cette activité, exprimées en émission carbone équivalente. D'après le GIEC, l'équivalent carbone d'une émission de GES étant la quantité de CO₂ qui peut provoquer le même forçage radiatif cumulé sur une période de temps donnée, exprimé un facteur de conversion qui est le potentiel de réchauffement global.

2.2 Comment mesurer le bilan carbone de l'institut

Pour réussir à réaliser un bilan carbone de l'institut, je vais d'abord chercher un bon calculateur d'émission de GES afin de mesurer l'empreinte carbone liée aux déplacements, ensuite, je vais récolter les données disponibles grâce aux bases de données de l'institut (billets de train, d'avion, achat d'équipement...) pour évaluer leur contribution au bilan. J'élaborerai aussi un questionnaire pour recueillir les informations directement des individus (trajets pour se rendre au travail, trajet pour aller d'un site à un autre, quel type de transport utilisé...). Une fois toutes les données réunies, des facteurs d'émission proposés par l'ADEME permettent de traduire ces données en une quantité d'émissions de gaz à effet de serre, en tonnes équivalent carbone. Par la suite, les données ainsi compilées vont être partagées avec le groupe GES1point5. Je vais aussi avoir besoin de connaître les modes de chauffages utilisés à l'institut d'Alembert et les m2 chauffés, ainsi que les différentes rénovations effectuées sur les bâtiments de l'institut. Afin de mener à bien ce projet, je vais effectuer une étude bibliographique des divers facteurs d'émission. Ma tutrice et moi avons choisi de nous focaliser sur certaines catégories d'émission : les émissions directes de gaz à effet de serre comme l'utilisation de chauffage au gaz ou des radiateurs électriques dans les bureaux ainsi que la climatisation, les émissions indirectes qui inclut les émissions liées aux achats de matières premières de biens et de services comme les prestations informatiques, les émissions liées au déplacement domicile-travail et au déplacement professionnel.

2.3 Le collectif labos 1point5

Le collectif labos 1point5 a été créé en 2019, son but est de réussir à promouvoir un modèle de recherche ayant un impact plus faible sur l'environnement et le climat. Il compte aujourd'hui plus de 663 membres qui ont développé un outil appelé GES 1 point 5 permettant de calculer l'empreinte carbone et de construire le bilan gaz à effet de serre des laboratoires de recherches français.

3 Emission liées à la climatisation: étude générale

La climatisation est basée sur la circulation et la transformation d'un fluide frigorigène. Grâce à ses propriétés physiques, ce dernier permet de transférer l'énergie par cycle compression/détente, et ainsi de produire du froid ou

du chaud. Malgré les bienfaits qu'il nous apporte, ce fluide présente aussi un grave problème pour l'environnement. En effet, comme les installations frigorifiques ne sont pas parfaitement hermétiques, elles peuvent présenter des fuites, et lorsque ces fluides frigorigènes s'échappent à l'air libre, ils s'évaporent et peuvent avoir un impact environnemental néfaste en détruisant la couche d'ozone (en particulier, les fluides CFC et HCFC) et en participant au réchauffement climatique (les fluides HFC). Afin de comparer les nuisances de ces gaz sur l'effet de serre par rapport au CO2 (considéré comme gaz de référence), des indices PRG (potentiel de réchauffement global) leur sont associés. On estime qu'un kg de fluide frigorigène R404A correspond en émission de CO2 à 26 146 km parcourus en voiture. Ceci correspond au fait que le pouvoir réchauffant des fluides HFC est 3 700 fois supérieur à celui du CO2.

Voici une liste des gaz réfrigérants les plus usités:

Réfrigérant	Réf commerciale	Réf industrielle	Type équipement	RRG 100 ²
R-404A ⁴	oui		Unités monoblock	3 922
R-454A	oui		Unités monoblock	2 140
R-448A	oui		Unités monoblock	1 387
R-449A ⁴	oui		Unités monoblock	1 398
R-134a	oui		Unités monoblock	1430
R-513A	oui		Unités monoblock	631,4
R-450A ⁴	oui		Unités monoblock	604,7
R-290(propano)	oui	oui	Unités compactes Chillers	3
R-152a		oui	refroidisseurs de glycol	124
R-744(CO2)	oui	oui	systèmes centralisés à détente direct	1
R-717(Ammoniac)		oui	systèmes indirects	0

figure1: Liste des gaz réfrigérants les plus usités à l'heure actuelle. Source: INTARCON

3.1 Recyclage de climatiseurs

Le climatiseur hors d'usage doit faire l'objet d'un processus de dépollution dans lequel tous les composants polluants du dispositif (les gaz réfrigérants) doivent être retirés et traités afin que les autres éléments, non-polluants, puissent être recyclés, et utilisés pour concevoir d'autres appareils. Cette opération se déroule en deux phases :

Phase de dépollution C'est la phase qui consiste à récupérer le gaz réfrigérant, après avoir poinçonné le circuit. L'huile contenue dans le compresseur est aspirée par la même occasion.

Phase de traitement des différents éléments composant l'appareil Après l'étape de dépollution, on passe au processus de traitement des différents éléments composant l'appareil. Ce tri n'est rendu possible qu'une fois le climatiseur broyé.

Les éléments broyés sont regroupés par type de matériaux, et sont généralement séparés en 3 catégories : les métaux ferreux, les éléments non-ferreux et les plastiques. Cette distinction est nécessaire pour le traitement de ces différents matériaux, car en effet, ils ne se recyclent pas tous de la même manière.

Le recyclage de ces matériaux permet d'éviter la pollution produite par la fabrication et la transformation de nouvelles matières.

Il existe différents points de collecte habilités à recevoir des climatiseurs à recycler, comme les déchetteries municipales, les commerçants spécialisés qui, suite à la mise en place d'une nouvelle législation, ont pour obligation de s'occuper de leur acheminement jusqu'au centre de recyclage. On peut trouver aussi des réseaux solidaires, des associations comme Emmaüs, Envie et e-dechet (<https://www.e-dechet.com/>)

3.2 Durée de vie moyenne d'un climatiseur

La durée de vie d'un climatiseur dépend de sa qualité, à titre d'exemple, les produits japonais comme Panasonic, DAIKIN, MITSUBISHI electric, ATLANTIC sont plus fiables que les produits Coréens ou chinois. Mais elle dépend aussi de l'entretien et de l'environnement dans lequel il se trouve.

L'entretien de base est de nettoyer les filtres au moins 4 fois par an chez un particulier, ainsi qu'un entretien annuel par un professionnel. La durée de vie d'un appareil bien installé est de 14 à 20 ans.

4 Emissions liées au chauffage: étude générale

Selon l'Agence de la transition écologique, le chauffage est le premier poste de rejet de CO₂ en France, il représente en moyenne 60 % de la consommation énergétique des ménages. Comme les dispositifs de chauffage rejettent en plus du CO₂, d'autres polluants tel que le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), hydrofluorocarbure (HFC), le perfluorocarbure (PFC), le hexafluorure de soufre (SF₆), l'ADEME a fourni des facteurs d'émission de GES qui permettent d'évaluer l'empreinte carbone du chauffage.

Ces facteurs d'émission de GES incluent des facteurs d'émission dits amont, ce qui permet de mesurer l'empreinte carbone du chauffage au moment de la production en prenant en compte toute la chaîne de production (production, transport et le raffinage du combustible utilisé), l'ADEME souligne à ce sujet que ces données en amont restent approximatives.

Selon le type de chauffage utilisé, le taux d'émission de CO₂ diffèrent, d'après le rapport sur l'état de l'environnement en France, le chauffage au fioul a une émission de 324 gCO₂e/kWh, suivi du gaz avec une émission de 227 gCO₂e/kWh, de l'électricité avec 147 gCO₂e/kWh puis du bois avec 30 gCO₂e/kWh

4.1 Le chauffage au Gaz

Selon l'ADEME, 42 % des ménages se chauffent au gaz en France.

Pour calculer la consommation de gaz, l'ADEME a mis en place dans la base carbone des données qui permettent de calculer l'empreinte carbone du chauffage en fonction de la surface à chauffer ainsi que du type d'énergie utilisé.

Pour une pièce qui fait 55 m², construite avant 1975 avec chauffage individuel au gaz, on aura une consommation moyenne de 8 030 kWh/an, et sachant qu'une chaudière à gaz émet 227 gCO₂e par kWh, on aura une empreinte carbone de 1,82 tCO₂e/an. À titre de comparaison, cela émet autant de CO₂ que 9 000 km en voiture à essence, qui elle produit en moyenne 0.200 kgCO₂e/km

4.2 Le chauffage électrique

Environ un tiers des foyers français utilisent le chauffage électrique.

Comme pour le chauffage au gaz, on a à disposition des données mises en place par l'ADEME qui nous permettent de calculer la consommation en électricité ainsi que l'empreinte carbone du chauffage électrique selon la surface et la date de construction de la pièce à chauffer. Pour la même pièce prise pour le calcul de l'empreinte carbone du chauffage au gaz, on aura une consommation de 5 390 kWh/an, et sachant que le chauffage électrique émet 147 gCO₂e par kWh, on a une émission de 0,79 TCO₂e par an. On constate bien qu'on a 1,03 TCO₂e par an de moins, si on utilise un radiateur électrique plutôt qu'une chaudière à gaz.

4.3 Le chauffage au fioul

Le chauffage au fioul présente la plus forte empreinte carbone avec un rejet de 324 gCO₂e par kWh consommé. Il concerne 12 % des ménages en France.

Pour le même exemple avec un chauffage collectif, en utilisant une chaudière au fioul, on a en moyenne une consommation de 10 725 kWh/an, ce qui revient à une émission de 3,47 TCO₂e par an. Pour la même pièce, on a une émission de 1,67 TCO₂e en plus comparés à une chaudière à gaz, et 2,68 TCO₂e en moins si on utilise un radiateur électrique.

4.4 Chaudière à bois

Avec seulement une émission de 30 gCO₂e par kWh, le chauffage au bois est considéré comme le mode de chauffage le plus écologique en France.

Malgré le faible taux d'émission de CO₂ que représente ce mode de chauffage, ce dernier est l'émetteur principal de particules fines produites par la combustion du bois. Ces particules fines ont un impact néfaste sur l'environnement, elles nuisent au développement de la faune et de la flore en faisant barrage à la lumière du soleil, et elles peuvent causer des maladies chez les animaux. Elles ont aussi un impact négatif sur la santé humaine en causant de nombreuses pathologies. (asthme, troubles cardiovasculaires, bronchite, etc.). Le transport porte toutefois une part de responsabilité plus importante sur les émissions de particules fines (28%), le chauffage au bois quant à lui est responsable de 26 % d'émission de ces particules.

La réglementation européenne est donc très stricte sur les seuils d'émissions de ces particules fines des appareils de chauffage au bois.

4.5 Pompes à chaleur

Les pompes à chaleur sont des appareils de chauffage qui se basent sur les énergies renouvelables, de ce fait elles ont un impact faible sur l'environnement. Elles fonctionnent grâce à un système de transfert thermique entre le milieu environnant et un liquide frigorigène, en utilisant de l'électricité. Leur consommation en électricité dépend des modèles de PAC, ainsi que des caractéristiques de son lieu d'installation.

La pompe à chaleur est un système capable, via un compresseur et l'utilisation d'un fluide frigorigène, de capter l'énergie du sol et de l'air, de moduler la chaleur et la restituer au sein du logement, soit par un réseau hydraulique ou par l'air. Elles peuvent aussi refroidir l'air, en fonctionnant de la manière inverse et en utilisant la même quantité d'énergie que pour le chauffage. Elles ont une durée de vie de 15 ans environ et de 40 ans pour les pompes à chaleur géothermiques.

Comme les pompes à chaleur utilisent de l'électricité, leur empreinte carbone n'est pas nulle (49 gCO₂e/kWh), sans oublier l'impact du fluide frigorigène sur l'environnement.

5 Empreinte carbone des équipements informatiques : étude générale

Dans un premier temps, nous allons seulement discuter des émissions liées à l'utilisation des ordinateurs portables et fixes d'une manière générale, sans prendre en compte les émissions liées à la fabrication, rassemblement et transport de ces équipements. Ensuite, nous discutons de l'empreinte des ordinateurs portables, en incluant cette fois les émissions liées à la fabrication, rassemblement et transport de ces derniers.

5.1 Émissions liées à l'utilisation des ordinateurs portables et fixes

Un ordinateur fixe (imprimante et haut-parleurs inclus) avec une puissance de 200 watts, consomme environ 600 kWh/an si l'ordinateur est allumé 8 heures par jour. Cela représente 175 kg par an d'émission de CO₂.

Un ordinateur portable avec une puissance entre 50 et 100 watts, branché pendant 8 heures par jour consomme entre 150 et 300 kWh/an. Cela représente 44 à 88 kg de CO₂ par an.

En mode veille, un ordinateur consomme environ le tiers de sa consommation en fonctionnement.

5.2 Empreinte carbone amont des ordinateurs portables

Les informations suivantes sont basées sur une étude intitulée « Product Carbon Footprint (PCF) Assessment of Dell Laptop – Results and Recommendations », publiée par Scott O'Connell et Markus Stutz, en 2010. Cette étude décompose l'empreinte carbone de la fabrication d'un ordinateur Dell Latitude E6400 sorti en 2008.

Production, assemblage et transport Le graphique suivant montre la répartition de l'empreinte carbone de l'ordinateur entre la production de ses composants, leur assemblage, et le transport du produit.

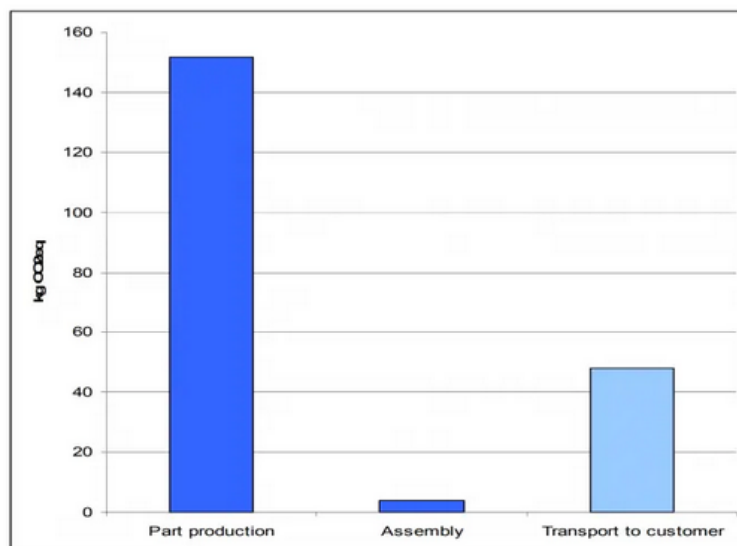


figure2: Empreinte carbone lié à la fabrication, assemblage et transport des ordinateurs portables. Source: ISLEAN

D'après le graphique, l'empreinte carbone de la fabrication de la machine incluant l'empreinte de l'extraction des matériaux, de leur transformation, et du transport des composants, est d'environ 151 kg CO₂e. En 2018, l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie donne un ordre de grandeur similaire : 124 kg CO₂e pour la fabrication d'un ordinateur portable. L'assemblage des différents composants a une empreinte plutôt faible (4 kg CO₂e), mais celle du transport représente près d'un quart de l'empreinte totale (48 kg CO₂e pour un total de 203 kg CO₂e), en effet cet ordre de grandeur s'explique, car le transport des produits se fait par avion.

Décomposition de l'empreinte carbone de la production d'un ordinateur portable. Le graphique suivant montre l'empreinte carbone de chaque composant d'un ordinateur portable.

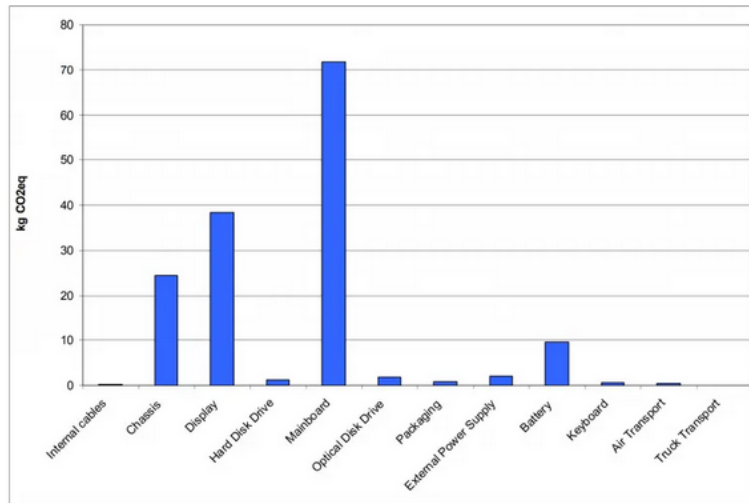


figure3: Empreinte carbone des différents composants d'un ordinateur portable. Source: ISLEAN

D'après les données de ce graphique, l'élément qui présente une empreinte carbone la plus élevée est la carte mère et ses composants : 71 kg CO₂e sur un total de 150 kg CO₂e, ce qui revient à 47% de l'empreinte carbone du PC. La batterie quant à elle, représente un poids relativement faible dans l'empreinte carbone totale de la fabrication de l'ordinateur : environ 9 kg CO₂e, sur un total d'environ 151 kg CO₂e, elle représente donc 6% de l'empreinte totale.

Décomposition de l'empreinte carbone de la carte mère

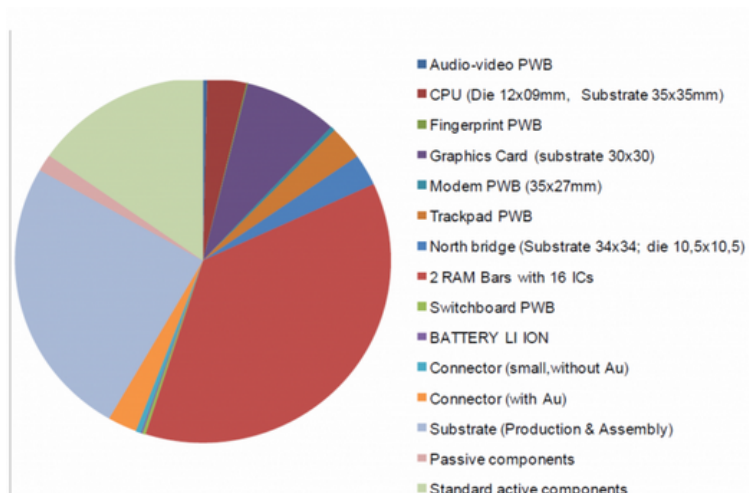


figure4: Empreinte carbone des composants de la carte-mère d'un PC. Source: ISLEAN

La RAM (en rouge), est le composant dont l'empreinte carbone est la plus élevée : 37% de celle de la carte-mère, soit 17% de l'empreinte totale de l'ordinateur, sachant que le modèle étudié a 2 Go de RAM. La plupart des modèles produits aujourd'hui en proposent 16 Go.

Le circuit imprimé « substrate », dont la fabrication demande beaucoup d'énergie, son empreinte carbone compte pour 24% de l'empreinte carbone de la carte-mère, soit 11% de l'empreinte totale de la machine. Les autres composants standards « standard active components » comme les transistors, les circuits intégrés, diodes et LED. Ces composants contiennent tous un die, qui résulte de la découpe d'un wafer qui est une tranche très fine de silicium, dont la production demande elle aussi beaucoup d'énergie.

Les émissions de GES du numérique représentent aujourd'hui environ 4% des émissions mondiales. Avec une augmentation de 9% par an, ces émissions peuvent atteindre 16% d'ici 2025. L'empreinte carbone de ce secteur se répartit entre les data centers avec un pourcentage de 25%, les infrastructures réseau 28% et 47% pour et les équipements des consommateurs. Ces émissions de GES sont produites lors de la production de l'équipement informatique et de son utilisation.

L'empreinte carbone d'un e-mail est loin d'être négligeable, selon le rapport des statistiques du groupe radicati, chaque jour 281 milliards d'e-mails ont été envoyés dans le monde en 2018, si l'empreinte carbone d'un e-mail sans pièce jointe est de 4 grammes, on arrive à une émission de 410 millions de tonnes de CO₂ générées chaque année, et cela, sans prendre en compte les spams. Ce chiffre grandit si on envoie un e-mail avec une pièce jointe de 1 MB par exemple, qui lui génère la même quantité de gaz à effet de serre que celle causée par la production d'un sac en plastique.

5.3 Comment expliquer cette empreinte carbone ?

Lors de l'envoi d'un e-mail, des données sont transmises à un data center, qui se trouve bien souvent de l'autre côté de l'Atlantique. Ces données parcourent donc des milliers de kilomètres, et ce tout en opérant des passages par de nombreux routeurs, serveurs et ordinateurs ayant besoin d'énergie pour fonctionner tout en incluant leur refroidissement. Selon Guilhem Cottet (délégué général de France Datacenter), les data centers consomment près de 10% de l'électricité mondiale. Ajouter à cela la dépense énergétique du stockage, selon Fox Intelligence les internautes français auraient en stock entre 10 000 et 50 000 mails non lus. Cette consommation s'élève à 200 TWh par an pour assurer leur stockage en datacenter, générant ainsi 0,3 % de GES selon le média Nature.

6 Empreinte carbone du papier et généralités sur le papier recyclé

Selon l'ademe, chaque année un employé de bureau consomme en moyenne 94 kg de papier par an, dont 55 kg de papier ramette, et ils rejettent chaque année environ 900 000 tonnes de déchets en papier, et seuls 20 % de ce papier seraient recyclés, sachant qu'il faut 7 kg de bois et 130 l d'eau pour fabriquer une seule ramette, avec une émission de 3,5 kg CO₂e. Ajouter à cela l'empreinte de l'impression, selon une enquête de Human Green Consultants pour Bonial, imprimer une feuille A4 génèrent 10,22 gCO₂e sans prendre en compte l'empreinte du transport de la feuille.

6.1 Généralités sur le papier recyclé

Un papier est dit recyclé quand il contient au moins 50% de fibres de cellulose provenant de chutes industrielles ou de papiers usagés. Le papier 100 % recyclé non désencré et non blanchi est le plus éco-responsable, mais on peut aussi trouver du papier recyclé issu de mélanges entre fibres recyclées et fibres vierges.

On peut recycler du papier entre 5 à 10 fois.

6.2 Pourquoi recycler du papier ?

Préserver les ressources (bois, eau, énergies). En effet, la production de papier recyclé nécessite 2 à 5 fois moins d'énergie et d'eau comparée à la production de papier issu de pâte vierge. Selon l'ADEME, recycler du papier permet d'éviter l'émission de 390 000 tonnes de CO₂ chaque année en France. Et permet aussi de relâcher la pression exercée par l'homme sur la forêt.

En revanche, il ne faut pas se limiter qu'à l'utilisation du papier recyclé. L'utilisation du papier à base de fibres vierge issues de forêts gérées de façon responsable est important afin de réaliser le cycle du papier.

6.3 Les différents logos et labels du papier recyclé



figure5:Logos et labels du papier recyclé. Source: Recygo

Label	Information
FSC recyclé	100 % de fibres recyclées, dont au moins 85 % issues de la post-consommation.
Blauer Engel	Premier et plus ancien label en matière de protection environnementale. Selon le guide du WWF, c'est l'un des plus exigeants. Parmi les critères d'attribution, le produit doit être constitué à 100 % de fibres recyclées post-consommation.
Nordic Swan	Au moins 75 % de fibres recyclées et/ou 20 % au moins de l'origine de la fibre provenant de forêts certifiées.
Paper by Nature	Au moins 75 % de fibres recyclées et/ou au moins 20 % de fibres provenant de forêts certifiées.
PEFC™ Recyclé	Au moins 70 % de fibres recyclées.
APUR	Au moins 50 % de fibres recyclées

figure6: Tableau informations sur les Logos et labels du papier recyclé. Source: Recygo

6.4 Papier ou numérique

Suite à notre étude précédente sur l’empreinte du papier et du numérique, on arrive à définir les secteurs ayant l’impact le plus important pour les deux supports. Pour le papier, il s’agit de la production et de l’impression. Pour le numérique, c’est plutôt le stockage des données sur les serveurs qui a un impact considérable.

Selon une étude comparative réalisée par le cabinet Quantis pour le compte de la poste, qui a été portée sur seize indicateurs, on ne peut affirmer que l’un des deux supports (papier ou numérique) est le meilleur choix en termes d’impact écologique. Il s’agit plus de déterminer quel est le choix le plus judicieux pour différents besoins.

Le papier présente un impact plus fort pour douze indicateurs, comme par exemple : le changement climatique pour lequel le numérique représente 59% de l’impact du papier, et 50% pour les particules fines.

Le numérique passe avant le papier pour trois indicateurs : l’utilisation des sols, l’usage de l’eau et les particules atmosphériques.

Selon la même étude, en se basant sur l’ensemble de la chaîne de fabrication et de distribution, l’empreinte carbone d’une facture papier est supérieure de 63% à celle d’une facture électronique. Le numérique est imbattable pour la diffusion rapide et massive de l’information contrairement au papier, en revanche la présence massive du « snack content » qui est un contenu très peu qualitatif, demande beaucoup de ressources en termes de stockage donc plus d’impact écologique. Le numérique reste un choix judicieux quand il s’agit de documents plus volumineux, pour éviter l’utilisation d’une quantité considérable de papier, mais aussi l’impression de tous ces documents.

7 Émissions liées aux transports

Dans cette partie, nous allons voir les émissions de GES selon les différents modes de transport. (avion, train et voiture)

7.1 Transport aérien

Les transports sont responsables de 29% des émissions de CO₂. Les voitures représentent plus de la moitié de ces émissions. Quant aux transports aériens, ils représentent 3% des émissions de CO₂, d'après l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). On voit bien que la part des transports aériens est plus faible que celle des voitures, mais les avions restent à ce jour les plus polluants des deux, en effet d'importantes quantités de kérosène sont consommées à chaque trajet en avion, sachant que la combustion de kérosène s'accompagne par l'émission de CO₂, ajoutant à cela l'émission de vapeur d'eau ainsi que d'autres polluants gazeux. Sans oublier l'impact des traînées de condensation sur le réchauffement de la surface terrestre, il s'agit des traînées blanches présentes dans le sillage des avions, qui sont formés par le rejet de particules par l'avion. Lorsque l'air chaud sortant de l'avion entre en contact avec l'air froid extérieur de la condensation se forme au niveau de ces particules, ainsi les nuages emprisonnent la chaleur et participent donc au réchauffement climatique.

Plusieurs facteurs influent sur la quantité de gaz à effet de serre rejetée : le nombre de voyageurs, le nombre de kilomètres parcourus, le type d'avion et sa consommation, l'altitude de vol, etc.

7.2 Déplacement en voiture

La voiture est responsable d'une part non-négligeable de notre empreinte carbone. Selon l'ADEME, les véhicules particuliers sont responsables de plus de la moitié de l'empreinte carbone des Français, qui est estimée à environ 31% suivi des poids lourds. Le taux d'émission de gaz à effet de serre, cependant, diffère du type de carburant utilisé. En effet, les voitures à essence ont une empreinte carbone élevée (2,9 T CO₂e libérées par la combustion d'essence), elles produisent en moyenne 0.200 kg CO₂e/km. Contrairement aux voitures diesel qui ont une empreinte carbone moins élevée avec une moyenne de 0.190 kg CO₂e/km,, elles consomment en effet moins de carburant, néanmoins elles émettent un nombre élevé de particules fines qui polluent beaucoup. Les voitures GPL consomment jusqu'à 30% de plus de carburant que les voitures à essence, et produisent en moyenne 0.192 kgCO₂e/km. Leur inconvénient est qu'elles émettent beaucoup de monoxyde de carbone, qui est un gaz très toxique. Les véhicules à l'E85 rejettent peu de CO₂ dans l'atmosphère (0.183 kgCO₂e/km). En effet, le bioéthanol est un biocarburant d'origine végétale qui compense ses émissions de CO₂. Cependant, il n'est pas très développé en France à cause de son réseau de distribution limité.

Quant aux véhicules électriques, elles sont, en effet, moins polluantes, l'empreinte carbone d'un véhicule électrique est deux fois moins élevée que celle d'un véhicule thermique. Mais il ne faut pas oublier la pollution liée à leur fabrication. Ces véhicules fonctionnent avec une batterie lithium, on estime qu'environ 75% de leur empreinte écologique se fait en amont. Selon l'ADEME, une voiture électrique cœur de gamme produira en moyenne 0.103 kg CO₂e/km. Et en dernier les voitures hybrides, selon l'ADEME, un véhicule hybride cœur de gamme produira entre 0.147 et 0.232 kg CO₂e/km selon son type de propulsion hybride.

7.3 Déplacement en train

Pour bien illustrer le coût en CO₂ des trains (TGV, train intercity et TER), nous allons comparer le coût en carbone de différents trajets effectués en train et en avion.

Prenant comme exemple le trajet Paris-Toulouse. Selon le ministère de l'Écologie, en moyenne chaque passager d'un vol est responsable de 79 kilos d'équivalent CO₂, contre 1,4 kg CO₂e pour chacun des 684 passagers d'un TGV rempli. On constate donc qu'en prenant l'avion un passager émet 56 fois plus de CO₂ qu'en TGV. Pour ce qui est des trains intercity, sur un trajet comme Toulouse-Marseille, l'avion relâche environ 62,1 kgCO₂e contre 2,2 kgCO₂e par passager en train. Et en dernier, le TER qui lui roule parfois encore propulsé par des motrices diesel. Selon la SNCF, leur empreinte carbone est d'environ 24,81 gCO₂e par passager et par km. Le TER est donc moins écologique, ceci dit, bien qu'il soit 14 fois pire qu'un TGV, il reste moins polluant qu'un avion.

En conclusion, le TGV reste l'un des moyens de transport le plus écologique, avec une émission de 13 g CO₂/km.

7.4 Train ou voiture

Comme on peut le constater grâce à cette étude, se déplacer en train est plus responsable que tout le reste pour la planète. Pour bien illustrer ça, on compare le pourcentage de CO₂ émis pour un aller/retour depuis Paris en voiture ou en train:

Destination depuis Paris	Train	Voiture seul.e
Marseille	0.16%	14.9%
Lyon	0.10%	8.9%
Bordeaux	0.12%	11.2%
Toulouse	0.14%	13.1%
Rennes	0.07%	9.6%

figure7: Pourcentage de CO2 émis pour un aller/retour depuis Paris. Source: SNCF

On le voit bien, un Paris Marseille en train émet presque 100 fois moins de CO2 qu'en voiture en voyageant seul (e).

8 Le bilan carbone de l'institut d'Alembert.

Dans cette dernière partie du rapport, je vais présenter les statistiques des émissions carbone de l'institut D'Alembert, en expliquant la démarche suivie pour l'évaluation de l'empreinte des différents postes d'émission de GES. Je vais aborder également les difficultés rencontrées lors de la construction de ce bilan.

8.1 Difficultés rencontrées

Lors de l'établissement du bilan carbone de l'institut, j'ai rencontré quelques difficultés dont la faible précision des calculateurs de GES sur la mesure de l'empreinte carbone des déplacements, j'ai donc dû utiliser plusieurs calculateurs pour chaque itinéraire en prenant ensuite la moyenne et l'erreur relative. Toujours dans les émissions carbone des déplacements, l'autre difficulté rencontrée était sur les déplacements domicile-travail. Suite au questionnaire établi, on a eu 39 réponses sur 170, j'ai donc quantifié l'émission carbone des déplacements des 39 personnes et extrapolé les résultats sur les 131 autres agents (permanent et non permanent). Pour les achats informatiques, le coût CO2 des petits achats ne figurait pas sur les factures, il n'a pas été mesuré par les fournisseurs ni même par l'ADEME. Pour le chauffage, j'avais peu d'informations sur le/les mode(s) de chauffage utilisés à Jussieu, contrairement au campus de Saint-Cyr, qui nous ont fourni des données détaillées sur les modes de chauffage utilisés (chauffage collectif, chauffage individuel, radiateurs électriques...), je n'avais pas d'idées aussi sur la performance des bâtiments de l'institut à Jussieu.

Dans les statistiques des émissions carbone de l'institut qui seront présentées par la suite, je n'ai pas pris en compte l'empreinte carbone de la climatisation, par manque de fiches techniques détaillées des maintenance des climatiseurs. Donnée qui est très importante dans ce type d'étude, car comme je l'ai mentionné avant, les installations frigorifiques ne sont pas parfaitement hermétiques.

8.2 Les statistiques des émissions carbone de l'institut d'Alembert

8.2.1 Empreinte carbone totale de d'Alembert

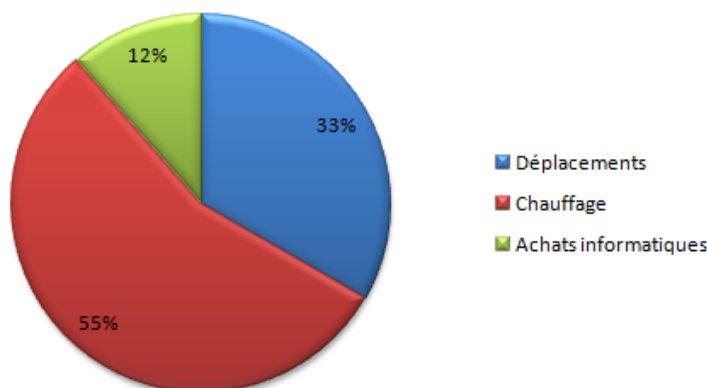


figure8: Empreinte carbone totale de l'institut

On a une empreinte totale de 510 T CO₂e pour l'année 2021. Les déplacements (domicile-travail et déplacements pour missions) sont responsables de 170 T CO₂e, le chauffage qui est le plus gourmand en émission carbone avec une empreinte de 282 T CO₂e, et en dernier les achats informatiques (ordinateurs portables, ordinateurs fixes et serveurs) qui eux sont responsables de 52 T CO₂e.

8.2.2 Empreinte carbone des déplacements

Nous allons voir dans cette partie, l'empreinte carbone selon les types de déplacements (domicile-travail et déplacements pour missions), et selon le mode de transport utilisé.

Pour quantifier l'empreinte carbone des déplacements, j'ai utilisé plusieurs calculateurs disponibles sur Internet. (climatmundy, ecotree, myclimat, greentriper, calculateursncf et celui de l'ademe)

Empreinte carbone selon les types de déplacements

■ Missions(entrantes/sortantes) ■ Domicile-travail

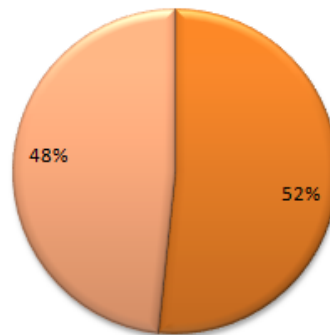


figure9: Empreinte carbone selon les types de déplacements

Les déplacements domicile-travail et entre les sites (entre Jussieu et Saint-Cyr) sont responsables de 82 T CO₂e. Pour quantifier cette empreinte, j'ai pris en compte les 39 réponses que j'ai reçues suite au questionnaire proposé, ensuite, j'ai fait une extrapolation sur le reste des agents. (131 autres agents)

Pour quantifier l'empreinte des déplacements en missions, j'ai demandé à l'équipe du SAF de l'institut les informations suivantes : ville de départ, ville de destination, mode de transport utilisé, type de mission et l'âge des missionnaires. En utilisant les différents calculateurs de GES des déplacements, on a au final une empreinte de 88 T CO₂e pour les déplacements pour missions.

Empreinte carbone des déplacements pour mission par mode de transport : Pour les déplacements pour mission, on avait besoin de quantifier l'empreinte carbone selon les modes de transport utilisés afin d'arriver à identifier des leviers pour réduire cette empreinte carbone.

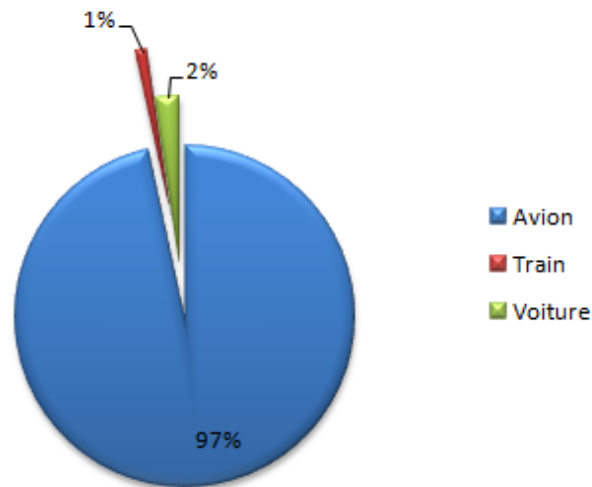


figure10:Empreinte carbone déplacements pour mission par mode de transport

On voit bien que l'avion est responsable de la plus grande part des émissions carbone des déplacements pour missions, son empreinte est de 85 T CO₂e, ensuite le train avec une empreinte carbone de 2 T CO₂e, et en dernier la voiture qui est responsable de seulement 0,5 T CO₂e.

Empreinte carbone des déplacements pour mission en avion selon les types de vols : Il faut donc agir au niveau des déplacements en avion pour essayer de réduire son empreinte carbone, et pour ce faire, j'ai voulu connaître l'empreinte carbone liée aux vols nationaux et internationaux. L'idée étant de privilégier le train pour les trajets de <6h à la place de l'avion.

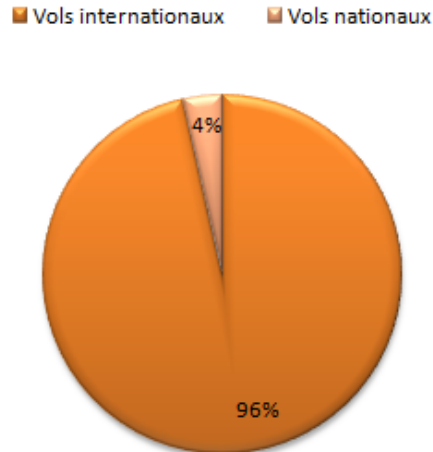


figure11:Empreinte carbone déplacements pour mission par type de vol

Dans les données que j'ai reçu de la part du SAF, le seul trajet possible que j'ai trouvé sur lequel l'hypothèse est applicable est un PARIS- TOULOUSE. Après calcul (en remplaçant l'avion par le train pour un Paris-Toulouse), on réduit l'empreinte des déplacements de seulement 1%. Ce qui n'est clairement pas énorme.

Empreinte carbone des déplacements domicile-travail par mode de transport :

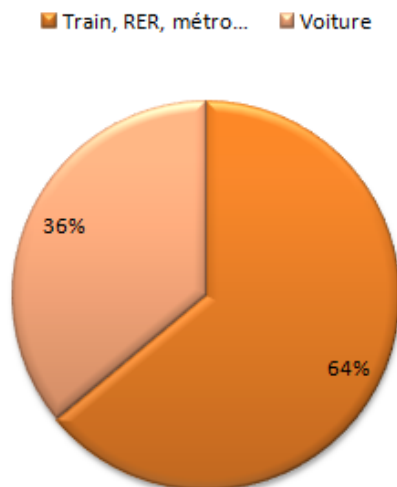


figure12: Empreinte carbone des déplacements domicile-travail par mode de transport

Pour se rendre à l'institut d'Alembert à Jussieu, la plupart des agents se déplacent en transports en commun. L'empreinte carbone de ces derniers est de 52 T CO₂e. Pour les déplacements en voiture on a une empreinte de 32 T CO₂e, généralement, c'est quand il y a nécessité de transporter des équipements lourds entre Jussieu et Saint-Cyr. On a aussi des agents qui se déplacent en vélo, trottinette ou à pied, leur empreinte carbone est donc nulle.

8.2.3 Empreinte carbone du chauffage

Pour quantifier l'empreinte carbone du chauffage. J'avais besoin de connaître les modes de chauffages de l'institut, ainsi que les m² chauffés. Ensuite, j'ai utilisé les données proposées par l'ADEME(la consommation en Kwh/m² selon l'énergie finale utilisée et l'âge du logement, ainsi que l'empreinte carbone des différents systèmes de chauffage).

Tableau des consommations selon l'énergie finale utilisée :

Energie finale utilisée et âge du logement	kwh/m ² .an(moyenne)	Surface moy
Gaz naturel, appts < 1975, chauff. Cent. collectif	207	66
Gaz naturel, appts > 1975, chauff. Cent. collectif	196	66
Gaz naturel, appts < 1975, chauff. Individuel	146	71
Chauffage électrique, apparts avant 1975	98	49
Chauffage électrique, apparts après 1975	65	53

figure13: Consommation par Kwh/m² selon l'énergie finale utilisée et l'âge du logement. Source: ADEME

Tableau de l'empreinte carbone selon les systèmes de chauffage:

Système de chauffage	CO ₂ (gCO ₂ e/kwh)
Chaudière à bois	30
Pompe à chaleur	49
Réseau de chaleur	100
Radiateur électrique	147
Chaudière gaz	227
Chaudière fioul	324

figure14: Empreinte carbone en (g CO₂e/kwh) selon les systèmes de chauffage. Source ADEME

Pour les bâtiments de l'institut à Jussieu, comme je n'avais pas d'informations sur le mode de chauffage utilisé ni même sur les performances des bâtiments, ma tutrice et moi avons supposé que tout est chauffé avec des chaudières à gaz. Pour les bâtiments de Saint-Cyr, on connaît à la fois les systèmes de chauffage ainsi que les performances des bâtiments.

On prenant en compte ces données, on a pu quantifier l’empreinte du chauffage qui est résumé dans le tableau suivant :

Institut	Surface chauffé	système de chauffage	Empreinte carbone (T CO2e/an)
Bâtiments de l’institut à Saint-Cyr	3856 m2	chaudière à gaz	171,67
Bâtiments de l’institut à Saint-Cyr	2313 m2	radiateur électrique	22,6
Bâtiments de l’institut à Jussieu	1971,37 m2	chaudière à gaz	87,71

figure15:Empreinte carbone du chauffage

8.2.4 Empreinte carbone des achats informatiques

Dans les statistiques qui vont être présentées dans cette partie, j’ai pris en compte seulement l’empreinte carbone des ordinateurs portables, les ordinateurs fixes et les serveurs.

Grâce aux données reçues de la part des membres du SAF, ainsi qu’aux facteurs d’émission proposés par l’ADEME et DELL, j’ai réussi à évaluer l’empreinte carbone des achats informatiques.

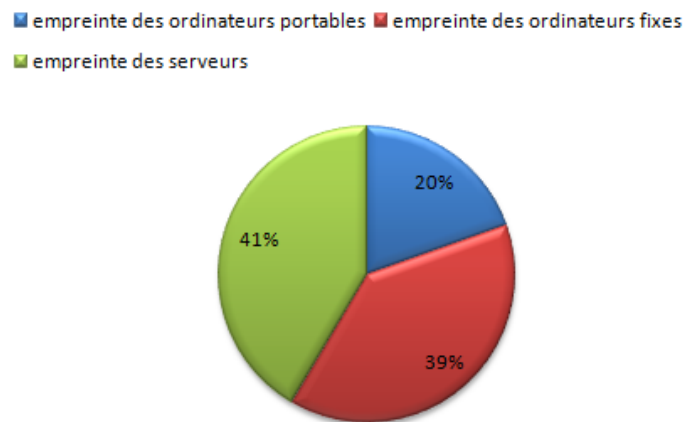


figure16:Empreinte carbone des achats informatiques

Malgré la faible quantité de serveurs achetés en 2021 par l’institut (5 serveurs), leur empreinte carbone reste élevée (24 T CO2e) comparé à d’autres achats informatiques. On peut donc en déduire que l’achat d’un serveur à une empreinte carbone très importante, par exemple, un serveur DELL PowerEdge C4140 à une empreinte de 6 800 kgCO2e.

Les ordinateurs fixes sont responsables de 23 T CO2e, et enfin les ordinateurs fixes avec une empreinte de 11 T CO2e.

9 Conclusion

Tout au long du stage, il a été question d’évoluer l’empreinte carbone de l’institut d’Alembert pour l’année 2021. Malgré les difficultés rencontrées, un premier bilan carbone a été réalisé, qui donne une idée sur les émissions GES de l’institut, pour cela un séminaire a été présenté par moi-même jeudi 16 juin, ou j’ai partagé les statistiques des émissions carbone de d’Alembert avec les membres de l’institut(lien du séminaire: https://youtu.be/aZEW4HEf_w). Le travail effectué va ainsi servir de base pour les prochains bilans carbone, qui pourront le compléter en se penchant plus sur l’empreinte carbone de tous les achats et aussi sur l’empreinte de la climatisation afin d’apporter plus de précision et avoir un bilan carbone complet.

Il me reste plus qu’à entrer ces résultats sur le calculateur GES 1point5 mis en place par le collectif Labos 1point5, afin qu’ils puissent entrer le bilan total dans les émissions carbone de la recherche française pour l’année 2021.

10 Bibliographie

- [1] Société Intarcon *Types de gaz réfrigérants les plus usités en réfrigération*, Octobre 22, **consulté le 30/03/2022** à l'adresse <https://www.intarcon.com/fr/refrigerants-plus-usites/>.
- [2] Balthazar Dadvisard. *Réduire l'empreinte carbone de votre informatique*, Juin 2021, **consulté le 29/03/2022** à l'adresse <https://islean-consulting.fr/fr/transformation-digitale/reduire-empreinte-carbone-informatique/>.
- [3] Société Recygo *Tout savoir sur le papier recyclé*, Aout 2020, **consulté le 21/04/2022** à l'adresse <https://www.recygo.fr/blog/dossier/papier-recycle>.
- [4] Anaïs Fleury Manager chez Carbo *Que représente (réellement) une tonne d'équivalent CO2 ?*, **consulté le 15/03/2022** à l'adresse <https://www.hellocarbo.com/blog/calculer/tonne-equivalent-co2/>.
- [5] Caroline Dusanter *Quel est l'impact environnemental du chauffage ?*, Mars 2021 **consulté le 13/04/2022** à l'adresse <https://www.choisir.com/energie/articles/124022/quel-est-limpact-environnemental-du-chauffage>.
- [6] L'équipe Choisir.com *Comment fonctionne une Pompe à chaleur (PAC) ?*, Octobre 2020 **consulté le 13/04/2022** à l'adresse <https://www.choisir.com/energie/articles/104396/la-consommation-electrique-dune-pompe-a-chaleur-pac>.
- [7] Société Greenly *Quelle est l'empreinte carbone d'un mail ?*, Mars 2021 **consulté le 13/05/2022** à l'adresse <https://www.greenly.earth/blog-fr/quelle-est-lempreinte-carbone-dun-mail>.
- [8] Les Pépites Tech *Numerique vs papier : le match qui va vous étonner*, Juillet 2021 **consulté le 18/05/2022** à l'adresse <https://lespepitestech.com/blog/2021/07/16/numerique-vs-papier-le-match-qui-va-vous-etonner>.
- [9] Site du collectif labos1point5 *Réduire l'empreinte de nos activités de recherche sur l'environnement*, **consulté tout au long du stage** à l'adresse <https://labos1point5.org/>.
- [10] ADEME *Documentation base carbone*, **consulté tout au long du stage** à l'adresse [//bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLoad_DOC_FR/index.htm?chauffage.htm](https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLoad_DOC_FR/index.htm?chauffage.htm).
- [11] Fournisseurs electricite by Selectra *Bilan Carbone : quelle est l'empreinte carbone d'un avion ?*, Novembre 2021 **consulté le 15/03/2022** à l'adresse <https://www.fournisseurs-electricite.com/guides/environnement/bilan-carbone/avion>.
- [12] Fournisseurs electricite by Selectra *Bilan carbone d'une voiture essence, diesel et électrique*, Novembre 2021 **consulté le 16/03/2022** à l'adresse <https://www.fournisseurs-electricite.com/guides/environnement/bilan-carbone/voiture>.
- [13] Greenly *Empreinte carbone et comparatif par type de transport*, Janvier 2021 **consulté le 16/03/2022** à l'adresse <https://www.greenly.earth/blog-fr/empreinte-carbone-comparatif-transports>.
- [14] Cyber-Jay *Comment se calcule l'empreinte carbone d'un MacBook ?*, Mars 2022 **consulté le 09/06/2022** à l'adresse <https://www.cyber-jay.fr/actualite/comment-se-calcule-lempreinte-carbone-dun-macbook>.
- [15] DELL *Empreinte carbone des produits*, **consulté le 08/06/2022** à l'adresse <https://www.dell.com/fr-fr/dt/corporate/social-impact/advancing-sustainability/sustainable-products-and-services/product-carbon-footprints.htm#tab0=0>.
- [16] SNCFconnect *comparateur de mobilité*, **consulté le 16/03/2022** à l'adresse <https://www.sncf-connect.com/train/comparateurco2>.

[17] Greentripper *Calculer et compenser votre empreinte CO2*, consulté tout au long du stage à l'adresse <https://www.greentripper.org/calculator.aspx?cl=fr&ol=6>.

[18] Climatmundi *Calculateur CO2*, consulté tout au long du stage à l'adresse <https://www.climatmundi.fr/index.phtml?lng=FR&srub=6&InitEcommerce=true&-ecommerce->.