HAL open science

Bilan carbone 2018 de l'Institut Néel

O Cépas, Cécile Delacour, V Reita, J Robert, Philippe-Emmanuel Roche, S Triqueneaux

To cite this version:

O Cépas, Cécile Delacour, V Reita, J Robert, Philippe-Emmanuel Roche, et al.. Bilan carbone 2018 de l'Institut Néel. [Rapport Technique] Institut Néel. 2022, 60 p. hal-03763344

HAL Id: hal-03763344

https://hal.science/hal-03763344

Submitted on 29 Aug 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Bilan carbone 2018 de l'Institut Néel

O. Cépas*, C. Delacour, V. Reita, J. Robert, P.-E. Roche, S. Triquenaux
Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, Institut Néel, Grenoble, France

10 mars 2022

Résumé

Ce rapport présente en détail le premier bilan carbone de l'Institut Néel, institut de physique de la matière condensée situé à Grenoble. Il s'attache à analyser les différents postes d'émissions directes ou indirectes de gaz à effet de serre (énergies, déplacements domicile-travail et en mission, achats de biens et services et expériences externalisées). L'estimation finale est de 10 tonnes de CO_{2e} par agent et par an pour l'activité professionnelle, avec d'assez grandes disparités, également étudiées.

*olivier.cepas@neel.cnrs.fr

Table des matières

1 Présentation succinte du laboratoire **3**
1.1 Activités . . . 3
1.2 Budget . . . 4
1.3 Bilan carbone résumé . . . 5

2 Le contexte du bilan carbone **6**
2.1 Pourquoi on compte . . . 6
2.2 Comment on compte . . . 7

3 Emissions indirectes : dépenses d'énergie **8**
3.1 Electricité . . . 8
3.2 Chauffage . . . 9

4 Missions **10**
4.1 Emissions de CO_2 . . . 10
4.2 Répartition . . . 12
4.3 Exemple de mission transatlantique . . . 13
4.4 Exemple de mission en Europe (avion versus train) . . . 15
4.5 Déplacements pour enseignement . . . 16

5 Déplacements domicile-travail **16**
5.1 Sondage sur les déplacements du personnel . . . 17
5.2 Modes de transport utilisés . . . 17
5.3 Kilomètres parcourus par mode de transport . . . 19
5.4 Comptages réels . . . 21
5.5 Emissions de CO_2 . . . 24
5.6 Répartition . . . 26
5.7 Conclusion des déplacements domicile-travail . . . 26

6 Achat de biens et services* **28**
6.1 Achat d'équipements et services . . . 28
6.1.1 Budget . . . 28
6.1.2 Empreinte carbone . . . 29
6.2 Construction des bâtiments . . . 32
6.3 Fluides . . . 34
6.3.1 Hélium liquide . . . 34
6.3.2 Azote liquide . . . 36
6.3.3 Eau . . . 36
6.3.4 Fuites de gaz frigorigènes fluorés . . . 36
6.4 Utilisation des grands instruments . . . 36
6.4.1 Expériences faites à l'ESRF . . . 37
6.4.2 Expériences faites au LNCMI . . . 37
6.4.3 Expériences faites à l'ILL . . . 37
6.5 Informatique . . . 38

6.5.1 Parc informatique : émissions de la fabrication 38
6.5.2 Fonctionnement 40
6.5.3 Calculs intensifs 40
6.5.4 Flux de données 41
6.5.5 Conclusion de l'informatique 41
6.6 Restauration 42
6.7 Traitement des déchets 43

7 Remerciements 43

A Taux de CO_2 de la Base Carbone® 44
A.1 Electricité 44
A.2 Chauffage 44
A.3 Transport de personnes 46
A.4 Catégories d'achats et ratios monétaires $kgCO_2/k€$ 48

B Différences avec l'outil de Labos 1.5 50

C Méthodologie pour les émissions des achats 51

D Quelle est l'énergie nécessaire pour liquéfier un litre d'hélium ? 53

E Quelle est l'émission de CO_2 dans l'échange d'1 Go d'information numérique ? 56

1 Présentation succinte du laboratoire

1.1 Activités

L'Institut Néel [1] est un laboratoire public du CNRS, UPR 2940 (unité propre de recherche), affilié à l'Université Grenoble Alpes. Son activité porte essentiellement sur la physique de la matière condensée, principalement expérimentale, mais aussi théorique, et sa gestion :

— conduite d'expériences au sein du laboratoire et support (fabrication de pièces, dispositifs, électronique, informatique)
— basses températures (liquéfacteur)
— théorie, calculs numériques
— chimie (synthèse de matériaux, réactions, cuissons, *etc.*)
— missions à l'étranger ou en France (colloques, collaborations, jury de thèses, séjours longs, expériences en grands instruments, formations, *etc.*)
— gestion de la recherche (financements, gestion des missions)
— enseignement, vulgarisation, communication

Le laboratoire regroupe approximativement 450 personnes, personnels administratifs (4 % des effectifs), techniciens et ingénieurs (27 %), chercheurs (27 %), enseignants-chercheurs (11 %), doctorants et post-doctorants (non permanents, 31 %) et occupe

20 000 m^2 de locaux, bureaux, salles d'expériences et de liquéfaction (pour l'obtention de basses températures). Les locaux principaux ont été construits en 1960, avec des surélévations en 1997, le bâtiment Nanosciences en 2013 (avec deux surélévations supplémentaires). Le laboratoire est situé à Grenoble, sur la presqu'île, à 4 km du centre historique (relié par tramway). Il fait partie d'un campus regroupant d'autres laboratoires et la délégation régionale du CNRS, partageant ainsi certaines infrastructures. Les enseignements se déroulent principalement à l'Université Grenoble Alpes à Saint-Martin-d'Hères, à 8 km du laboratoire ; d'autres à Valence (90 km).

1.2 Budget

Le budget total de l'Institut Néel est de

36 millions d'euros,

dont 24 millions d'euros de salaires (21 millions d'euros permanents, 2.7 millions d'euros CDD). Les 12 millions d'euros restants permettent d'acheter des équipements, de payer les missions et les frais de fonctionnement. Les subventions d'état (du CNRS, et, pour des montants plus faibles, de l'université Grenoble-Alpes et de quelques autres organismes) se chiffrent à 4 millions d'euros ; les sommes les plus importantes (et variables d'une année à l'autre), soit 8 millions d'euros, proviennent des contrats des équipes de recherche auprès d'organismes publics ou privés (Agence nationale de la recherche, European research council *etc.*). Le budget des équipes de recherche est ainsi fractionné entre dotations du laboratoire et contrats.

L'Institut Néel (UPR 2940) regroupe techniquement six entités (notamment séparées au niveau financier) : Institut Néel, liquéfacteur, magasin, bibliothèque, service études et réalisation d'appareillages scientifiques (SERAS), et le "collaborating research group" (CRG). Une partie de sa gestion relève de la délégation régionale du CNRS, et notamment du service technique aux laboratoires (STL) qui gère et facture une partie "infrastructure" qui regroupe (par ordre décroissant de coût en euros), électricité, nettoyage, chauffage, gardiennage, eau de ville, agent d'accueil, entretien des sorbonnes, déchets industriels, espaces verts, entretien, *etc.*

1.3 Bilan carbone résumé

Le bilan des émissions de gaz à effet de serre de l'Institut Néel, estimé ci-après, est de

4 400 tonnes CO_2 eq. [1]

pour l'année 2018. Certaines données sont pour 2019, sans grands changements. Pour les 450 agents, cela correspond à approximativement

10 tonnes par agent et par an.

Ce résultat est une moyenne sur des activités très diverses (voir section 1.1) et ne reflète pas le large éventail de pratiques.

La répartition est la suivante, en tonnes de CO_2 eq. arrondies à la centaine de tonnes (voir aussi Figure 1) :

— 300 tonnes. Consommation d'électricité
— 200 tonnes. Chauffage des bâtiments
— 600 tonnes. Missions
— 300 tonnes. Déplacements domicile-travail
— 2 700 tonnes*. [2] Achats de produits manufacturés et services (émissions importées)
— 100 tonnes. Construction des bâtiments (si conservés 100 ans)
— 200 tonnes*. Utilisation des grands instruments

* Grande incertitude sur ce poste.

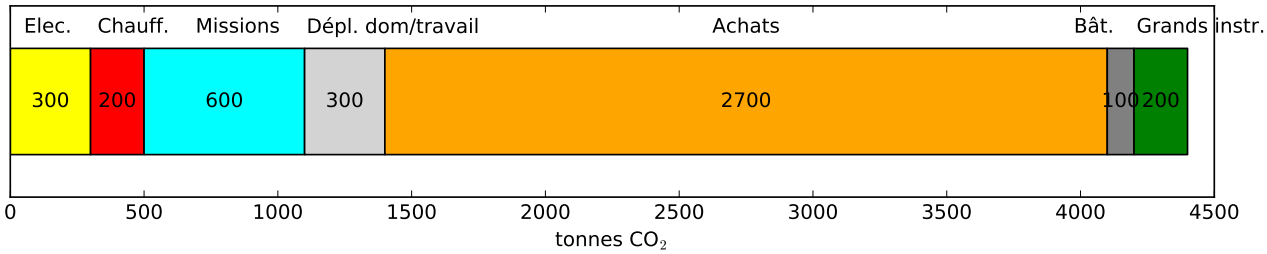


FIGURE 1 – Répartition des émissions de gaz à effet de serre. Total : 4 400 tonnes CO_2.

Les estimations suivantes, en italique, ne sont pas comptées.

— *200 tonnes. Repas du midi (20 tonnes gaspillage alimentaire rest. coll.)*
— *35 tonnes. Achat d'azote (total liquéfacteur, en partie "exporté")*

1. eq. ou e = équivalent : les émissions d'autres gaz à effet de serre, comme le méthane CH_4, le protoxyde d'azote NO_2, HFC, PFC, SF_6 sont aussi comptabilisées et ramenées à un taux de CO_2. La notation eq. est omise dans la suite.

2. Dans la version 1 présentée au laboratoire en avril 2021, le poste achat avait été sous-estimé d'un facteur 4 (700 tonnes au lieu de 2 700 tonnes) faute d'accès alors au fichier des achats (accordé en septembre 2021) et à des données transmises erronées. Il s'est avéré que le montant total des achats était deux fois plus élevé que celui qui nous a été transmis et que le ratio monétaire moyen, calculé grâce au fichier des achats, est deux fois plus élevé.

— *25 tonnes. Achat d'hélium (total liquéfacteur, en partie "exporté")*
Ces résultats sont détaillés dans les parties 3 4 5 6 ci-après.

2 Le contexte du bilan carbone

2.1 Pourquoi on compte

L'idée est de présenter un panorama des ordres de grandeur des émissions de gaz à effet de serre de nos activités professionnelles. Pour fixer certains repères, il est à noter que les émissions mondiales de CO_{2e} sont de 50 milliards de tonnes par an (2018) [2], soit

6.4 tonnes de CO_{2e} par terrien par an.

L'évolution temporelle est donnée dans la référence [3].

Selon le Haut Conseil pour le climat [4], [3], l'empreinte carbone par habitant en France, pour 2018, est de

11.2 tonnes de CO_{2e} par habitant par an,

dont 6.4 tonnes d'émissions directes [4] (445 millions de tonnes de CO_{2e} [2] dues à l'alimentation, chauffage, transports, services publics, électricité...), et 4.8 tonnes d'émissions importées (achats, transports internationaux...). Les émissions directes prennent place essentiellement sur le territoire national, alors que les émissions importées de biens ou services consommés en France prennent place à l'étranger ou dans l'espace international : c'est la somme des deux qui constitue l'*empreinte carbone* (à distinguer des *émissions carbone* qui constituent les émissions directes). Notons que l'empreinte carbone a été stable d'une année sur l'autre avec une légère diminution des émissions directes et une augmentation des émissions importées, selon le Haut Conseil pour le climat [4]. Ce dernier recommande l'usage de l'empreinte carbone pour éviter les effets de vases communiquants et la délocalisation des émissions.

Sur l'empreinte totale de 11.2 tonnes, la répartition est la suivante [7] mais diffère selon les sources (et selon l'attribution par exemple du transport des aliments à l'alimentation ou au transport) : alimentation 15 %, transport 29 %, services 15%, services publics 10 %, logements 24 %, équipements et habillement 7%.

Objectifs officiels. Dans la lutte contre le changement climatique, l'objectif de "neutralité carbone" apparaît dans l'Accord de Paris (2015), puis dans la Statégie Nationale Bas Carbone (SNBC) [8], la législation française (loi énergie climat 2019) [9] et européenne (Pacte vert 2021) [10]. Pour la France, la "neutralité carbone", telle qu'inscrite dans la loi actuelle, consiste à diminuer les émissions directes à 1 tonne de CO_2 eq. par habitant (contre 6.4 tonnes actuellement) d'ici à 2050, en favorisant en parallèle l'augmentation des "puits de carbone" (forêts, sols, stockage de carbone...), afin d'assurer une "neutralité" des émissions. L'objectif est

de diviser les émissions par un **facteur 6** à l'horizon 2050.

3. Cette valeur diffère selon les sources officielles. Par exemple, l'INSEE [5] a annoncé 11.2 tonnes puis 9.7 tonnes. De même, le ministère de la transition écologique annonce 9.7 tonnes [6]. On retiendra l'ordre de grandeur et une relative stabilité.

Les puits absorbent en 2018, selon le CITEPA, 26 millions de tonnes de CO_2 (soit 0.38 tonne par habitant), mais sont en baisse du fait de la filière bois-énergie et de l'artificialisation des sols [11]. L'objectif est au contraire de tripler ces puits à l'horizon 2050 pour compenser les émissions résiduelles d'1 tonne par habitant.

Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a évalué que les trajectoires compatibles avec une élévation de la température globale de 1.5° impliquent une réduction des émissions mondiales de 50 milliards de tonnes de CO_2 par an à 0 tonne en 2050 (neutralité carbone) [12] (il n'y a pas à distinguer émissions et empreinte, puisqu'il s'agit d'émissions mondiales). Selon le GIEC, l'objectif nécessite effectivement des "réductions considérables dans tous les secteurs" [13]. En France, le Haut Conseil pour le climat recommande d'intégrer les émissions indirectes dans la loi sur la "neutralité carbone" [4], et de diviser l'empreinte carbone par ce même facteur 6.

Quels objectifs possibles au niveau du laboratoire ? Il nous semble qu'il est de notre responsabilité individuelle et collective, au vu de nos connaissances actuelles et des recommandations en vigueur, de diminuer nos émissions de gaz à effet de serre.

Les émissions du laboratoire sont comptabilisées dans l'empreinte carbone dans le secteur des services publics. Les services publics (enseignement, hopitaux, armée...) ont des émissions de 74 millions de tonnes [7] ou 1.1 tonne par habitant et par an (sur un total de 11.2 tonnes). Si on suppose que la répartition des divers secteurs d'émissions de l'empreinte par habitant reste la même, il s'agit donc aussi de diviser par 6 l'empreinte carbone des services publics. En réalité, il apparaît dans la Stratégie Nationale Bas Carbone que les secteurs tertiaires (et résidentiels) seront soumis à des efforts de réduction plus élevés : l'objectif pour le secteur tertiaire est plutôt de diviser ses émissions par un facteur de l'ordre de 20 à l'horizon 2050 [14].

Si la partie professionnelle du bilan carbone implique un bilan carbone individuel largement supérieur à la moyenne nationale (et *a fortiori* mondiale), les fortes disparités évoquées dans la section 1.3 entre les divers agents (gestion et support ou recherche) sont à garder en mémoire lors de la mise en oeuvre d'une politique globale de réduction des gaz à effet de serre.

Dans la circulaire du 25 février 2020 du Premier ministre [15], où il est question de services publics "écoresponsables", il est dit que "les services et leurs agents sauront innover pour trouver des solutions adaptées à leur territoire, leur métier et à leur évolutions".

2.2 Comment on compte

Le groupe de travail "évaluation de l'empreinte carbone" n'avait pas d'expérience particulière en la matière : des oublis ou des erreurs sont certainement présents (mais les raisonnements sont simples et facilement corrigibles). Le groupe s'est inspiré notamment de ce qui s'est fait à l'Institut des sciences de la terre [16] à Grenoble, où un étudiant a réalisé les enquêtes nécessaires et le bilan carbone du laboratoire au cours d'un stage. Nous avons pu consulter aussi le travail de l'Institut Pierre-Simon Laplace, du laboratoire d'Océanographie et du climat [17], de la direction de l'Institut écologie et environnement du CNRS [18], de l'Institut P' (notamment pour

le traitement des achats) [19], du laboratoire de recherche “Environnement, Ville, Société” [20].

Les résultats présentés ci-dessous sont donc des évaluations approximatives qui ont pour but de donner une idée des ordres de grandeur des différents postes. Il a été effectué en 2019-2021 sur les données de 2018, parfois 2019 lorsque les données n'étaient pas disponibles.

Le bilan carbone repose sur la Base Carbone® de l'Agence de la transition écologique, anciennement Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) [21], dont les taux sont résumés dans l'appendice A. Un bilan carbone de l'ADEME se décompose en trois postes d'émissions (“Scope” 1, 2 et 3), seuls les scopes 1 et 2 sont obligatoires dans un bilan carbone “réglementaire”.

— Scope 1. Emissions directes et amont (Combustibles, Process et émissions fugitives, Utilisation des terres).
— Scope 2. Emissions indirectes - Energies (électricité et réseaux de chaleur/froid).
— Scope 3. Emissions indirectes - autres (transport de marchandise, transport de personnes, achats de biens, achats de service, traitement des déchets).

Nous avons suivi cette présentation en essayant de prendre en compte le périmètre le plus large possible : nous n'avons pas d'émissions en scope 1, les émissions du scope 2 sont traitées en section 3 ci-après, les émissions du scope 3 sont traitées en sections 4, 5, 6.

Nous avons aussi comparé ces résultats avec ceux de l'outil bilan carbone développé par le collectif labos 1.5 du CNRS [22], voir Appendice B.

3 Emissions indirectes : dépenses d'énergie

3.1 Electricité

La consommation d'électricité en 2018 pour l'Institut Néel, le liquéfacteur, le Seras, et le magasin est de [23]

$$4\ 890\ 000 \text{ kWh} = 4.89 \text{ GWh}$$

Les variations d'une année sur l'autre sont assez faibles, de l'ordre de 5% sur la période 2016-2019, et une baisse de 12% pour 2020.

Méthodologie. Le taux de l'électricité de l'ADEME pour l'année 2018 est de 57 gCO_2e/kWh, moyenne sur le mix électrique français (voir figure 19 pour les taux par origine).

Valeur retenue, en arrondissant :

$$\boxed{300 \text{ tonnes de } CO_2\text{eq.}}$$

Remarques. Notons que si le taux retenu ici est celui de l'ADEME, le taux affiché par Réseau de Transport d'Electricité (RTE) [24] est généralement plus faible. Il s'appuie sur les données de l'ADEME pour chaque combustible, mais ne prend pas en compte les émissions dues à l'amont (construction des infrastructures). Calculé en continu, avec des variations importantes, il est en revanche intéressant à consulter : une politique de baisse des émissions peut passer par une utilisation de l'électricité en

heures creuses (pratiquée par exemple au LNCMI sur les aimants les plus puissants) ou aux heures peu "carbonées".

Le taux dépend fortement du pays et de son mix énergétique, par exemple, au Royaume-Uni, le taux est de 255 gCO_2/kWh [25].

Comparaisons. A titre de comparaison, le laboratoire ISTerre (250 personnes) a une estimation de 24 tonnes de CO_2 [16] : l'Institut Néel a une consommation 7 fois plus élévée à même nombre d'agents. La consommation d'électricité est donc très élévée (mais peu carbonée), il s'agit peut-être d'expériences spécifiques, pompes, lasers de puissance... reflétant des activités propres à l'Institut Néel (le liquéfacteur utilise 20 % de l'électricité). Notons aussi que de nombreux bureaux et salles de réunion sont climatisés et que des chauffages électriques d'appoint sont utilisés.

Il est intéressant aussi de comparer avec certains grands instruments dont les consommations sont très particulières : le laboratoire national des champs magnétiques intenses (LNCMI) a une consommation de 15 GWh d'énergie électrique en une année, soit 850 tonnes de CO_2 avec le taux ci-dessus [4]. Au LNCMI, la question de la baisse de l'empreinte carbone est étudiée sous divers aspects : contrat d'électricité permettant de travailler hors pics de consommation (c'est lors des pics de consommation que l'empreinte carbone est la plus défavorable avec l'augmentation de la part du gaz naturel, fioul...), récupération de la chaleur des aimants (refroidi à l'eau) pour chauffer le site ou l'injecter dans le réseau de chauffage urbain (projet). Le CERN a lui une consommation électrique de 1300 GWh= 1.3 TWh [26] (70 000 tonnes CO_2). Ceci est à ramener à l'échelle de la production française annuelle d'énergie électrique : 500 TWh. Autre élément de comparaison : un habitant moyen consomme 1 MWh par an pour les équipements électroménagers et l'éclairage (hors cuisson, hors chauffage). [5]

Notons que recouvrir les toits du laboratoire de panneaux solaires ne serait pas suffisant pour assurer une telle consommation. Si 10 m^2 de panneaux solaires fournissent 2 kW crête, soit 2 MWh dans l'année, il faudrait 25 000 m^2 de panneaux pour une consommation de 5 GWh. Or, par exemple, l'emprise au sol du bâtiment Nanosciences est de 1 262 m^2.

Consommation par m^2. 244 kWh/m^2 (Néel). Moyenne nationale tertiaire - enseignement : 131 kWh/m^2. ISTerre Grenoble : 102 kWh/m^2.

Il semblerait intéressant de réaliser un diagnostic de la consommation électrique.

3.2 Chauffage

L'Institut Néel est entièrement chauffé par le réseau de chaleur du chauffage urbain de Grenoble [28]. La consommation de **chaleur** pour l'Institut Néel, le liquéfacteur, le Seras et le magasin en 2018 est de [23]

$$1350 \text{ MWh}.$$

4. Une estimation plus précise visant à prendre en compte les variations journalières est en cours de réalisation au sein du LNCMI.

5. La consommation électrique *résidentielle* de 2018 en France est de 143 TWh [27]. Elle se répartit en 34 TWh (chauffage électrique), 23 TWh (eau chaude sanitaire), 11 TWh (cuisson), 1 TWh (climatisation), 74 TWh (reste : électroménagers et éclairage) [27], soit pour ce dernier poste 1.1 MWh par habitant et par an.

Les variations sur la période 2016-2019 sont de l'ordre de 10% ; une baisse de 15% par rapport à la moyenne des années précédentes est enregistrée en 2020.

Méthodologie. Le taux de CO_2 peut être calculé à partir du "mix" de chauffage urbain : combustion d'ordures ménagères, bois, charbon, gaz naturel, farines animales, fioul [29]. Ce taux est donné par l'arrêté du 11 avril 2018 au journal officiel et est de 141 g CO_2eq./kWh [30], qui est aussi celui retenu par l'ADEME. La valeur retenue et arrondie est de

$$\boxed{\text{200 tonnes de } CO_2\text{eq.}}$$

Taux utilisé. Nous remarquons que le taux officiel (que nous gardons par souci de comparaison) semble sous-évalué : par exemple, les ordures ménagères brûlées (37 % du mix) ne sont pas comptées comme participant à un rejet de gaz à effet de serre (mais, dans un bilan équilibré, elles devraient apparaître dans le traitement des déchets).

Comparaisons. La consommation de chauffage est en proportion de celle du laboratoire ISTerre (83 tonnes) qui a presque moitié moins de personnel. Pour les 20 000 m^2 de l'institut, cela représente 68 kWh/m^2, plus faible que la valeur nationale de 100 kWh/m^2 [6]. Nous remarquons que certains bâtiments sont largement chauffés et assez mal isolés (20°C à l'intérieur du bâtiment M le 14 janvier 2021, extérieur 5°C) ; d'autres sont moins chauffés. Les équipements électriques participent certainement au chauffage. Une comparaison des modes de chauffage est donnée en appendice A.2.

4 Missions

Les missions (colloques, collaborations, jury de thèses, séjours longs, expériences en grands instruments, formations, *etc.*) constituent un des postes d'émissions particulièrement important. Les destinations dans le monde entier sont indiquées sur la figure 2 pour toute la période 2016-2020. On y distingue très nettement des missions proches (<3 000 km), des missions lointaines (>5 000 km) et peu de destinations entre les deux (Océan Atlantique, Afrique, Sibérie...). Les destinations en Europe sont indiquées sur la figure 3. Des lignes noires ont été ajoutées sur les trajets effectués au moins une fois en train. Dans les deux cas, la taille des disques rouges indique la contribution aux émissions, en incluant la fréquence de ces destinations.

4.1 Emissions de CO_2

Les émissions de CO_2 ont été estimées anonymement à partir de l'ensemble des trajets. Pour 2018, par exemple, on dénombre 1344 missions avec le décompte suivant : Afrique, 5 ; Amérique du nord, 51 ; Asie, 65 ; Europe (hors France), 302 ; France, 901 ; Océanie, 7 ; Amérique du sud, 12.

6. La consommation de chauffage du secteur tertiaire est de 100 TWh/an pour un parc d'un milliard de m^2, soit 100 kWh/m^2 [31]. Par ailleurs, pour les 37 millions de logements, la consommation de chauffage est de 291 TWh/an, selon l'INSEE. La surface moyenne d'un logement (appartements et maisons confondus) est de 91 m^2, la surface totale chauffée est donc de $0.9\times37.10^6\times91$ m^2=3 milliards de m^2 (où 0.9 est le taux d'occupation), ce qui donne aussi 100 kWh/m^2.

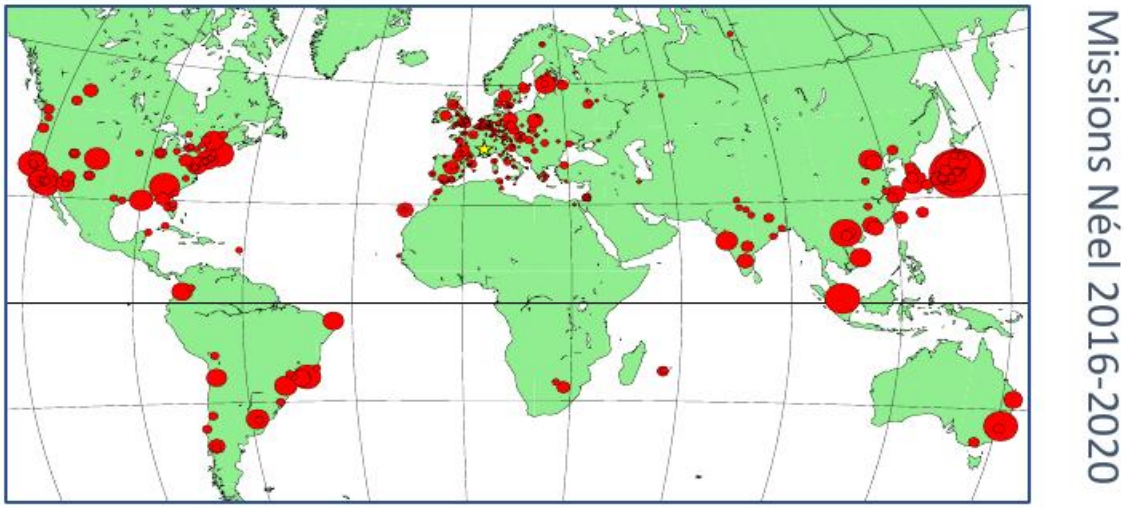


FIGURE 2 – Destinations des missions (monde).

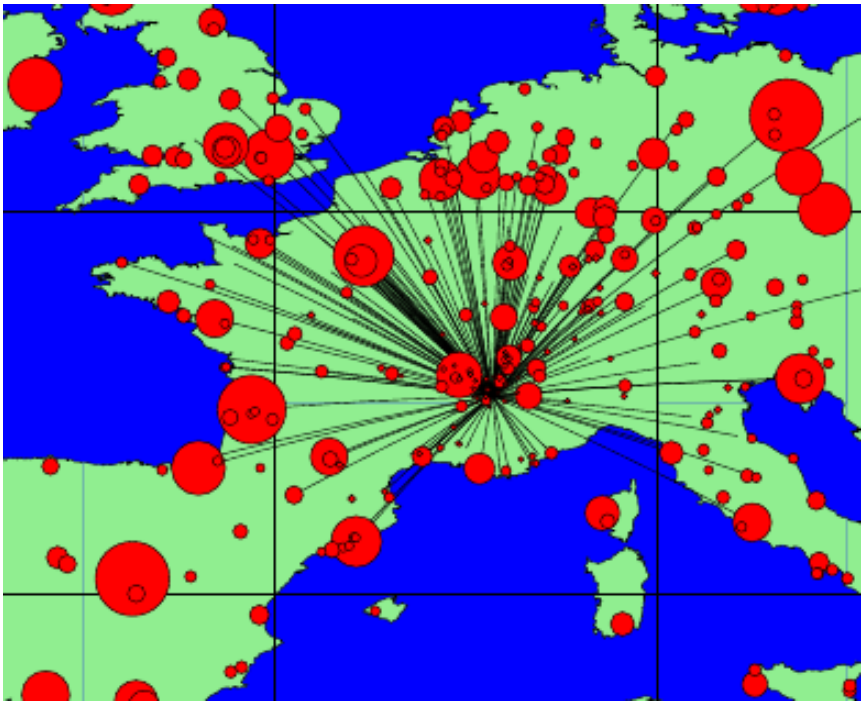


FIGURE 3 – Destinations des missions (Europe), avion (rouge), train (ligne noire = au moins un voyage en train).

La méthodologie consiste à identifier automatiquement les lieux et les distances

(en corrigeant les erreurs) et en remplaçant les adresses ou les lieux-dits par les métropoles (afin d'anonymiser les missions). En ce qui concerne les taux km $\rightarrow$ kgCO_2eq., plusieurs protocoles ont été testés, ADEME, DEFRA, ICAO, KLM, My-Climate, Atmosfair, Labos 1.5 et celui de l'ADEME a été suivi.

Le résultat pour l'année 2018 en utilisant les taux de l'ADEME (voir annexe A.3) est de 625 tonnes, arrondi à

$$\boxed{600 \text{ tonnes de } CO_2\text{eq.}}$$

Il varie d'une année à l'autre avec une moyenne sur la période 2016-2020 de 550 tonnes CO_2 par an. Notons qu'en 2020, la pandémie de covid 19 a considérablement réduit le nombre de voyages et que les émissions ont diminué à 115 tonnes. Enfin, selon le protocole, des variations très importantes sont à noter. Pour 2019, on trouve des résultats allant de 156 tonnes à 679 tonnes de CO_2 (ADEME : 528 tonnes). Le protocole de Labos 1.5 conduit à un résultat deux fois plus faible par rapport à celui de l'ADEME, il est discuté dans l'annexe B.

4.2 Répartition

La répartition des émissions selon le mode de transport est donnée sur la figure 4. L'essentiel provient des trajets en avion (95% des émissions). Parmi les missions, l'es-

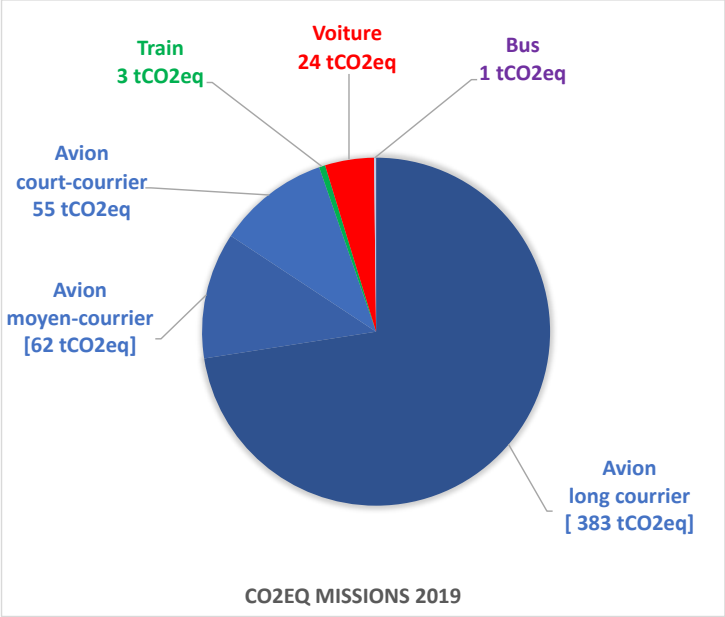


FIGURE 4 – Répartition des émissions des missions selon le mode de transport (2019) : l'avion représente 95% des émissions.

sentiel des émissions provient des vols intercontinentaux, i.e. des missions lointaines selon la distinction donnée ci-dessus. Cette distinction apparaît très clairement sur

la figure 5 où les deux pics correspondent aux missions proches (<3 000 km) et lointaines (>5 000 km). La surface étant proportionnelle aux émissions, il apparaît que les vols intercontinentaux sont responsables de 73% des émissions aériennes.

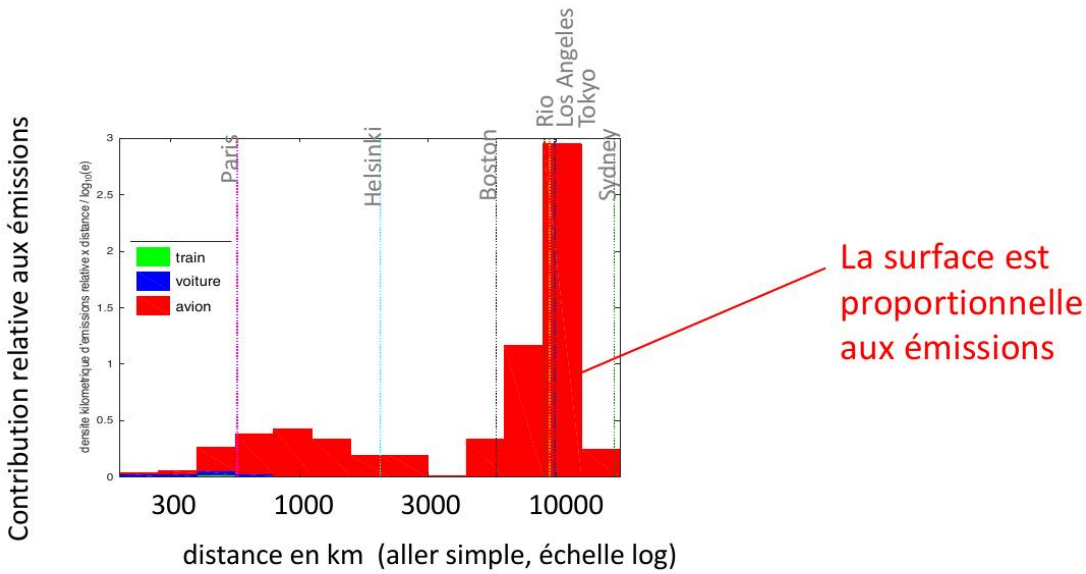


FIGURE 5 – Contribution aux émissions en fonction de la distance. On distingue des missions proches (<3 000 km) et lointaines (>5 000 km), ces dernières contribuant pour 73%.

L'analyse des missions et des bilans carbone individuels est intéressante. Sur la figure 6 (en haut), on représente la contribution (en %) des missions dont les émissions sont classées de la plus émettrice (à gauche) à la moins ément trice (à droite). Ainsi 50% des émissions est due à 6% des missions (longs courriers). De même, il est possible d'agréger par agent l'ensemble de ses missions (et de calculer ainsi un bilan carbone individuel pour les missions) et de représenter la contribution de chaque agent, classée en fonction de son bilan carbone (figure 6, en bas). Il apparaît alors que 60 personnes sont responsables de 50% des émissions.

Il ressort de ces figures que (1) la distribution des émissions est large et la moyenne par personne reflète donc mal la distribution, (2) c'est un petit nombre de missions (réparties sur un plus grand nombre d'agents) qui sont responsables de la plupart des émissions. Il s'agit, nous l'avons vu, des destinations les plus lointaines.

4.3 Exemple de mission transatlantique

Pour information, nous donnons un exemple de calcul d'une mission Grenoble-Boston AR qui est la première destination transatlantique au laboratoire. Les taux utilisés sont ceux donnés en annexe A.3. Le voyage se décompose en

— Autocar. Grenoble-Aéroport de Lyon Saint Exupéry, 92×2 km : 5 $kgCO_2$

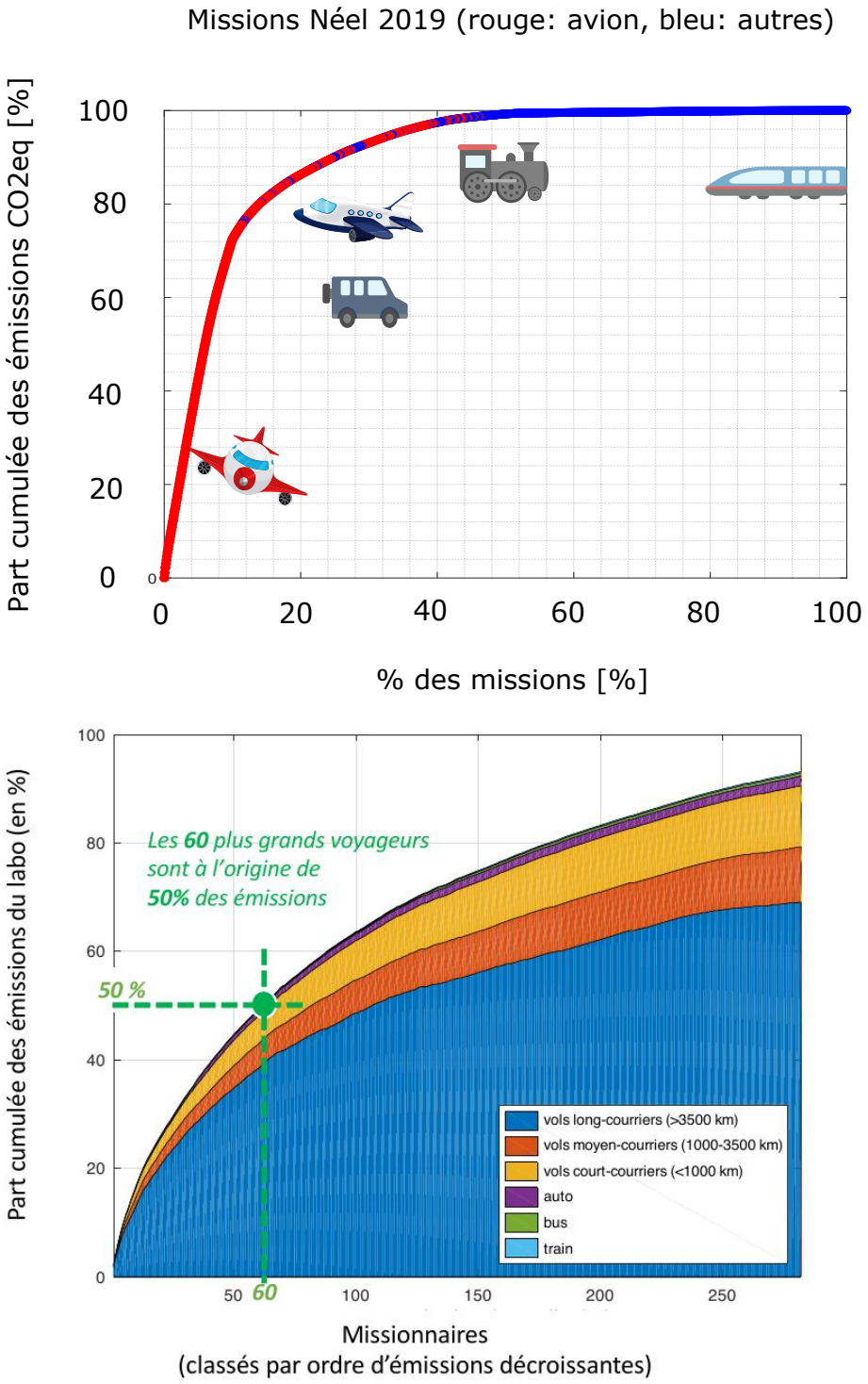


FIGURE 6 – Part cumulée des émissions.

Grenoble-Bordeaux en	temps (aller)	distance (aller)	CO_2eq. (aller-retour)
TGV (via Paris)	6h43	1100 km	4 kg
TER+TGV (via Nîmes)	7h23	780 km	7 kg
Voiture électrique (avec péages)	7h + recharge	660 km	26 kg
Autocar	10h	660 km	34 kg
Voiture thermique (sans péages)	9h20	700 km	200 kg
Moto	7h	660 km	222 kg
Avion	4h	435 km	227 kg
Voiture thermique (avec péages)	7h	660 km	255 kg

Table 1 – Comparaison d'une mission Grenoble-Bordeaux selon le mode de transport, temps, émissions.

— Avion court-courrier. Par exemple, Lyon-Francfort, 560 km $\times 2$: 290 kgCO_2
— Avion long-courrier. Francfort-Boston 5 900 km $\times 2$: 1.8 tCO_2
— Bus. Logan Boston Airport-university, 10 km$\times 2$: 2 kgCO_2

Soit un total de 2.1 tCO_2, où les autocars/bus jouent un rôle négligeable.

4.4 Exemple de mission en Europe (avion versus train)

Le tableau 1 donne une comparaison des émissions d'un trajet Grenoble-Bordeaux selon le mode de transport. Il est obtenu avec les taux de l'ADEME (annexe A.3) et le comparateur de transport de l'ADEME [33]. L'usage de l'avion pour un trajet domestique (ou de la voiture personnelle transportant une seule personne) est donc approximativement 50 fois plus émissif que le train pour un gain de temps (pour l'avion) de 1.75 (notons que ce trajet est particulièrement défavorable au train puisqu'il contourne le massif central). L'autocar est 7 fois plus émissif que le train. [7]

Parmi les mesures de la circulaire "services publics écoresponsables" [15], la mesure 7 prohibe l'usage de l'avion pour des trajets domestiques pour lesquels il existe une alternative en train de moins de 4 heures de trajet (3 heures pour les trajets aller-retour ayant lieu dans une journée) et ne concerne donc pas Bordeaux -plus de 4 h de train.

Dans le tableau ci-dessous, on trouvera les temps médians des trajets en train à partir de Grenoble, vers quelques destinations courantes en France. Les fréquences des trajets effectués en avion sont indiquées et sont des moyennes sur la période 2016-2020.

```
12.3 h  DIVES-SUR-MER
10.0 h  BAYONNE
```

7. Notons que le voyage en train est moins émissif par Paris (1100 km) que par Nîmes (780 km) : ces estimations sont à relativiser car les taux appliqués prennent en compte *le taux de remplissage* et un choix individuel de report sur le trajet long (plus énergivore) ne ferait que rendre encore plus défavorable le trajet court (moins énergivore) en baissant le taux de remplissage. On mesure ainsi la nécessité d'interpréter les résultats.

```
9.8 h   LIMOGES
9.8 h   SAINT-POL-DE-LEON
9.5 h   LA BAULE
9.3 h   CAEN           (2 vols AR/an)
9.0 h   PAU
9.0 h   LA TESTE-DE-BUCH(1 vol AR/an)
8.0 h   METZ
7.8 h   CHATELLERAULT
7.8 h   VANNES        ( 1 vol AR/an)
7.6 h   BORDEAUX      (14 vols AR/an)
7.3 h   NANTES        ( 4 vols AR/an)
7.2 h   NANCY
7.2 h   POITIERS      ( 1 vol AR/an)
6.8 h   STRASBOURG    ( 2 vols AR/an)
5.9 h   RENNES
5.6 h   TOULOUSE      ( 5 vols AR/an)
5.6 h   VILLEFRANCHE
4.6 h   LILLE         ( 1 vol AR/an)
4.2 h   MASSY
3.6 h   PARIS         ( 7 vols AR/an)
3.5 h   MARSEILLE
```

Ainsi, tous les trajets en avion à destination de Lille, Toulouse, Strasbourg, Poitiers, Nantes, Bordeaux, Vannes, Caen, *etc.* (> 4 h) peuvent continuer à se faire en avion (pas d'obligation légale). Cette mesure ne concerne que les trajets en avion à destination de Paris et est quasiment sans effet pour l'Institut Néel.

L'ensemble des vols courts-courriers (<1 000 km) contribue à hauteur de 15% des émissions des missions du laboratoire. C'est l'ordre de grandeur de l'économie espérée si l'ensemble des trajets de moins de 1 000 km était réalisé en train. Les principales raisons invoquées pour préférer l'avion sont, d'après une enquête de Labos 1.5 [34] : avion plus rapide, éviter une nuit sur place, avion moins cher, avion plus pratique.

4.5 Déplacements pour enseignement

Les enseignements ont lieu principalement à Saint Martin d'Hères (8 km), mais aussi à Valence (90 km), et plus rarement à Lyon, Paris... Ils ne sont pas comptabilisés.

5 Déplacements domicile-travail

L'Institut Néel est situé sur la presqu'île entre l'Isère et le Drac, à 4 km au nord-ouest du centre historique de Grenoble, à 2 km des gares SNCF et routière, et est desservi par la ligne B du tramway. Les cars "Transisère" desservent la gare routière et, pour la plupart, le laboratoire. Un réseau de pistes cyclables sur les berges de l'Isère et du Drac ou sur l'avenue des Martyrs relie le laboratoire au centre et aux communes situées au nord-ouest. Un projet de transport en commun par cable pour traverser l'Isère, le Drac et l'autoroute va être mis en oeuvre dans les années à

venir (2024). L'Institut Néel partage un site avec plusieurs laboratoires où travaillent approximativement 700 personnes. Ce site dispose de 350 places de parking pour voitures, et de 230 places à vélos.

L'estimation du bilan carbone des trajets domicile-travail repose essentiellement sur :

— Un sondage *ad hoc* sur les déplacements domicile-travail, effectué au sein du laboratoire en décembre 2020, sur les déplacements de 2019. Il a été construit par Labos 1.5 [22], mené à l'initiative du collectif laboratoire en transition et transmis au personnel par la direction du laboratoire.
— Une enquête menée par le Syndicat Mixte des Transports en Commun de l'Agglomération Grenobloise (SMTC) en décembre 2019 [35].
— Des comptages réels des effectifs à l'entrée du site, à l'occasion des journées annuelles "Challenge mobilité", organisées dans le cadre du plan déplacement entreprise (PDE).

Les déplacements domicile-travail s'effectuent essentiellement du lundi au vendredi : le nombre de jours travaillés à l'Institut Néel par an est de 207 jours. [8] On néglige les absences pour missions, congés maladie, gardes d'enfant, télétravail (l'estimation concerne l'ère pré-confinements)... Les temps partiels sont pris en compte dans l'enquête. Le travail le week-end concerne 2-3% des effectifs [35] et les déplacements associés sont négligés.

5.1 Sondage sur les déplacements du personnel

Un sondage du personnel a été effectué en décembre 2020 sur les déplacements domicile-travail de 2019, en utilisant le gabarit mis au point par Labos 1.5 [22]. Les résultats bruts (fichier anonyme) ont été traités par nos soins.

Sur les 450 personnes du laboratoire, 166 personnes ont répondu à ce sondage, soit 37% du personnel. Le sondage enregistre le nombre de participants des trois catégories de personnel suivantes :

1. Doctorants et post-doctorants (28 réponses).
2. Ingénieurs, techniciens, administratifs (ITA) (61 réponses).
3. Chercheurs et enseignants-chercheurs (77 réponses).

La répartition en pourcentage est donnée sur la figure 7 (à droite). La figure de gauche donne la comparaison avec les effectifs réels de chaque catégorie. On remarque donc une plus faible participation des doctorants et post-doctorants. L'analyse statistique suppose que l'enquête est représentative, mais sera corrigée pour prendre en compte certains biais.

5.2 Modes de transport utilisés

Le nombre de personnes utilisant un mode de déplacement donné sur les 166 personnes ayant répondu au sondage est indiqué sur la figure 8. La somme dépasse

8. 365-2x52 (samedi, dimanche)-9 jours fériés (2018)-13 jours de récupération du temps de travail (RTT) -32 jours congés= 207 jours.

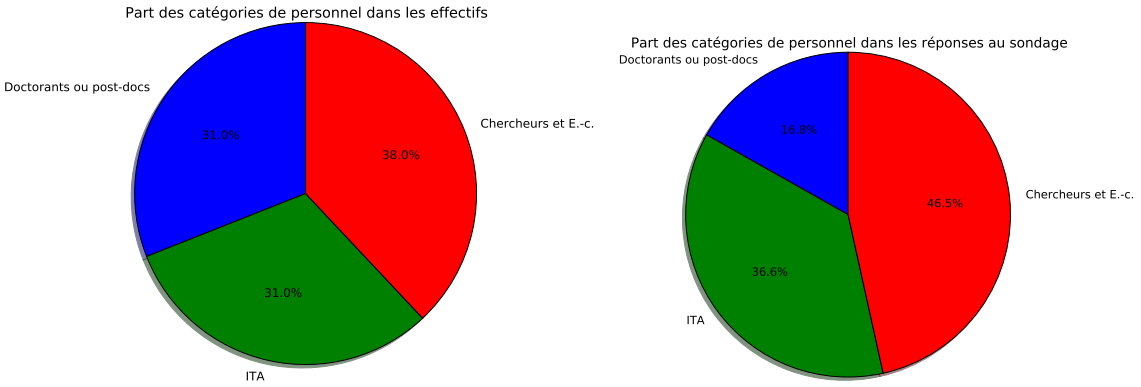


FIGURE 7 – Part des catégories de personnel dans les effectifs du laboratoire (gauche). Part des catégories de personnel dans les réponses au sondage (droite).

les 166 réponses car plusieurs modes sont parfois utilisés. Les pourcentages de chaque mode sont donnés dans le tableau 2, colonne 1. Le vélo arrive en tête du sondage mais est légèrement surreprésenté, comme on va le voir.

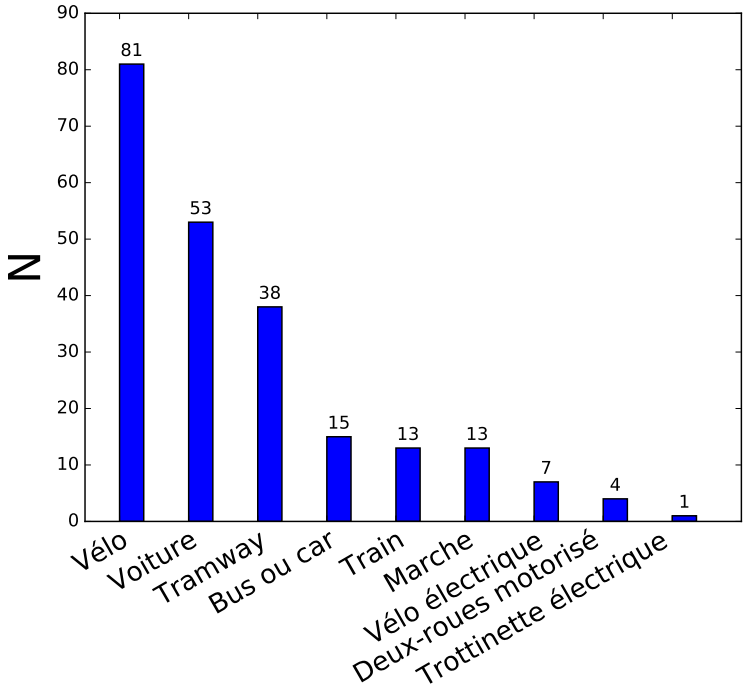


FIGURE 8 – Nombre de personnes effectuant les trajets domicile-travail selon le mode de transport, sur les 166 réponses du sondage effectué en 2020. Plusieurs réponses étaient possibles.

L'INSEE a des statistiques au niveau national [36] : "70,4 % des personnes en

Mode	Enquête (2020)	Enquête SMTC (2019)	Comptage (2014)
Voiture	24%	24%	40%
-dont autosolisme	19%	22%	37%
-dont covoiturage	5%	2%	3%
Vélo	36%	28%	30%
Tramway	17%	22%	N.C.
Bus ou car	7%	5%	N.C.
Train	6%	11%	N.C.
Marche à pied	6%	3%	N.C.
Vélo électrique	3%	2%	N.C.
Deux-roues motorisé	2%	1%	1%

Table 2 – Pourcentages des modes de transport, obtenus par sondage du personnel (colonne 1), sur les trajets domicile-travail (réalisé en 2020 sur 2019). Colonne 2 : enquête de la SMTC auprès des agents de l'ensemble du site (2019). Colonne 3 : comptage à l'entrée du site lors de la journée "challenge mobilité" de 2014 (voir Fig 12 pour 2014-2020). Dans ce dernier cas, les piétons (modes marche+train+tramway+bus) correspondent à 28%. N.C.=non comptabilisés (individuellement).

emploi résidant dans les pôles hors aire de la ville de Paris rejoignent leur lieu de travail en voiture." 14% en transport en commun, 2.1 % en deux-roues motorisé, 4% à vélo, 9.5% à pied. En ce qui concerne la région Auvergne-Rhône-Alpes [37], pour les "villes centres des métropoles" (resp. "autres communes des métropoles"), les pourcentages deviennent 42.1% (resp. 69.5%) pour la voiture, 7.7% pour le vélo (2.8%), 31.7% (resp. 17.9%) pour la marche à pied 14.7% (resp. 5.5%) et 1.2% pour les deux-roues motorisés.

Le vélo est très fortement représenté au laboratoire avec 39% (en comptant les vélos électriques) des déclarations, et 30% dans un comptage réel (voir section 5.4) ; d'ailleurs, Grenoble arrive en tête pour l'usage du vélo en France (16.3% des trajets pour se rendre au travail [37]). La voiture est aussi largement utilisée (24% de tous les modes déclarés, 32% des personnes interrogés [9]) mais en proportion bien moindre qu'au niveau national, régional ou même des centres-villes de la région (42.1%). Les transports en commun (tramway, autocar, train) sont utilisés par 30% des sondés.

5.3 Kilomètres parcourus par mode de transport

La distribution des distances domicile-travail (allers), tout mode de transport confondu, est donnée sur la Fig. 9. Ainsi, 44% des trajets sont inférieurs à 5 km (1/3 au niveau national [36]), 44% supérieurs à 9 km (50% au niveau national [36]), et 7% supérieur à 40 km. La médiane est de 7 km (50% de personnes en dessus, 50% de personnes en dessous) et la moyenne est de 14 km.

9. Il faut faire attention que les pourcentages indiqués incluent plusieurs réponses possibles. Le pourcentage de voitures dans l'enquête est de 53/166, soit 32%.

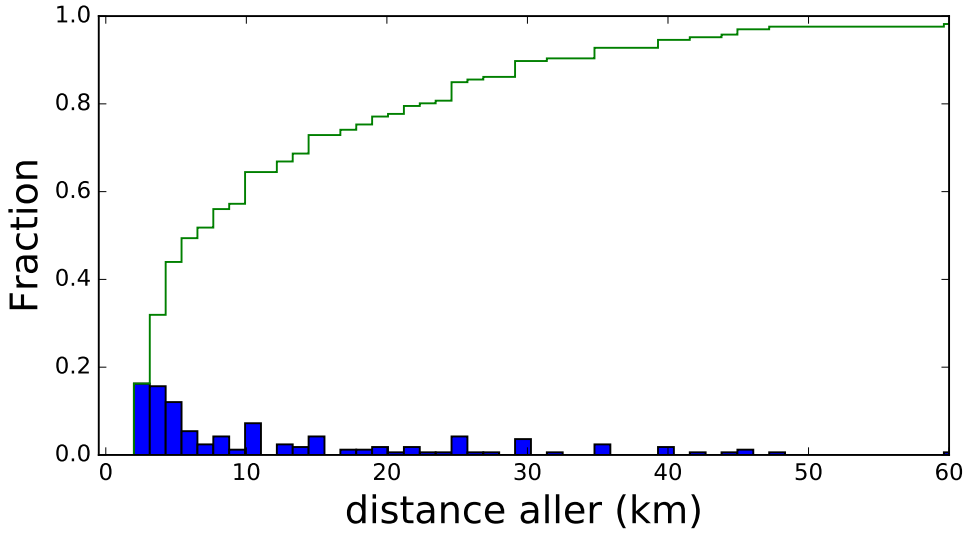


FIGURE 9 – Histogrammes des distances domicile-travail (aller), tout mode de transport confondu, et cumul : 44% sont inférieurs à 5 km, 44% supérieurs à 9 km, 7% supérieurs à 40 km (médiane 7 km, moyenne 14 km).

Les kilomètres parcourus par mode de transport, issus de l'enquête, sont résumés dans la colonne 1 du tableau 3 et, en pourcentage, dans la colonne 2 (voir aussi Fig. 10). Les kilomètres sont réalisés principalement en voiture (38% des kilomètres), suivi par le train (24%) et le vélo (19% en comptant les vélos électriques). Le tramway (17% des personnes) ne concerne que 6% des kilomètres. La comparaison avec un laboratoire du campus universitaire est donnée en colonne 3.

La somme de la colonne 1 correspond à un total de 5 039 km par jour aller-retour, soit une moyenne de 30 km (aller-retour) par jour et par personne. [10] Pour l'ensemble du laboratoire (450 personnes) et pour une année complète (207 jours), on obtient donc approximativement

3 millions de km.

Méthodologie. La méthodologie est celle de l'enquête de Labos 1.5[22] : [11]

— Les kilomètres parcourus en voiture ont été divisés par le nombre d'occupants. Ainsi, les kilomètres de deux personnes arrivant dans la même voiture et ayant répondu au sondage ne sont comptabilisés qu'une fois. De même, si une des deux personnes ne travaille pas à l'institut, seule la moitié des kilomètres est comptabilisée.

10. La différence d'un kilomètre sur la moyenne avec l'estimation précédente provient d'erreurs dans l'enquête sur la répartition des modes de transport pour les personnes utilisant plus d'un mode de transport.

11. Nous avons noté quelques confusions dans la répartition des km de plusieurs personnes entre plusieurs modes de transport (somme ne correspondant pas à la distance domicile-travail déclarée). Nous avons aussi retiré deux données aberrantes (un utilisateur d'un "métro" à Grenoble, confusion avec métrovélo ?) et une distance en train qui nous a semblé erronée et que nous avons divisée par 2, supposant une confusion entre aller et aller-retour.

Mode	Néel km AR enquête	Néel %km	ISTerre	Néel km moyen aller	Néel CO_2
Voiture*	1908	38%	49%	18.0	92.5%
Train	1205	24%	12%	46.0	2.2%
Vélo	847	17 %	30%	5.2	0%
Bus	472	9%	1%	15.7	3.4%
Tramway	298	6%	4%	3.9	0.2%
Vélo électrique	126	2.5%	4%	9.0	0.3%
Deux-roues motorisé	99	2.0%	0%	12.4	1.3%
Marche	76	1.5 %		2.9	0%
Trottinette électrique	8	0.1%	0%	4.0	0.04%

Table 3 – Total des kilomètres parcourus allers-retours (par jour) des personnes sondées (colonne 1), pourcentage (colonne 2 reportée dans la Fig. 10), comparaison avec le laboratoire ISTerre [16] (colonne 3), valeurs moyennes des distances allers (colonne 4) et CO_2 émis (colonne 5), en fonction du mode de transport. Somme de la colonne 1 : 5 039 km par jour. * pour les voitures, le nombre de km et les émissions sont divisés par le nombre d'occupants.

— Le nombre d'allers-retours dans la journée est comptabilisé, la moyenne est de 1.10, selon le sondage.
— Le nombre de jours réellement travaillés dans la semaine (temps partiels, télétravail) aussi : la moyenne est de 4.80 jours par semaine, selon le sondage.

Histogrammes. Les distributions des kilomètres parcourus (allers) pour chaque mode de transport sont données sur la figure 11.

L'aller moyen en voiture est de 18 km. Chaque mode a une moyenne distincte (voir tableau 3), avec des catégories "faible kilométrage" (marche 2.9 km, tramway 3.9 km, trottinette 4.0 km, vélo 5.2 km), "kilométrage moyen" (vélo électrique 9.0 km, deux-roues motorisé 12.4 km, bus 15.7 km, voiture 18 km) et "fort kilométrage" (train 46 km). Néanmoins, il ne faudrait pas en conclure qu'ils répondent nécessairement à des besoins différents (en dehors du train qui est très à part) : les histogrammes sont assez largement distribués (voir Fig. 11) et ont des recouvrements importants. Par exemple, 21% des trajets en voiture font moins de 8 km. Les histogrammes vélo et tramway sont très similaires, ceux des bus et voiture aussi. Le train concerne davantage les longues distances.

5.4 Comptages réels

Des comptages réels ont été effectués à l'entrée du site lors des journées "Challenge mobilité", dans le cadre du plan déplacement entreprise (PDE). Les résultats en pourcentage des catégories (autosolistes, vélos, piétons, covoiturages) sont présentées sur la Fig. 12, pour les années 2014-2020. On suppose que les piétons arrivent en tramway, autocar, train, ou à pied, et correspondent aux catégories transports en commun + marche. Les comptages ayant lieu au cours d'une journée où les personnels

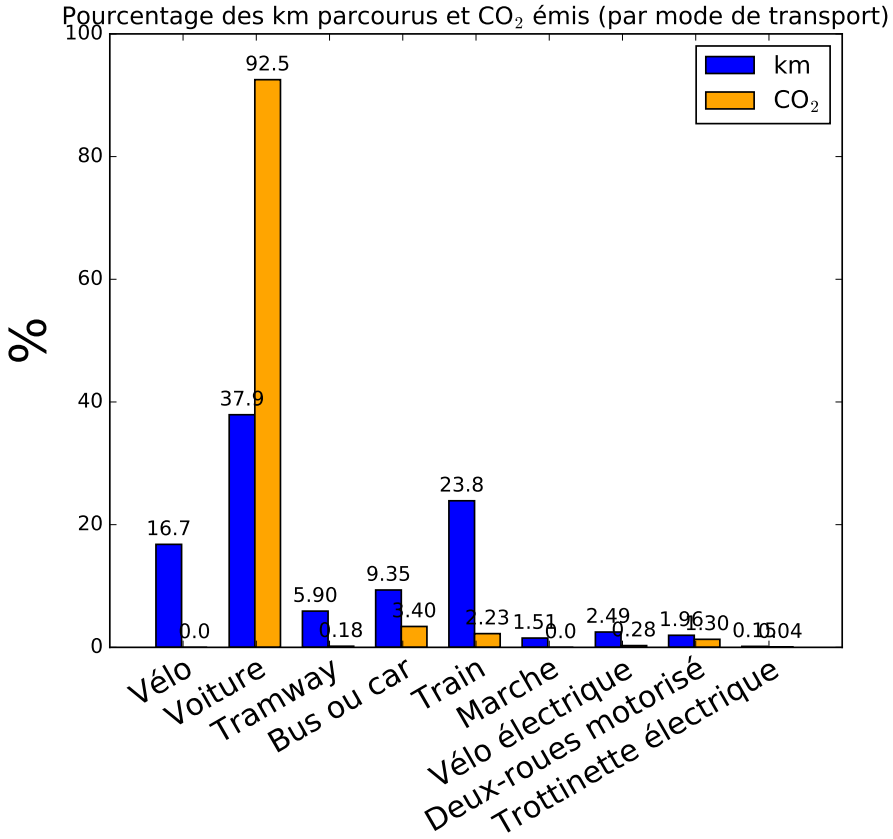


FIGURE 10 – Part des kilomètres parcourus et du CO_2 émis par mode de transport.

sont encouragés à utiliser d'autres modes de transport que la voiture, ils ne sont pas forcément représentatifs d'une journée quelconque. Par ailleurs, il existe des variations importantes d'une journée à l'autre, par exemple selon la météo ou la saison. Aussi, les comparaisons d'une année sur l'autre et les pourcentages sont à relativiser. Néanmois, en moyenne sur toute la période, la part de voitures (voitures+ covoiturage) est de 32%, ce qui est aussi le résultat de l'enquête, et constitue peut-être une légère sous-estimation du nombre de voitures. Les vélos sont en moyenne à 30% (39% dans l'enquête). On note une forte diminution de l'utilisation des transports en commun (part piétons) en 2020 (covid) et une augmentation des parts de la voiture et du vélo.

On remarque aussi une baisse continue du rapport du nombre de voitures sur le nombre de vélos (Fig. 12 du bas), passant de 1.3 en 2014 à 0.9 en 2019 et 2020 (0.8 dans le sondage), reflétant, bien sûr, soit une baisse réelle [12], soit une plus grande adhésion au "challenge".

Pour vérifier (très partiellement) ce point, nous avons effectué un comptage en décembre 2020 (jour de météo plutôt mauvaise) : 178 voitures et 118 vélos étaient

12. Notons que l'INSEE souligne une baisse de 2 points (en %) entre 2015 et 2020 de la part modale de la voiture dans les "communes-centres" et une augmentation de 2 points de la part du vélo.[36]

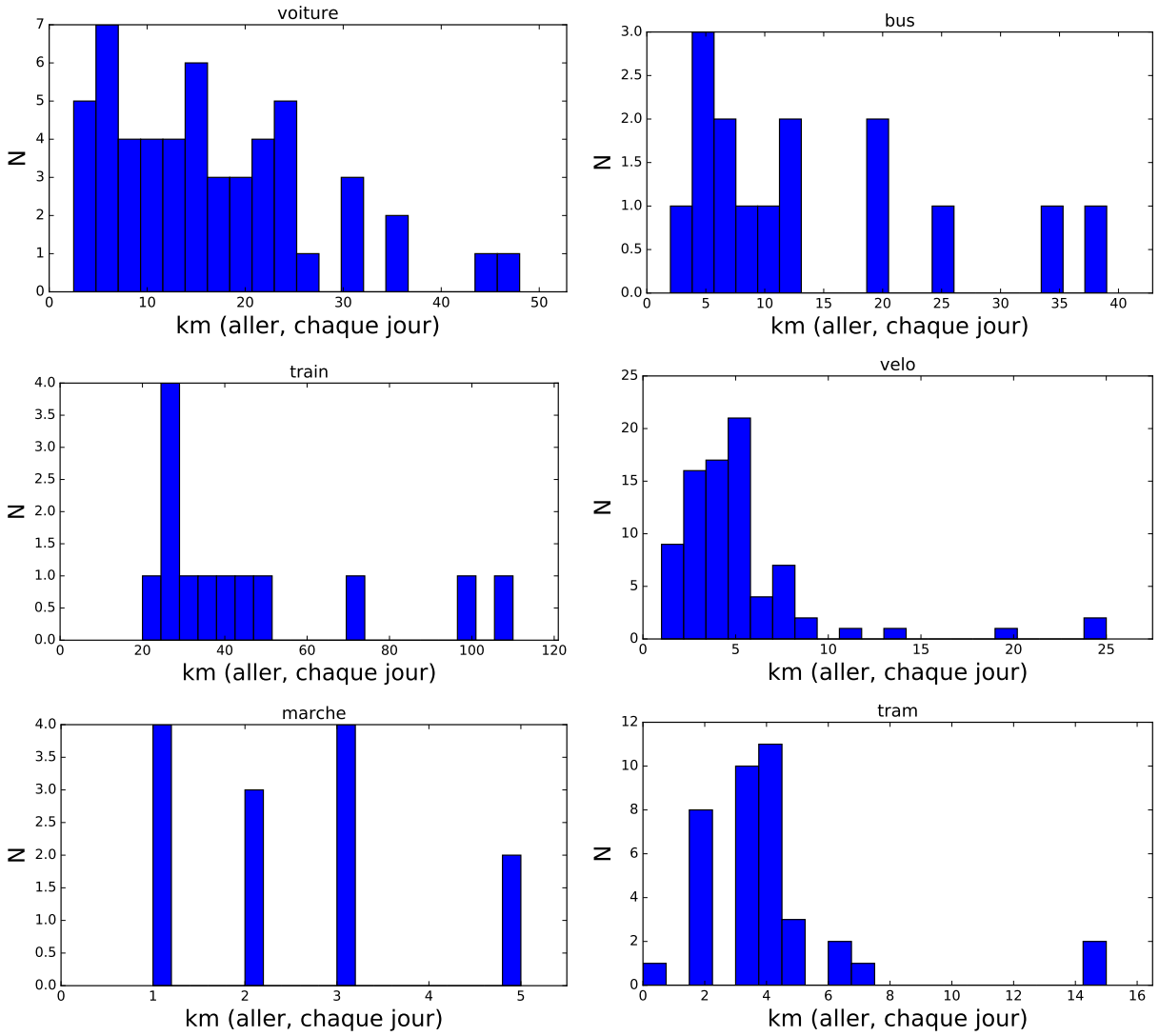


FIGURE 11 – Histogramme des distances allers parcourues de façon journalière selon le mode de transport. N est le nombre de réponses à l'enquête correspondant au mode et à la distance correspondante. Notons que la longueur maximale des lignes de tramway à Grenoble est de 13.7 km (ligne A), la ligne B qui dessert le laboratoire 10.5 km.

stationnés sur le site, soit un rapport de 1.5 (mais confinement et télétravail partiel peuvent aussi changer les résultats). Nous notons aussi que le rapport du nombre de places de parking de voitures et de vélos est aussi de 1.5.

Ces résultats semblent indiquer que les parts modales sont fluctuantes d'une journée à l'autre et seuls des comptages aléatoires et systématiques pourront donner des résultats fiables. Ils semblent néanmoins indiquer une légère surreprésentation des vélos dans le sondage (39% au lieu de 30%) et conforter le nombre de voitures (biais faible).

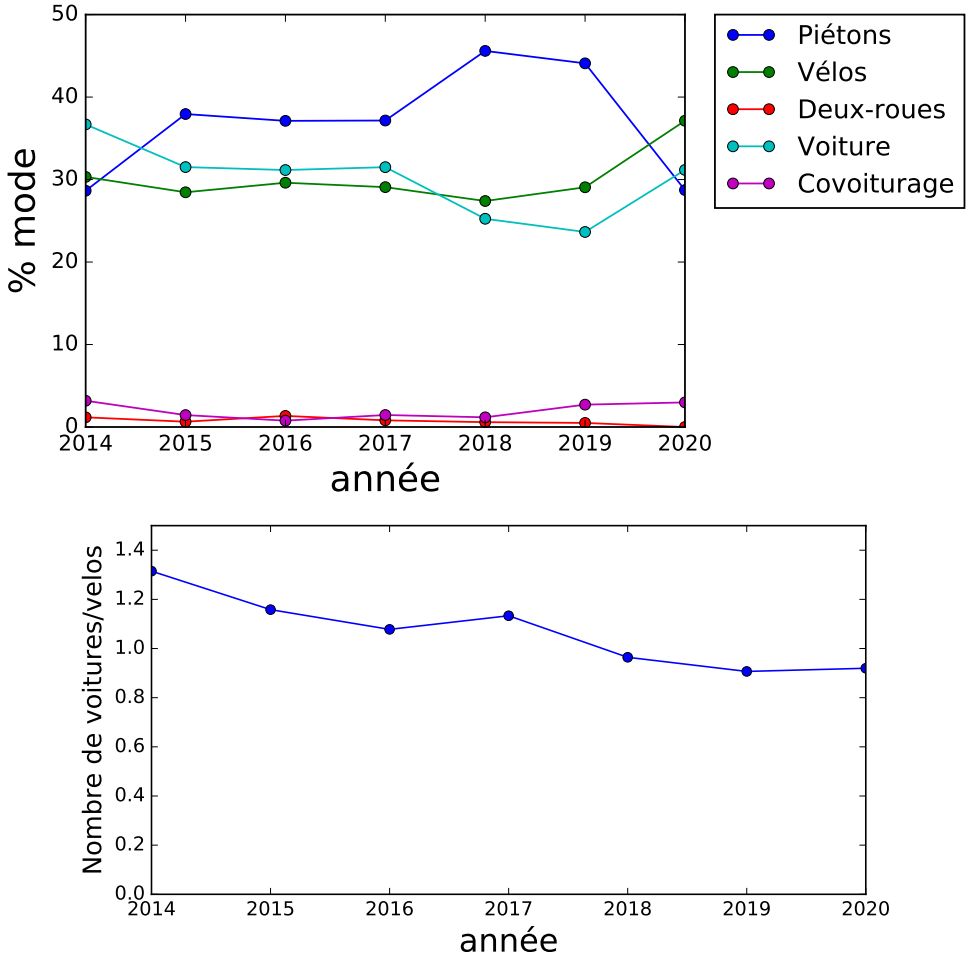


FIGURE 12 – Part modale comptée lors des journées "Challenge mobilité" (fig. du haut) et rapport du nombre de voitures sur le nombre de vélos (fig. du bas). On remarque une baisse continue du nombre de voitures sur le nombre de vélos. Ces données ayant été collectées sur un jour, il faut relativiser leur portée.

Ces résultats suggèrent d'associer au sondage du Labos 1.5 [13] un comptage des véhicules (voitures, dont covoitureurs, vélos (dont électriques), motos, scooters, piétons).

5.5 Emissions de CO_2

Dans le calcul des émissions de CO_2, la voiture à moteur thermique a une part prépondérante, mais l'estimation de l'ensemble des modes de transport est faite ci-dessous. Chaque report sur un autre mode de transport ou sur le covoiturage (émissions divisées par le nombre d'occupants) est un gain en termes d'émissions de

13. Une clarification de la question du sondage sur la répartition d'un trajet entre plusieurs modes de transport devrait conduire à moins d'erreurs.

CO_2.

Les taux utilisés ci-dessous sont ceux de l'ADEME [21] (voir Annexe A.3). L'outil de Labos 1.5 [60] utilise des taux plus élevés, notamment pour l'autocar et les deux-roues (Annexe A.3). Contrairement à l'outil de Labos 1.5, nous gardons ci-dessous le nombre exact de voitures issu du sondage (voir Annexe B pour une comparaison détaillée des différences), qui semble conforté par les comptages (voir section 5.4).

Voiture. Le trajet domicile-travail (aller) en voiture est de 18 km en moyenne selon le sondage (tableau 3), soit 36 km par jour (covoiturage inclus). Pour 144 voitures (32% des 450 personnes) et 207 jours, on obtient

1.1 million de km.

Le taux de l'ADEME (avant juillet 2020) pour les déplacements en voiture est de 241 gCO_2/km. En réalité, nous utilisons des taux distincts pour les voitures selon la motorisation. La répartition de la motorisation issue du sondage (resp. sur le parc de véhicules en France au 1 janvier 2020 [38]) est : diesel 51% (resp. 59%), essence 43% (resp. 39%), hybride 4% (resp. 1.4%), électrique 2% (resp. 0.4%). On arrive ainsi à (pas de biais appliqué, voir section 5.4)

252 tonnes CO_2. [14]

Nous remarquons aussi que le taux de remplissage des voitures est de 1.26, bien supérieur à la moyenne nationale de 1.06 pour les trajets pendulaires.

Autocar, bus. La catégorie regroupe en principe des bus urbains et des autocars du département. Compte-tenu des dessertes au niveau du laboratoire et des distances parcourues (voir histogramme Fig. 11), nous supposons qu'il s'agit principalement d'autocars "Transisère" courte distance dont le taux d'émissions (35 gCO_2/km.passager) est considérablement plus faible que celui des bus urbains (129 gCO_2/km). L'enquête donne 472 km/jour pour les personnes sondées (tableau 3). En l'absence de données réelles, nous n'appliquons pas de correction de biais. Ce qui donne

9 tonnes de CO_2

(42 tonnes évitées par rapport aux mêmes trajets effectués en voiture.)

Deux-roues motorisé. La catégorie n'est pas très précise et regroupe des véhicules plus ou moins puissants, nous avons retenu les taux de l'ADEME assez faibles (64 gCO_2/km), correspondant plutôt à des scooters. Le faible pourcentage d'utilisation de ce mode de transport ne change pas le résultat, soit 3.5 tonnes de CO_2.

Modes peu émissifs : marche à pied, vélo, tramway, train, vélo électrique. Les modes peu émissifs (moins de 10 gCO_2/km) regroupent marche à pied, vélo, tramway, train, et vélo électrique. Le train concerne un kilométrage important, 1 205 km/jour. Le taux est de 9 gCO_2/km.passager, soit 6 tonnes de CO_2. (145 tonnes de CO_2 évitées par rapport aux mêmes trajets effectués en voiture). La somme des autres modes (vélo électrique, trottinette, tramway) contribue à 1.4 tonnes, soit 0.5% du bilan final.

Somme totale des émissions. La somme de tous les modes de déplacements donne 266 tonnes de CO_2, et on retiendra l'arrondi,

14. L'ordre de grandeur est de (32% $\times$ 450) $\times$ 207 jours$\times$ 241 g CO_2/km $\times$ 36 km=258 tonnes.

$$\boxed{300 \text{ tonnes de } CO_2}$$

ou encore 0.6 tonne en moyenne par agent. La répartition en pourcentage selon le mode de transport est donnée dans le tableau 3, colonne 5 : l'essentiel provient de la voiture avec 252 tonnes, soit 93% des émissions.

5.6 Répartition

Il est intéressant de remarquer que la moyenne de 0.6 tonne par agent reflète mal la distribution des émissions. La majorité des modes de transport utilisés est peu émissive (taux inférieur à 5% du taux de la voiture thermique) : marche à pied, vélo, tramway, train, et vélo électrique concernent 60% du personnel.

La figure 13 donne le taux de CO_2 émis par une fraction du personnel (la fraction la plus émettrice) et se lit de la façon suivante : par exemple, 50% des émissions est dû à 10% du personnel. [15]

Nous notons que la courbe est très proche de la courbe obtenue en distribuant aléatoirement et uniformément des distances dans un rayon donné, soit $x(2-x)$ (redimensionnée, voir courbe verte), ce qui ne correspond pas exactement à la distribution réelle de distances (voir histogramme de la Fig. 11), mais reproduit assez bien le résultat.

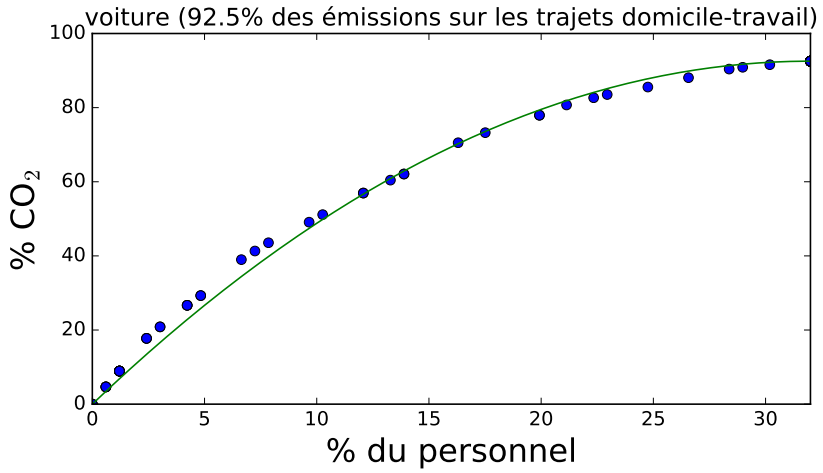


FIGURE 13 – % du personnel (le plus émetteur) émettant un certain % des émissions totales de CO_2 des trajets domicile-travail. Courbe verte : courbe qui résulterait d'une distribution aléatoire de distances dans un rayon donné, soit $x(2-x)$ (redimensionnée).

5.7 Conclusion des déplacements domicile-travail

Le total de l'estimation des émissions de CO_2 des déplacements domicile-travail est de 266 tonnes de CO_2 (arrondi à 300 tonnes) pour une année, pour les 450 agents

15. Incidemment ce serait aussi le résultat d'une distribution aléatoire de distances, voir courbe verte.

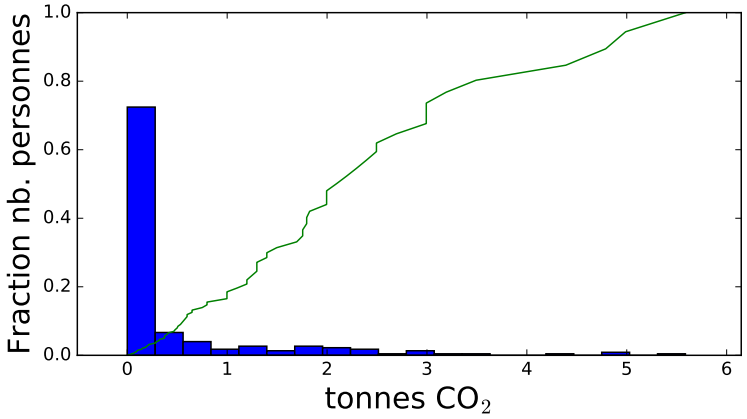


FIGURE 14 – Fraction du nombre de personnes ayant un bilan carbone donné en tonnes de CO_2, pour les déplacements domicile-travail et cumul des émissions (courbe verte).

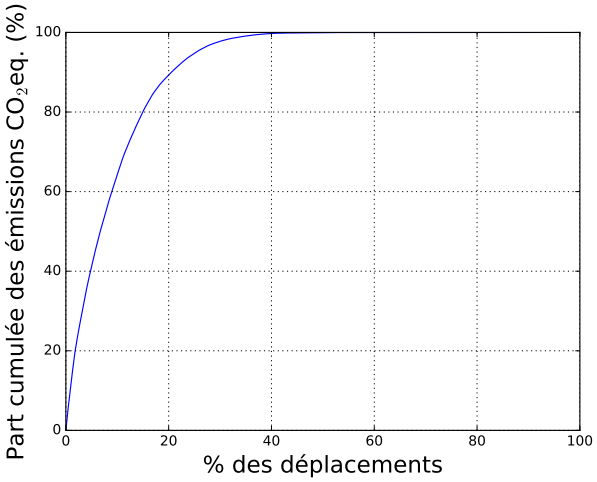


FIGURE 15 – Part cumulée des émissions en fonction du pourcentage des déplacements domicile-travail. Lecture : 20% du personnel émet 90% du CO_2. (similaire à la fig. 13 mais tout déplacement confondu).

et les 3 millions de km parcourus.

L'essentiel de ces émissions (93%) provient des trajets en voiture (1.1 millions de km ou 252 tonnes CO_2) et le report sur tous les autres modes (sauf motos de grosse cylindrée), ou covoiturage, constitue un gain important.

A titre de comparaisons :

— Le laboratoire ISTerre [16] a estimé à 164 tonnes de CO_2, pour 250 personnes les émissions des déplacements domicile-travail, ce qui est, par personne, très similaire.

— Si les kilomètres étaient entièrement parcourus en voiture, le bilan serait doublé.

Deux exemples permettent de comparer avec d'autres sources d'émissions :

— L'utilisation de la voiture à moteur thermique toute l'année, pour le trajet moyen de 18 km aller, conduit à des émissions de 1.8 tonne par an (une mission à Boston en avion : 2.1 tonnes).
— Pour un parcours quotidien plus long, soit 50 km aller (1 ou 2% du personnel), le total des émissions est de 5 tonnes par an.

Le détail de la répartition des émissions est donné sur la Fig. 14 où on voit la fraction du nombre d'agents ayant un bilan carbone déplacement donné (en tonnes). La grande majorité a un bilan très faible, voire nul (vélo, marche, transports en commun, train, vélo électrique). Le pourcentage du personnel émettant un certain pourcentage de CO_2 est représenté sur la Fig. 15 : par exemple, 80% du personnel n'émet que 10% des 266 tonnes. [16] La réduction d'un facteur 6 des émissions (objectif 2050) est possible à condition d'un report sur des modes peu émissifs d'approximativement 15% du personnel.

Notons que l'offre de transport hors de Grenoble ne permet pas à une partie du personnel de se rendre au laboratoire en transport en commun. Cela s'avère statistiquement plus fréquent pour le personnel ITA (voir Fig. 22), et peut aisément s'interpréter comme une conséquence indirecte du coût du logement sur le bassin grenoblois.

6 Achat de biens et services*

Les achats de biens et services regroupent tous les équipements achetés, fluides, bâtiments, eau... et services (courier, télécommunications, réparation et entretien de machines, formations...).

∗ Le bilan carbone associé est entaché d'une forte incertitude.

6.1 Achat d'équipements et services

6.1.1 Budget

Le montant total des dépenses (hors salaires) est de 8.8 millions d'euros pour 2019 (nous n'avons pas les données pour 2018). Le budget moyen en équipement et en fonctionnement est donc de 20 000 € par personne (450 personnes au laboratoire), mais il s'agit d'une moyenne et les budgets individuels sont très différents d'une personne à l'autre. Le minimum correspond aux dépenses d'infrastructure (électricité, chauffage, nettoyage, gardiennage, *etc.*) et est autour de 1 000 € par personne.

Les dépenses d'électricité et de chauffage s'élèvent, pour 2019, à 574 000 €. Le bilan carbone associé a été traité plus haut (partie 3) et est retiré de cette partie.

Les dépenses de missions s'élèvent à 313 000 €, dont 260 000 € pour la partie transport (dont le bilan carbone a été traité dans la partie 4). [17] Celle-ci est retiré, le montant retenu hors missions est donc de 8.5 millions d'euros.

16. Strictement, il s'agit d'un pourcentage de modes de transport déclarés (il y a davantage de modes déclarés que de personnel), d'où de légères différences d'estimation avec la Fig. 13.

17. Pour les missions, la partie transport correspond à 260 000 € et 528 tonnes de CO_2 (2019) d'après la

La répartition des dépenses par entité financière est donnée dans la colonne 1 du tableau 4. Les équipements du CRG, du liquéfacteur *etc.* sont partagés et utilisés aussi par des chercheurs extérieurs.[18] Pour simplifier, on ne retiendra donc dans le bilan CO_2 que la ligne correspondant à l'Institut Néel.

Entité financière	montant (€)	tCO_{2e}
Institut Néel	6889575	2735
Bibliothèque	18559	3
Magasin	161932	99
SERAS	92655	16
Liquéfacteur	741539	49
CRG	650786	212
TOTAL	8555044	3114

Table 4 – Montants dépensés par entité financière (2019) (hors missions) et tonnes de CO_2 (hors missions, électricité, chauffage).

6.1.2 Empreinte carbone

La méthodologie pour extraire l'empreinte carbone est détaillée dans l'appendice C. Un extrait du traitement des données est indiqué dans le tableau ci-dessous. En résumé, les achats sont classés et regroupés par un code administratif, le code NACRES renseigné à chaque achat (colonne 1). Ils sont classés par leur montant décroissant en euros (colonne 2). Chaque code NACRES se voit attribué un code ADEME (colonne 3) correspondant aux catégories d'achat de l'ADEME (voir tableau 7). Les facteurs d'émissions monétaires de l'ADEME correspondants sont indiqués en colonne 4 en $kgCO_2/k€$, conformément à l'ADEME et donnés dans le tableau 7. Enfin, les émissions de CO_2 en tonnes sont données en colonne 5.

NACRES	MONTANT	CODE	TAUX	MONTANT_CO2
XF01	1020340.0	SDIV	170.0	173.0
GA52	685901.0	HEL	26.0	18.0
XF02	573819.0	ZERO	0.0	0.0
VA11	513000.0	MACH	700.0	359.0
XD56	368954.0	SDIV	170.0	63.0
DC01	54104.0	RES	320.0	17.0
MA11	260263.0	ELEC	400.0	104.0
RD02	169932.0	DIV	367.0	62.0

section "mission". L'hébergement associé correspond à 53 000 € au taux de 320 $kgCO_2/k€$, soit 17 tonnes de CO_2. Le ratio monétaire des missions est donc de 1 750 $kgCO_2/k€$ (sans les frais d'inscription). C'est le ratio monétaire le plus élevé.

18. Par exemple, en ce qui concerne les lignes CRG de l'ESRF, seuls 9% du temps d'expérience revient à des chercheurs de l'Institut Néel. Le liquéfacteur produit de l'hélium liquide distribué à d'autres laboratoires.

```
RA01    161148.0        MET     1700.0  274.0
IA01    151223.0        ORD     400.0   60.0
OA32    149667.0        ELEC    400.0   60.0
TA01    142853.0        ELEC    400.0   57.0
OA21    112180.0        ELEC    400.0   45.0
VA12    108061.0        MACH    700.0   76.0
...
```

En faisant la somme de toutes les catégories ainsi pondérées, le total des achats correspond à 3114 tonnes de CO_2 (voir le tableau 4 pour la répartition). Pour l'Institut Néel, on retiendra donc la partie qui lui incombe,

$$\boxed{\text{2700 tonnes de } CO_2.}$$

Il s'agit donc du poste le plus important de l'empreinte carbone, mais assorti d'une forte incertitude : les taux de l'ADEME sont des moyennes sur des équipements divers et non forcément représentatifs des achats effectués au laboratoire.

Le taux moyen s'obtient à partir du coût carbone et des dépenses totales en euros. Ayant retiré l'électricité, le chauffage et les missions, le montant total dépensé est de 8 millions d'euros pour 3114 tonnes CO_2, soit une moyenne de

$$390 \text{ kg}CO_2/\text{k€}.$$

Notons pour comparaison le taux très agrégé de 178 kgCO_2/k€, qui est le rapport du PIB français sur les émissions totales [39] (qui suggère très approximativement que chaque euro dépensé contient 1 kWh d'énergie ou 178 gCO_2).

Notons également que tout transfert de commande d'achats aux taux élévés (en particulier les missions) vers des achats aux taux moins élévés améliorera le bilan carbone. Par exemple, un report des missions permettrait d'économiser 528 tonnes CO_2 (transport) plus 17 tonnes CO_2 (hébergement, voir tableau ci-dessus) soit 545 tonnes CO_2 et 313 000 €. Ce montant reporté sur des achats au taux moyen de 390 kgCO_2/k€ génèrerait 122 tonnes de CO_2, soit un gain d'approximativement 420 tonnes de CO_2.

Nous étudions maintenant plus en détails la répartition de ces émissions (Fig. 16). Les émissions les plus importantes proviennent des catégories

— "Machines et équipements" (MACH)
— "Produits électroniques et optiques" (ELEC)
— "Métaux" (MET)
— "Services" (SDIV)
— "Appareils de mesure" (MESU)
— "Equipements divers" (DIV)
— "Ordinateurs et petit équipement informatique" (ORD)

Quelques exemples d'achats correspondants à ces catégories sont donnés dans le tableau 5. L'équipement informatique (hors utilisation) occupe finalement un faible pourcentage des achats (4.5%) : une étude plus détaillée est faite dans la partie 6.5.

Le détail des dépenses et empreintes carbone par catégorie est donné sur la figure 17.

Code ADEME	exemples d'achats au laboratoire
ELEC	microscope à champs proche, microscopes, caméras, lentilles, composants électroniques, cartes, crystaux optiques, lasers, polariseurs, détecteurs, tables optiques, spectromètres, microélectronique, nanotechnologies...
MACH	Climatiseur, réservoir de transport cryogénique, compresseur, presse plieuse, bancs de pompage, enceinte ultra-vide, fours spéciaux
MET	Tube rond Cu/Ni, Indium wire, Capillaires Cupronickel, Platine Ecran, Argent fil, acier, laiton, cuivre, gallium, cobalt, vanadium, terbium *etc.*
SDIV	Infrastructure XF01, nettoyage, gardiennage, contrôles, maintenance, espaces verts, déchets, entretiens...
MESU	UHFLI Lock-in amplifier, détecteurs de fuite, traitement des signaux, oscilloscopes, multimètres thermocouples, transmetteurs de pression, ponts de mesure...
DIV	consommables pour machines-outils, micromanipulateurs, fours, plaques chauffantes, quincaillerie, parquet, peinture, aimants, outillage, pièces mécaniques usinées, congélateurs...
ORD	Ordinateurs fixes, portables, serveurs, noeuds de calcul, stockage, imprimantes, vidéoprojecteurs, cartes, réseaux...

Table 5 – Quelques exemples d'achats en 2019 au laboratoire, selon les catégories de l'ADEME.

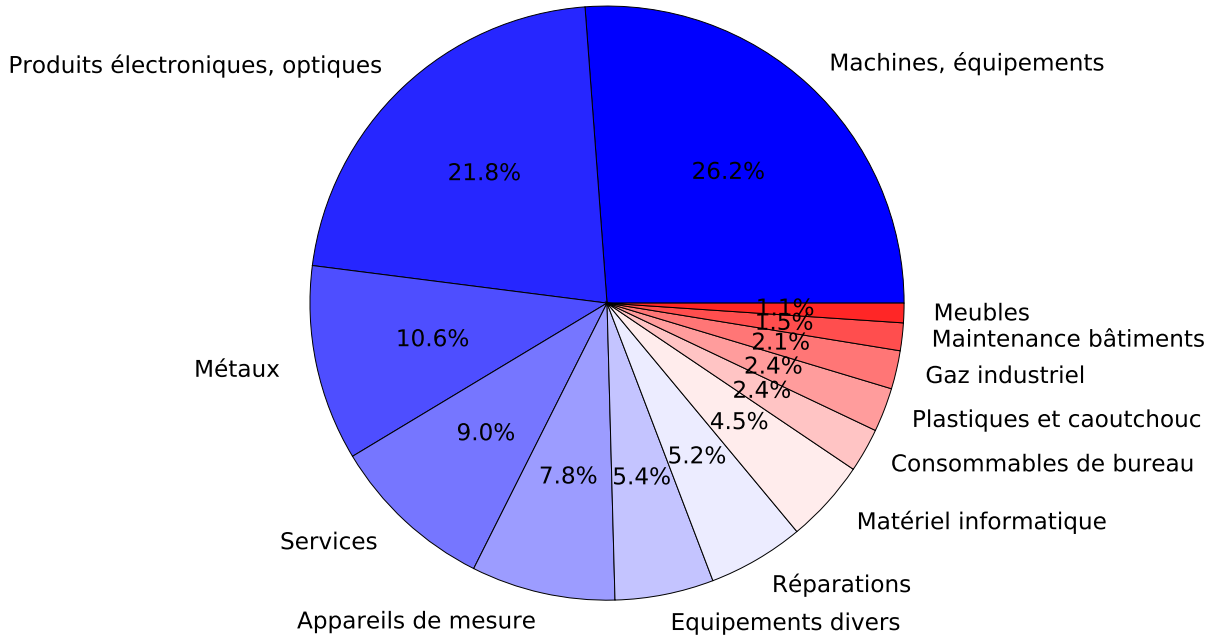


FIGURE 16 – Répartition des catégories d'achat en pourcentage des émissions totales de CO_2 pour l'année 2019, toute entité financière confondue. Les catégories avec moins de 30 tonnes par an ont été supprimées.

6.2 Construction des bâtiments

L'impact de la construction des bâtiments est plus difficile à inclure dans un bilan annuel car leur durée de vie n'est pas connue. La plupart des bâtiments de l'Institut Néel datent de 1960 et ont donc déjà une durée de vie de 60 ans. Les premières surélévations datent de 1997, et le bâtiment Nanosciences et les secondes surélévations, de 2013. Il est à noter que certains bâtiments peuvent avoir une durée de vie plus courte. Ainsi, la "maison de magistères", bâtiment voisin de l'Institut Néel, construite dans les années 1990, voit actuellement son maintien (ou sa destruction) en discussion. Comme le CO_2 émis est définitivement émis (et pas chaque année), il est un peu artificiel de l'inclure dans un bilan annuel : l'objectif est de "ventiler" sur plusieurs années les pics particulièrement importants lors des années de construction de ces bâtiments.

Exemple. Le bâtiment Nanosciences et des surélevations ont été inaugurés en 2013. Leur surface plancher est de 4 338 m^2 (dont 2 556 m^2 pour le bâtiment Nanosciences) [40].

Calcul 1. Le taux d'émission préconisé par l'ADEME est de 440 $kgCO_2e/m^2$ (Etablissement d'enseignement - structure en béton), soit 2 000 tonnes de CO_2.

Calcul 2. On utilise les "ratios monétaires" de l'ADEME, au taux de 360 $kgCO_2e$/keuro de dépense de construction (Service - Construction). Les bâtiments ont coûté 8,846 millions d'euros (hors-taxe et hors équipements et réhabilitation)[40], soit une émission de 3 200 tonnes de CO_2, ce qui donne une estimation supérieure à l'estimation ci-

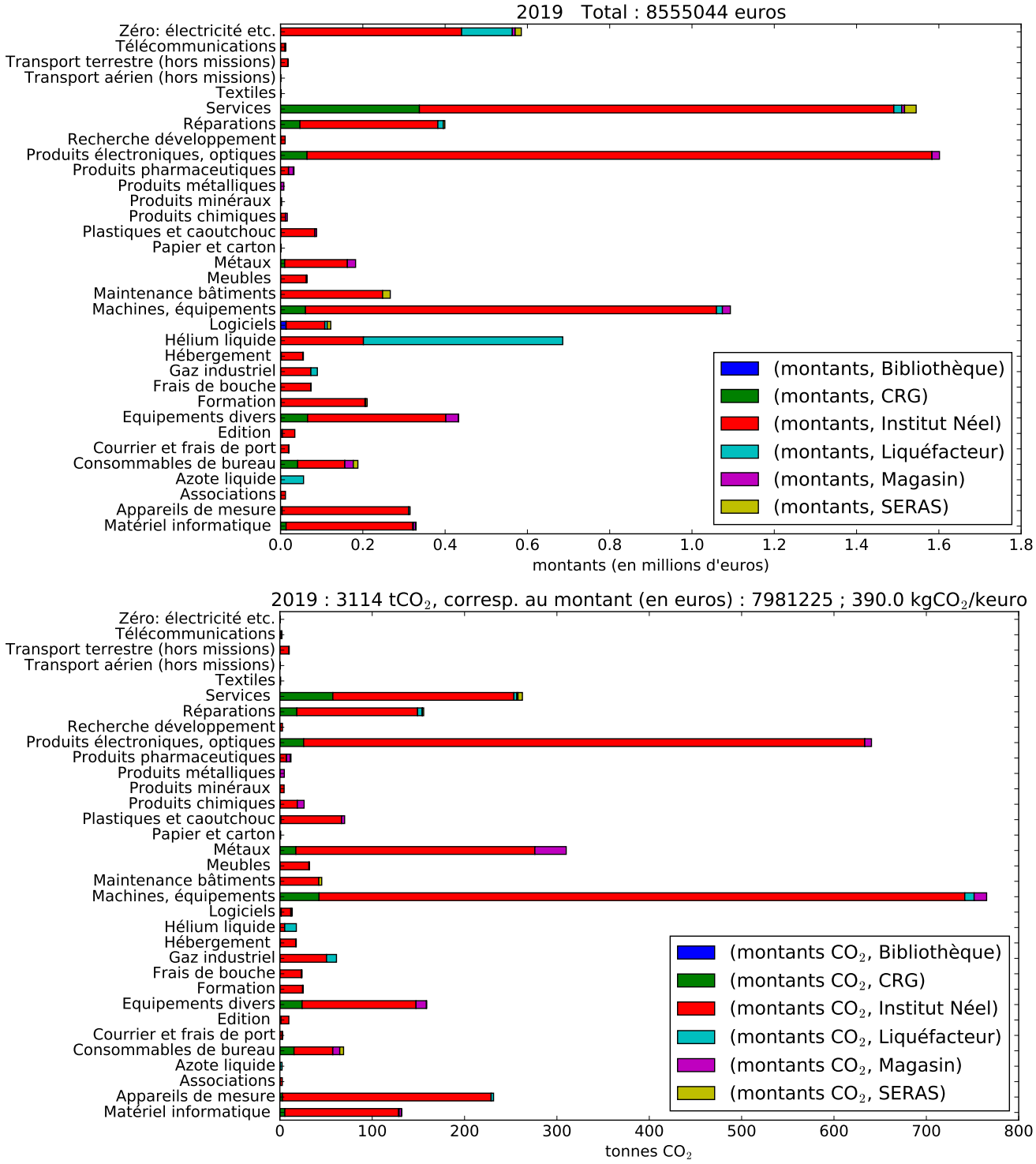


FIGURE 17 – Montants dépensés en millions d'€ (haut) et en CO_2 (bas) pour l'année 2019.

dessus.

Si on prend une durée de vie de 100 ans et en retenant la moyenne de ces deux estimations, soit 2 600 tonnes, on obtient au bilan 26 tonnes de CO_2 par an pour ces bâtiments. [19]

Estimation pour l'ensemble de l'institut. L'Institut Néel dispose de 20 000 m^2 de laboratoire. En utilisant le taux de 440 $kgCO_2e/m^2$ (les ratios monétaires ne sont pas applicables), on estime le coût carbone annuel des constructions du laboratoire, à 88 tonnes, et on arrondit à

100 tonnes de CO_2 par an pour la construction de l'ensemble des bâtiments

pour une durée de vie supposée de 100 ans. Bien sûr, cette estimation est inversement proportionnelle à la durée de vie des bâtiments, seule à même de faire diminuer l'empreinte de bâtiments déjà construits.

Par ailleurs, des rénovations lourdes sont régulièrement effectuées et incluent l'utilisation de matériaux à fort impact CO_2 (remplacement des canalisations, bétonnage d'accès en pente douce pour fauteuils roulants, remplacement de l'enrobé bitumineux, dalles en béton coulées dans les sous-sols...).

6.3 Fluides

6.3.1 Hélium liquide

Le laboratoire utilise de l'hélium liquide pour des expériences à basses températures, mais l'hélium liquide a, plus généralement, de nombreuses applications [41, 42].

Le laboratoire dispose d'un liquéfacteur pour produire l'hélium liquide à 4.2 Kelvin (K) par liquéfaction d'hélium gazeux [43]. Le liquéfacteur distribue chaque année approximativement 400 000 litres d'hélium liquide pour des expériences. Suite à ces expériences, l'hélium évaporé est récupéré et reliquéfié. Parmi ces 400 000 litres, 100 000 litres sont perdus chaque année (fuites ou hélium non recyclé pour certains sites) et donc réapprovisionnés. Notons que l'hélium gazeux (monoatomique) n'est pas un gaz à effet de serre en tant que tel mais sa production, son transport, et sa liquéfaction sont sources de dépenses d'énergie et donc d'émissions indirectes. L'ADEME ne donne pas d'estimation. Le budget hélium de l'institut (retiré du poste achat ci-dessus) a considérablement augmenté ces dernières années du fait de l'augmentation du prix de l'hélium [41] : sous la barre des 10 centimes d'euro le litre dans les années 2000, il a augmenté à 6€/litre en 2018 et à 23.7€/litre en 2021.

Le liquéfacteur dispose de machines thermiques HELIAL Air Liquide (chacune pouvant produire environ 100 litres d'hélium liquide par heure) qui reliquéfient et permettent de distribuer les 300 000 litres supplémentaires. La consommation annuelle d'électricité du liquéfacteur est de 1 GWh, soit, ramenée au nombre de litres

19. Le bâtiment Nanosciences est particulier en ceci qu'il a nécessité 9 000 tonnes de béton, dont 3 000 tonnes de massifs expérimentaux (isolation et inertie nécessaire aux expériences). Avec une masse volumique de 2 500 kg/m^3, le volume de béton utilisé est de 3 600 m^3. Le ratio volume sur surface plancher est de 3 600/4 338=0.83 m^3 de béton par m^2 de surface plancher. Le béton seul fournit ainsi entre 700 et 1400 tonnes de CO_2 (taux ADEME) sur les 2000 à 3000 tonnes de CO_2 pour la construction du bâtiment.

produits, de 3.3 kWh/litre d'hélium liquéfié.[20] Cela correspond à 57 tonnes de CO_2 au taux de l'électricité de 57 gCO_2/kWh [21], soit 190 gCO_2/litre pour la liquéfaction *in situ* d'hélium liquide. Cette estimation est comptabilisée dans la consommation électrique totale, section 3.1.[21]

Le bilan est différent pour les 100 000 litres d'hélium réapprovisionnés pour compenser les pertes. Comme le pétrole ou le gaz naturel, l'hélium est extrait du sous-sol : il est en réalité considéré comme un "polluant" du gaz naturel et séparé après extraction de celui-ci [42]. Il est ensuite liquéfié sur place (par exemple au Qatar), transporté et livré liquide à 4.2 K, par camion.

On estime que l'énergie minimale pour liquéfier 1 litre d'hélium est de 500 Wh, pour les unités de production les plus efficaces (annexe D). Pour estimer les émissions de CO_2 associées, on retiendra, dans la mesure où les unités de production (au Quatar, Etats-Unis, Russie...) produisent conjointement hélium et gaz naturel, un fonctionnement au gaz naturel, dont le taux est de 227 gCO_2/kWh [21]. Avec 500 Wh d'énergie, on obtient ainsi 113 gCO_2 pour la liquéfaction d'un litre d'hélium. Pour la part de l'extraction et du transport, on peut s'inspirer des données sur le gaz naturel. En effet, lorsque le gaz naturel est liquéfié (à 112 K) pour son transport, les vapeurs d'hélium sont séparées. L'hélium étant vu comme un produit secondaire de la production de gaz naturel, on peut donc considérer que les émissions d'extraction sont déjà comptées dans celles du gaz naturel et ne pas les compter pour l'hélium. L'amont (extraction, liquéfaction et transport) des émissions du gaz naturel s'élève à 18 % du total des émissions de 2.2 $kgCO_2/m^3$ de gaz [21][22], dont une moitié pour le transport, soit 200 gCO_2/m^3. Pour distribuer un litre d'hélium liquide, il est nécessaire de partir de 750 litres de gaz (à température et pression normales), on trouve donc 150 gCO_2 pour les émissions du transport d'un litre d'hélium liquide. Ainsi, le total est approximativement de 260 gCO_2/litre d'hélium liquide acheté. Les émissions amont pour les 100 000 litres de perte s'élèvent donc à 26 tonnes de CO_2 (total liquéfacteur).

Au total, les émissions associées à l'hélium sont de

$$85 \text{ tonnes de } CO_2$$

pour l'ensemble du liquéfacteur (achat et reliquéfaction).

Les différences de coût en CO_2 au litre 190 gCO_2/l *in situ* et 260 gCO_2/l (à l'achat) résultent de l'utilisation d'électricité dans le premier cas et d'énergie fossile dans le second, du coût du transport et de l'efficacité des installations.

Seule une partie incombe à l'Institut Néel proprement dit (le liquéfacteur distribue de l'hélium à d'autres laboratoires) : il s'agit de 18 000 litres de perte et 225 000 litres d'utilisation, soit <u>44 tonnes</u> de CO_2 avec les taux estimés ci-dessus. La partie essentielle (39 tonnes) est déjà comptabilisée dans l'électricité, et la partie achat (5

20. Notons que cette valeur n'est pas l'énergie nécessaire à la liquéfaction d'un litre (voir annexe D), mais reflète le coût total de distribution. Par exemple, il est nécessaire, du fait de l'évaporation, de liquifier davantage d'hélium. Par ailleurs, 360 000 litres d'azote liquide sont nécessaires pour le pré-refroidissement.

21. Notons une particularité du liquéfacteur : une partie de la chaleur extraite sert à alimenter le chauffage des bâtiments [43].

22. D'après Total, "en moyenne, une usine de liquéfaction consomme pour son propre fonctionnement 10 % du gaz naturel entrant".

tonnes) est comptabilisée avec les achats en appliquant un taux variable d'une année à l'autre (fortement dépendant du prix).

6.3.2 Azote liquide

Pour la production de basses températures et les expériences, le laboratoire consomme de l'azote liquide à 77 K. Abondamment présent dans l'air, il est produit en France par Air Liquide. On peut estimer que l'énergie nécessaire pour obtenir un litre d'azote liquide à 77 K est approximativement de 400 Wh (à 5.4 centimes d'euros le litre (prix 2021), l'énergie consommée ne peut guère être plus élevée). En théorie, il faut extraire 339 kJ/l de chaleur pour refroidir le gaz et le liquéfier, soit 94 Wh/l, ce à quoi il faut ajouter le rendement. Les 1.5 million de litres consommés chaque année nécessitent donc approximativement 600 MWh (hors site), soit en arrondissant,

$$35 \text{ tonnes de } CO_2 \text{ par an,}$$

estimation non retenue dans le bilan car en partie redistribuée vers d'autres laboratoires.

6.3.3 Eau

La consommation d'eau de l'Institut Néel est de

$$14\ 000 \text{ m}^3 \text{ par an.}$$

Avec le taux de 132 gCO_2/m^3 (hors infrastructure) [21], on obtient

$$1.8 \text{ tonne de } CO_2\text{, négligée dans le bilan final.}$$

6.3.4 Fuites de gaz frigorigènes fluorés

Il s'agit essentiellement des fuites de gaz des climatiseurs, gaz qui ont un haut pouvoir de gaz à effet de serre. Les fuites s'avèrent très faibles, de 0.4 kg pour l'ensemble de l'institut en 2020, et nulles en 2021, soit même avec un pouvoir de réchauffement très élevé (2000 pour le R410A ou 680 pour le R32), cela correspond à moins d'une tonne de CO_2, qu'on néglige ici. Selon l'ADEME, le poste est à surveiller surtout pour les vieux appareils.

6.4 Utilisation des grands instruments

De nombreuses expériences sont faites sur des grands instruments situés hors du laboratoire, en France ou à l'étranger. Il s'agit de comptabiliser les émissions de CO_2 associées.

Ces expériences peuvent être des expériences de diffraction, diffusion inélastique de rayons X sur des synchrotrons (European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), SOLEIL, DIAMOND...) ou de neutrons (Institut Laue Langevin,...), expériences en champs magnétiques intenses (LNCMI)... Elles sont faites par des équipes, souvent en collaboration entre plusieurs instituts, et les instruments sont évidemment très mutualisés. Il est donc nécessaire de diviser les émissions par le nombre d'institutions (en évitant les écueils des affiliations virtuelles) ou de retenir l'institution du

responsable de la demande d'expérience (le "porteur" de projet). C'est cette dernière solution qui a été retenue.

6.4.1 Expériences faites à l'ESRF

Le rayonnement synchrotron est produit par un courant d'électrons, guidés dans un anneau par de puissants électro-aimants, impliquant une forte consommation d'électricité, de l'ordre de 60 GWh par an [44]. L'ESRF est un organisme de 600 personnes, recevant 6 000 chercheurs chaque année qui travaillent sur 44 "lignes de lumière", dont 39 lignes propres à l'ESRF et 5 lignes CRG (Collaborative Research Group) du CNRS et CEA [45]. La comptabilité des expériences a lieu en "shifts de 8 heures" et l'ESRF fonctionne en continu 240 jours par an, avec trois "shifts" par jour. Il y a donc un total de 31 680 shifts. Les bilans carbone réglementaires de l'ESRF sont de 6 400 et 12 000 tonnes de CO_2 par an, pour les années 2014 et 2011 (mais avec des données prises en compte différentes) [44]. Soit entre 200 kg et 400 kg de CO_2 par shift (c'est un peu plus que la valeur retenue par ISTerre [46]), dont 110 kg de CO_2 provenant de la consommation électrique d'un shift.

L'ESRF nous a communiqué le nombre de shifts réalisés en 2018 par des porteurs de projets issus de l'Institut Néel : 229 shifts. Ces expériences sont faites soit sur des lignes CRG (137 shifts) soit sur les lignes propres à l'ESRF (92 shifts). La proportion de chercheurs de l'Institut Néel sur les cinq lignes CRG est de 9.3% (en nombre de chercheurs) [45]. Au total, les 229 shifts représentent un peu moins de **1% de l'activité**, 0.7% du nombre total de shifts précisément. L'énergie électrique consommée est donc de 0.4 GWh. Si on importe 0.7% du bilan carbone de l'ESRF, le total arrondi s'élève à <u>50-100 tonnes</u>.

6.4.2 Expériences faites au LNCMI

Les chercheurs de l'Institut Néel ayant effectué des mesures en champ magnétique intense au LNCMI en 2018 ont consommé au total 1,12 GWh d'électricité [47] sur une consommation totale du LNCMI de 15 GWh, soit **7% de l'activité**. Au taux de 57 gCO_2/kWh, cela correspond à <u>64 tonnes de CO_2</u> pour l'Institut Néel. Notons qu'en moyenne, une expérience au LNCMI (un "projet") consomme 256 MWh (moyenne 2018) : cette moyenne reflète mal la disparité des expériences qui utilisent des aimants de puissances variées (24 MW, 12 MW, ...). Il est à noter que le tonnage CO_2 donné ci-dessus pourrait être réestimé à la baisse : la partie importante de la consommation ayant lieu lors d'expériences de nuit, à un moment où le taux de CO_2 du mix énergétique est plus faible que dans la journée, mais aussi avec des variations saisonnières.

6.4.3 Expériences faites à l'ILL

L'Institut Laue Langevin (ILL), voisin, abrite un réacteur nucléaire de recherche d'une puissance de 58 MW (faible en comparaison avec les réacteurs de production) destiné à sonder la matière à l'échelle de l'angström. L'ILL occupe 515 scientifiques et employés [48]. Les expériences sont sélectionnées à partir de "proposals" issus

du monde entier : approximativement 500 “proposals” sont retenus chaque année correspondant à un certain nombre de “journées” d’expériences. Un bilan carbone a été déposé sur le site de l’ADEME et s’élève à 2 400 tonnes de CO_2 par an [49]. Cette estimation réglementaire ne prend pas en compte les mêmes éléments que l’ESRF ou l’Institut Néel, par exemple, et semble faible en comparaison. [23]

L’ILL nous a communiqué le nombre de journées d’expériences effectuées par des chercheurs de l’Institut Néel (porteurs de projet), soit 745 journées réalisées en 4 ans sur 43 869 journées [51], soit **1.7% de l’activité**. Avec l’estimation ci-dessus, on trouve 40 tonnes de CO_2.

Nous n’avons pas de données pour les autres grands instruments (SOLEIL, CERN, GANIL *etc.*), qui sont certainement moins utilisés.

Les résultats ci-dessus sont très approximatifs et on arrondit la somme à

$$\boxed{\text{200 tonnes de } CO_2\text{eq. par an}}$$

6.5 Informatique

Une question récurrente concerne la place des émissions de l’informatique. Nous nous référons notamment aux études d’un collectif du CNRS, ecoinfo [53], qui étudie cette question.

Nous avons noté que les émissions dues aux achats d’ordinateurs et de petit matériel informatique (132 tonnes CO_2, voir Fig. 17) ne constituaient qu’un assez faible pourcentage de l’ensemble des émissions des achats du laboratoire. Nous cherchons ici à préciser ces émissions.

6.5.1 Parc informatique : émissions de la fabrication

Le parc informatique du laboratoire est de 1500 à 2000 ordinateurs (bureaux, expériences). Les émissions indirectes de CO_2 proviennent de la consommation d’énergie électrique et de l’énergie nécessaire à leur construction et transport.

Les émissions pour la fabrication des ordinateurs varient bien sûr d’un ordinateur à l’autre et ecoinfo a regroupé une série de bases de données [54]. D’après DELL [55], par exemple, un portable “DELL précision 5520” conduit à l’émission de 368 kg CO_2 au cours de son cycle de vie. La répartition est donnée sur la figure 18 : 25 % pour l’utilisation et 75% (soit 276 kg CO_2) pour la fabrication et transport. On

23. On peut obtenir une estimation assez grossière en ajoutant les rubriques non prises en compte. En effet, pour le fonctionnement d’un réacteur, le taux de CO_2 pour la production d’électricité d’origine nucléaire est de 6 gCO_2/kWh [21] peut être retenu en première approximation, même si l’ILL n’a pas pour objectif de produire de l’électricité. Pour l’année 2018, le réacteur a fonctionné à 52.5 MW pendant trois cycles, totalisant 165 jours de fonctionnement [50], soit 208 GWh, ou 1 250 tonnes de CO_2 par an pour le fonctionnement du réacteur. Pour la partie missions, chauffage, déplacements domicile-travail, on peut importer le présent bilan carbone au prorata du nombre d’employés (515/450), soit 1 800 tonnes de CO_2 (en retirant achats et expériences sur grands instruments). Pour les achats, le budget équipement et investissement est de 100 millions d’euros [48], 8 fois supérieur à celui de l’Institut Néel, soit 2 700*8=21 600 tonnes de CO_2. Soit un bilan carbone total pour l’ILL d’approximativement 25 000 tonnes de CO_2. Dans ce cas, pour la partie qui incombe à l’Institut Néel, soit 1.7%, on trouverait plutôt 425 tonnes de CO_2 et 3.5 GWh d’énergie, ce qui augmenterait énormément l’empreinte carbone “grands instruments”.

remarque notamment que le transport est faible (3.4%), comparé à la construction et l'extraction des matières premières. On remarque aussi que la partie écran coûte cher en CO_2. D'après Apple, un portable "Macbook pro" avec un écran de 16 pouces émet 394 kg CO2 pour sa fabrication (85 %), transport (5 %), utilisation (10 %). En retirant l'utilisation, on arrive à 355 kg CO_2.

On retiendra (voir [54]) la valeur de 250 kg CO_2 pour la fabrication d'un portable (hors utilisation), 500 kg CO_2 pour un ordinateur fixe avec écran, 400 kg CO_2 pour un grand écran d'appoint.

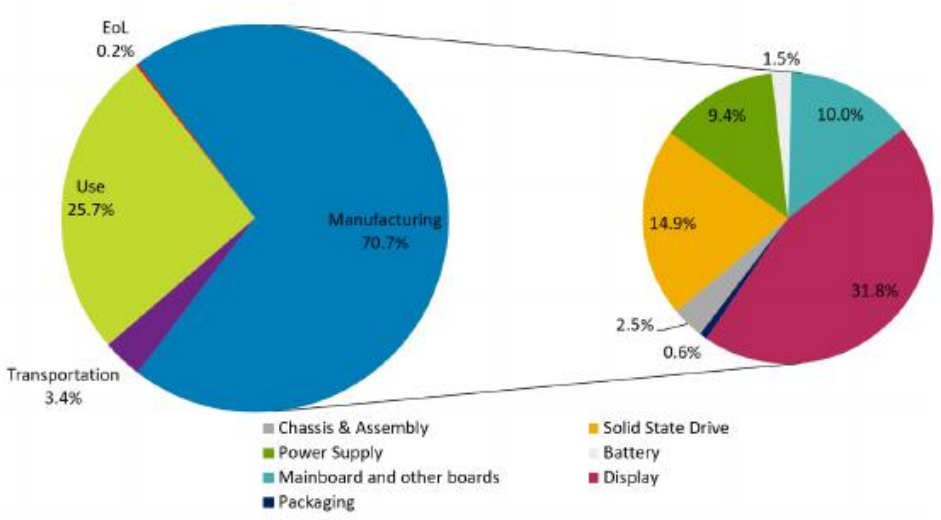


FIGURE 18 – Répartition des émissions CO_2 d'un ordinateur DELL "precision 5520", d'après DELL.

La durée de vie des PC au laboratoire est de 3-4 ans, de 5-6 ans pour les Mac [24]. Certains ordinateurs sont sûrement conservés plus longtemps, car un taux de renouvellement de 1500-2000 ordinateurs gardés 5 ans conduirait à l'achat annuel de 300-400 ordinateurs. Or c'est 200 ordinateurs qui sont achetés par an (dont 2/3 de portables). On obtient donc, pour les 200 ordinateurs (2/3 portables), (2/3)*200*250kg+(1/3)*200*500kg=67 tonnes de CO_2, et 32 tonnes pour l'achat de 80 écrans d'appoint (on suppose que les écrans sont gardés entre 2 à 3 fois plus longtemps que les ordinateurs). Restent les imprimantes (un quinzaine + six sous contrat dans le parc), tablettes (une dizaine achetée par an à 83 kgCO_2/unité en moyenne) vidéo-projecteurs, disques dûrs, clés USB, routeurs, *etc.*

La partie Achats informatiques est donc chiffrée à approximativement 100 tonnes de CO_2 par an (hors fonctionnement) et rejoint l'estimation ci-dessus (132 tonnes de CO_2) obtenue avec les ratios monétaires. Elle est déjà prise en compte.

24. Données internes à confirmer. D'après ecoinfo [53], les ordinateurs ont une durée de vie de 3-8 ans. Certains, avec des mises à jour GNU/Linux, fonctionnent plus longtemps.

6.5.2 Fonctionnement

Les ordinateurs sont utilisés pour la bureautique (gestion, mails, échange de fichiers, vidéos, suivi de cours en ligne...), le pilotage des expériences, les calculs intensifs ou les analyses de données. La consommation d'énergie associée a lieu *in situ* (prise en compte) et dans des *clouds* (non estimée). 1 000 ordinateurs en service (sur 1500 à 2000 dans le parc informatique) à 100 W de puissance, allumés la moitié du temps, concourent dans l'année à 0.4 GWh (8 % de la facture d'électricité), soit 23 tonnes CO_2.

6.5.3 Calculs intensifs

Le groupe théorie dispose en 2018 d'un "cluster de calcul" de 256 cœurs de processeur pour les calculs intensifs [25]. Un travail récent, concernant le centre de calcul GRICAD à Grenoble, a estimé le coût carbone de l'acquisition d'un cœur de processeur et de son fonctionnement sur une heure, moyennée sur sa durée de vie [52]. Le résultat est de 4.68 gCO_2/cœur.heure, dont on retiendra ici le fonctionnement 1.28 gCO_2/cœur.heure (au taux de 57 gCO_2/kWh pour l'électricité) et la construction 1.54 gCO_2eq./cœur.heure moyennée sur la durée de vie (et en supprimant les contributions du fonctionnement du centre de calcul lui-même).

En supposant un taux d'utilisation des cœurs à 60 %, on obtient pour les 256 cœurs,

— 2.1 tonnes par an [26] pour leur fabrication (fabrication du cluster, gardé 7 ans ; c'est-à-dire 9 tonnes pour la fabrication des 256 cœurs, ce qui donne 35 kg/cœur)

— 1.7 tonnes par an [27] pour sa consommation électrique (hors climatisation, assurée par l'eau industrielle), ce qui donne 7 kg CO_2 par an et par cœur (c.a.d. une puissance d'un cœur de 20 W, ce qui semble en effet un bon ordre de grandeur).

On retiendra l'empreinte (arrondie) de 256 cœurs (c'est-à-dire de ses 1.3 millions d'heures de calculs dans l'année),

4 tonnes de CO_2 par an

dont 1.7 tonnes ont déjà été comptabilisées dans les 300 tonnes de consommation électrique totale, et les 2.1 tonnes de construction ont déjà été comptabilisées dans les achats.

Une partie des calculs numériques a lieu dans des centres de calcul extérieurs (IDRIS, CEA, GRICAD,...). Un sondage auprès des utilisateurs a permis d'estimer le nombre d'heures de calcul à environ 5 millions d'heures.cœurs. En utilisant le taux de GRICAD donné ci-dessus, 4.68 gCO_2/cœur.heure, on estime à

23 tonnes de CO_2. [28]

négligé dans le bilan final.

25. 256 cœurs de processeur sont opérationnels en 2018, 284 en 2020, 440 en 2021.

26. 256 cœurs × 60 % × 8 760 h × 1.54 g /cœur.heure=2.1 tonnes.

27. 256 cœurs × 60 % × 8 760 h × 1.28 g/cœur.heure=1.7 tonnes.

28. Il est intéressant de noter que le CEA donne une estimation du coût de l'utilisation de son supercalculateur comprenant l'amortissement de la machine, le salaire des techniciens, l'électricité *etc.* Elle est d'un peu plus d'1 centime d'euro par heure.coeur, soit, avec les estimations de GRICAD, 468 $kgCO_2$/k€, un ordre de grandeur qui rejoint les ratios monétaires "matériels" de l'ADEME.

6.5.4 Flux de données

Une autre question récurrente concerne l'impact des échanges de données, elle est brièvement discutée dans l'appendice E.

Au niveau de l'Institut Néel, le Centre Réseau et Informatique Commun de Grenoble (CRIC) a mesuré le flux entrant et sortant entre mars 2020 et mars 2021, la somme est de 120 To (T=10^{12}), avec une baisse des flux due à la fermeture du laboratoire pendant le confinement. On peut donc retenir un flux de l'ordre de

$$150 \text{ To par an,}$$ [29]

soit une moyenne de 333 Go par personne et par an (hors échanges internes). Par exemple, un mail interne avec une pièce jointe d'1 Mo, envoyé à 450 personnes, *une fois par jour tous les jours de l'année* contribue à 164 Go soit 0.1% du flux total annuel. Quand on parle du poids du flux de données, on parle surtout de vidéos (cours en ligne, visioconférences, par exemple). Les émissions propres aux visioconférences sont étudiées ici [57].

Quelles sont les émissions de CO_2 associées ? Avec un taux de 125 gCO_2/Go (voir appendice E et Ref. [56]), on obtient

$$20 \text{ tonnes de } CO_2$$

soit de l'ordre de 0.5 % du bilan carbone, ou 0.35 GWh. Cette estimation est très incertaine mais une partie de l'électricité associée est déjà comptabilisée, une partie est extérieure. Notons que nous avons utilisé ci-dessus le taux de 125 gCO_2/Go et non celui de l'ADEME, 35 kgCO_2/Go (voir la discussion dans l'appendice E). Ce dernier conduirait pour les 150 To échangés à l'Institut Néel chaque année à 5 250 tonnes de CO_2, soit le bilan carbone de l'institut. Il faut aussi garder en mémoire que doubler les flux sur une infrastructure existante qui n'est pas saturée (ordinateurs, réseaux) ne double pas le coût en CO_2.

6.5.5 Conclusion de l'informatique

Ainsi, on estime que les achats informatiques participent pour 132 tonnes de CO_2 d'émissions importées, le fonctionnement du parc informatique (électricité) pour 23 tonnes de CO_2 (on retrouve un facteur proche de 1/4 entre l'utilisation et la construction), les calculs intensifs (principalement hors site) pour 27 tonnes, et les flux de données à 20 tonnes, soit un total arrondi à

$$200 \text{ tonnes de } CO_2,$$

déjà comptabilisé pour l'essentiel.

29. Pour fixer les ordres de grandeur, un caractère occupe un ou deux octets, une phrase est de quelques dizaines d'octets, un mail simple est de quelques kiloctets Ko (K=10^3), un image compressée ou trente secondes de son de quelques centaines de Ko, une image brute ou quelques secondes de vidéo, quelques Mo (M=10^6), selon la résolution (et peut faire l'objet d'une pièce jointe d'un mail), une carte SD ou une clé USB contient quelques dizaines de Go (G=10^9), un disque dur de l'ordre du To (T=10^{12}),

6.6 Restauration

L'alimentation est de manière générale grande émetrice de gaz à effet de serre (15-25 % de l'empreinte personnelle), avec des variations très importantes en fonction du régime alimentaire. Ainsi, pour donner un ordre de grandeur, les repas du midi de 450 personnes (effectif du laboratoire), pour 220 jours dans l'année génèrent en moyenne, selon l'ADEME,

200 tonnes CO_2 par an

avec un taux de 2 kgCO_2 par repas (moyen) [21]. Ce taux moyen reflète des disparités importantes [21] :
— 0.51 kg CO_2 par repas végétarien
— 1.35 kg CO_2 par repas avec poulet
— 6.29 kg CO_2 par repas avec boeuf
Ainsi, des repas exclusivement végétariens génèreraient des émissions quatre fois moindres, soit

51 tonnes CO_2 par an.

Le taux des repas véganes est absent des données de l'ADEME, mais est encore inférieur à celui des repas végétariens. De même, non pris en compte par l'ADEME, la question des aliments locaux et de saison joue un rôle, quoique plus faible que le type de régime [58].

Les membres du laboratoire ont accès à une cantine professionnelle subventionnée par le CNRS qui est utilisée par une partie du personnel (un autre apporte son propre repas ou fait appel à une restauration extérieure). En ce qui concerne la restauration collective subventionnée, la question de l'orientation des subventions peut se poser au niveau du CNRS. La question est aussi celle de la différence entre des pratiques individuelles et les pratiques de la restauration collective -achat locaux ou de gros (générant plus de transport), type de régime disponible pour ceux qui le souhaitent, gaspillage alimentaire. On peut estimer ce dernier poste : 100 à 170 g d'aliments sont gaspillés en moyenne par repas dans la restauration collective, soit 13 % à 23 % en poids d'un repas moyen et quatre fois plus qu'un repas hors restauration collective, [30] malgré les efforts du secteur. Ainsi au niveau du laboratoire, si 80 % du personnel mange tous les midis à la cantine professionnelle, c'est entre 16 et 28 tonnes de CO_2 par an. Nous arrondissons à (limite inférieure, la limite supérieure étant la restauration dans les hôpitaux), 20 tonnes de CO_2 par an, uniquement pour le gaspillage alimentaire (en soustrayant le gaspillage moyen hors restauration collective). Notons que le traitement de ces "déchets" alimentaires est négligeable : 100g $\times$ 80 % 450 personnes $\times$ 200 jours, ce qui représente 7 tonnes de déchets par an, au taux de 48.1 kgCO_2/tonne (déchets alimentaires -fin de vie moyenne), soit 0.3 tonnes de CO_2.

Traiteurs, *etc.* Les "frais de bouche" (de l'ordre de 70 000 €) héritent des mêmes commentaires généraux que dans le paragraphe ci-dessus (type de régime et aliments locaux et de saison). Avantages "en nature", ils se soustraient des repas personnels et doivent être comptabilisés en différence.

30. *Source* ADEME, fiche Réduire le gaspillage alimentaire en restauration collective, mars 2019, page 9.

6.7 Traitement des déchets

En l'absence de données, nous ne pouvons pas donner d'estimation fiable. On note que 130 kg de déchets sont produits en moyenne par an par salarié du secteur tertiaire, dont 3/4 de papier. Pour les 450 personnes de l'institut, cela représenterait 60 tonnes de déchets par an. Si on prend le taux moyen du papier, soit 43.1 kgCO_2e/tonne. On trouve donc 2.5 tonnes de CO_2, mais les déchets de mobilier, déchets spéciaux, déchets d'équipements électriques et électroniques ne sont pas estimés.

7 Remerciements

Nous remercions les membres du collectif "Labos-En-Transition" ainsi que la direction du laboratoire. Ce document de travail n'est pas un rapport officiel. Il est issu d'un groupe de travail du collectif "Labos-En-Transition" et a été fait au sein du laboratoire. Nous remercions également Caroline Bartoli (Institut Néel), Denis Basko (LPMMC), Patrick Belmain (Institut Néel), Nathalie Boudet (Institut Néel), Françoise Berthoud (GRICAD et ecoinfo), Giovanna Cicognani (ILL), François Debray (LNCMI), Marie Derouette (Délégation régionale du CNRS), Dominique Fournier (CRIC), Thierry Fournier (Institut Néel), Stéphane Grenier (Institut Néel), Stéphanie Malbet-Monaco (ESRF), Julien Minet (Institut Néel), Jean-Franck Pini (Institut Néel), Jean-Philippe Poizat (Institut Néel), Olivier Proux (ESRF), Pascal Quémerais (Institut Néel), Luc Ronayette (LNCMI), Virginie Simonet (Institut Néel) et Robert Whitney (LPMMC) pour des informations diverses et variées.

A Taux de CO_2 de la Base Carbone®

La Base Carbone® est une base de données de taux d'émissions développée par l'ADEME [21]. Quelques taux utilisés sont indiqués ci-dessous.

A.1 Electricité

Le taux de CO_2 de l'électricité est, pour la France, de 57 gCO_2/kWh (2018). Les taux de la Base Carbone, selon le mode de production, sont résumés sur la figure 19, pour information.

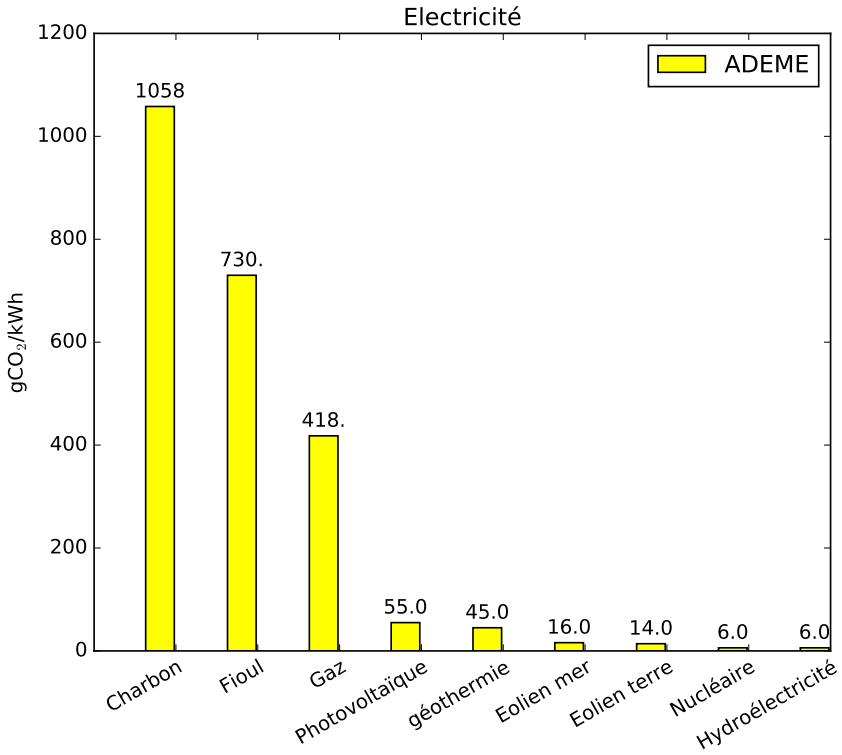


FIGURE 19 – Quelques taux de l'ADEME pour la production d'électricité à partir de diverses sources [21].

A.2 Chauffage

Le chauffage de l'Institut Néel est assuré par le réseau de chauffage urbain, dont le taux d'émissions est, pour Grenoble, de 141 gCO_2/kWh (ADEME/journal officiel).

A titre de comparaison (non fourni par l'ADEME), il est intéressant de noter les taux de CO_2 bruts pour les différents modes de chauffage calculés à partir

du poids de CO_2 émis sur la chaleur dégagée (enthalpie de réaction), Fig. 20 (en haut). Par exemple, la combustion d'1 kg de méthane (gaz naturel) génère 2.75 kg de CO_2 et 13.9 kWh de chaleur (50 MJ/kg [59]), soit 200 gCO_2/kWh. Pour mesurer l'efficacité du chauffage, il est nécessaire de prendre en compte le rendement de l'appareil de chauffage. Les taux d'émissions correspondants sont donnés sur la figure 20 (en bas), et vont de 1 040 gCO_2/kWh de chaleur (bois poêle ancien) à 19 gCO_2/kWh (pompes à chaleur).

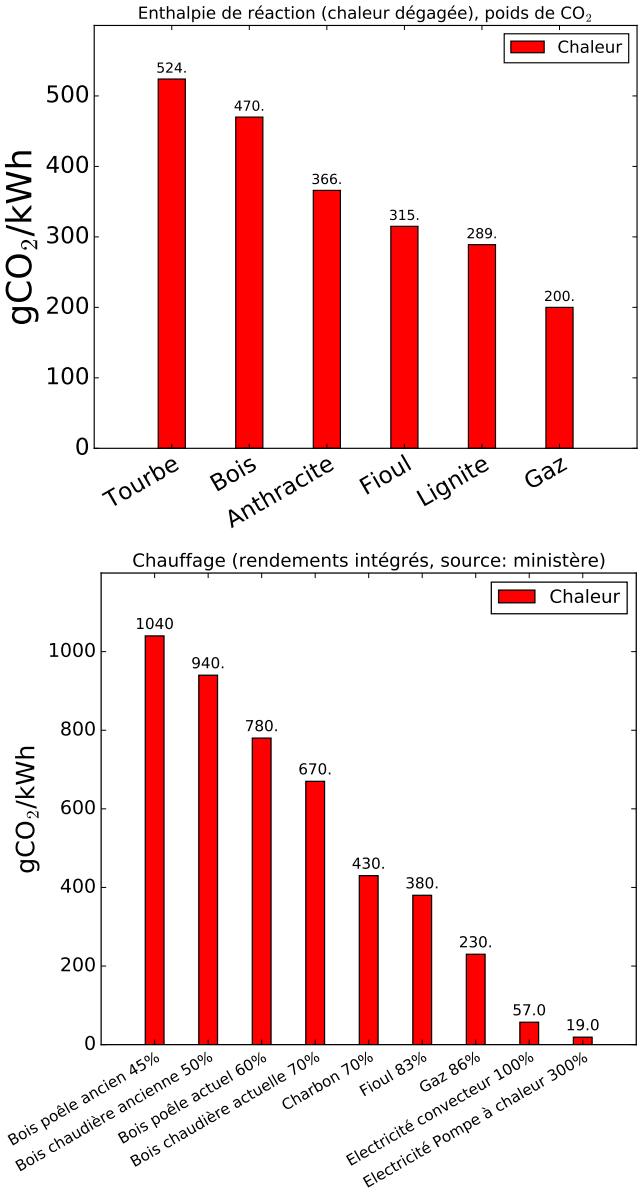


FIGURE 20 – Taux de CO_2 obtenus à partir des enthalpies de réaction de combustion (théoriques) [59] (fig. du haut) et avec les rendements intégrés (fig. du bas).

A.3 Transport de personnes

Les taux de la Base Carbone pour le transport des personnes (CO_2/km ou par km.passager) sont résumés dans le tableau 6 et la figure 21. Ils sont comparés avec ceux de Labos 1.5 [60]. Les taux sont choisis pour une agglomération de plus de 250 000 habitants (Grenoble et sa métropole). Le coût en CO_2 de la construction des infrastructures n'est pas inclus.

Mode	ADEME [21] (gCO_2/km.pass)	Labos 1.5 [60] (gCO_2/km.pass)
Voiture thermique	241*	241
Voiture hybride	147	183
Voiture électrique	103	103
Autobus	129	135
Autocar courte distance	35	135
Deux-roues motorisé	64	205
Moto $\leq$ 250 cm^3 urbain	64	205
Moto > 250 cm^3 urbain	154	205
Train	9	18
Tramway	3	4
Vélo	0	5
Vélo électrique	11	16
Trottinette électrique	25	61
Marche	0	0
Avion (long courrier)	152	83
Avion (moyen courrier)	187	102
Avion (court courrier)	258	141

Table 6 – Taux de CO_2 en gCO_2/km.passager.

Quelques remarques et ordres de grandeur.

— * Le taux pour les voitures à moteur thermique correspond à celui de l'ADEME *avant juillet 2020* et est identique au taux retenu par Labos 1.5 [60]. Notons que la combustion d'un litre d'essence émet 2.28 kg de CO_2. Une voiture moyenne (France) consomme 6.33 litres aux 100 kilomètres. Il faut donc 0.0633 litre pour faire 1 km, donc émettre 144 g CO_2 au km. L'extraction, raffinage et transport du pétrole contribue à 20%, soit 29 g au km. On arrive donc à 173 g par km, auquel il faut ajouter une estimation du coût de la construction. C'est ainsi qu'avant 2020, l'ADEME arrivait à 241 gCO_2/km.

— Le taux de la voiture électrique semble élevé. Si une voiture électrique consomme 15 kWh aux 100 kilomètres, cela donne 8.5 gCO_2/km (mix électricité France). Il faut ajouter la production de la batterie qui est typi-

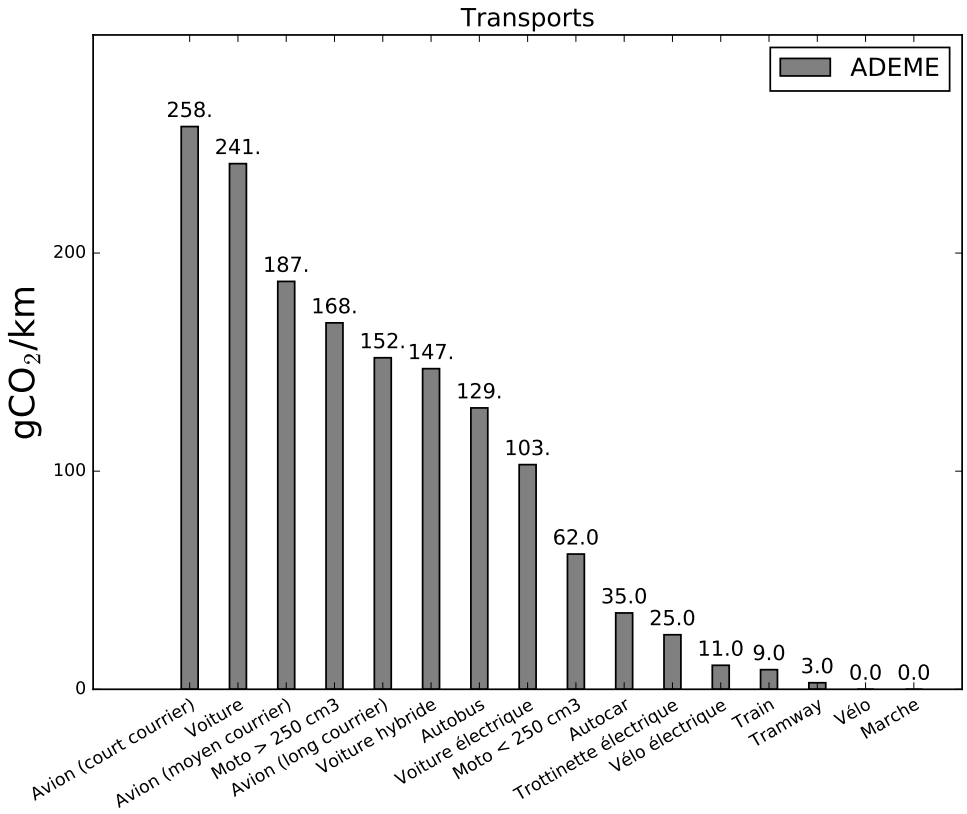


FIGURE 21 – Quelques taux de l'ADEME pour le transport de personnes [21].

quement entre 30 et 270 $kgCO_2$/kWh de batterie [61]. Pour une batterie de 40 kWh, cela donne 1.2-8.1 tonnes CO_2. Si la batterie permet de parcourir au total 200 000 km, la fourchette est de 6-40 gCO_2/km pour la production de la batterie. En ajoutant la construction d'une voiture (hors batterie), de 40 gCO_2/km, on arrive ainsi à une fourchette de 50-90 gCO_2/km.

— Le taux de la voiture hybride rechargeable peut aussi sembler élevé : une consommation de 2 litres aux 100 km, soit 55 gCO_2/km + 5 gCO_2 de recharge électrique + fabrication d'une batterie de 10 kWh (10 gCO_2/km) + fabrication du véhicule (40 gCO_2/km), soit 110 gCO_2/km.

— La masse d'un autocar est de 10 fois celle d'une voiture, pour 60 passagers. En supposant un taux d'occupation de 58 % [62] (soit 34 personnes, contre 1.2 pour une voiture) et une consommation de 60 % de celle d'une voiture à poids comparable (vitesse plus faible et moteur plus efficace), on obtient $1.2/30 \times .6 \times 10 \times 241$ g CO_2=50 g CO_2/passager.km, ce qui est un peu plus grand que le taux retenu.

— Les trottinettes électriques (en libre service) ont un taux beaucoup plus élevé que les vélos électriques (durée de vie faible, nécessité de les collecter

pour les recharger).

— Concernant les avions, il existe un facteur 2 entre les taux de l'ADEME et les taux de certains "comparateurs" disponibles en ligne (aussi avec l'outil GES de Labos 1.5). Cette différence est due aux trainées de condensation d'altitude (cirrus induits) qui contribuent à l'effet radiatif d'un facteur 2 et au réchauffement global à un instant t [63]. Elles sont prises en compte dans le premier cas et non dans le second. Ainsi, les transporteurs *ne sont pas obligés* de prendre en compte cet effet, mais seulement de comptabiliser le CO_2 émis. Dans l'esprit du CO_2 *équivalent*, il est évidemment intéressant d'avoir une idée de l'effet total des avions sur le réchauffement climatique. L'ADEME [21] : "A titre conservatoire, et faute de mieux à ce jour, l'ADEME propose de mettre ce facteur multiplicateur à 2. Dit autrement, pour un kg équivalent CO_2 dû au CO_2 de la combustion, nous rajouterons un kg équivalent CO_2 pour tenir compte du reste."

A.4 Catégories d'achats et ratios monétaires kgCO_2/k€

La description des catégories d'achat de l'ADEME et des taux de CO_2 est donné dans le tableau 7. Ces taux relèvent de moyenne sur des équipements assez divers et sont donc entachés de fortes incertitudes. Nous remarquons par exemple quelques différences avec les constructeurs.

— Pour un ordinateur portable mac book pro 16" (acheté 2000 €), Apple estime les émissions à 394 kg CO_2, soit un taux de 200 kgCO_2/k€, deux fois plus faible que le taux de l'ADEME.

— Pour un ordinateur portable DELL XPS 13 (acheté 1600 €), DELL estime les émissions à 317 kg CO_2, soit là encore un taux de 200 kgCO_2/k€.

— Un écran 27" DELL U2719DC à 500 €, est, selon DELL, à 673 kgCO_2, soit 1 300 kgCO_2/k€.

Catégorie d'achats	code	$kgCO_{2e}$/k€
Assurances	ASS	110.0
Frais bancaires	BANQ	110.0
Courrier et frais de port	C	130.0
Télécommunications	TEL	170.0
Hébergement (des missions)	RES	320.0
Services (imprimerie, publicité, nettoyage, gardiennage, infrastruct...)	SDIV	170.0
Maintenance des bâtiments	MAIN	170.0
Edition (livres, abonnements, publications)	EDIT	280.0
Réparation et installation de machines et équipements	REP	390.0
Transport terrestre (hors missions)	TT	560.0
Transport aérien (hors missions)	TA	1190.0
Restauration (frais de bouche)	ALIM	320.0
Produits minéraux (ciment, verre, etc.)	VER	1800.0
Plastiques et caoutchouc	PLAS	800.0
Papier et carton	PAP	900.0
Textiles	TEXT	600.0
Meubles et autres biens manufacturés	MEUB	500.0
Produits chimiques	CHIM	1600.0
Produits pharmaceutiques, équipements de sécurité	SECU	367.0
Métaux (aluminium, cuivre, acier, etc.)	MET	1700.0
Produits métalliques	METP	600.0
Machines et équipements	MACH	700.0
Produits électroniques et optiques	ELEC	400.0
Ordinateurs et petit équipement informatique	ORD	400.0
Equipements divers	DIV	367.0
Appareils de mesure	MESU	735.0
Recherche et développement	RD	250.0
Formation	FORM	120.0
Logiciels	L	110.0
Associations	ASSO	220.0
Consommables de bureau	BUR	367.0
Gaz industriel	GAZ	685.0
Hélium liquide	HEL	26.0
Azote liquide	AZO	43.0
Zéro : infrast. électricité (XF02), déplacements, CDD etc.	ZERO	0.0

Table 7 – Quelques exemples de ratios monétaires de l'ADEME [21], les codes sont empreintés ici [19].

B Différences avec l'outil de Labos 1.5

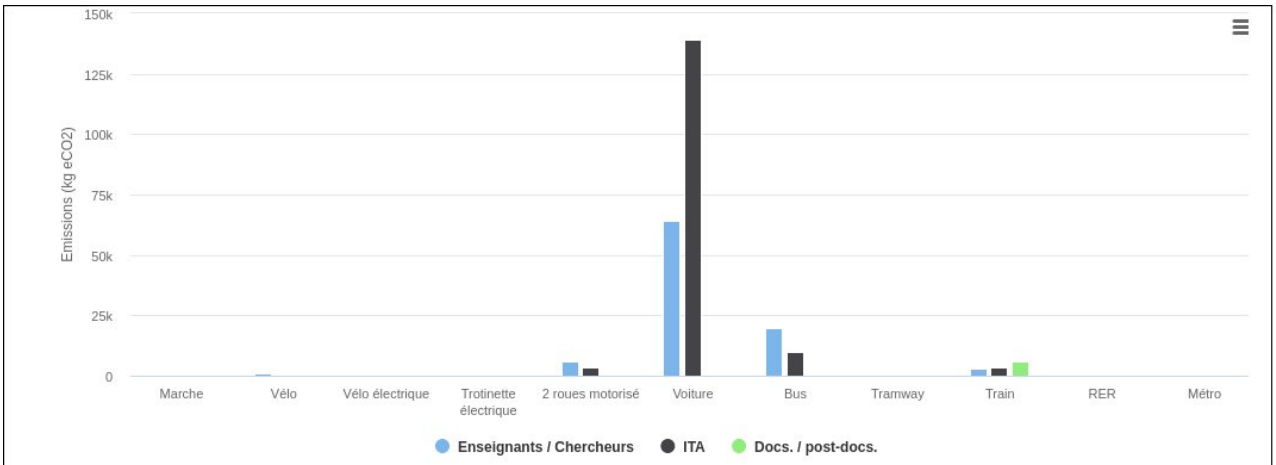
Le CNRS recommande désormais l'utilisation de l'application du collectif Labos 1.5 pour faire le bilan carbone d'un laboratoire (disponible ici [22]).

Certaines estimations diffèrent des notres et relèvent de choix différents que nous expliquons ci-dessous (nous avons notamment appliqué les taux de la Base Carbone® de l'ADEME). La méthodologie de Labos 1.5 est justifiée ici [60].

— Energies (électricité, chauffage dans notre cas) : les estimations sont identiques.
— Missions : la différence essentielle provient des taux utilisés, voir tableau 6. En particulier, suite à l'absence du facteur 2 des trainées de condensation dans les taux des trajets en avion (voir la discussion à la fin de la partie A.3), Labos 1.5 obtient une contribution des trajets en avion deux fois plus faible.
— Déplacements domicile-travail : nous avons utilisé l'enquête développée par Labos 1.5. Notre analyse conduit à 266 tonnes de CO_2 (cf. partie 5) alors que Labos 1.5 estime les émissions à 258 tonnes pour les mêmes données (voir figure 22). Ces deux estimations sont quasiment indentiques mais plusieurs différences se compensent. D'une part, les taux de Labos 1.5 sont plus élevés (voir tableau 6) ; en les utilisant, on trouverait 320 tonnes. D'autre part, les choix de correction de biais ne sont pas les mêmes :
  — Labos 1.5 applique un facteur correctif sur le biais de représentation des catégories de personnel.[31] D'après la figure 8, les chercheurs et ITA sont surreprésentés et les doctorants et post-doctorants (dont aucun des sondés n'utilise de voiture) sont sous-représentés : il y a 170 chercheurs et enseignants-chercheurs alors que le pourcentage de sondés suggère 46.5%*450=209. Typiquement, la correction revient à réduire le nombre de voitures d'un facteur 209/170, soit 117 voitures, et réduit donc le nombre de kilomètres du même facteur.
  — L'analyse présentée ici montre que le nombre de voitures est correctement estimé dans l'enquête, résultat conforté par les comptages et qui entraîne une forte différence sur le nombre de kilomètres estimés. Plus généralement, elle suggère qu'il est important d'estimer précisément la présence ou non d'un biais sur le nombre de voitures, plutôt que les biais des catégories socio-professionnelles.

  Il y a deux biais dans notre sondage : certes les chercheurs et ITA ont répondu davantage (et ont plus de voitures, donc il faudrait corriger à la baisse, c'est ce que fait l'outil de Labos 1.5), mais parmi les chercheurs et ITA, ce sont plutôt (il s'agit de biais assez légers) ceux qui n'utilisent pas la voiture qui ont répondu, et donc il faut corriger à la hausse. En ayant accès à des comptages représentatifs, nous avons ainsi pu corriger correctement

31. Il est nécessaire de renseigner, parmi les 450 personnes du laboratoire, le nombre de chercheurs (170), d'ITA (140) et de doctorants ou post-doctorants (140).



Statut	Marche	Vélo	Vélo électrique	Trotinette électrique	2 roues motorisé	Voiture	Bus	Tramway	Train	RER	Métro
Enseignants / Chercheurs	0 (0)	942 (660)	639 (448)	0 (0)	6093 (3656)	63955 (39205)	19923 (11954)	274 (165)	2766 (1436)	128 (26)	0 (0)
ITA	0 (0)	686 (480)	296 (207)	227 (159)	3339 (2003)	139029 (83418)	9624 (5774)	161 (96)	3393 (2036)	0 (0)	0 (0)
Docs. / post-docs.	0 (0)	694 (486)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	297 (178)	6027 (3616)	0 (0)	25 (5)

FIGURE 22 – Analyse des émissions des déplacements domicile-travail avec l'outil de Labos 1.5 [22]. Les émissions totales (258 tonnes) sont légèrement inférieures à notre analyse (266 tonnes).

ces biais.

— Achats : Labos 1.5 ne prend pas encore en compte les achats hors ordinateurs, mais développe une approche similaire.

C Méthodologie pour les émissions des achats

Notre estimation actuelle de l'empreinte carbone des achats est assez incertaine. Elle repose sur des catégories d'achat considérées par l'ADEME qui regroupent parfois des achats assez différents.

Afin d'analyser cette empreinte carbone, le service financier du laboratoire nous a transmis la liste complète des commandes du laboratoire pour l'année 2019. [32]

32. Il s'agit d'un fichier excell de 15 000 lignes avec une ligne par commande. Le traitement est fait à l'aide de scripts écrits en python à l'aide de la librairie pandas.

De chaque commande, nous avons extrait les données suivantes, voir Fig. 23 : code NACRES (code famille, voir ci-dessous), montant hors-taxe en euros, année, entité financière, libellé de la commande, et entreprise bénéficiaire. Les

6914	VA12	110.7	2019	1882	Vanne de remise Ã l'air KF10	KURT J. LESKER COMPANY LTD
6915	VA12	330	2019	1882	Vanne d'angle UHV inox CF16 VAT	KURT J. LESKER COMPANY LTD
6916	VA12	450	2019	1882	Vanne d'angle UHV 40CF inox VAT	KURT J. LESKER COMPANY LTD
6917	XD61	56.66	2019	1882	Frais de port	KURT J. LESKER COMPANY LTD
6918	NA23	212.4	2019	1882	Ta foil 0.25mm thick 100x100mm	THERMO FISHER (KANDEL) GMBH *
6919	VA03	464	2019	1882	Cable HT pour PI alim. type Agilent	VINCI TECHNOLOGIES
6920	VA03	464	2019	1882	Cable HT pour PI alim. type Riber	VINCI TECHNOLOGIES
6921	XD61	30	2019	1882	Frais de port	VINCI TECHNOLOGIES

FIGURE 23 – Extrait du fichier des achats.

codes NACRES (colonne 1, par exemple "VA12") proviennent d'une nomenclature administrative de l'agence de mutualisation des universités et des établissements (AMUE). Cette nomenclature, dont un extrait est donné sur la figure 24, contient approximativement 2000 codes dont la description complète est disponible ici [64]. Ces codes sont utiles pour faire une estimation de l'empreinte

MA.1		MICROSCOPIE A CHAMP PROCHE ET PROFILOMETRIE A CONTACT : EQUIPEMENTS, ACCESSOIRES ET CONSOMMABLES SPECIFIQUES		
MA.11	N647	MICROSCOPES A CHAMP PROCHE (AFM, SPM, SNOM, ELECTROCHIMIQUES...)		60670000
MA.12	N648	PROFILOMETRES A CONTACT		60670000
MA.13	N649	POINTES ET AUTRES CONSOMMABLES POUR MICROSCOPES A CHAMP PROCHE	60228000	60670000
MA.14	N650	MICROSCOPIE A CHAMP PROCHE : AUTRE MATERIEL ET PIECES DETACHEES		60670000
MA.15	N651	MICROSCOPIE A CHAMP PROCHE : ELECTRONIQUE DE REMPLACEMENT		60670000
MA.2		MICROSCOPIE ELECTRONIQUE ET IONIQUE : EQUIPEMENTS, ACCESSOIRES ET CONSOMMABLES SPECIFIQUES		
MA.21	N652	MICROSCOPES ELECTRONIQUES ET IONIQUES		60670000
MA.22	N653	MICROSCOPIE ELECTRONIQUE ET IONIQUE : DETECTEURS SPECIFIQUES		60670000

FIGURE 24 – Extrait du fichier de nomenclature des codes NACRES (qui apparaissent à gauche) [64].

carbone. [33]

L'ADEME fournit des ratios monétaires (en $kgCO_2$/k€ hors taxes) pour des catégories d'achats, décrites dans le tableau 7. Nous avons néanmoins séparé certaines catégories pour une lecture plus fine : par exemple, les ordinateurs, initialement dans la catégorie "Produits informatiques, électroniques et optiques" forment une nouvelle catégorie à part. De même, les "frais de bouche" ont été classés en "Restauration" et séparés de l'hébergement (qui ne concerne plus que les missions). L'hélium et l'azote liquide sont aussi traités à part. Nous avons donc fléché les codes NACRES apparaissant dans les achats (environ 500) vers ces catégories, [34] par exemple,

```
AA63    ALIM
AB01    BUR
AB02    MEUB
```

33. Idéalement, chaque code NACRES pourrait correspondre à un taux d'émission de CO_2 par euro dépensé mais cette correspondance n'existe pas, à ce jour.

34. Le collectif Labos 1.5 développe une approche similaire.

```
BB14    SDIV
BD24    MACH
BD25    MEUB
BE01    MAIN
CB12    SDIV
DC01    RES
EB04    SDIV
...
```

où la première colonne est une liste de codes NACRES et la seconde une liste de catégories ADEME. Le descriptif des codes de la seconde colonne et les taux associés sont donnés par le tableau 7 (par exemple, la restauration, code ALIM, correspond à 320 kgCO_2/k€), ainsi nous avons obtenu un ratio monétaire pour chaque code NACRES. En faisant la somme sur tous les achats, [35] nous obtenons l'empreinte carbone. [36]

D Quelle est l'énergie nécessaire pour liquéfier un litre d'hélium ?

Afin d'estimer le bilan carbone de la production d'1 litre d'hélium liquide, il est nécessaire d'estimer l'énergie dépensée. Quelle est l'énergie nécessaire pour produire 1 litre d'hélium liquide à 4.2 K à partir d'helium gazeux à 300 K ? Si la réponse est avant tout expérimentale et dépend surtout des procédés et du but recherché (disponibilité, rapidité, quantité...), quelques repères peuvent être donnés.

Chaleur. Une certaine quantité de chaleur est à extraire du fluide à refroidir. Pour l'hélium, la quantité de chaleur à extraire pour refroidir le gaz de 300 K à 4.2 K à pression atmosphérique est donnée en intégrant la chaleur spécifique (connue) en fonction de la température, soit 1480 kJ/kg de liquide (ou 51.4 Wh/litre). La chaleur latente de liquéfaction à 4.2 K (pour transformer le gaz en liquide) est faible et vaut Q_l =20.6 kJ/kg (ou 0.69 Wh/litre). La chaleur emmagasinée à 300 K moins celle à 4.2 K est donc de 188 kJ par litre de liquide, ou 52 Wh/litre.

35. Nous avons retiré certains postes, traités à part : électricité, chauffage, missions (partie transport), eau, hélium, azote.

36. En comptabilité, on distingue habituellement la "classe 2" (immobilisation, noté IM, équipement > 1 000 euros, durée de vie > 1 an, inventorié et faisant partie du patrimoine de l'entreprise) et la "classe 6" (fonctionnement, noté FO, < 1 000 euros, consommable mais pas forcément). L'ADEME ne parle que de la classe 6 pour les ratios monétaires et compte l'immobilisation à part, mais la différence fonctionnement, immobilisation est en partie arbitraire [65]. L'avantage de l'immobilisation est d'amortir sur plusieurs années un investissement important et de lisser la comptabilité d'une année à l'autre. En l'absence de fortes fluctuations, nous n'avons pas retenu cette approche.

Rendement de Carnot. Pour extraire cette chaleur, il est nécessaire de fournir un travail W. D'après les principes de la thermodynamique, le travail minimal à fournir pour extraire une quantité de chaleur Q d'un fluide à une température froide T_f (appelé source froide) et la transférer à une source chaude à température T_0 est

$$W \geq Q\left(\frac{T_0}{T_f} - 1\right).$$

Par exemple, le travail à fournir est faible lorsqu'on veut extraire de la chaleur d'un gaz qui est à une température proche de celle de la source chaude, $T_f \sim T_0$ (c'est le principe de la climatisation où on veut extraire de la chaleur d'une pièce qui est à une température $T_f \lesssim T_0$) ; par contre, il croit fortement lorsque $T_f \ll T_0$. Ce travail minimal est parfois appelé "exergie" et correspond au travail d'un cycle de Carnot parfait.

Dans un processus de liquéfaction, on abaisse d'abord la température du gaz à sa température de liquéfaction puis on liquéfie le gaz à température constante. Pour baisser la température du gaz de T_f à $T_f - dT_f$, il faut extraire la chaleur $\delta Q = C_p(T_f)dT_f$ où $C_p(T_f)$ est la capacité calorifique du fluide à pression constante. Le travail minimal associé est donné par $\delta W \geq \delta Q(\frac{T_0}{T_f} - 1)$. Le travail total pour le refroidissement du gaz de T_0 jusqu'à la température de liquéfaction T_l est donc donné par

$$W \geq \int_{T_l}^{T_0} dT_f C_p(T_f)\left(\frac{T_0}{T_f} - 1\right).$$

La chaleur spécifique étant connue, cela donne un travail minimal W^{min} =177 Wh/litre avec $T_l = 4.2$ K et $T_0 = 300$ K [66]. Ensuite, il faut extraire la chaleur latente Q_l (donnée ci-dessus) pour liquéfier le gaz à 4.2 K. Pour cela, il faut fournir un travail supplémentaire donné par

$$W_l \geq Q_l\left(\frac{T_0}{T_l} - 1\right) \approx 70Q_l.$$

$Q_l = 0.69$ Wh/l, soit $W_l^{min} = 48$ Wh/l.

Le travail minimal total à fournir (cycle de Carnot parfait) est donc de 225 Wh/litre. Le travail à fournir en réalité est supérieur pour des raisons thermodynamiques et mécaniques.

Rendement réels. Prenons l'exemple de la chaleur latente à 4.2 K. Le travail minimal pour extraire cette chaleur (cycle de Carnot) est de 48 Wh/litre. Les rendements réels de réfrigération à 4.2 K sont connus pour différentes installations et dépendent de leur taille : ils vont de 1% du rendement de Carnot à 30% dans le meilleur des cas [67], soit entre 4 800 Wh/litre et 160 Wh/litre (uniquement pour la chaleur latente). Nous ne connaissons pas le rendement de l'ensemble du cycle de refroidissement, mais pouvons prendre,

comme pour l'azote liquide, un rendement de 50% du rendement de Carnot, soit $2W^{min}$ =354 Wh/litre. En additionnant les deux contributions (160 Wh/l et 354 Wh/l), on obtient donc approximativement

$$500 \text{ Wh/litre},$$

ce qui doit être l'ordre de grandeur du minimum possible pour les plus grandes unités de production.

Notons que pour une petite production comme le liquéfacteur de l'Institut Néel (300 000 litres par an et une dépense d'énergie de l'ordre d'1 GWh), l'énergie consommée par litre est plus élevée,

$$3.3 \text{ kWh/litre},$$

mais répond au besoin de petites quantités rapidement disponibles.

E Quelle est l'émission de CO_2 dans l'échange d'1 Go d'information numérique ?

La question concerne les émissions indirectes de CO_2 générées par l'envoi d'un courriel, de la consultation d'une page web, d'une heure de vidéo, d'une heure de visio-conférence... Plus généralement, on se pose la question des émissions générées par l'échange d'un gigaoctet d'information (Go, G=10^9, octet=1 Byte=8 bits).

L'ADEME [21] estime ces émissions à

— 4 gCO_2 par mail

— 35 gCO_2 par mail avec une pièce jointe de 1 Mo (M=10^6)

ce qui donnerait

$$35\ kgCO_2/Go$$

de données échangées. "The shift project" [56] fournit une application qui mesure les données échangées par un navigateur web et estime à

$$125\ gCO_2/Go$$

de données échangées (consommation électrique des data centers, du terminal, des infrastructures *etc.*). La grande différence (d'un facteur 300) provient des hypothèses retenues. Deux calculs d'ordres de grandeur peuvent être donnés, néanmoins.

— La consommation mondiale d'énergie du numérique est estimée à 1 000 TWh (T=10^{12}) et l'échange de données à 1 ZB=10^{21} Bytes=10^{12} Go. Donc si on attribue tout le numérique aux seules communications (ce n'est pas vrai, il y a aussi la bureautique, les calculs...), on a donc 1 kWh de dépense pour 1 Go. Sur un kWh, on compte 1/4 pour l'utilisation, et 3/4 pour la construction (au moins pour un ordinateur). Pour le taux de l'électricité de construction, 760 gCO_2/kWh et pour notre utilisation en France 57 gCO_2/kWh, donc 600 g de CO_2 pour 1 kWh, soit 600 gCO_2/Go. Il s'agit d'une borne supérieure et l'estimation de "the shift project", 125 gCO_2/Go, correspond à une division par 4, qui semble raisonnable.

— Dans une analyse en cycle de vie (telle que celle de l'ADEME), il est nécessaire d'estimer les émissions pour réaliser la tache en question, en l'occurence envoyer 1 Go. Il faut donc estimer l'électricité nécessaire, l'énergie "grise" de construction de l'infrastructure de communication et des ordinateurs, le coût de la transmission *etc.* Dans le cas d'un laboratoire, les ordinateurs ne servent pas uniquement aux communications et nous pouvons compter à part le coût de leur construction. La transmission est très faible : 1.4 gCO_2/Go entre Orsay et Montpellier [68]. Même si on suppose que les données voyagent sur 15 000 km (parcours moyen d'une donnée selon l'ADEME) [69], et que l'augmentation est linéaire avec la distance, on arrive à 20 gCO_2/Go pour la transmission. Il faut aussi stocker 1 Go

sur un disque (par exemple cas d'un mail avec une pièce jointe, envoyé à 450 personnes et copié sur deux disques). Au prix actuel des disques durs, ce stockage coûte 4 centimes d'euros. Supposons que tout le prix soit de l'énergie (pas de marge, le pire cas), soit au prix du kWh d'électricité, 500 Wh pour la construction du stockage d'un Go. Prenons de l'électricité mix pur charbon à 800 gCO_2/kWh (le pire cas). On a donc 400 gCO_2 pour la construction d'un Go de mémoire : soit pour un disque de 1 To, 400 $kgCO_2$, c'est beaucoup trop grand - c'est le coût en CO_2 de tout un ordinateur ! Divisons par 4, soit 100 gCO_2 pour la construction du stockage de 1 Go. Reste le coût de l'électricité. Sur le terminal, 10 minutes de fonctionnement donne 3 Wh. Même si on suppose que 10 terminaux sont impliqués, soit 30 Wh, que ces terminaux sont majoritairement dans des pays où le taux de CO_2 est élévé 500 gCO_2/kWh, on obtient 16 gCO_2. On arrive ainsi à une estimation proche de celle de "the shift project". Par ailleurs, il suffit de libérer la place de stockage régulièrement pour effacer la majeure partie de l'empreinte carbone du flux.

Ainsi, si on ne prend pas en compte la construction des terminaux, les ordres de grandeur ci-dessus semblent rejoindre l'estimation de "the shift project".

Références

[1] Site de l'Institut Néel : `https://neel.cnrs.fr/`

[2] CITEPA. Rapport National d'Inventaire secten (2020). Bilan des émissions de 1990 à 2018. page 36. `https://www.citepa.org/fr/secten/`

[3] J. Houghton, *Global warming, the complete briefing*, page 14.

[4] Haut Conseil pour le climat. Rapport. Maîtriser l'empreinte carbone de la France. Octobre 2020, disponible ici : `https://www.hautconseilclimat.fr/publications/maitriser-lempreinte-carbone-de-la-france/`

[5] `https://www.insee.fr/fr/statistiques/3281683?sommaire=3281778` Attention, les estimations pour 2018 ont été modifiées : l'empreinte carbone pour 2018 était de 11.2 tonnes (page consultée en 2020), mais de 9.7 tonnes (valeur affichée en mars 2021).

[6] `https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/estimation-de-lempreinte-carbone-de-1995-2019`

[7] Stratégie nationale bas-carbone (ministère). `https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc`. Rapport de synthèse, mars 2020, page 12.

[8] Stratégie nationale bas-carbone (ministère). *ibid.*

[9] Loi énergie climat 2019. `https://www.ecologie.gouv.fr/adoption-du-projet-loi-energie-climat-vers-neutralite-carbone-en-2050`

[10] Un pacte vert pour l'Europe, 14 juillet 2021. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr

[11] CITEPA. *ibid.* page 404-406.

[12] Derniers rapports spéciaux du GIEC disponibles en français à l'adresse https://www.ipcc.ch/languages-2/francais/, Réchauffement planétaire de 1.5^0. Résumé à l'intention des décideurs, page 15.

[13] GIEC, *ibid.* page 17.

[14] Stratégie nationale bas-carbone révisée complète (ministère). https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc. Rapport complet, mars 2020, figure page 32, catégorie Résidentiel et Tertiaire.

[15] Circulaire "Engagements de l'État pour des services publics écoresponsables" disponible sur https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf/circ?id=44936.

[16] Bilan carbone de l'institut des sciences de la terre (ISTerre) et présentation : https://www.isterre.fr/french/actualites/a-la-une/article/isterre-publie-son-bilan-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-ges.html

[17] Bilan carbone et actions à l'Institut Pierre-Simon Laplace, https://climactions.ipsl.fr/

[18] Bilan carbone de la direction de l'INEE-CNRS, 24 janvier 2020.

[19] Bilan carbone Institut PPRIME, Nadezhda Dobreva, Yves Bertin (2020).

[20] Mémoire de Master 2 Gestion de l'environnement, Evaluation des émissions de gaz à effet de serre du laboratoire de recherche UMR 5600 EVS, "Environnement, Ville, Société", Lucie Farard.

[21] Base Carbone, documentation des facteurs d'émissions de la Base Carbone. Version 19.0.0 -vendredi 4 décembre 2020. Taux disponibles sur http://www.bilans-ges.ademe.fr/ (après inscription) ; ou sur http://avenirclimatique.org/micmac/sources.php, avec quelques variations.

[22] https://labos1point5.org/ges-1point5

[23] Donnée transmise par le directeur technique de l'Institut Néel et le service technique aux laboratoires (STL).

[24] https://www.rte-france.com/eco2mix/les-emissions-de-co2-par-kwh-produit-en-fran

[25] https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2019

[26] https://home.cern/fr/science/engineering/powering-cern

[27] https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/consommation-denergie-par-usage-du-residentiel?rubrique=20&dossier=168

[28] https://www.chauffage-urbain-grenoble.fr/

[29] https://www.chauffage-urbain-grenoble.fr/2629-production-de-chaleur.htm

[30] https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000036800469/

[31] https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/consommation-denergie-par-usage-du-tertiaire

[32] https://www.ecologie.gouv.fr/diagnostic-performance-energetique-dpe

[33] https://ecolab.ademe.fr/apps/transport

[34] https://labos1point5.org/les-enquetes/enquete1-intro

[35] Restitution de l'enquête PDM M'PRO CNRS (Décembre 2019) du Syndicat Mixte des Transports en Commun de l'Agglomération Grenobloise (SMTC). Nous remercions Julien Minet (Institut Néel) de nous avoir transmis ce document.

[36] https://www.insee.fr/fr/statistiques/5013868#figure2_radio3

[37] https://www.insee.fr/fr/statistiques/5010361#tableau-figure1

[38] https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/382-millions-de-voitures-en-circulation-en-france?rubrique=&dossier=1347

[39] CITEPA. *ibid.* page 38.

[40] https://jammet-archi.com/projets/environnement-recherche/cnrs-extension-louis-neel

[41] H. Godfrin et C. Gianese, Reflets de la physique **39**, 19 (2014).

[42] https://geology.com/articles/helium/

[43] https://neel.cnrs.fr/equipes-poles-et-services/liquefacteur

[44] European Synchrotron Radiation Facility, Bilan GES de l'activité. Rapport V4, mars 2016. Disponible en ligne, https://www.esrf.eu

[45] http://f-crg.fr/

[46] ISterre a utilisé 367 "shifts" (O. Blanchard, courriel) estimés à 50 tonnes de CO_2 [16], soit 140 kg par "shift".

[47] La somme a été obtenue par F. Debray après accord des chercheurs concernés.

[48] Annual Report 2018 ILL : https://www.ill.eu/fileadmin/user_upload/ILL/1_About_ILL/Documentation/Annual_report/AR-18/mobile/index.html#p=123

[49] https://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/bilanenligne/detail/index/idElement/4084, consulté Nov. 2020.

[50] https://www.ill.eu/fr/reacteur-et-securite/le-reacteur-a-haut-flux/cycles

[51] Nous remercions l'ILL de nous avoir transmis ces données.

[52] Estimation de l'empreinte carbone d'une heure.cœur de calcul. Document HAL : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02549565v4

[53] https://ecoinfo.cnrs.fr/

[54] https://ecoinfo.cnrs.fr/2020/05/06/ecodiag/

[55] https://www.dell.com/ Carbon Footprint.

[56] https://theshiftproject.org/en/carbonalyser-browser-extension/

[57] A. Béranger et al. https://hal.archives-ouvertes.fr/halshs-03120479

[58] Rapport de l'association Carbone 4, Faire sa part ? C. Dugast et A. Soyeux, Juin 2019. Disponible sur http://www.carbone4.com/publication-faire-sa-part/

[59] https://fr.wikipedia.org/wiki/Pouvoir_calorifique

[60] Pour les taux de Labos 1.5, sur le site [22], suivre l'onglet "La méthodologie" puis les "Facteurs d'émissions". Tels que consultés en Février 2021 et arrondi. Voir, dans ce même onglet, le fichier pdf "Facteurs d'émission - version du 7 juillet 2020", pour les justifications.

[61] The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries, IVL Swedish Environmental Research Institute (2017).

[62] Rapport annuel transport par autocar et gares routières 2018. page 5. Autorité de régulation des activités ferroviaires et routières (ARAFER).

[63] http://www.carbone4.com/trainees-de-condensation-impact-climat/ ; Article trainées de condensation, wikipedia, https://fr.wikipedia.org/

[64] http://www.amue.fr/finances/metier/dossier-nacres/documentation/nacres-version-definitive

[65] https://www.bilans-ges.ademe.fr/forum/viewtopic.php?t=4171

[66] *e.g.*, U. Wagner (CERN), Refrigeration (disponible en ligne), table 3.

[67] R. A. Byrns and M. A. Green, An update on estimating the cost of cryogenic refrigeration, Advances in cryogenic engineering, vol. 43, 1661, (1998).

[68] https://ecoinfo.cnrs.fr/2020/12/04/quelle-est-lempreinte-carbone-de-la-transmis

[69] Rapport ADEME : "La face cachée du numérique". Janvier 2021, page 5.