

Projet multidisciplinaire

Rapport écrit



"Phelma 2050"

Arno CARRIN

Simon MARMION

Laurent SABY

Louis TRZEWIK

3A EPEE - Année scolaire 2022/2023

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Table des matières | 1 |
| Table des figures | 2 |
| Tableaux | 2 |
| Remerciements | 3 |
| Définitions | 4 |
| Introduction | 5 |
| 1 - Mise en contexte | 6 |
| 1) Contextualisation de l'étude | 6 |
| 2) Limites et méthodes employées | 6 |
| 2 - Bilan carbone de la construction des bâtiments | 8 |
| 1) Impact des chantiers | 8 |
| 2) Bâtiments du campus de Saint Martin d'Hères | 8 |
| 3) Bâtiments du site Minatec | 11 |
| 3 - Bilan carbone des dépenses de l'école | 13 |
| 1) Achats considérés, et méthodes de calcul | 13 |
| 2) Résultats obtenus | 16 |
| 4 - Interprétation des résultats | 19 |
| 1) Bâtiments | 19 |
| 2) Achats | 19 |
| 3) Bilan complet | 20 |
| Conclusion | 21 |
| Références bibliographiques | 22 |
| Annexes | 23 |

Table des figures

| | |
|---|-----------|
| Figure 1 : vue satellite de Phelma Campus | 9 |
| Figure 2 : calcul de la surface du bâtiment A du Campus | 10 |
| Figure 3 : calcul de la surface du bâtiment C du Campus | 10 |
| Figure 4 : calcul de la surface du bâtiment de recherche du LEPMI | 10 |
| Figure 5 : diagramme circulaire des achats réalisés par Phelma en 2019 | 14 |
| Figure 6 : figure de l'ADEME détaillant l'empreinte équivalent carbone d'un ordinateur fixe | 15 |
| Figure 7 : figure de l'ADEME détaillant l'empreinte équivalent carbone de différents modes de transport pour un trajet de 300 km | 16 |
| Figure 8 : diagramme circulaire des émissions carbone par secteur en 2019 | 17 |
| Figure 9 : diagramme circulaire des émissions carbone équivalent par secteur sur une année | 21 |
| Figure 10 : diagramme circulaire de la répartition des scopes d'émissions pour la partie enseignement d'un étudiant de Phelma | 22 |

Tableaux

| | |
|---|-----------|
| Tableau 1 : facteurs d'émission au m ² des bâtiments en fonction de leur type et de leur activité | 9 |
| Tableau 2 : surfaces et émissions de CO _{2eq} à la construction des bâtiments du Campus | 11 |
| Tableau 3 : surfaces et émissions de CO _{2eq} à la construction des bâtiments de Minatec | 12 |
| Tableau 4 : valeurs des émissions de CO _{2eq} par secteur en 2019 | 17 |
| Tableau 5 : Impact carbone global de Phelma sur une année | 20 |

Remerciements

- *Mr. Patrice PETITCLAIR, Directeur des Études à Phelma,*
- *Mme. Laurence NEAULT, gestionnaire du service Finances de Phelma,*
- *Mr. Sébastien FAUVEL, Responsable du Patrimoine Grenoble INP,*
- *Mr. Jacques SCHMITT, Directeur Mission Projets Stratégiques et Transition Energétique,*
- *Mme. Isabella ZIN, enseignante-chercheuse en climatologie et Vice-Présidente du Développement Durable à Grenoble INP,*
- *Jeanne BARRIOL, Augustin SOYER et Lou-Anne MICHEL pour leur travail réalisé l'an dernier et pour les conseils qu'ils nous ont prodigué,*
- *Mr. Raphaël BOICHOT, enseignant à Phelma dans la filière ÉPÉE, qui a répondu à nos questions et nous a aiguillé tout au long du projet.*

Définitions

Scope 1 : émissions directes de gaz à effet de serre qui proviennent de sources contrôlées, par exemple l'utilisation d'une voiture thermique.

Scope 2 : émissions indirectes de gaz à effet de serre en lien avec l'achat d'électricité, de chaleur ou de vapeur.

Scope 3 : toutes les émissions indirectes qui n'appartiennent pas au scope 2 comme l'achat de matériel, l'utilisation de services ou de produits.

NACRES : Nomenclature Achats Recherche Enseignement Supérieur

Introduction

L'objectif de ce projet est de compléter le travail réalisé l'année dernière par le groupe d'étudiants de la filière ÉPÉE constitué de Jeanne BARRIOL, Augustin SOYER et Lou-Anne MICHEL, sur l'impact carbone de l'école Grenoble INP - PHELMA. Leur travail s'est principalement focalisé sur ce qu'on appelle les scopes 1 et 2.

Nous avons décidé de compléter cette étude par une quantification des émissions de gaz à effet de serre liées au scope 3. En effet, les émissions du scope 3 sont généralement les plus difficiles à estimer (par rapport aux émissions du scope 1 et 2) mais représentent bien souvent la majorité des émissions de gaz à effet de serre d'une entité. Ce rapport a donc pour but de présenter deux secteurs estimés comme ayant un fort impact sur l'émission de gaz à effet de serre de l'école : les dépenses annuelles et la construction des bâtiments. Pour cela, bien que ce projet avait avant tout un objectif calculatoire, nous avons dû rencontrer et discuter avec de nombreuses personnes, afin d'obtenir soit des informations, soit des idées pouvant nous aider dans la réalisation du projet. Notre avantage, comparé au groupe nous ayant précédé, était que nous pouvions nous baser sur leur travail et que notre cadre d'étude était bien mieux défini.

Ce rapport a donc pour but d'apporter des précisions quant au travail réalisé en présentant les principaux résultats éludés l'an passé.

1 - Mise en contexte

1) Contextualisation de l'étude

De nos jours, nous faisons face à de multiples problèmes à l'échelle mondiale : surconsommation énergétique, surpopulation, pollution de l'air et de l'eau, appauvrissement de la biosphère, déplétion des ressources, et réchauffement climatique. Pour contrer ces problèmes du mieux possible, comme l'explique S.Krumdieck dans son livre [1], il faut notamment consommer moins et de tout. Ces aspects ont aussi été développés dans le cours de Génie de la Transition proposé cette année par Mr Raphaël Boichot. Ainsi, la culture scientifique acquise à travers ces enseignements prodigués nous a aidé dans la réalisation de ce projet.

De la même manière que le groupe de l'an dernier, nous avons donc voulu commencer à notre échelle, en évaluant l'impact de notre école sur l'environnement au travers de son empreinte carbone. La problématique ayant guidé nos pas est donc sensiblement similaire à celle ayant motivé le rapport de l'an dernier : **"Sur quels facteurs Phelma peut jouer afin de réaliser une transition énergétique concrète en réduisant son impact carbone ?"**.

En effet, en Europe, le secteur de l'éducation est en moyenne responsable de 9,1% de l'empreinte carbone d'un pays [2]. Il peut donc être intéressant de connaître les champs qui ont le plus d'impact sur l'émission de CO_{2eq}. Le rapport de nos prédécesseurs se focalisait sur 5 axes majeurs :

- le chauffage et l'électricité
- les mobilités quotidiennes (domicile - école)
- les mobilités à l'international, qui font partie du cursus ingénieur
- l'achat de matériel informatique
- la restauration

Ils en ont conclu que le bilan de gaz à effet de serre de Phelma pour l'année 2019 était de **1 353 ± 515 tonnes de CO₂ équivalent**.

A travers ce rapport, nous allons voir si les émissions liées au scope 3, à savoir la construction des bâtiments et les dépenses réalisées annuellement ont un impact significatif sur le bilan carbone calculé l'année dernière.

2) Limites et méthodes employées

Bien que largement plus défini que le travail réalisé par nos prédécesseurs, le projet restait très ouvert, et une méthodologie efficace a dû être mise en place. Cette méthodologie, censée initialement se confondre avec celle mise en place par le groupe de l'an dernier a cependant été fortement perturbée par les problèmes informatiques ayant frappé le groupe Grenoble INP à partir du mois de décembre 2022.

Nous avons pour cela suivi les étapes suivantes :

- **Bibliographie** : Nous avons dans un premier temps mené des recherches bibliographiques sur le scope 3 et plus précisément sur l'impact carbone de la

construction d'un bâtiment, de part la production des matières premières ou leur transport mais aussi l'achat de biens et services en termes de coût de production et de livraison.

- **Entretiens** : Nous avons ensuite démarché l'administration de Phelma ainsi que de nombreuses personnes de Grenoble INP travaillant dans un domaine en rapport avec l'étude que nous souhaitons mener. C'est à ce propos que nous avons pu échanger avec Mr Fauvel et Mme Néault, au sujet respectivement des bâtiments et des factures.
- **Bilans** : À l'aide de ces entretiens et de nos recherches bibliographiques, nous avons ainsi pu réaliser les bilans carbone sur les dits bâtiments et les achats annuels, afin de cibler les sources principales d'émissions de gaz à effet de serre.
- **Analyse des résultats et mise en parallèle avec le rapport "Phelma en 2050"** : Nous avons enfin pu interpréter nos résultats, et avons complété le bilan carbone réalisé l'année précédente.

2 - Bilan carbone de la construction des bâtiments

Afin de réaliser le bilan carbone lié à la construction des bâtiments de l'école, nous avons suivi la méthodologie de l'ADEME en utilisant une approche par les surfaces construites à l'aide de ratio moyens. Ainsi, après avoir déterminé les surfaces des différents bâtiments et en connaissant les matériaux utilisés, il a été possible d'en déduire l'impact carbone des différentes infrastructures des deux campus.

Cependant, les facteurs d'émissions proposés par l'ADEME ne prennent pas en compte l'impact carbone des chantiers. Il a donc fallu vérifier que ce dernier était négligeable dans notre bilan.

1) Impact des chantiers

La publication de *J. Hong et al. (2014)* [3] fait le bilan carbone d'un bâtiment en béton armé d'une surface de 11 508 m² construit entre 2008 et 2010. L'étude tient compte du carburant utilisé pour la construction, des véhicules, des équipements, de la consommation d'électricité sur le site, de la fabrication et du transport des matériaux, de la construction et du transport des équipements de construction. Les résultats de l'étude montrent que près de 93% de toutes les émissions de CO₂ équivalent sont dues à la production des matériaux de construction. En comparaison, 0,25% des émissions sont dues à la consommation directe des engins de chantier.

De nombreuses années séparent la construction du bâtiment de cette étude (2008) et celle du Campus de PHELMA (1961). De plus, les matériaux utilisés pour les bâtiments de Minatec, du Campus et de cette étude sont différents. Cependant, au vu des résultats assez tranchés de cette étude, nous avons fait l'hypothèse que l'impact carbone des chantiers était négligeable pour les deux campus de notre étude. Nous avons ainsi pu utiliser les valeurs fournies par l'ADEME.

2) Bâtiments du campus de Saint Martin d'Hères

Pour les bâtiments du campus, les édifices retenus dans le calcul des émissions de CO_{2eq} ont été les suivants :

- le bâtiment A
- le bâtiment C-Tp
- le bâtiment de recherche du LEPMI



Figure 1 : vue satellite de Phelma Campus

Les consommations intermédiaires (transports, fabrication des matériaux, etc.) sont englobées dans cette étude, car déjà prises en compte dans les valeurs de l'ADEME et n'ont donc pas fait le sujet d'investigations plus avancées.

Les bâtiments du Campus ayant été construits dans le début des années 60, nous considérons qu'ils sont composés majoritairement de béton.

Les valeurs d'émissions de CO_{2eq} choisies sont donc celles correspondant à des bâtiments d'enseignement pour une construction béton pour les bâtiments A et C-TP et un bâtiment industriel pour le bâtiment recherche. Les données du tableau ci-dessous sont tirées d'une base de données de l'ADEME [4].

| Type de bâtiment | kg équivalent CO2 par m ² | |
|-----------------------|--------------------------------------|--|
| | Construction métallique (hangar...) | Construction béton (immeuble de bureaux) |
| Bâtiments agricoles | 220 | 656 |
| Bâtiments industriels | 275 | 825 |
| Garages | 220 | 656 |
| Commerces | 183 | 550 |
| Enseignement | 147 | 440 |
| Santé | 147 | 440 |
| Loisirs | 169 | 506 |

Tableau 1 : facteurs d'émission au m² des bâtiments en fonction de leur type et de leur activité

Les mesures de surface des bâtiments ont ensuite été réalisées via la vue satellite de Google Maps et sont présentées ci-après.

Bâtiments A (Administration) :



Figure 2 : calcul de la surface du bâtiment A du Campus

Surface : 1465 m²

Bâtiments C (TP) :



Figure 3 : calcul de la surface du bâtiment C du Campus

Surface : 1048 m²

Bâtiment recherche LEPMI :



Figure 4 : calcul de la surface du bâtiment de recherche du LEPMI

Surface : 1960 m²

Le calcul des émissions liées aux bâtiments du campus a ensuite été réalisé de la manière suivante :

- Bâtiments A et C considérés comme des bâtiments d'enseignement avec construction en béton : 0,440 t CO_{2eq} / m².
- Bâtiment de recherche du LEPMI considéré comme un bâtiment industriel avec construction en béton : 0,825 t CO_{2eq} / m².
- Émissions CO_{2eq} = Surface*nbr d'étages*émission par m²

| | Bâtiments A (Administration) | Bâtiments C (TP) | Bâtiment recherche LEPMI | Total |
|---|---------------------------------|---------------------|--------------------------------|--------|
| Surface (m ²) | 1 465 | 1 048 | 1 960 | 13 914 |
| Nombre d'étages | 2 | 3 | 4 | |
| Émissions de CO _{2eq} à la construction (t CO _{2eq}) | 1 289 | 1 383 | 6 468 | 9 140 |

Tableau 2 : surfaces et émissions de CO_{2eq} à la construction des bâtiments du Campus

Ces bâtiments ont été construits entre 1961 et 1963. Ils sont donc utilisés depuis environ soixante ans. Connaissant les émissions totales et l'âge des bâtiments, nous pouvons ainsi en déduire les émissions annuelles de CO_{2eq} liées à la construction du campus de Phelma : **152 t CO_{2eq}/an**.

3) Bâtiments du site Minatec

Pour les bâtiments du site Minatec, les édifices retenus dans le calcul des émissions de CO_{2eq} ont été les suivants :

- le bâtiment M
- le bâtiment Z
- le bâtiment du Crous
- le bâtiment Auditorium

La vue satellite du site Minatec étant floutée sur les sites (Google Earth, Maps), des estimations de la surface des bâtiments ont été réalisées via les plans disponibles sur Maps (vue plan et non vue satellite) et les photos des plans d'accès disponibles sur les sites de Minatec.

Les photos n'étant pas disponibles seules les surfaces obtenues seront données ici. Les résultats obtenus sont présentés ci-après.

- Bâtiments M, Z et Auditorium considérés comme des bâtiments d'enseignement avec construction en béton : 0,440 t CO_{2eq} / m².
- Bâtiment du CROUS considéré comme un bâtiment commercial avec construction en béton : 0,550 t CO_{2eq} / m².
- Émissions CO_{2eq} = Surface*nbr d'étages*émission par m²

| | Bâtiment A (Auditorium) | Bâtiment Z | Bâtiment M | CROUS | Total |
|--|----------------------------|------------|------------|-------|-------|
| Surface (m ²) | 1410 | 450 | 1330 | 600 | 11890 |
| Nombre d'étages | 2 | 7 | 4 | 1 | |
| Émissions de CO _{2eq} à la construction (t CO _{2eq}) | 1241 | 1386 | 2341 | 330 | 5297 |

Tableau 3 : surfaces et émissions de CO_{2eq} à la construction des bâtiments de Minatec

Les bâtiments de Minatec ont été construits entre 2004 et 2006. Leur durée de vie estimée est de cinquante ans. Nous avons calculé deux émissions annuelles différentes :

- émissions en tenant compte de la durée de vie actuelle des bâtiments (17 ans) qui est de **312 t CO_{2eq}/an**
- émissions en tenant compte de la durée de vie annoncée des bâtiments (50 ans) qui est de **106 t CO_{2eq}/an**

Les émissions basées sur la durée de vie annoncée nous paraissent être l'approche la plus pertinente pour notre étude.

Nous pouvons alors calculer les émissions annuelles de l'ensemble des bâtiments de PHELMA qui s'élèvent à **258 t CO_{2eq}/an**.

Le facteur d'incertitudes par défaut donné par l'ADEME est de 50%. Cette valeur semble cohérente avec la précision des valeurs mesurées, nous avons donc fait le choix de la garder. Nous avons donc finalement pour l'ensemble des bâtiments de Phelma :

258 ± 129 t CO_{2eq}/an

3 - Bilan carbone des dépenses de l'école

Les dépenses de l'école sont nécessairement très nombreuses afin de pouvoir continuer à avoir un matériel à la pointe de la technologie, une communication efficace ou encore des ordinateurs performants capables de faire tourner les logiciels dernièrement développés. Toutefois, ces dépenses impliquent nécessairement des émissions de carbone d'une manière ou d'une autre, de part l'extraction des matières premières, la fabrication des produits et le transport de ces derniers jusqu'à l'école. Nos prédécesseurs ont réalisé un bilan carbone partiel des dépenses en faisant l'hypothèse que le renouvellement du parc informatique était la principale source d'émission carbone. Nous avons pour but dans cette partie, de vérifier cette hypothèse à travers un bilan plus complet des dépenses et d'en déduire son impact sur les émissions globales de l'école.

1) Achats considérés, et méthodes de calcul

Suite à un entretien, Laurence NEAULT, gestionnaire du service Finance de Phelma, nous a fourni les dépenses de l'année 2019, avant l'épidémie de Covid-19. C'est sur cette base que nous allons nous appuyer. Une hypothèse forte sera émise lors de l'analyse des émissions liées aux dépenses : il s'agit de considérer que les émissions sont environ les mêmes chaque année : c'est à dire qu'il suffit d'analyser une seule année et de considérer que les deux autres années du parcours d'un étudiant à Phelma sont équivalentes du point de vue de l'empreinte carbone pour les achats.

Les dépenses ont toutes été regroupées à partir de leur nomenclature NACRES. Certaines dépenses ont été considérées comme ne générant pas directement des émissions de carbone : par exemple l'achat de licence pour des logiciels informatiques, ou encore des frais liés aux étudiants partis en échange dans une autre université (car déjà comptés dans les autres scopes). La somme d'argent totale dépensée que nous avons considérée dans cette étude est de 614 626,22 euros. Il a été choisi de ne pas considérer les regroupements d'achats par code NACRES dont la somme était inférieure à 3000 euros. Ces dépenses ne représentaient que 15% des dépenses de cette année.

En regroupant de nouveau ces dépenses par secteurs, on obtient le total suivant :

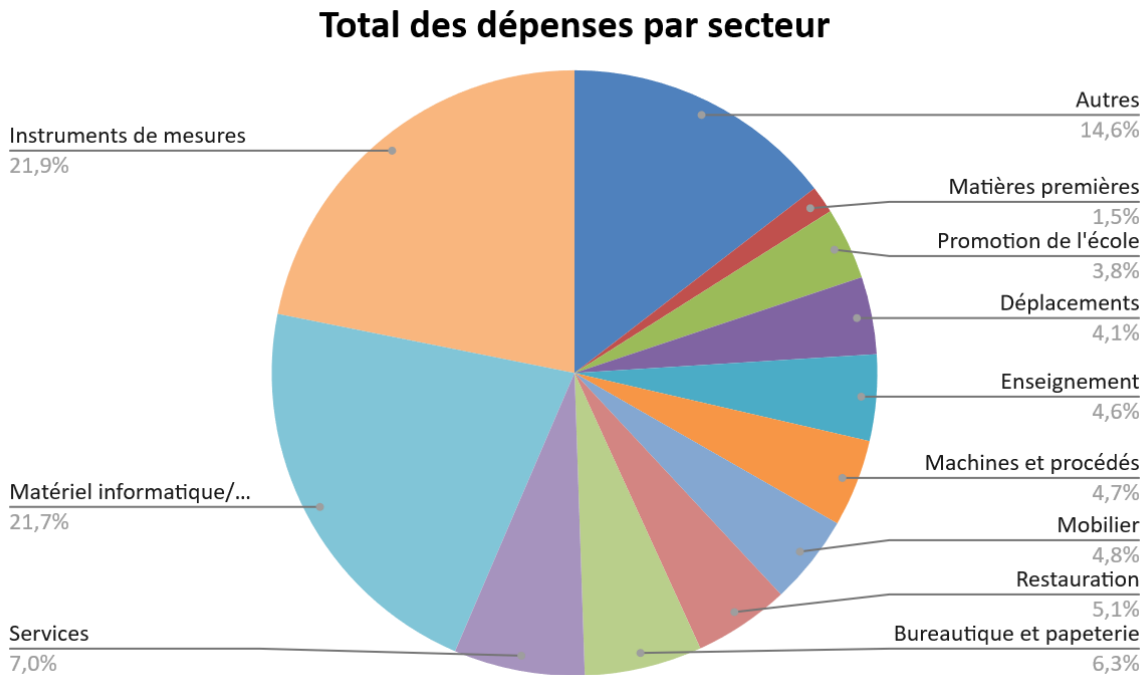


Figure 5 : diagramme circulaire des achats réalisés par Phelma en 2019

Dans la catégorie nommée "autres" se trouvent les achats dont le volume monétaire est inférieur à 3000 euros. Nous avons émis l'hypothèse que les parts monétaires et d'émissions étaient les mêmes pour ces petits achats. En faisant cela, il est possible que nous sous-évaluons son impact. C'est pourquoi nous intuitions que cette partie pourrait être responsable d'un maximum de 25% des émissions.

Afin d'associer émission de carbone et coût, plusieurs méthodes sont utilisées : dans un premier temps, des ratios monétaire sont utilisés afin de quantifier certains achats [4] & [5] , par exemple le mobilier pédagogique est associé à la catégorie "meubles et autres biens manufacturés" du tableau constituant l'**annexe 1**, soit un ratio monétaire de 500 kgCO_{2eq} / k€ HT. Il suffit simplement de multiplier ce ratio monétaire par le prix de la dépense pour obtenir les émissions de CO₂ équivalentes.

Néanmoins, les ratios monétaires ne sont pas très précis et nous pensons qu'ils ne sont pas suffisants pour certaines dépenses. En effet, certaines machines peuvent être onéreuses parce qu'elles sont à la pointe de la technologie ou encore qu'elles utilisent une technologie brevetée. Ainsi d'autres méthodes de calculs sont appliquées de manière plus situationnelle. Quelques exemples sont les suivants :

- Pour les ordinateurs, qui représentent une très grosse partie des dépenses, l'ADEME fournit la valeur précise de CO_{2eq} émis estimée à 467,59 kg CO_{2eq}.

Pour un ordinateur, l'ADEME fournit des chiffres très précis [6] :

Détail de l'empreinte de 1 ordinateur fixe (467,59 kg CO_{2e})

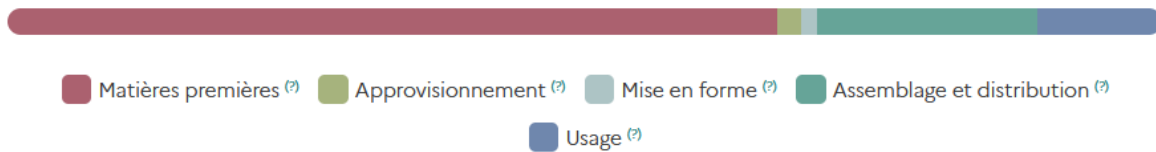


Figure 6 : figure de l'ADEME détaillant l'empreinte équivalent carbone d'un ordinateur fixe

Ici, la consommation électrique d'un ordinateur n'est pas prise en compte car seulement le scope 3 est traité lors de ce rapport. Nous considérons donc la valeur de 467,59 KgCO_{2eq}.

Nous avons estimé le prix moyen d'un ordinateur fixe aux alentours de 500 euros avec l'achat d'un écran. Nous avons donc pu en déduire le nombre supposé d'ordinateurs achetés à 67, ce qui correspond à une émission de 31176 kg CO_{2eq}.

- La machine qui a été achetée grâce au pack Charly est une machine de haute technologie assez onéreuse. Toutefois, en regardant la documentation du constructeur, le poids de la machine est de 81 kilos. Pourtant, son prix est approximativement de 20 000 euros soit le prix dépensé par l'école, ce qui signifie qu'une seule machine a été achetée. Nous avons choisi dans ce cas-là de calculer les émissions de carbone à partir du poids de la machine (d'après l'ADEME, 5,5 tonnes de CO_{2eq} / tonne de machine en moyenne) qui donnait une valeur nous paraissant plus pertinente dans ce cas que l'utilisation de ratios monétaires.
- Pour les transports des personnels de l'école, quasiment tous les déplacements sont effectués en trains. En sommant tous les coûts engendrés par ces déplacements, nous avons pu estimer la distance totale parcourue grâce à la moyenne de 0,13 € par kilomètre en France. Il a été choisi de considérer 80% de déplacements en TGV et 20% en TER dans la mesure où une majorité de déplacements est effectuée vers des grandes villes partout en France et une minorité vers d'autres villes plus proches comme en Savoie ou à Lyon, accessibles en TER [7] & [8]. Pour estimer les émissions d'un trajet, nous avons utilisé "mon impact transport" et le site impact CO_{2eq} de l'ADEME avec par exemple pour 300 km parcourus, les émissions ci-dessous :

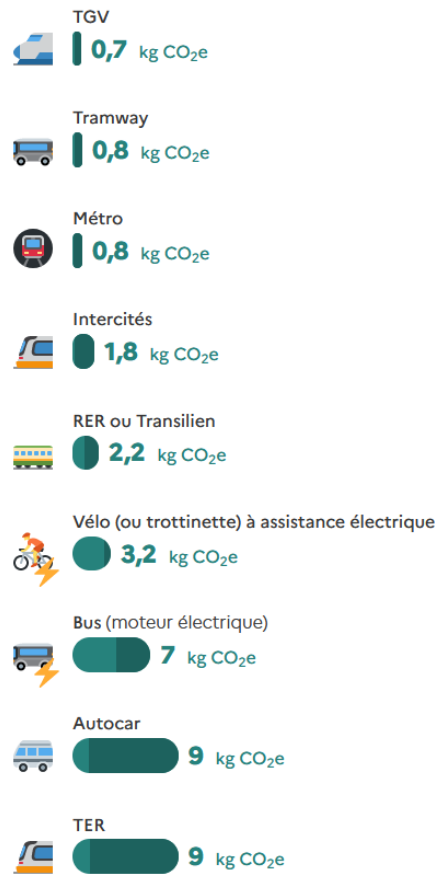


Figure 7 : figure de l'ADEME détaillant l'empreinte équivalent carbone de différents modes de transport pour un trajet de 300 km

Ainsi il suffit d'appliquer la distance totale dans ce type d'outil et d'utiliser 80% de TGV et 20% de TER soit un total de 1634 kg CO_{2eq}.

2) Résultats obtenus

Après avoir calculé les émissions de CO₂ équivalent de toutes les dépenses de plus de 3000 euros, nous avons regroupé ces dernières de la même manière que pour les dépenses. Nous avons ainsi obtenu le diagramme suivant.

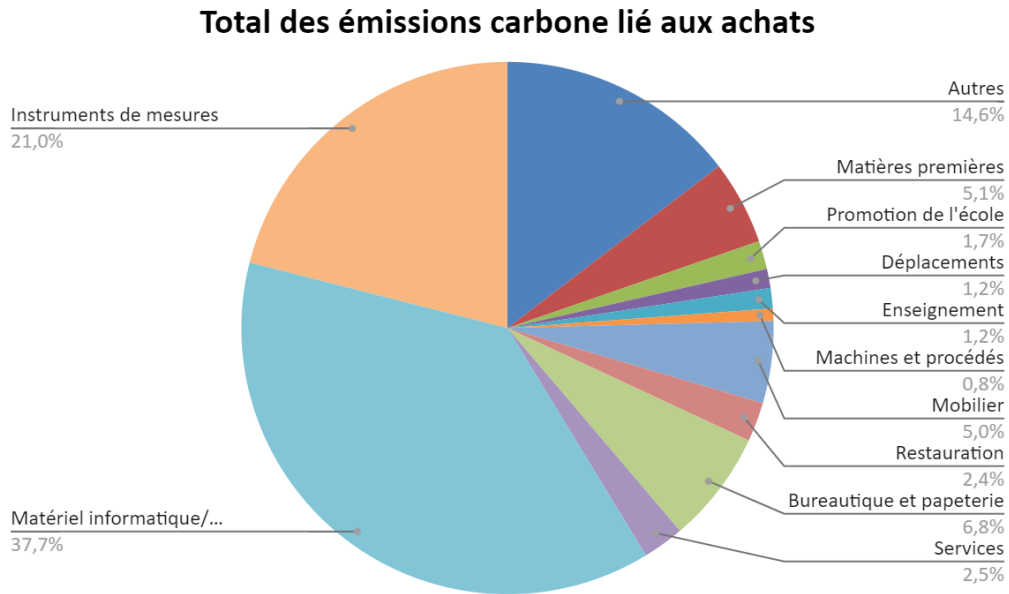


Figure 8 : diagramme circulaire des émissions carbonées liées aux achats par secteur en 2019

Le tableau suivant donne des valeurs numériques lié à ces catégories:

| Catégorie de dépenses | Total des émissions de CO _{2eq} par secteur (Tonnes de CO ₂ équivalentes) |
|------------------------------------|---|
| Autres | 42,5 |
| Matières premières | 14,85 |
| Promotion de l'école | 5,02 |
| Déplacements | 3,364 |
| Enseignement | 3,60 |
| Machines et procédés | 2,18 |
| Mobilier | 14,48 |
| Restauration | 6,95 |
| Bureautique et papeterie | 19,91 |
| Services | 7,31 |
| Matériel informatique/électronique | 109,62 |
| Instruments de mesures | 61,23 |

Tableau 4 : valeurs des émissions de CO_{2eq} par secteur en 2019

Nous avons ainsi pu déterminer l'impact carbone des dépenses de Phelma pour l'année 2019 :

291 ± 204 t CO_{2eq}/an

L'ADEME ne fournissant pas de valeurs d'incertitudes liées aux données que nous avons utilisées et au vu des nombreuses hypothèses que nous avons fait, nous avons décidé d'utiliser une incertitude relative de 70 % pour le résultat ci-dessus.

En analysant de plus près les émissions carbone associées aux dépenses, les plus grosses émissions sont dues respectivement aux composants électroniques achetés par l'école, aux ordinateurs fixes ainsi qu'à des potentiostats. Ce matériel est produit en grande partie à l'étranger (l'ADEME explique le calcul de leur valeur en estimant que ce sont des objets produits en Asie ce qui impose de forts impacts dus aux transports de ce matériel). Toutefois, il est légitime de se questionner si de telles dépenses sont effectuées chaque année.

4 - Interprétation des résultats

1) Bâtiments

Dans un premier temps, nous pouvons remarquer que la construction des bâtiments du campus a été la plus émettrice, dû notamment au bâtiment de recherche du LEPMI qui a lui seul a été plus émetteur que tous les bâtiments de Minatec. Pour rappel nous avons trouvé **258 ± 129 tCO_{2eq}/an**, ce qui n'est pas négligeable en comparaison avec les résultats trouvés par nos prédécesseurs pour le chauffage et l'électricité qui s'élevait à 520 tonnes d'équivalent CO_{2eq} en 2019 (en négligeant les bâtiments de recherche). Globalement, la construction d'un bâtiment n'est absolument pas à négliger lors d'un bilan carbone.

Pour rappel, certaines hypothèses ont dû être prises pour obtenir les résultats présentés ci-dessus. Ainsi, nous avons considéré la durée de vie actuelle des bâtiments du site phelma campus (de 1961 à aujourd'hui). Concernant les bâtiments du site minatec, nous avons considéré la durée de vie estimée des bâtiments (50 ans). Si toutefois ces durées de vie ne sont pas celles observées réellement, le bilan carbone de la construction des bâtiments se verrait alors modifié. C'est le cas ici avec les bâtiments du site Phelma campus qui ne seront vraisemblablement pas détruits cette année. Ne disposant pas d'informations concernant leurs futures destructions possibles, l'hypothèse que nous avons prise nous semblait être la plus réaliste.

Un autre facteur que nous n'avons pas pris en compte dans nos calculs est l'empreinte carbone liée à la rénovation des bâtiments. En effet, les bâtiments sont régulièrement rénovés, c'est le cas notamment des bâtiments du site Phelma campus cette année. Finalement, les résultats présentés, ainsi que les incertitudes ne prennent pas en compte les rénovations des bâtiments.

2) Achats

En mettant en parallèle les deux diagrammes réalisés, nous pouvons remarquer que la plupart des secteurs représentent une part très similaire dans les dépenses et les émissions de CO_{2eq}. Nous pouvons par exemple citer les instruments de mesure : 21,9 % des dépenses et 21 % des émissions.

Cependant quelques cas particuliers sont à noter. Les émissions liées aux déplacements sont faibles par rapport aux dépenses. Cela peut être expliqué par le fait que la très grande majorité des déplacements sont réalisés en train qui est l'un des moyens de transport les plus décarbonés.

Au contraire, le matériel informatique/électronique et les matières premières prennent une part plus importante dans les émissions que dans les dépenses. L'extraction et le raffinage des matières premières est très émettrice de gaz à effet de serre, ce qui se ressent dans les résultats.

L'achat des ordinateurs fixes et portables représente une partie non négligeable des émissions de CO₂ équivalentes du secteur le plus émetteur "matériel informatique/électronique". C'est donc une bonne approche pour avoir un ordre de grandeur des émissions de CO₂ équivalents. Cependant, ils ne représentent que 15 % des émissions totales. Il est donc nécessaire de faire une étude plus globale pour avoir une meilleure approximation de l'impact des achats.

Finalement, il est possible que nous ayons sous-estimé l'empreinte carbone des achats de l'école. En effet, la diversité des achats et le manque d'informations sur certaines catégories ne nous permettent pas d'en réaliser un bilan carbone précis.

3) Bilan complet

Afin de réaliser le bilan complet de Phelma, nous avons repris les résultats de nos prédécesseurs en enlevant leurs calculs de l'impact carbone du parc informatique car il est compris dans notre étude sur les achats.

| Bilan | Impact carbone (t CO _{2eq}) | Incertitudes (t CO _{2eq}) |
|--|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Électricité | 180 | ± 17 |
| Gaz | 324 | ± 16 |
| Chauffage urbain | 201 | ± 60 |
| Déplacements quotidiens (domicile-travail) | 54,0 | inconnues |
| Déplacements à l'international étudiants | 487 | ± 341 |
| Restauration universitaire | 259 | ± 91 |
| Construction des bâtiments | 258 | ± 129 |
| Achats de biens et services | 291 | ± 203 |
| Total | 2054 | ± 857 |

Tableau 5 : Impact carbone global de Phelma sur une année

En prenant en compte les hypothèses faites tout au long de l'étude, les émissions de CO₂ équivalents de Phelma sur une année sont de **2054 ± 857 t CO_{2eq}**.

Ainsi, la construction des bâtiments de l'école et l'ensemble des achats réalisés sur l'année 2019 représentent environ 27% des émissions globales de l'école (respectivement 14% et 12.5%).

Finalement, les achats de l'école et la construction des bâtiments représentent une part non négligeable du bilan carbone de l'école. Ce travail permet de mettre en avant le fait que la scope 3, qui est souvent oublié, a un impact très important.

A l'aide du tableau 5, nous avons pu construire le diagramme ci-dessous :

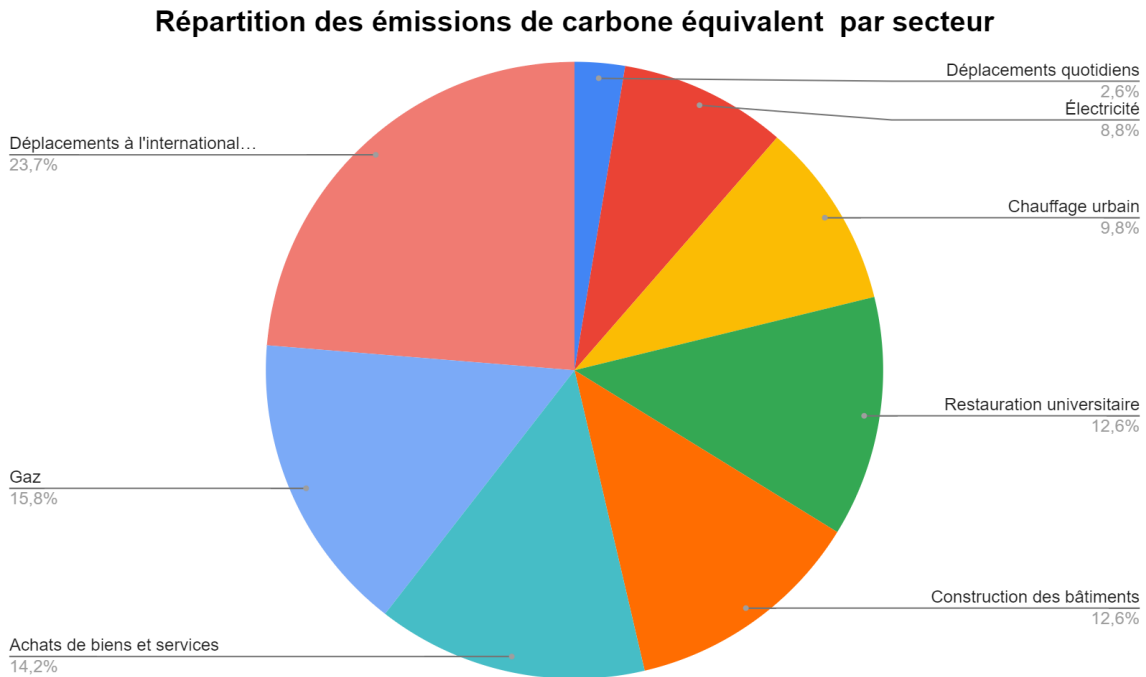


Figure 9 : diagramme circulaire des émissions de carbone équivalent par secteur sur une année

Nous avons alors regroupé ces secteurs dans les différents scopes d'émissions carbone définis au tout début de ce rapport.

La répartition est la suivante :

- **chauffage au gaz** dans le **scope 1**
- **chauffage urbain** dans le **scope 2** : Phelma achète de l'énergie sous forme de chaleur
- **consommations électriques** dans le **scope 2**
- **déplacements à l'international** dans le **scope 3** : les émissions carbonées sont liées à l'utilisation de l'avion mais ne sont pas des émissions directes du point de vue de Phelma
- **déplacements quotidiens** dans le **scope 3** : considérées comme des émissions indirectes car imputées aux étudiants/enseignants et non à l'école
- **restauration universitaire** dans le **scope 3**
- **construction des bâtiments** dans le **scope 3**
- **achats de biens et services** dans le **scope 3**

A l'aide du diagramme précédent et de la répartition ci-dessus, il a alors été possible de déterminer l'impact de chacun des scopes pour un étudiant de Phelma.

Répartition totale des scopes d'émissions

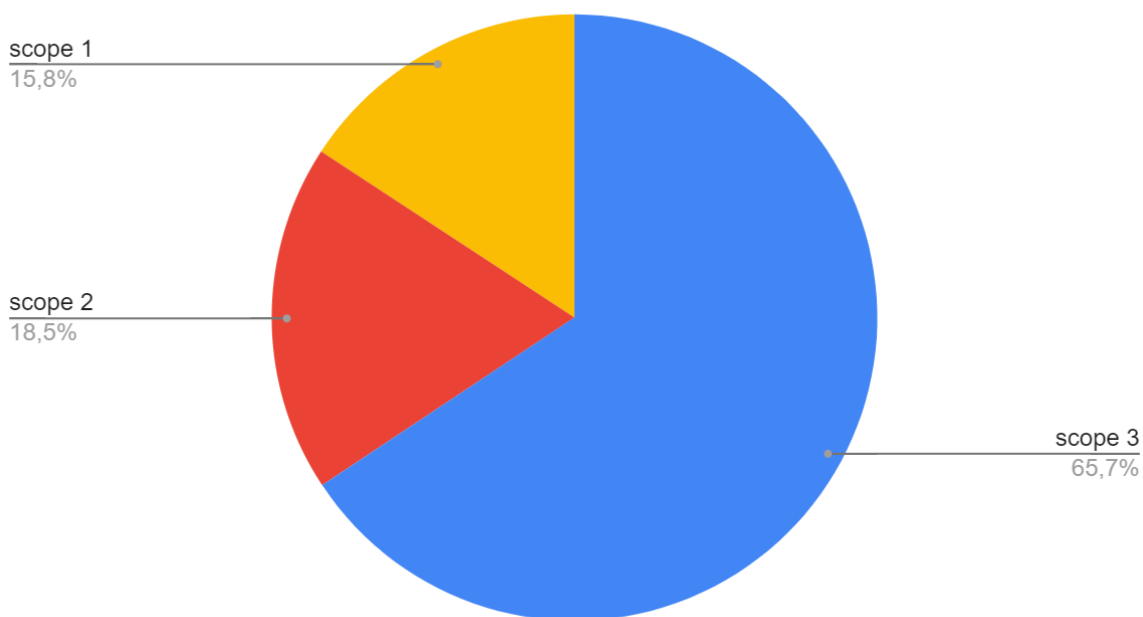


Figure 10 : diagramme circulaire de la répartition des scopes d'émissions pour la partie enseignement d'un étudiant de Phelma

Ainsi, le scope 3 est le plus impactant pour un étudiant lors de sa formation à Phelma. Les chiffres obtenus sont à rapprocher des estimations au niveau de la France selon laquelle le scope 3 représente environ 75% des émissions d'une entité.

Conclusion

L'étude a montré l'importance du scope 3 par rapport à l'étude "Phelma 2050" qui a été faite. Les principaux émetteurs de carbone restent les consommations énergétiques ainsi que les déplacements à l'international. Toutefois, les achats de biens et la construction sont loin d'être négligeables. En calculant par rapport au nombre d'étudiants actuellement en formation (on considère 360 étudiants par promotion pour un total de 1000 élèves environ en tenant compte des élèves partis en césure/à l'étranger) dans l'établissement, on aboutit environ à la valeur de **2,05 ± 0,86 t CO_{2eq}** émise par élèves et par an. On arrive ainsi à **6,16 ± 2,58 t CO_{2eq}** par étudiant lors de sa formation à Phelma soit l'équivalent de plus de quatre trajets Paris-Tokyo en avion long courrier (1,474 t CO_{2eq} par voyage par personne).

Cette valeur de 1,58 t CO_{2eq} /an par élève est à mettre en parallèle avec les émissions annuelle moyenne d'un habitant français, estimées à environ 10 t CO_{2eq}/an. Ainsi, pour les étudiants de Phelma, aller à l'école serait responsable d'environ 15% de leurs émissions carbone annuelles. En réalité, un étudiant émet sûrement beaucoup moins de CO₂ qu'une personne qui travaille, surtout que de nombreux étudiants vont à Phelma dans des transports en commun où à vélo.

De plus, il convient de noter que notre approche du scope 3 est relativement incomplète : en effet, nous n'avons par exemple pas pris en compte les coûts de gestion des déchets de Phelma, la gestion de fin de vie de tous les biens achetés ou encore les émissions liées à la fabrication des transports utilisés par les professeurs/élèves pour se rendre sur les sites de Phelma. Ainsi, la valeur des émissions liées au scope 3 est très certainement largement sous-estimée, et il en va de même pour la part prise par le scope 3 dans le total des émissions carbone de Phelma.

Références bibliographiques

- [1] *Transition Engineering Building a Sustainable Future* by Susan Krumdieck
- [2] N. Borgermann, A. Schmidt, J. Dobbelaere "Preaching water while drinking wine: Why universities must boost climate action now", *One Earth* 5, January 21, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.12.015>
- [3] Hong, J., et al., *Greenhouse gas emissions during the construction phase of a building: a case study in China*, *Journal of Cleaner Production* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.023>
- [4] Base de données de l'ADEME regroupant de nombreuses informations sur les émissions carbone https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/
- [5] N (1993), *Comptabilité économique et environnementale intégrée*, Nations Unies, New York, Series F
- [6] *Modélisation et évaluation environnementale de produits de consommation et biens d'équipement*, ADEME, 2019
- [7] *Impact CO₂*, site de l'ADEME très simple d'utilisation <https://impactco2.fr/transport>
- [8] *Mon impact transport. Quand je parcours .. km j'émet*s. 2019
https://monimpacttransport.fr/?transportations=6_1_9_3_11_13_14_12_2_8_7_5_4

Annexes

Annexe 1: Tableau des ratios monétaires (ADEME)

| Catégorie d'achat | Valeur | Unité |
|--|--------|----------------------------|
| Assurance, services bancaires, conseil et honoraires | 110 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Courrier | 130 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Télécommunications | 170 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Hébergement et restauration | 320 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Services (imprimerie, publicité, architecture et ingénierie, maintenance multi-technique des bâtiments, gardiennage, nettoyage, sécurité, agence de voyage, autres services aux entreprises) | 170 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Édition (livres, journaux, revues, etc.) | 280 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Réparation et installation de machines et d'équipements | 390 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Transport terrestre | 560 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Transport fluvial et maritime | 590 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Transport aérien | 1190 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Entreposage et services auxiliaires des transports | 170 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Construction | 360 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Produits agricoles et de la mer | 2300 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Produit agro-alimentaires transformés | 1000 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Produit minéraux (ciment, verre, etc.) | 1800 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Plastiques et caoutchouc | 800 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Papier et carton | 900 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Bois et article en bois | 500 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Textile et habillement | 600 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Meubles et autres biens manufacturés | 500 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Produits chimiques | 1600 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Produits pharmaceutiques | 500 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Métaux (aluminium, cuivre, acier, etc.) | 1700 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Produits métalliques, sauf machines et équipements | 600 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Machines et équipements | 700 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Produits informatiques, électroniques et optiques | 400 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Matériel de transport | 700 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Administration publiques et défense, sécurité sociale obligatoire | 160 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Enseignement | 120 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Recherche et développement | 250 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Activités pour la santé humaine | 120 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Action sociale | 100 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Activités créatives, artistiques et de spectacle; Bibliothèques, archives, musées et autres activités culturelles; Organisation de jeux de hasard et d'argent | 210 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Activités sportives, récréatives et de loisirs | 270 | kgCO _{2e} / k€ HT |
| Activités des organisations associatives | 220 | kgCO _{2e} / k€ HT |