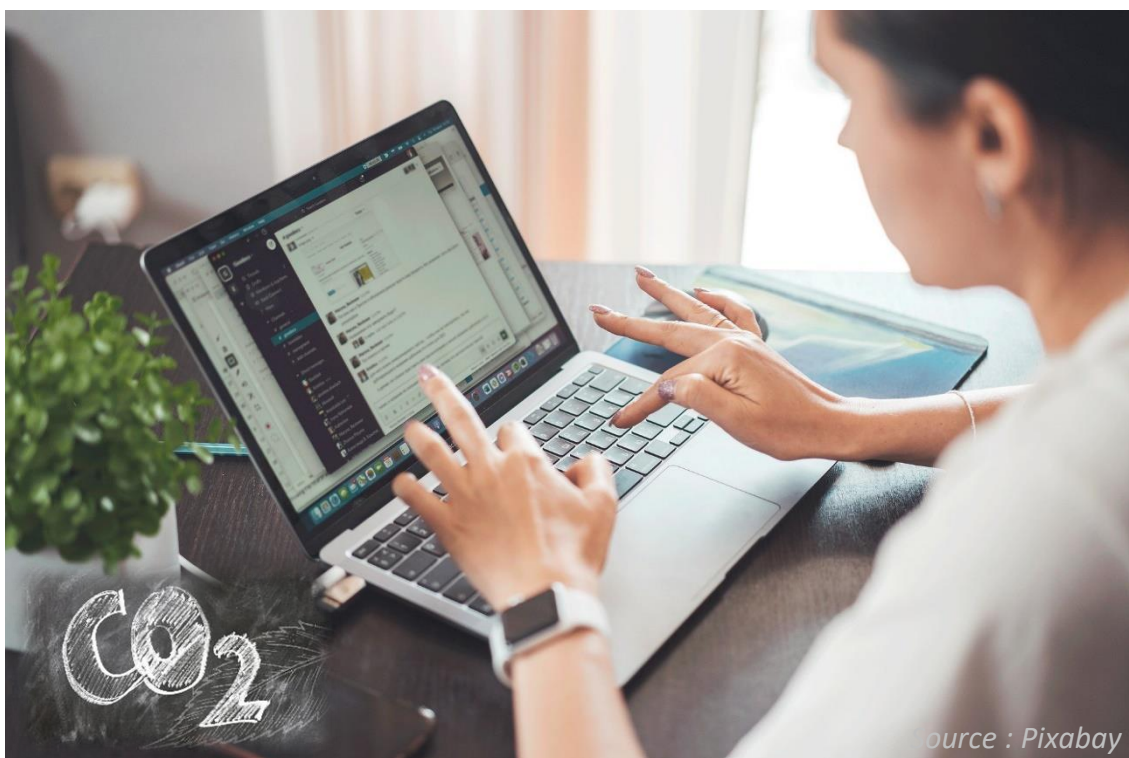


Projet de Fin d'Etudes (PFE) 2021-2022

Le télétravail, outil réellement efficace pour réduire les émissions de gaz à effet de serre ?



Le télétravail, outil réellement efficace pour réduire les émissions de gaz à effet de serre ?

Modélisation des effets rebonds du télétravail sur l'émission de gaz à effet de serre dans le secteur tertiaire

Directeur de recherche : Hervé BAPTISTE

Auteurs : Arthur GAILLARD, Julien VANTOUROUX

Année : 2021-2022

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Avant tout développement, nous souhaitons remercier chaleureusement notre tuteur de projet de fin d'études, Monsieur Hervé BAPTISTE, maître de conférences en aménagement urbanisme et directeur des études du Département Aménagement et Environnement de Polytech Tours, pour l'accompagnement et l'intérêt qu'il nous a témoignés tout au long de ce travail.

Nous remercions également Mathilde GRALEPOIS, maître de conférences et vice-présidente à la Transition Écologique, ainsi que Hadrien HERRAULT, attaché temporaire d'enseignement et de recherche, pour les précieux enseignements transmis afin de mener à bien un travail de recherche. Même si notre cursus ingénieur ne débouche pas sur une thèse, les outils méthodologiques acquis et mobilisés seront d'une grande utilité dans l'exercice de notre future activité professionnelle.

Julien VANTOUROUX et Arthur GAILLARD

SOMMAIRE

Table des figures.....	7
Introduction.....	8
I- Définition du sujet et de l'objet de recherche.....	9
A- Télétravail et bilan carbone : concepts et enjeux	9
B- Objet de recherche : Le télétravail, outil efficace de réduction des émissions de GES ?	11
II- État de l'art	11
A. Baisse des émissions de GES grâce au télétravail	11
1) Des déplacements domicile-travail plus vertueux	11
2) Réorganisation des espaces de travail en entreprise.....	13
B. Effets rebonds qui nuancent le bilan carbone du télétravail.....	13
1) Modification des habitudes de déplacements	13
2) Augmentation des équipements nécessaires à la pratique du télétravail.....	15
3) Une consommation énergétique au domicile plus importante	15
III- Objet de recherche : Le télétravail, synonyme d'une baisse significative des émissions de GES ?	16
IV- Modélisation.....	17
A. Contexte de l'élaboration du modèle	22
B. Hypothèses du modèle.....	22
C. Légende des variables du modèle	24
D. Définition des variables	28
1) Finalité du modèle.....	28
2) Emissions de GES dues aux déplacements.....	29
3) Emissions de GES dues à la consommation énergétique au lieu de domicile.....	36
4) Emissions de GES dues à la consommation énergétique à l'entreprise.....	43
E. Résultats de l'étude.....	50
1) Bilan de GES d'un individu type.....	50
2) Influence de la période de l'année sur le bilan GES	53
3) Bilan de GES selon la distance domicile-travail.....	55
Conclusion	60
Bibliographie	62

Table des figures

Figure 1: Déplacement en étoile et en chaîne (ADEME).....	14
Figure 2: Part modale selon la distance parcourue (source: EMC ² Touraine 2019)	31
Figure 3: Part modale selon la distance parcourue pour les loisirs et achats (source: EMC ² Touraine 2019).....	33
Figure 4: Bilan GES selon le type de travail (hiver)	50
Figure 5: Poids des postes d'émission en fonction du type travail et focus sur les émissions des déplacements.....	51
Figure 6: Poids des postes d'émission selon le type de travail	52
Figure 7: Emission des postes de l'énergie	52
Figure 8: Emissions du poste de l'énergie au domicile	52
Figure 9: Bilan GES selon le type de travail et la période de l'année.....	53
Figure 10: Bilan GES du domicile selon le type de travail et la période de l'année	54
Figure 11: Différence entre les émissions GES en télétravail et celles en présentiel.....	55
Figure 12: Bilan GES en fonction de la distance entre le domicile et le lieu de travail.....	56
Figure 13: Histogramme empilé représentant la part modale selon la distance parcourue (source données: EMC ² Touraine).....	57
Figure 14: Bilan GES en fonction de la distance entre le domicile et le lieu de travail.....	57

Introduction

La crise sanitaire issue de la pandémie de coronavirus Covid-19 en 2020 a bouleversé nos modes de vie. Les confinements successifs et l'obligation de limiter les contacts ont dès lors profondément remis en question la pratique du travail et accéléré le recours au télétravail pour un certain nombre d'emplois. Ces modifications de l'exercice du travail ont eu notamment des effets sur les déplacements domicile-travail qui de fait se sont trouvés réduits, voire supprimés, impactant corrélativement les émissions de gaz à effet de serre (GES). Dans le même temps, les nouvelles pratiques résultant du télétravail ont nécessité le recours à diverses alternatives comme la visio-conférence, ou l'utilisation d'un espace de travail à son domicile. Ces pratiques induites par le télétravail sont également génératrices d'émissions de gaz à effet de serre.

C'est dans ce contexte que notre projet de fin d'études prend place. Il vise à évaluer dans quelle mesure le recours au télétravail permettrait de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Notre travail s'appuie dans un premier temps sur une revue de la littérature scientifique existante afin de connaître les différentes sources d'émissions de GES intervenant dans la pratique du télétravail. Sur la base de ce travail bibliographique, une modélisation est proposée afin d'effectuer la comparaison de l'empreinte carbone d'une journée en télétravail avec celle passée en présentiel. Une première partie est consacrée à exposer les hypothèses formulées pour élaborer le modèle, à la définition des variables ainsi qu'aux relations qui les lient. La deuxième partie présente les résultats de la modélisation afin d'estimer les potentiels effets rebonds du télétravail et le poids qu'ils représentent dans le bilan GES du télétravail.

I- Définition du sujet et de l'objet de recherche

Le sujet initial de recherche proposé s'intitule : « Covid19, confinement et monde "d'après" : bilan carbone du télétravail et de l'enseignement distanciel. » Dans la partie qui suit, nous nous attachons à définir les termes du sujet. Cette appropriation du sujet de recherche nous a permis ensuite de dégager un objet de recherche présentée dans la seconde partie.

A- Télétravail et bilan carbone : concepts et enjeux

La crise sanitaire de la Covid 19 a bouleversé nos modes de vie. En ce sens, la pratique du travail s'est trouvée profondément remaniée avec une accélération de la mise en œuvre du « télétravail ». Cette déclinaison du travail « à distance » telle que le montre l'analyse sémantique du mot est relativement récente comme en témoigne la première apparition du mot en 1974 introduite par Nilles¹. Ce mot-valise est progressivement passé dans le langage courant, bien qu'il en existe plusieurs sens et perceptions. Le code du travail par son article L1222-9 le définit comme une organisation du travail réalisé hors des bureaux d'une entreprise grâce aux outils informatiques. Il apparaît alors comme une modification de forme de travail elle-même mais également de sa pratique dans l'espace. C'est d'ailleurs cette localisation du télétravail qui est particulièrement soulignée dans un rapport de la DATAR en 1998². Le télétravail est alors vu comme un outil d'aménagement du territoire grâce au développement des activités dans les espaces peu desservis à l'instar des espaces ruraux. Le télétravail pouvant effectivement s'effectuer dans des espaces partagés où les outils du numérique et internet sont développés tels que des télécentres, les espaces dits de coworking ou encore des lieux plus informels comme des cafés. Enfin, le télétravail peut être considéré comme une réponse à la problématique des émissions de gaz à effet de serre. Le lien entre télétravail et évitement des déplacements pendulaires est, selon l'ADEME, en effet « indiscutable ». Néanmoins, dans son rapport de juillet 2020, l'agence précise que selon les modalités du télétravail, son potentiel impact environnemental est à nuancer.³

La CTI définit en janvier 2020, l'**enseignement distanciel** comme « *l'utilisation des nouvelles technologies multimédia de l'Internet pour améliorer la qualité de l'apprentissage* »⁴. Les outils éducatifs numériques, tels que les MOOC ou encore les espaces numériques de travail (ENT), sont ici davantage considérés comme des dispositifs en support à l'offre d'enseignement classique en présentiel. Cet enseignement distanciel présente diverses modalités, comme par exemple, le niveau de présence allant du présentiel complet au total distanciel. La CTI identifie également comme une force la possibilité d'enseigner à des publics empêchés d'assister à des cours classiques en présentiel⁵.

Pendant la crise sanitaire, ce qui a été identifié comme une force par la CTI en période pré-covid, est devenu primordial pour assurer l'enseignement en France. L'enseignement distanciel est alors devenu la norme. L'institut national de la recherche en sciences et technologies du numérique (INRIA) souligne dans son rapport de décembre 2020 que la mise en place du numérique a montré quelques limites lors du « passage d'un modèle de formation principalement présentiel à un modèle

¹ Nilles, « Development of Policy on the Telecommunications-Transportation Tradeoff ».

² DATAR, *TELETRAVAIL, TELEACTIVITES*.

³ 6th bureau de recherche pour l'Ademe, « Télétravail, (im)mobilité et modes de vie. Étude du télétravail et des modes de vie à l'occasion de la crise sanitaire de 2020 ».

⁴ CTI (Commission des Titres d'Ingénieur), « Note sur l'enseignement numérique distanciel ».

⁵ CTI (Commission des Titres d'Ingénieur).

totalelement distanciel »⁶. « Souvent conçus comme un accompagnement au présentiel », l'enseignement par le numérique n'avait pas été suffisamment pensé pour assurer « un niveau d'enseignement opérationnel ». Néanmoins, l'INRIA mentionne également que le développement des usages du numérique dans ce contexte de crise sanitaire permet d'entrevoir une accélération de l'usage du numérique, et donc de l'enseignement distanciel, dans le système éducatif français dans un contexte post-covid⁷.

Enfin, la CTI présente l'enseignement distanciel comme une solution à la réduction de l'empreinte carbone de l'enseignement en réduisant d'une part les impressions papiers, et d'autre part en évitant les déplacements d'enseignants et d'étudiants entre domiciles et lieux d'études⁸.

Le *bilan carbone*, ou de façon plus rigoureuse le *Bilan Carbone*[®], est une marque déposée au titre de la propriété industrielle de l'association *BILAN CARBONE (ABC)*⁹. Ce mot-valise, ici aussi tombé dans le langage courant, fait référence selon son créateur Jean Marc JANCOVICI à une méthode et outil d'évaluation des émissions de gaz à effet de serre engendrées par une activité humaine¹⁰. Cet outil, développé par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), permet donc de comptabiliser les émissions dites *directes* et *indirectes* de gaz à effet de serre d'un périmètre donné sous forme de dioxyde de carbone équivalent. L'ADEME hiérarchise en effet les émissions. Les émissions dites directes (scope 1) tout d'abord, correspondent aux émissions directes des installations fixes ou mobiles d'une entreprise. La deuxième échelle (Scope 2) prend en compte les émissions indirectes liées à la production de l'énergie utilisée (électricité, chaleur...). Enfin, la Scope 3, plus large, s'attache à évaluer l'ensemble des émissions indirectes non prises en compte dans les scopes 1 et 2 tel que la fabrication des produits ou même plus généralement l'ensemble de leur cycle de vie¹¹. Cette dernière échelle n'est pas obligatoire dans les bilans carbones réglementaires bien que fortement recommandée par l'ADEME. L'association *The ShiftProject*, va également dans ce sens en précisant dans son rapport *Déployer la sobriété numérique*¹², que l'utilisation toujours plus intense des outils numériques, fortement émetteurs de GES lors de leur production et recyclage, nécessite de prendre en compte l'ensemble du cycle de vie des produits pour établir un bilan carbone viable.

Le bilan d'émission de Gaz à effet de serre (GES) est quant à lui moins large dans le sens où il se concentre sur l'étude d'un certain nombre de poste d'émission de gaz à effet de serre et non sur l'ensemble des émissions comme c'est le cas pour le bilan carbone. Il existe divers gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane, le protoxyde d'azote qui ont chacun des effets différents sur le climat. C'est pourquoi, le pouvoir de réchauffement global (PRG) est utilisé afin de pouvoir travailler sur une unité commune (le dioxyde de carbone équivalent CO₂e) et comparer les différents GES. Concrètement, le PRG mesure l'effet de perturbation d'une quantité de gaz (1Kg) pendant une durée par rapport à cette même quantité de gaz carbonique.

⁶ Giraudo et al., *Éducation et numérique, défis et enjeux*.

⁷ Giraudo et al.

⁸ CTI (Commission des Titres d'Ingénieur), *Note sur l'enseignement numérique distanciel*.

⁹ Institut National de la Propriété Industrielle (INPI), Notice complète de la marque Bilan Carbone.

¹⁰ Jancovici, « Qu'est-ce que le bilan carbone ? »

¹¹ Pallez, Le Breton, et Gourdon, « L'élaboration d'une politique publique environnementale, le Bilan Carbone[®] ».

¹² Ferreboeuf et al., « Déployer la sobriété numérique ».

B- Objet de recherche : Le télétravail, outil efficace de réduction des émissions de GES ?

Dans le cadre de notre travail de recherche, nous allons appréhender le télétravail comme un outil d'aménagement du territoire permettant une réduction des émissions de CO₂ liées aux déplacements domicile-travail. Comme indiqué précédemment, nous distinguons les définitions de bilan carbone et de bilan de gaz à effet de serre (GES). Toutefois, dans la suite de notre travail, nous retenons la seule notion de bilan de GES car nous décidons de nous concentrer sur la prise en compte de trois postes d'émissions et non sur l'ensemble des postes d'émission. Les trois postes retenus sont les déplacements liés aux trajets domicile-travail et aux autres activités quotidiennes (courses, loisirs...) ainsi que les consommations au domicile et à l'entreprise. Nous nous attachons en premier lieu au Scope 1 et Scope 2 définis par l'ADEME qui prennent en compte les émissions directes des activités anthropiques et indirectes avec la production d'énergie.

Nous soulignons également que, même si la crise sanitaire et le confinement constituent des points de départ à la réflexion de ce travail de recherche, ce dernier ne s'inscrit non pas dans une vision rétrospective de ces événements mais davantage dans un contexte post-covid. Le confinement a en effet permis de mettre en lumière l'importance accordée à notre cadre de vie et notamment à la qualité de l'air que nous respirons. Il a également permis de nous interroger sur le mode d'organisation à adopter pour construire le « monde d'après covid » afin de faire évoluer un modèle aujourd'hui à bout de souffle. Les résultats de cette étude permettront de contribuer à cette réflexion en évaluant la pertinence de la mise en place du télétravail au regard de la réduction des émissions de CO₂. Notre travail s'attachera donc à élaborer un modèle permettant de traduire quantitativement les effets de telles mesures.

II- État de l'art

La pratique du télétravail bouleverse nos façons de travailler et l'organisation des journées de travail. Nous verrons dans un premier temps les impacts bénéfiques de la mise en place du télétravail sur les émissions de CO₂ à travers le volet des mobilités et la réorganisation des espaces dans les entreprises. Nous observerons ensuite qu'un certain nombre d'effets rebonds viennent nuancer la baisse des émissions de CO₂ telles la consommation au domicile des télétravailleurs ou la modification des formes de mobilité.

A. Baisse des émissions de GES grâce au télétravail

1) Des déplacements domicile-travail plus vertueux

Tout d'abord, il est important de rappeler que selon l'INSEE, 7 français sur 10 utilisent leur voiture particulière pour se rendre sur leur lieu de travail¹³. Le parc étant constitué à 97% de véhicules thermiques en 2020, 271 kilogrammes équivalents CO₂ (kg éqCO₂) par jour de télétravail hebdomadaire et par actif pourraient être évités par la suppression des déplacements domicile-travail selon l'ADEME¹⁴.

¹³ INSEE, *Sept salariés sur dix vont travailler en voiture*, 2019.

¹⁴ Benoît Tinetti et al., *Evaluation de l'impact du télétravail & des tiers-lieux sur la réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre et sur l'organisation des entreprises*,

La pratique du télétravail permet donc de réduire le volume des déplacements (-69% pour un jour de télétravail par semaine) mais également la distance parcourue. Alors qu'un travailleur allant à son bureau tous les jours parcourt en moyenne 9km dans la journée, un télétravailleur n'en parcourt que 5,5km¹⁵.

Cette diminution en distance de déplacement est à mettre en relation avec le type de télétravail effectué. En effet, plusieurs études soulignent l'impact de la localisation de la pratique du télétravail dans le nombre et la distance de déplacement effectués. Trois catégories de télétravail sont généralement distinguées :

- Le télétravail au domicile pour lequel la distance de déplacement est nettement inférieure.
- Le télétravail nomade (qui comporte des déplacements professionnels)
- Le télétravail dans des espaces dédiés (de type tiers-lieux...) qui nécessite tout de même un déplacement entre le domicile et cet espace. Ainsi, trois catégories de tiers-lieux peuvent être mises en avant : ¹⁶
 - o Les tiers-lieux spécifiquement adaptés à la pratique du télétravail (espaces de coworking, centres d'affaires, télécentres...) Ils sont principalement situés dans les centres des agglomérations.
 - o Les tiers-lieux qui existent déjà mais qui ne sont pas spécialement dédiés à la pratique du télétravail (hôtels, cafés, restaurants, parcs publics, gares, médiathèques...). Ces espaces sont situés dans le centre des agglomérations mais également dans les espaces périurbains. La distance entre le domicile et ces lieux sont souvent plus faibles que le premier type de tiers-lieux.
 - o Les tiers lieux qui ne sont pas encore dédiés à l'accueil de télétravailleurs mais qui pourraient le devenir dans un avenir proche (maisons, bureaux de poste...) ¹⁷.

Grâce au télétravail, les modes de déplacements peuvent également être modifiés. En effet, la pratique du télétravail à domicile ou dans des espaces proches de ce dernier peuvent favoriser l'utilisation de moyens de transport décarbonés. Le report modal de la voiture particulière vers des mobilités actives est en effet montré dans plusieurs études sur le sujet avec une diminution significative du nombre de déplacements effectués en voiture particulière. Sur l'exemple Lillois développé dans l'étude de Tissandier et Mariani-Rousset (2019), la part modale de la marche à pied a augmenté de 2% et même jusqu'à plus de 4% dans le cas où le lieu de télétravail est proche du domicile. Dans le même temps, c'est la part modale de la voiture particulière et des transports en communs qui ont été réduites dans des proportions relativement similaires (de -1,5% à -2% suivant le scénario)¹⁸. Ce constat est à nuancer en fonction de la localisation du logement (ville-centre, périphérie, rural) et du contexte (métropole, ville-moyenne, etc.).

ADEME, 2015 ; ADEME, *Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail*, Greenworking et ADEME, 2020.

¹⁵ ADEME, *Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail*.

¹⁶ Tissandier et Mariani-Rousset, « Les bénéfices du télétravail ».

¹⁷ *Ibid.* ; 6t bureau de recherche pour l'Ademe, *Télétravail, (im)mobilité et modes de vie. Étude du télétravail et des modes de vie à l'occasion de la crise sanitaire de 2020*.

¹⁸ Tissandier et Mariani-Rousset, « Les bénéfices du télétravail ».

2) Réorganisation des espaces de travail en entreprise

La réduction des émissions de CO₂ grâce à la mise en place du télétravail s'illustre également à travers la réorganisation de l'espace de travail dans les entreprises.

Le télétravail permet, en effet, de réduire la surface totale de travail réservée aux employés. Les jours en présentiel étant moins nombreux, l'utilisation de bureaux individuels semble moins justifiée pour certaines activités professionnelles. Il peut alors être préférable d'utiliser des organisations de travail moins consommatrices d'espace telles que le *flex office*. Il s'agit d'espaces de travail où les employés n'ont pas d'emplacements fixes. Ce type d'organisation permet de réduire les consommations d'électricité de l'entreprise mais aussi le matériel mobilier nécessaire aux salariés¹⁹. L'espace ainsi économisé pourrait permettre de libérer des bâtiments ou partager l'espace avec de nouvelles entreprises, et ainsi éviter la construction de nouveaux bureaux. Il est souligné dans le rapport que malgré l'augmentation du recours au flex-office dans les entreprises, il reste un phénomène peu étudié et pris en compte dans les modèles du fait de sa nouveauté.

L'ADEME propose alors 3 scénarios différents selon l'organisation de l'espace mise en œuvre par l'entreprise en fonction de ses télétravailleurs. Le premier considère qu'aucun changement dans l'organisation de l'espace de travail est réalisé. Les économies de CO₂ reposent donc sur l'absence des salariés et l'économie de consommation énergétique associée. La réduction de 6,7 kg eq CO₂/an par salarié apparaît alors comme marginale comparée aux autres scénarios. Le second correspond à l'adoption du travail en flex-office par l'entreprise mais sans organiser les flux de travailleurs afin d'optimiser l'occupation des locaux. D'après l'ADEME, cette configuration permettrait d'éviter l'émission de 292,5kg eq CO₂/an. Le troisième scénario imagine une organisation en flex office associée à une optimisation de l'occupation des locaux par les salariés permettant une réduction des émissions de CO₂ encore plus élevée²⁰.

B. Effets rebonds qui nuancent le bilan carbone du télétravail

Malgré ces effets environnementaux bénéfiques, la littérature actuelle relève des effets rebonds qui viennent nuancer le bilan carbone du télétravail.

1) Modification des habitudes de déplacements

Le télétravail induit de profonds changements sur nos habitudes de déplacement. L'un d'entre eux porte sur les types de trajets effectués entre un télétravailleur et un non-télétravailleur. En effet, lors d'un déplacement domicile travail, il est courant que le travailleur classique effectue quelques détours pour accomplir des tâches annexes. Par exemple, un salarié peut, au cours de son trajet domicile-travail, aller faire ses courses, passer à la boulangerie et récupérer son enfant à l'école. On parle alors d'un trajet en chaîne qui présente une certaine forme de complexité²¹.

Au contraire, un télétravailleur aura tendance à effectuer ces diverses tâches à différents moments de la journée, multipliant ainsi le nombre de déplacements. Un télétravailleur peut par exemple choisir d'aller chercher son pain le matin, aller faire ses courses sur l'heure du midi et aller chercher son enfant le soir. Ses déplacements, polarisés par le domicile²², décrivent alors une forme en étoile,

¹⁹ ADEME, « Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail ».

²⁰ ADEME.

²¹ 6t bureau de recherche pour l'Ademe, « Télétravail, (im)mobilité et modes de vie. Étude du télétravail et des modes de vie à l'occasion de la crise sanitaire de 2020 ».

²² Tissandier et Mariani-Rousset, « Les bénéfices du télétravail ».

moins complexe que celle en chaîne. Malgré la suppression du trajet quotidien domicile-travail, on ne peut donc pas affirmer que le télétravail induit une diminution du nombre de déplacements.²³

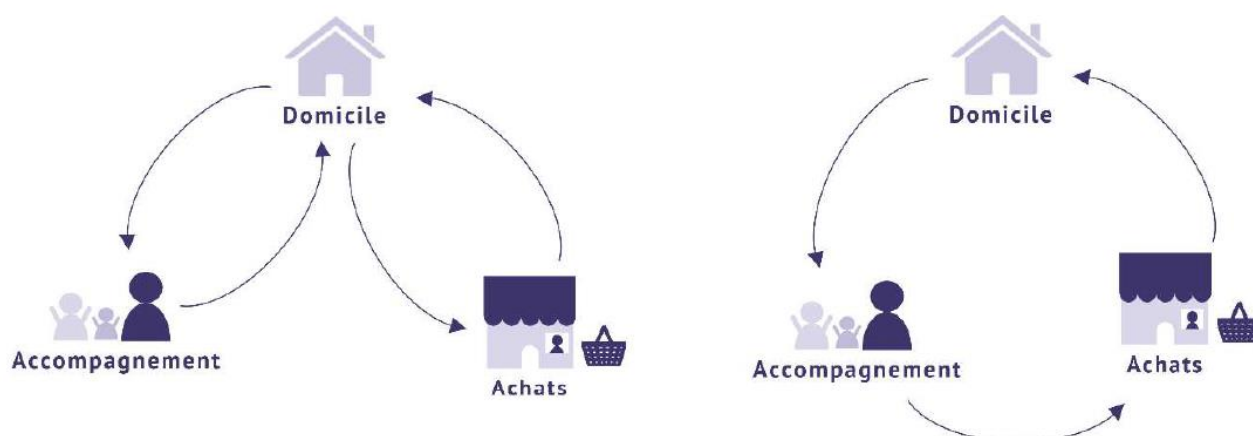


Figure 1: Déplacement en étoile et en chaîne (ADEME)

La pratique du télétravail est également susceptible d'augmenter les distances parcourues pour les déplacements secondaires.

Ce phénomène fait référence à la conjecture de Zahavi selon laquelle le budget temps alloué aux transports est constant. Selon cette conjecture, le temps passé dans les transports ne pourrait dépasser une certaine limite. Ainsi, le budget temps d'un travailleur en présentiel serait en grande partie consacré à son trajet domicile-travail. En revanche, un télétravailleur pourrait allouer le budget temps économisé afin de se rendre à d'autres activités telles que les loisirs par exemple. Cette hypothèse a été étudiée et illustrée par des études menées par l'ADEME.

D'après cette organisation, un télétravailleur ressent davantage l'envie de se déplacer, pour réaliser un loisir par exemple, après une journée de télétravail contrairement à un travailleur « classique » qui a déjà réalisé un trajet domicile-travail²⁴. Une étude menée entre le 30 avril et le 13 mai 2020 conforte cette affirmation²⁵. Parmi les 4000 personnes enquêtés, 49,2% des télétravailleurs affirmaient faire du télétravail pour économiser du temps de transport, plaçant ce motif en deuxième position derrière le travail dans un environnement calme. Ce temps de transport économisé pour se rendre à son lieu de travail était alors consacré à d'autres déplacements tels que les loisirs. Ainsi, selon cette même étude, la distance moyenne journalière de déplacement pour pratiquer des loisirs augmente de 7% lorsque les enquêtés télétravaillent.²⁶

Néanmoins, ces effets rebonds liés aux modifications de déplacements peuvent être contrebalancés par d'autres effets qui réduisent le bilan GES du télétravail. Ainsi, l'ADEME observe le transfert des mobilités quotidiennes du week-end vers la semaine. En effet, les déplacements supplémentaires observés lors d'une journée de télétravail auraient été normalement effectués le week-end pour un travailleur classique. La temporalité choisie afin de mener une étude sur le télétravail aura donc toute son importance. Si l'on choisit une semaine de cinq jours ouvrés, le télétravail induira un

²³ ADEME, « Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail ».

²⁴ ADEME.

²⁵ 6t bureau de recherche pour l'Ademe, « Télétravail, (im)mobilité et modes de vie. Étude du télétravail et des modes de vie à l'occasion de la crise sanitaire de 2020 ».

²⁶ 6t bureau de recherche pour l'Ademe.

nombre de déplacements secondaires plus important que pour le travail en présentiel. En revanche, si l'on considère une semaine complète de sept jours, ce constat sur le nombre de déplacements secondaires produits sera moins visible.²⁷

Le bilan GES des effets rebonds du télétravail est également plus faible si l'on retient l'observation de l'ADEME selon laquelle une partie des télétravailleurs associe au télétravail une journée calme, de repos et donc sans déplacement en général.²⁸

Pour étudier la modification des habitudes de déplacements qu'induit le télétravail, il apparaît donc pertinent de prendre en considération la rationalisation des déplacements (trajets en chaîne ou en étoile) ainsi que la fréquence des déplacements secondaires et les distances journalières parcourues pour chaque motif²⁹.

2) Augmentation des équipements nécessaires à la pratique du télétravail

Des émissions de CO2 supplémentaires peuvent également être imputées à la pratique du télétravail elle-même.

En effet, il apparaît d'une part que le doublement de l'équipement informatique est parfois nécessaire. Le travail depuis son domicile ou un espace de télétravail, nécessite un équipement informatique nomade qui doit parfois se doubler à l'équipement fixe utilisé au bureau³⁰. D'autre part, l'achat de matériel supplémentaire comme des outils de visioconférence ou le changement d'un équipement informatique pour qu'il soit plus performant ne peut être complètement ignoré. L'ensemble de ces bouleversements ont un impact encore plus important si le bilan carbone est réalisé sur l'ensemble du cycle de vie des produits³¹.

3) Une consommation énergétique au domicile plus importante

Enfin, la pratique du télétravail engendre une surconsommation énergétique au domicile du télétravailleur. De prime abord, la consommation globale d'énergie augmente mécaniquement avec la présence d'un télétravailleur (éclairage, internet, outils numériques, chauffage, repas, climatisation...). Cette consommation plus élevée est toutefois à nuancer car le logement n'est pas forcément inoccupé lorsqu'un travailleur classique travaille au bureau et une partie de ces consommations sont alors tout de même réalisées. La baisse de la température de confort n'est en outre pas forcément mise en place dans les logements des travailleurs en présentiel et la consommation liée au chauffage se trouve alors sensiblement équivalente à la situation d'un télétravailleur. Toutefois, le chauffage n'est pas, à lui seul, responsable des émissions de CO2 au domicile. Des études montrent en effet que la consommation du numérique joue un rôle non négligeable dans la surconsommation énergétique. Le ShiftProject dans son rapport de 2020 précise, en effet, que l'utilisation des outils numériques, des réseaux et l'énergie utilisée pour la gestion des datacenters représentent 56% de la consommation d'énergie finale du numérique. L'usage de la vidéo lors de visioconférence pour maintenir un contact visuel en télétravail est

²⁷ ADEME, « Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail ».

²⁸ ADEME.

²⁹ 6t bureau de recherche pour l'Ademe, « Télétravail, (im)mobilité et modes de vie. Étude du télétravail et des modes de vie à l'occasion de la crise sanitaire de 2020 ».

³⁰ ADEME, « Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail »; O'Brien et Yazdani Aliabadi, « Does Telecommuting Save Energy? »

³¹ Ferreboeuf et al., « Déployer la sobriété numérique »; Ferreboeuf, « LEAN ICT pour une sobriété numérique ».

gourmand en énergie puisque l'usage de la vidéo requiert mille fois plus de bande passante que le simple usage de l'audio³². Ici encore, cette consommation dépend de la technologie utilisée. Le wifi consomme en moyenne entre 5 et 25 fois moins d'énergie que le réseau 4G³³. L'ADEME estime ainsi qu'une minute de visioconférence émet 1 gramme de CO2.

III- Objet de recherche : Le télétravail, synonyme d'une baisse significative des émissions de GES ?

La revue de littérature exposée dans la partie précédente met en évidence que les émissions de CO2 évitées grâce à la pratique du télétravail ne sont pas aussi importantes qu'attendues. Dans son rapport de 2020, l'ADEME affirme que le télétravail permet d'éviter théoriquement le rejet de 271kg eq de CO2 alors que réellement, cette économie se limite à 84kg eq CO2. Notre projet de fin d'études s'attache donc à répondre à la problématique suivante :

Alors que le télétravail induit une diminution des déplacements, comment expliquer que la baisse observée des émissions de CO2 soit inférieure à celle due aux navettes domicile-travail ? Le télétravail constitue-il toujours une opportunité pour réduire nos émissions de GES ? Si oui, à quelles conditions ?

Pour répondre à cette question, nous avons soulevé l'hypothèse qu'il existe des effets de seconds tours³⁴ liés à la pratique du télétravail qui nuancent son impact environnemental bénéfique dû à la diminution des navettes domicile-travail. Nous faisons l'hypothèse que les effets rebonds liés à la réorganisation de l'espace de travail dans les entreprises, aux consommations d'énergie au domicile des télétravailleurs et à la modification de leurs habitudes de déplacements expliquent en majorité la différence entre les émissions de CO2 théoriques et celles réellement observées. L'utilisation énergivore d'outils numériques indispensables à la pratique du télétravail implique une émission plus élevée de GES qu'une activité en présentiel. De même, si l'on considère le domicile du télétravailleur comme son lieu d'activité principale, cet espace individuel nécessite davantage d'énergie en comparaison aux lieux de travail collectifs, tels que les flex-office en entreprises. Ramenées à l'individu, les consommations pour le chauffage, la climatisation ou l'éclairage seront donc plus élevées pour un télétravailleur.

Ainsi, en faisant varier des paramètres propres à chaque télétravailleur (mode principal de déplacement utilisé, surface du domicile, etc), nous analyserons si la pratique du télétravail induit une diminution des émissions de CO2 par rapport au travail en présentiel.

Nous déterminerons s'il existe une distance domicile-travail à partir de laquelle le recours au télétravail présente un intérêt pour la réduction de GES.

³² ADEME, « Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail ».

³³ ADEME, « Eco-responsable au bureau »; ADEME, « La face cachée du numérique ».

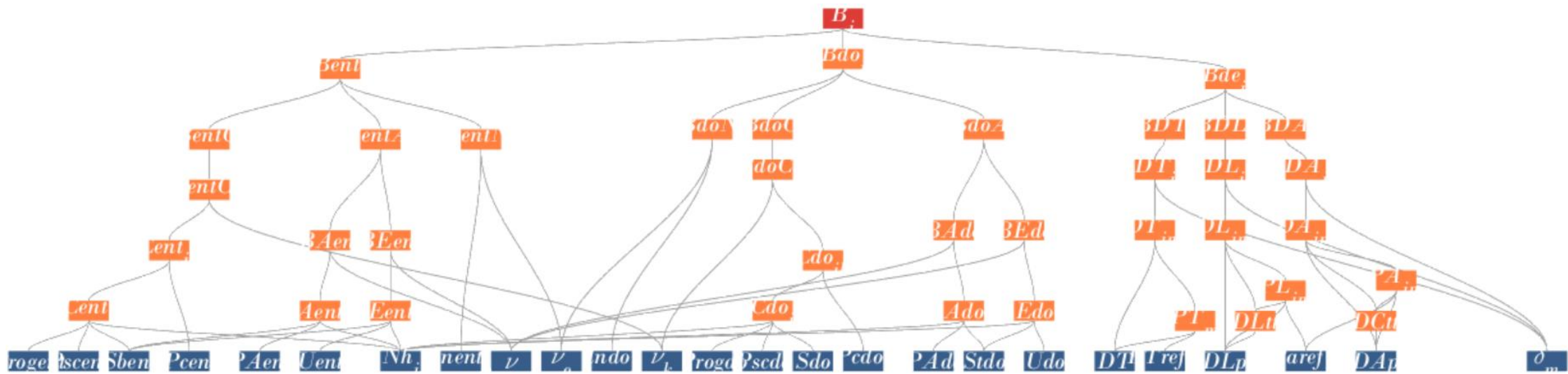
³⁴ Terme employé par l'ADEME dans son rapport sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail. Il fait référence aux effets qui peuvent amplifier ou au contraire atténuer les bénéfices environnementaux du télétravail. Ce terme est plus générique que celui d'« effet rebond » qui lui ne fait référence qu'aux effets qui atténuent les bénéfices du bilan environnemental.

IV- Modélisation

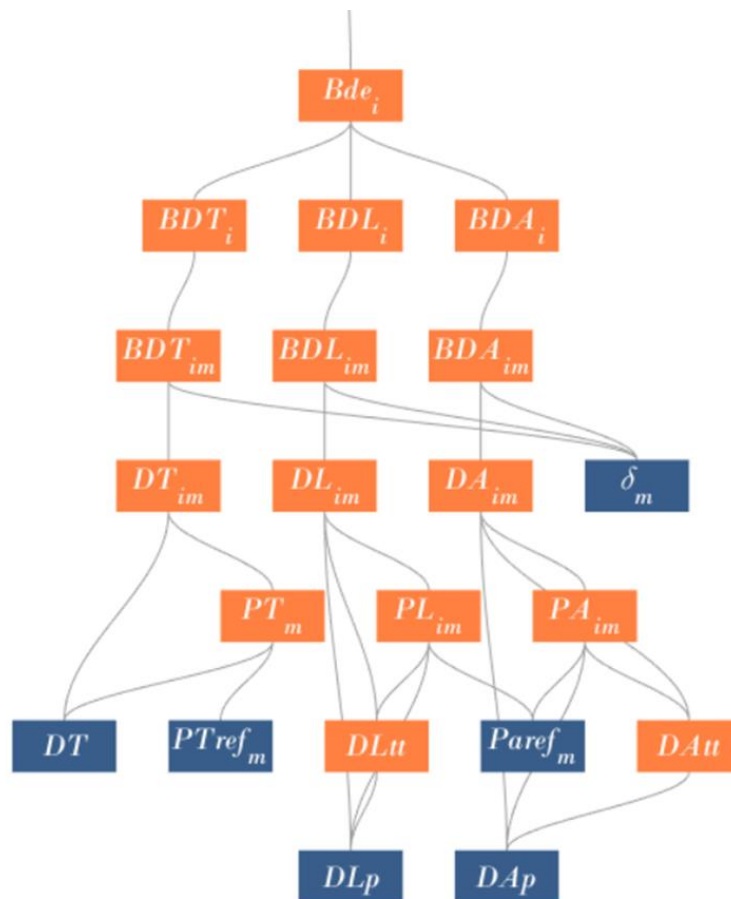
Afin d'élaborer notre modèle nous sommes partis de notre finalité : le bilan de GES d'une journée de travail et de télétravail. Les éléments formulés dans l'état de l'art nous ont conduit à retenir trois variables essentielles à la modélisation de ce bilan que sont les émissions de CO2 liées aux mobilités, à la consommation énergétique sur le lieu de travail présentiel et celle au domicile du télétravailleur. Chacune de ces variables a été ensuite endogénéisée jusqu'à obtenir une variable sur laquelle il est possible d'agir à notre niveau afin de faire varier la finalité de notre système. Ces variables, qualifiées de « levier » sont par exemple la distance domicile-travail ou la durée par type d'utilisation du matériel numérique. (Visioconférence, drive...)

Ce premier modèle prend en compte uniquement la phase d'utilisation des outils numériques.

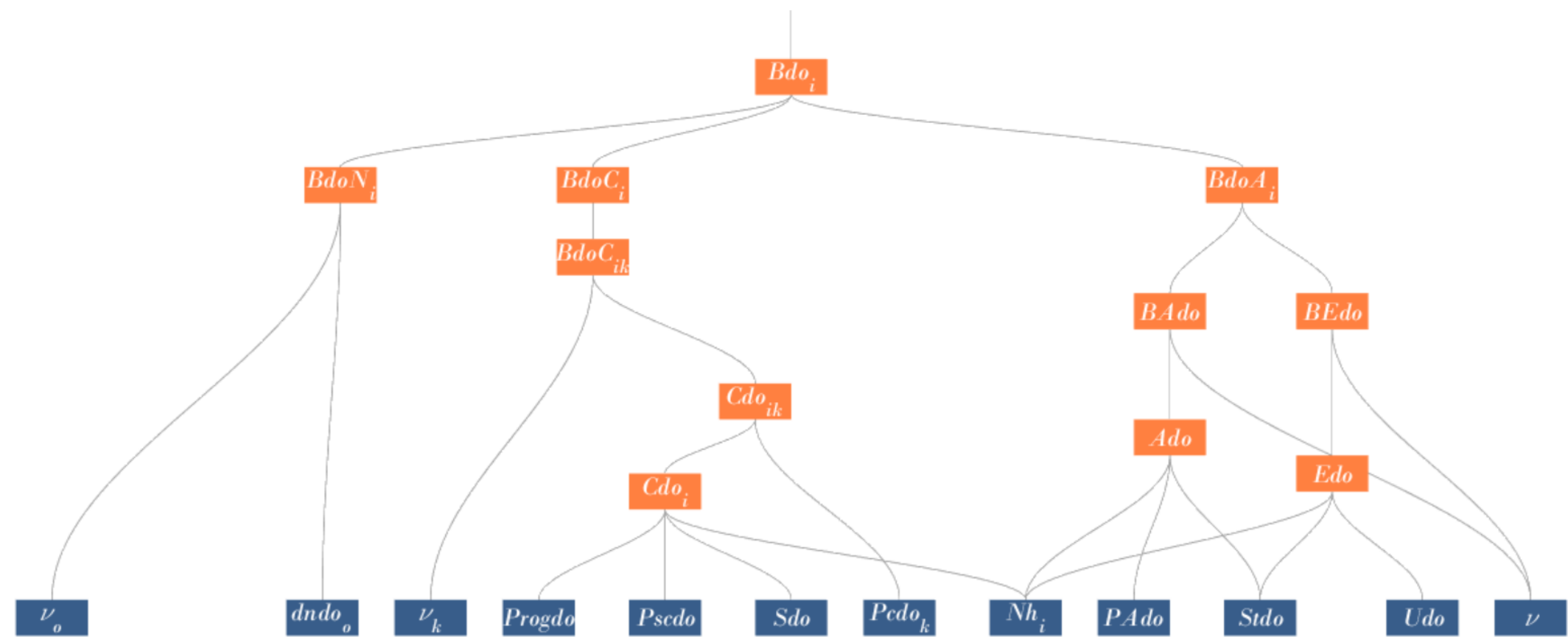
Système logique général :



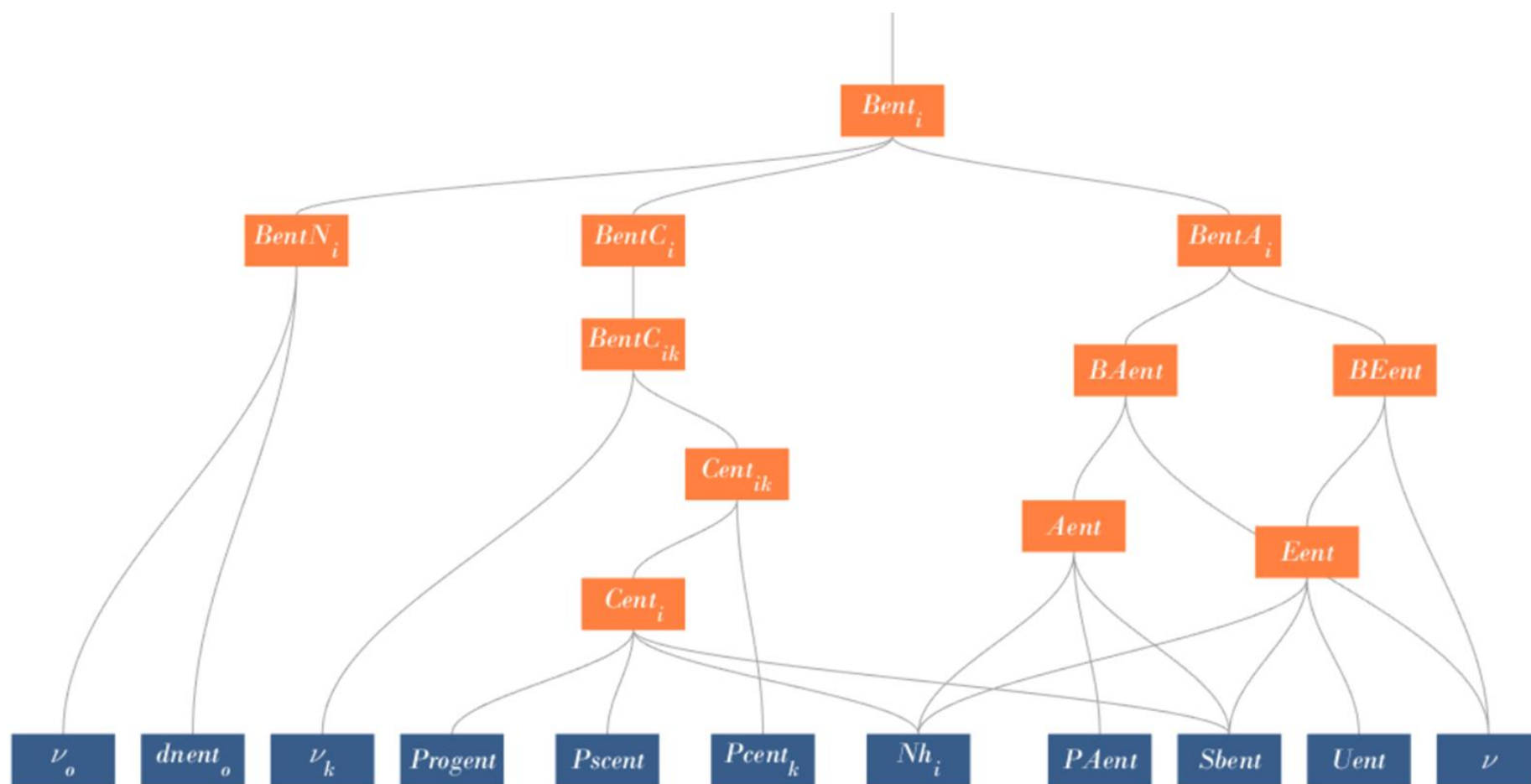
Zoom sur le système logique du poste des déplacements :



Zoom sur le système logique du poste de l'énergie au domicile



Zoom sur le système logique du poste de l'énergie à l'entreprise



A. Contexte de l'élaboration du modèle

Ce paragraphe est destiné à exposer notre vision du travail en présentiel ou en télétravail. Cette vision justifie certains choix que nous avons été amenés à faire lors de l'élaboration du modèle.

- Un jour de travail représente 7 heures de travail. Nous avons choisi de mener nos calculs sur la base d'une seule journée.

L'échelle d'une semaine aurait permis de mettre en exergue les différences de comportement des travailleurs selon le nombre de jours télétravaillés. Par exemple, un salarié consacrant une seule journée en télétravail n'a pas forcément le même comportement que s'il télétravaille toute la semaine. Lors d'une semaine complète de télétravail, ses déplacements pour des motifs de loisirs seront susceptibles d'être plus nombreux et plus long en temps de trajet. Une seule journée de télétravail n'induit pas nécessairement ce genre de comportement.

Ainsi, calculer la différence de émissions de GES sur l'ensemble d'une semaine suppose d'introduire de nouvelles hypothèses extrêmement fortes sur le comportement des individus. Dans notre travail, nous avons voulu nous concentrer sur les différences d'émissions de GES observées sur une seule journée.

- Un télétravailleur éclaire et climatise seulement la pièce où il exerce son activité au cours de sa journée de travail. En revanche, il chauffe l'ensemble des pièces de son domicile.

Après avoir élaboré un premier modèle pour lequel était attribué aux variables exogènes des moyennes issues de la références bibliographiques. Par la suite, nous lui appliquons différents profils de travailleurs. Certaines des variables exogènes conservent la même valeurs. Nous appellerons ces variables des variables fixes. D'autres variables évoluent selon le profil des travailleurs. Elles seront nommées variables leviers. Par exemple, les distances entre le domicile et le travail, les parts modales des déplacements ainsi que les durées d'utilisation des outils numériques sont des variables leviers.

B. Hypothèses du modèle

- Nous avons considéré à travers notre modèle que les émissions de GES liées au travail était imputable à **trois principaux postes d'émissions** que sont les déplacements, la consommation énergétique au lieu de domicile et la consommation énergétique au lieu de travail en présentiel. En effet, le bilan carbone de l'université de Tours³⁵ identifie le poste des déplacements comme le premier poste d'émissions de GES (62 % des émissions). La consommation énergétique figure également parmi les 3 premiers postes d'émissions de GES d'après le rapport (5% des émissions). Le choix a été fait de ne pas prendre en compte le poste des intrants bien que son empreinte carbone ne soit pas négligeable. Néanmoins, l'alimentation représente la majorité des émissions de ce poste (environ 50%). Nous estimons que ces émissions sont sensiblement identiques quel que soit le mode de travail. Il ne paraît donc pas pertinent de prendre en considération ce poste pour mettre en lumière les différences d'émissions de GES entre télétravail et travail en présentiel.

Il est important de garder à l'esprit que d'autres postes sont responsables d'émissions de GES tels que les déchets ou le fret par exemple. Notre modèle n'est donc pas représentatif de l'ensemble des émissions de CO2 liées à la pratique du télétravail ou au travail en présentiel. Il faut également

³⁵ Carbone Conseil, « Bilan Carbone de l'Université de Tours sur l'année 2019 ».

souligner que selon les secteurs d'activités (tertiaire, industrie, ...), le classement de ces postes par émissions de GES diffère nettement³⁶.

- Les activités liées au travail sont à l'origine de l'émission de gaz à effet de serre de natures différentes (protoxyde d'azote, méthane, dioxyde de carbone, ...). Chacun de ces gaz possède un pouvoir de réchauffement global (PRG) différent qui est comparé à celui du gaz carbonique. Cela permet d'obtenir une unité commune qui est les **équivalents CO2** (CO2_{éq}). C'est cette unité que nous avons choisi d'utiliser dans ce modèle. Ainsi, on peut relier les consommations énergétiques ou les distances parcourues en voiture à l'émission d'équivalents CO2 via des facteurs d'émissions. (*Bilan carbone de l'université*)
- L'objectif du modèle est la **comparaison** des émissions de CO2 entre une pratique du télétravail et un travail en présentiel. On ne porte donc pas attention spécifiquement à la valeur finale mais à sa différence entre les deux modes de travail. Nous avons choisi de raisonner en **énergie finale** pour calculer les émissions de CO2 alors qu'en nous concentrant uniquement sur la valeur trouvée, il nous aurait été nécessaire de calculer les émissions de CO2 sur l'énergie primaire.
- On considère que le lieu de travail présentiel est un **bureau individuel**. Pour affiner le modèle, il est envisageable de considérer d'autres lieux de travail tels que les espaces de flex office, moins énergivores.
- On retient l'hypothèse que les consommations du numérique entre le travail au lieu du domicile et le travail en présentiel diffèrent seulement par les heures d'utilisation de la **visio-conférence et du téléphone**. Nous écartons d'autres différences potentielles, telles que le nombre d'heures passées sur internet par exemple.
- Les données choisies pour le poste des déplacements sont extraites de l'enquête EMC² Touraine 2019. Pour le modèle de base, l'échelle choisie est celle de l'Indre et Loire mais les données à d'autres échelles sont ensuite exploitées pour étudier les différences entre les habitants de pôles urbains, péri-urbains, ou ruraux par exemple.
- Ce modèle s'attache uniquement aux déplacements entre le domicile et d'autres lieux. Les trajets, pour lesquels l'origine ou la destination n'est pas le domicile du travailleur, ne sont pas pris en compte.
- Nous nous intéressons seulement aux émissions de CO2_{éq} dues aux déplacements entre le domicile et le lieu de travail, de loisirs ou pour effectuer des achats (grands magasins et autres commerces). Ce choix découle des données de l'enquête EMC². En multipliant la distance moyenne des différents déplacement par leur nombre, on obtient la distance totale parcourue pour tous les déplacements. Ainsi, les trois premiers déplacement sont les trajets domicile-travail (6 800 000km), domicile-achats (3 400 000km) et domicile-loisirs (3 200 000km). Succèdent à ces déplacements les trajets domicile-accompagnement (1 200 000km) et domicile-démarche (870 000km)³⁷.

³⁶ Carbone Conseil.

³⁷ Enquête Mobilité Certifiée Cerema EMC² Touraine 2019

C. Légende des variables du modèle

Code couleur du système logique :

	Finalité du modèle
	Variable endogène (variable fonction d'une autre variable)
	Variable exogène (variable avec une valeur fixe ou variable « levier » dont la valeur dépend du profil du travailleur)

Unités :

Annotation	Signification
kgCO ₂ éq/j	Kilogramme de CO ₂ équivalent par jour
km/j	Kilomètre par jour
kgCO ₂ éq/km	Kilogramme de CO ₂ équivalent par kilomètre
kWh/j	Kilowattheure par jour
kgéqCO ₂ /kWh	Kilogramme de CO ₂ équivalent par kilowattheure
h	Heure
kW	kilowatt
m ²	Mètre-carré
kWh/m ²	Kilowattheure par mètre carré
kW/m ²	Kilowatt par mètre carré

Notation indice	Définition	Détails
<i>i</i>	Type de travail	<i>i</i> = 1 : télétravail <i>i</i> = 2 : présentiel
<i>m</i>	Mode de transport	<i>m</i> = 1 : à pied <i>m</i> = 2 : vélo <i>m</i> = 3 : deux roues motorisés <i>m</i> = 4 : voiture <i>m</i> = 5 : transport en commun
<i>o</i>	Type d'utilisation outil numérique	<i>o</i> = 1 : visioconférence (vidéo + audio) <i>o</i> = 2 : visioconférence (audio)
<i>k</i>	Type de chauffage	<i>k</i> = 1 : gaz <i>k</i> = 2 : électricité <i>k</i> = 3 : fioul <i>k</i> = 4 : bois <i>k</i> = 5 : chauffage urbain <i>k</i> = 6 : PAC

Notations et définitions des variables du modèle	
B_i	B_i : Bilan des gaz à effet de serre selon la pratique du travail (télétravail ou présentiel) en kgCO ₂ éq/j
Bde_i	Bde_i : Bilan GES du poste des déplacements en kgCO ₂ éq/j
BDT_i	BDT_i : Bilan GES des déplacements domicile-travail selon le type de travail i en kgCO ₂ éq/j
BDT_{im}	BDT_{im} : Bilan GES des déplacements domicile-travail selon le type de travail i et le mode de transport m en kgCO ₂ éq/j
δ_m	δ_m : Quantité de CO ₂ équivalent émis pour un kilomètre parcouru pour chacun des modes de transport m kgCO ₂ éq/km.
DT_{im}	DT_{im} Distance parcourue entre le domicile et le lieu de travail par type de travail i et mode de transport m en km/j
DT	DT : Distance journalière domicile-travail en km/j
PT_m	PT_m : Part modale pour un trajet domicile-travail selon la distance à parcourir pour chaque mode de transport m [sans unité]
$PTref_m$	$PTref_m$: Part modale pour un trajet domicile-travail selon la distance à parcourir pour chaque mode de transport m [sans unité]
BDL_i	BDL_i : Bilan GES des déplacements pour les loisirs selon le type de travail i en kgCO ₂ éq/j
BDL_{im}	BDL_{im} : Bilan GES des déplacements loisirs selon le type de travail i et le mode de transport m en kgCO ₂ éq/j
DL_{im}	DL_{im} : Distance parcourue pour les loisirs par type de travail i et mode de transport m en km/j
PL_{im}	PL_{im} : Part modale pour un trajet loisir selon la distance à parcourir pour chaque type de travail i et chaque mode de transport m [sans unité]
$Paref_m$	$Paref_m$: Part modale pour un trajet autre que domicile-travail (i.e loisirs ou achats) selon la distance à parcourir pour chaque mode de transport m [sans unité]
$DLtt$	$DLtt$: Distance parcourue pour les loisirs un jour de télétravail en km/j
DLp	DLp : Distance parcourue pour les loisirs un jour de présentiel en km/j

BDA_i	BDA_i : Bilan GES des déplacements pour les achats selon le type de travail i en kgCO ₂ éq/j
BDA_{im}	BDA_{im} : Bilan GES des déplacements d'achats selon le type de travail i et le mode de transport m en kgCO ₂ éq/j
DA_{im}	DA_{im} : Distance parcourue pour les achats par type de travail i et mode de transport m en km/j
PA_{im}	PA_{im} : Part modale pour un trajet achats selon la distance à parcourir pour chaque type de travail i et chaque mode de transport m [sans unité]
$DAtt$	$DAtt$: Distance parcourue pour les achats un jour de télétravail en km/j
DAp	DAp : Distance parcourue pour les achats un jour de présentiel en km/j
Bdo_i	Bdo_i : Bilan GES du poste de l'énergie au domicile en kgCO ₂ éq/j
$BdoN_i$	$BdoN_i$: Bilan GES du poste de l'énergie au domicile du poste du numérique en kWh/j
ν_o	ν_o : Emission de kgCO ₂ éq par type d'outil numérique o mobilisé en kgCO ₂ éq/h
$dndo_o$	$dndo_o$: Durée d'utilisation par type d'outil numérique o par jour de télétravail en h
$BdoC_i$	$BdoC_i$: Bilan GES du chauffage au domicile en kWh/j
$BdoC_{ik}$	$BdoC_{ik}$: Bilan GES du chauffage au domicile selon le type de chauffage k et du type de travail i en kWh/j
ν_k	ν_k : Emissions de kgCO ₂ éq par kWh consommé pour chaque type de chauffage k en kgéqCO ₂ /kWh
Cdo_{ik}	Cdo_{ik} : Consommation du chauffage au domicile par type de travail i et de chauffage k en kWh/j
$Pcdo_k$	$Pcdo_k$: Part d'utilisation des différents types de chauffage (sans unité)
Cdo_i	Cdo_i : Consommation du chauffage au domicile par type de travail en kWh/j
$Progdo$	$Progdo$: Programmation du chauffage au domicile (sans unité)
$Pscdo$	$Pscdo$: Puissance surfacique du chauffage au domicile en kW/m ²

Sdo	Sdo : Surface du domicile en m^2
$BdoA_i$	Nh_i : Nombre d'heures travaillées par jour par type de travail de type
$BdoA_i$	$BdoA_i$: Bilan GES du poste de l'énergie au domicile, autres que le chauffage et le numérique (climatisation et éclairage) en $kgCO_2\acute{eq}$
$BAdo$	$BAdo$: Bilan GES de la climatisation au domicile en $kgCO_2\acute{eq}/j$
Ado	Ado : Consommation électrique de la climatisation au domicile en kWh/j
ν	ν : Quantité de CO_2 équivalent émis pour un kWh d'énergie électrique consommée en $kg\acute{eq}CO_2/kWh$
$PAdo$	$PAdo$: Puissance surfacique du climatiseur au domicile en kW/m^2
$Stdo$	$Stdo$: Surface pièce de travail au domicile en m^2
$BEdo$	$BEdo$: Bilan GES éclairage au domicile en $kgCO_2\acute{eq}/j$
Edo	Edo : Consommation électrique de l'éclairage au domicile en kWh/j
Udo	Udo : Caractéristiques de l'éclairage bureau au domicile (variable composite)
$Bent_i$	$Bent_i$: Bilan GES du poste de l'énergie à l'entreprise en $kgCO_2\acute{eq}/j$
$BentN_i$	$BentN_i$: Bilan GES du poste de l'énergie à l'entreprise du poste du numérique en kWh/j
$dnent_o$	$dnent_o$: Durée d'utilisation par type d'outil numérique et par jour de travail en h
$BentC_i$	$BentC_i$: Bilan GES du chauffage à l'entreprise en kWh/j
$BentC_{ik}$	$BentC_{ik}$: Bilan GES du chauffage à l'entreprise selon le type de chauffage en kWh/j
$Cent_{ik}$	$Cent_{ik}$: Consommation du chauffage à l'entreprise par type de travail et de chauffage en kWh/j
$Cent_i$	$Cent_i$: Consommation du chauffage à l'entreprise par type de travail en kWh/j
$Pcent_k$	$Pcent_k$: Part d'utilisation des différents types de chauffage (sans unité)

Progent	Progent : Programmation du chauffage à l'entreprise (sans unité)
Pscent	Pscent : Puissance surfacique du chauffage à l'entreprise en kW/m ²
Sbent	Sbent : Surface du bureau individuel en entreprise en m ²
BentA_i	BentA_i : Bilan GES du poste de l'énergie à l'entreprise, autres que le chauffage et le numérique (climatisation et éclairage) en kgCO ₂ eq
BAent	BAent : Bilan GES de la climatisation à l'entreprise en kgCO ₂ eq/j
Aent	Aent : Consommation électrique de la climatisation à l'entreprise en kWh/j
PAent	PAent : Puissance surfacique du climatiseur à l'entreprise en kW/m ²
BEent	BEent : Bilan GES éclairage à l'entreprise en kgCO ₂ eq/j
Eent	Eent : Consommation électrique de l'éclairage à l'entreprise en kWh/j
Uent	Uent : Caractéristiques de l'éclairage bureau à l'entreprise (variable composite)

D. Définition des variables

1) Finalité du modèle

B_i : Bilan des gaz à effet de serre selon la pratique du travail (télétravail ou présentiel) en kgCO₂eq/j

La variable **B_i** correspond au bilan de gaz à effet de serre d'un individu en fonction du type de travail. (*i* = 1 : télétravail ; *i* = 2 : présentiel) afin de pouvoir en faire la comparaison.

Concrètement, il s'agit du bilan de GES de trois postes d'émissions :

- Les déplacements (pour aller au travail, faire ses courses ou se rendre à des loisirs), **Bde_i**
- La consommation énergétique au lieu du domicile, **Bdo_i**
- La consommation énergétique au lieu du travail en présentiel, appelé « travail entreprise » par la suite, **Bent_i**

$$B_i = Bent_i + Bdo_i + Bde_i$$

Notes importantes :

- L'ensemble des gaz à effet de serre sont convertis en quantité de CO₂ équivalent tel que présenté en I.A, page 9 afin de simplifier et raisonner sur une unité commune.
- Le bilan est fait sur une journée puisque l'objectif est de pouvoir comparer le bilan de GES entre une journée en présentiel et une journée en télétravail.

2) Emissions de GES dues aux déplacements

Bde_i : Bilan GES du poste des déplacements en kgCO₂éq/j

Les déplacements d'un individu, à travers divers modes de déplacements engendrent des émissions de gaz à effet de serre.

La variable **Bde_i** a pour but de quantifier et de sommer les émissions de CO₂ de ces divers déplacements selon le mode i ($i = 1$: télétravail ; $i = 2$: présentiel).

Nous considérons trois types de déplacements :

- Les déplacements domicile-travail **BDT_i**
- Les déplacements pour les loisirs **BDL_i**
- Les déplacements pour les achats **BDA_i**

$$\mathbf{Bde}_i = BDT_i + BDL_i + BDA_i$$

BDT_i : Bilan GES des déplacements domicile-travail selon le type de travail i en kgCO₂éq/j

La variable **BDT_i** correspond au bilan GES des différents modes de transports utilisés pour les déplacements domicile-travail contenus dans la variable **BDT_{im}** .

$$BDT_i(1,1) = \text{sum}(BDT_{im}(1, :))$$

$$BDT_i(2,1) = \text{sum}(BDT_{im}(2, :))$$

BDT_{im} : Bilan GES des déplacements domicile-travail selon le type de travail i et le mode de transport m en kgCO₂éq/j

Le bilan GES des déplacements domicile-travail pour chacun des modes de transport est obtenu en connaissant la distance parcourue par chacun des modes DT_{im} pour le trajet domicile-travail et la quantité de CO₂ équivalent émis par kilométrie parcourue de chacun des modes de transport δ_m .

$$BDT_{im} = DT_{im} \otimes \delta_m$$

δ_m : Quantité de CO₂ équivalent émis pour un kilomètre parcouru pour chacun des modes de transport m kgCO₂éq/km.

La variable δ_m correspond à la quantité de gaz à effet de serre moyenne (en équivalent CO₂) émise par kilomètre parcouru pour chacun des modes de transport m .

Les données utilisées sont issues de la base carbone de l'ADEME³⁸.

δ_j [kgCO₂éq/km]	Marche à pied	Vélo	Deux-roues motorisés	Voiture	Transport en commun
Emissions de CO ₂ éq	0	0	0,058	0,132	0,104
	0	0	0,058	0,132	0,104

³⁸ ADEME, <https://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/accueil/documentation-gene/index/page/Routier2>

NB : ces données prennent en compte les GES due à la fabrication et au transport de l'essence (Scope 2 du bilan carbone)

DT_{im} Distance parcourue entre le domicile et le lieu de travail par type de travail i et mode de transport m en km/j

La distance parcourue entre le domicile et le lieu de travail est déterminée par la distance domicile travail DT et la part modale de chaque mode de transport en fonction de la distance domicile-travail PT_m .

```
for i = 1: numel(PT_m)
    DT_im(1, i) = 0
    DT_im(2, i) = DT ⊗ PT_m(1, i)
end
```

DT : Distance journalière domicile-travail en km/j

La variable **DT** correspond à la distance journalière (c'est-à-dire aller-retour) parcourue entre le domicile et le lieu de travail (pour un jour en présentiel car on fait l'hypothèse qu'un jour de télétravail est effectué à domicile).

Distance moyenne [km/j]	20,8
-------------------------	------

D'après l'Enquête Mobilités Certifiée CEREMA (EMC²) Touraine 2019³⁹, la distance selon le motif combiné domicile $\leftrightarrow$ travail en Indre-et-Loire est de 20,8km⁴⁰.

PT_m : Part modale pour un trajet domicile-travail selon la distance à parcourir pour chaque mode de transport m [sans unité]

Il s'agit en réalité de la part modale des différents moyens de transport pour un trajet domicile-travail connaissant la distance à parcourir DT . Pour la déterminer, nous disposons des parts modales de chaque mode de transport PT_{ref_m} pour des distances données. Afin de connaître ces parts modales pour la distance domicile-travail de notre étude (DT), nous réalisé une interpolation linéaire. Nous soutenons l'hypothèse que la variation de la part modale en fonction de la distance domicile-travail était linéaire entre des distances proches pour lesquelles la part modale associée est connue.

³⁹ La distance moyenne des déplacements entre le domicile et lieu de travail est celle des résidents du département d'Indre-et-Loire. Les déplacements ont été déterminés sous le motif combiné. "Les motifs combinés sont l'association du motif à l'origine avec le motif à destination, indépendamment du sens du déplacement. Les déplacements du domicile vers le travail ou du travail vers le domicile sont tous comptés sous le motif combiné "domicile-travail". Les déplacements secondaires correspondent à des déplacements dont ni l'origine, ni la destination n'est le domicile".

⁴⁰ Enquête Mobilités Certifiée CEREMA (EMC²) Touraine 2019, <https://emc2-touraine-mobilites.scan-datamining.com/motif-distances-moyennes-de-deplacements-selon-le-motif-combine-pour-les-residents-de-id?destination=print/site>

$$\begin{aligned}
PT_m(1,1) &= (\text{interp1}(PTref_m(:,1), PTref_m(:,2), DT, 'linear', 'extrap')))/100; \\
PT_m(1,2) &= (\text{interp1}(PTref_m(:,1), PTref_m(:,3), DT, 'linear', 'extrap')))/100; \\
PT_m(1,3) &= (\text{interp1}(PTref_m(:,1), PTref_m(:,4), DT, 'linear', 'extrap')))/100; \\
PT_m(1,4) &= (\text{interp1}(PTref_m(:,1), PTref_m(:,5), DT, 'linear', 'extrap')))/100; \\
PT_m(1,5) &= (\text{interp1}(PTref_m(:,1), PTref_m(:,6), DT, 'linear', 'extrap')))/100;
\end{aligned}$$

$PTref_m$: Part modale pour un trajet domicile-travail selon la distance à parcourir pour chaque mode de transport m [sans unité]

Il s'agit de la part modale des différents moyens de transport pour un trajet domicile travail pour différentes classes de distance⁴¹.

$PTref_m$					
Milieu classe	À pied	Vélo	Deux-roues motorisés	Voiture	Transports en commun
0,25	70	0	0	23	4,7
0,75	57	6,8	0	30	5,5
1,5	27	9,6	2,5	56	5
2,5	6,9	10,6	2,6	68	11,7
4	1,4	7,2	2,6	77	11,4
7,5	0	2,1	2,6	85	10,15
17,5	0	0	1,3	94	4,53
32,5	0	0	0,42	84	16

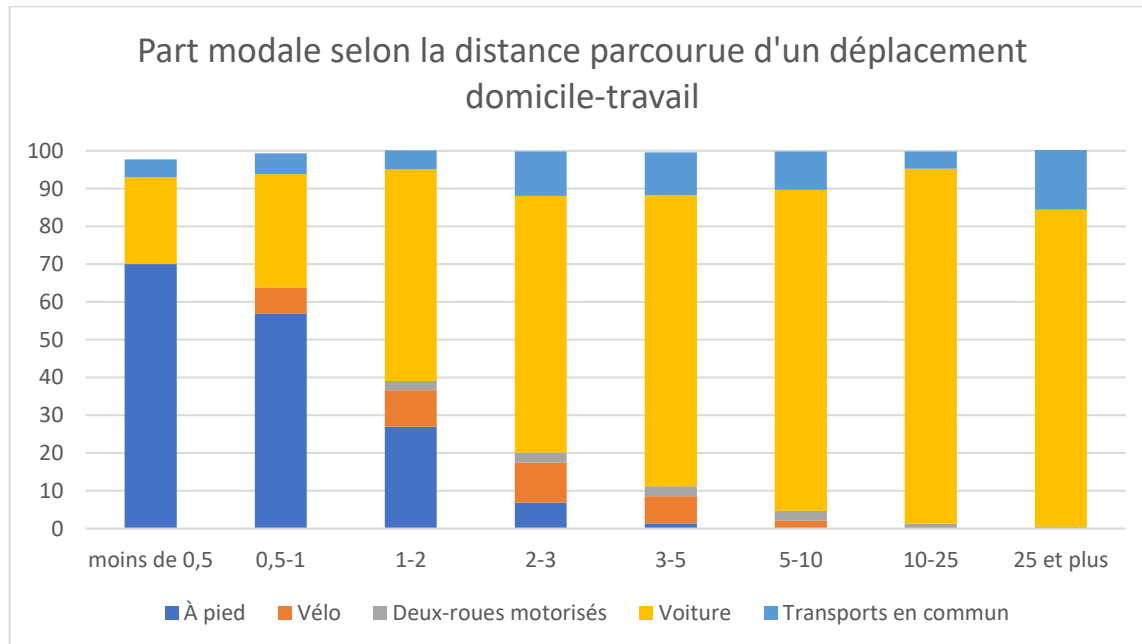


Figure 2: Part modale selon la distance parcourue (source: EMC² Touraine 2019)

⁴¹ Enquête Mobilités Certifiée CEREMA (EMC²) Touraine 2019, <https://emc2-touraine-mobilites.scan-datamining.com/la-mobilite-en-indre-et-loire/indre-et-loire-focus-les-deplacements-domicile-travail>

BDL_i : Bilan GES des déplacements pour les loisirs selon le type de travail i en kgCO₂éq/j

La variable **BDL_i** correspond au bilan GES des différents modes de transports utilisés pour les déplacements loisirs contenus dans la variable **BDL_{im}** .

$$\begin{aligned} BDL_i(1,1) &= \text{sum}(BDL_{im}(1,:)) \\ BDL_i(2,1) &= \text{sum}(BDL_{im}(2,:)) \end{aligned}$$

BDL_{im} : Bilan GES des déplacements loisirs selon le type de travail i et le mode de transport m en kgCO₂éq/j

Le bilan GES des déplacements loisirs pour chacun des modes de transport est obtenu en connaissant la distance parcourue par chacun des modes DL_{im} pour les loisirs et la quantité de CO₂ équivalent émis par kilométrie parcourue de chacun des modes de transport δ_m .

$$BDL_{im} = DL_{im} \otimes \delta_m$$

DL_{im} : Distance parcourue pour les loisirs par type de travail i et mode de transport m en km/j

La distance parcourue pour les loisirs pour chacun des modes de transports est déterminée par la distance totale parcourue pour les loisirs en présentiel DLp ou en télétravail, $DLtt$, et la part modale de chaque mode de transport en fonction de la distance parcourue PL_{im} .

$$\begin{aligned} DL_{im}(1,:) &= DLtt \otimes PL_{im}(1,:) \\ DL_{im}(2,:) &= DLp \otimes PL_{im}(2,:) \end{aligned}$$

PL_{im} : Part modale pour un trajet loisir selon la distance à parcourir pour chaque type de travail i et chaque mode de transport m [sans unité]

Il s'agit en réalité de la part modale des différents moyens de transport connaissant la distance à parcourir DLp (en présentiel) ou $DLtt$ (en télétravail).

Pour la déterminer, nous disposons des parts modales de chaque mode de transport $Paref_m$ pour des distances données. Afin de connaître ces parts modales pour la distance loisir en présentiel ou en télétravail de notre étude (respectivement DLp et $DLtt$), une interpolation linéaire a été réalisée. Nous avons retenu l'hypothèse que la variation de la part modale en fonction de la distance pour les loisirs était linéaire entre des distances proches pour lesquelles la part modale associée est connue.

$$\begin{aligned} PL_{im}(1,1) &= (\text{interp1}(Paref_m(:,1), Paref_m(:,2), DLtt, 'linear', 'extrap')))/100; \\ PL_{im}(1,2) &= (\text{interp1}(Paref_m(:,1), Paref_m(:,3), DLtt, 'linear', 'extrap')))/100; \\ PL_{im}(1,3) &= (\text{interp1}(Paref_m(:,1), Paref_m(:,4), DLtt, 'linear', 'extrap')))/100; \\ PL_{im}(1,4) &= (\text{interp1}(Paref_m(:,1), Paref_m(:,5), DLtt, 'linear', 'extrap')))/100; \\ PL_{im}(1,5) &= (\text{interp1}(Paref_m(:,1), Paref_m(:,6), DLtt, 'linear', 'extrap')))/100; \\ PL_{im}(2,1) &= (\text{interp1}(Paref_m(:,1), Paref_m(:,2), DLp, 'linear', 'extrap')))/100; \\ PL_{im}(2,2) &= (\text{interp1}(Paref_m(:,1), Paref_m(:,3), DLp, 'linear', 'extrap')))/100; \\ PL_{im}(2,3) &= (\text{interp1}(Paref_m(:,1), Paref_m(:,4), DLp, 'linear', 'extrap')))/100; \end{aligned}$$

$$PL_{im}(2,4) = (\text{interp1}(\text{Paref}_m(:,1), \text{Paref}_m(:,5), \text{DLp}, 'linear', 'extrap'))/100;$$

$$PL_{im}(2,5) = (\text{interp1}(\text{Paref}_m(:,1), \text{Paref}_m(:,6), \text{DLp}, 'linear', 'extrap'))/100;$$

Paref_m : Part modale pour un trajet autre que domicile-travail (i.e loisirs ou achats) selon la distance à parcourir pour chaque mode de transport m [sans unité]

Il s'agit de la part modale des différents moyens de transport pour un trajet autre que domicile-travail, c'est-à-dire pour les loisirs ou les achats pour différentes classes de distance⁴².

Paref_m					
Milieu classe	À pied	Vélo	Deux-roues motorisés	Voiture	Transports en commun
0,25	85	1,2	0	13	0,78
0,75	53	4,2	0,77	39	3,17
1,5	34	5,4	0,91	54	5,24
2,5	18	3,9	0,9	66	11,44
4	5,3	3,7	1,1	76	13,65
7,5	0,96	1,5	1,4	84	12,57
17,5	0	0,35	0,81	90	8,6
32,5	0	0,36	0,29	82	17,3

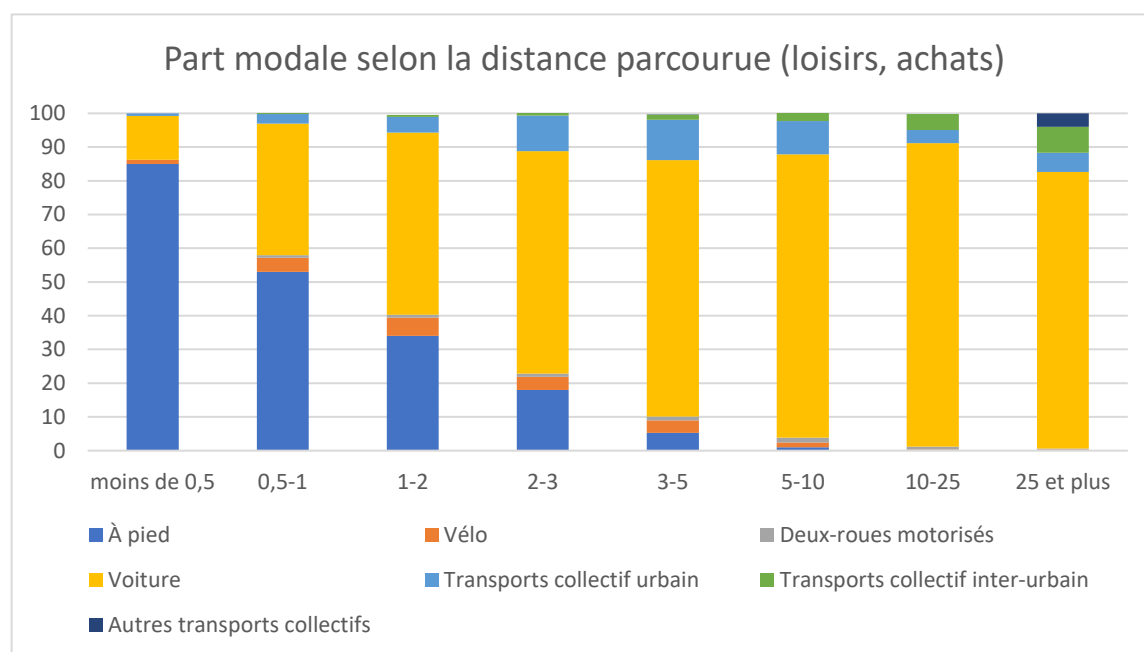


Figure 3: Part modale selon la distance parcourue pour les loisirs et achats (source: EMC² Touraine 2019)

⁴² Enquête Mobilités Certifiée CEREMA (EMC²) Touraine 2019 <https://emc2-touraine-mobilites.scan-datamining.com/la-mobilite-en-indre-et-loire/indre-et-loire-les-modes-de-deplacements/indre-et-loire-les-distances?type=dall&id=all>

DL_{tt} : Distance parcourue pour les loisirs un jour de télétravail en km/j

La variable DL_{tt} correspond à la distance journalière parcourue pour les loisirs un jour de télétravail. L'enquête EMC² n'ayant pas publié cette donnée, nous nous sommes appuyés sur une enquête de l'ADEME⁴³. D'après ses résultats, la distance parcourue par déplacement pour motif loisir augmente de 7% lorsque l'on passe d'un jour de présentiel à un jour de télétravail. A partir de ce pourcentage et de la distance parcourue une journée habituelle pour se rendre aux loisirs en Indre et Loire (DL_p), nous avons pu estimer cette même distance mais pour une journée de télétravail (DL_{tt}).

$$DL_{tt} = 1,07 \times DL_p$$

DL_p : Distance parcourue pour les loisirs un jour de présentiel en km/j

La variable DL_p correspond à la distance journalière (c'est-à-dire aller-retour) parcourue pour les loisirs

Distance moyenne [km/j]	8,3
-------------------------	-----

D'après l'Enquête Mobilités Certifiée CEREMA (EMC²) Touraine 2019⁴⁴, la distance parcourue pour les loisirs s'élève en moyenne, en Indre-et-Loire, à 8,3km par jour⁴⁵.

BDA_i : Bilan GES des déplacements pour les achats selon le type de travail i en kgCO₂éq/j

La variable BDA_i correspond au bilan GES des différents modes de transports utilisés pour les déplacements d'achats (courses...) contenus dans la variable BDA_{im} .

$$BDA_i(1,1) = \text{sum}(BDA_{im}(1, :))$$

$$BDA_i(2,1) = \text{sum}(BDA_{im}(2, :))$$

BDA_{im} : Bilan GES des déplacements d'achats selon le type de travail i et le mode de transport m en kgCO₂éq/j

Le bilan GES des déplacements pour chacun des modes de transport est obtenu en connaissant la distance parcourue par chacun des modes DA_{im} pour les achats et la quantité de CO₂ équivalent émis par kilométrie parcourue de chacun des modes de transport δ_m .

⁴³ 6t bureau de recherche pour l'Ademe, « Télétravail, (im)mobilité et modes de vie. Étude du télétravail et des modes de vie à l'occasion de la crise sanitaire de 2020 ».

⁴⁴ La distance moyenne des déplacements entre le domicile et lieu de travail est celle des résidents du département d'Indre-et-Loire. Les déplacements ont été déterminés sous le motif combiné. "Les motifs combinés sont l'association du motif à l'origine avec le motif à destination, indépendamment du sens du déplacement. Les déplacements du domicile vers le travail ou du travail vers le domicile sont tous comptés sous le motif combiné "domicile-travail". Les déplacements secondaires correspondent à des déplacements dont ni l'origine, ni la destination n'est le domicile".

⁴⁵ Enquête Mobilités Certifiée CEREMA (EMC²) Touraine 2019 <https://emc2-touraine-mobilites.scan-datamining.com/motif-distances-moyennes-de-deplacements-selon-le-motif-combine-pour-les-residents-de-id?destination=print/site>

$$BDA_{im} = DA_{im} \otimes \delta_m$$

DA_{im} : Distance parcourue pour les achats par type de travail i et mode de transport m en km/j

La distance parcourue pour les achats pour chacun des modes de transports est déterminée par la distance totale parcourue pour les achats en présentiel D_{Ap} ou en télétravail, D_{Att} , et la part modale de chaque mode de transport en fonction de la distance parcourue PA_{im} .

$$\begin{aligned} DA_{im}(1,:) &= D_{Ctt} \otimes PA_{im}(1,:) \\ DA_{im}(2,:) &= D_{Ap} \otimes PA_{im}(2,:) \end{aligned}$$

PA_{im} : Part modale pour un trajet achats selon la distance à parcourir pour chaque type de travail i et chaque mode de transport m [sans unité]

Il s'agit en réalité de la part modale des différents moyens de transport connaissant la distance à parcourir D_{Ap} (en présentiel) ou D_{Att} (en télétravail) pour les achats.

Pour la déterminer, nous disposons des parts modales de chaque mode de transport $Paref_m$ pour des distances données. Afin de connaître ces parts modales pour la distance achats en présentiel ou en télétravail de notre étude (respectivement D_{Ap} et D_{Att}), nous avons réalisé une interpolation linéaire en retenant l'hypothèse que la variation de la part modale en fonction de la distance pour les achats était linéaire entre des distances proches pour lesquelles la part modale associée est connue.

$$\begin{aligned} PA_{im}(1,1) &= (interp1(Paref_m(:,1), Paref_m(:,2), D_{Att}, 'linear', 'extrap'))/100; \\ PA_{im}(1,2) &= (interp1(Paref_m(:,1), Paref_m(:,3), D_{Att}, 'linear', 'extrap'))/100; \\ PA_{im}(1,3) &= (interp1(Paref_m(:,1), Paref_m(:,4), D_{Att}, 'linear', 'extrap'))/100; \\ PA_{im}(1,4) &= (interp1(Paref_m(:,1), Paref_m(:,5), D_{Att}, 'linear', 'extrap'))/100; \\ PA_{im}(1,5) &= (interp1(Paref_m(:,1), Paref_m(:,6), D_{Att}, 'linear', 'extrap'))/100; \\ \\ PA_{im}(2,1) &= (interp1(Paref_m(:,1), Paref_m(:,2), D_{Ap}, 'linear', 'extrap'))/100; \\ PA_{im}(2,2) &= (interp1(Paref_m(:,1), Paref_m(:,3), D_{Ap}, 'linear', 'extrap'))/100; \\ PA_{im}(2,3) &= (interp1(Paref_m(:,1), Paref_m(:,4), D_{Ap}, 'linear', 'extrap'))/100; \\ PA_{im}(2,4) &= (interp1(Paref_m(:,1), Paref_m(:,5), D_{Ap}, 'linear', 'extrap'))/100; \\ PA_{im}(2,5) &= (interp1(Paref_m(:,1), Paref_m(:,6), D_{Ap}, 'linear', 'extrap'))/100; \end{aligned}$$

D_{Att} : Distance parcourue pour les achats un jour de télétravail en km/j

La variable **D_{Att}** correspond à la distance journalière parcourue pour les achats un jour de télétravail. L'enquête EMC² n'ayant pas publié cette donnée, nous nous appuyons sur une enquête de l'ADEME⁴⁶. D'après ses résultats, la distance parcourue par déplacement pour motif achats diminue de 22% lorsque l'on passe d'un jour de présentiel à un jour de télétravail. A partir de ce pourcentage et de la distance parcourue une journée habituelle pour faire des achats en Indre et Loire (D_{Ap}), nous avons estimé cette même distance mais pour une seule journée de télétravail (D_{Att}).

⁴⁶ 6t bureau de recherche pour l'Ademe, « Télétravail, (im)mobilité et modes de vie. Étude du télétravail et des modes de vie à l'occasion de la crise sanitaire de 2020 ».

$$DAtt = 0,78 \times DAp$$

DAp : Distance parcourue pour les achats un jour de présentiel en km/j

La variable *DAp* correspond à la distance journalière (c'est-à-dire aller-retour) parcourue pour les achats.

Distance moyenne [km/j]	5,3
-------------------------	-----

D'après l'Enquête Mobilités Certifiée CEREMA (EMC²) Touraine 2019⁴⁷, la distance parcourue pour les achats s'élève en moyenne, en Indre-et-Loire, à 5,3km par jour⁴⁸.

3) Emissions de GES dues à la consommation énergétique au lieu de domicile

Cette partie du modèle s'intéresse à la consommation énergétique au domicile du travailleur aussi bien lors d'une journée en télétravail que d'une journée en présentiel.

Bdo_i : Bilan GES du poste de l'énergie au domicile en kgCO₂eq/j

Parmi les émissions de GES du domicile du travailleur, on calcule les émissions de GES liées au chauffage. Les sources d'énergie considérées dans le modèle pour le chauffage sont le gaz, l'électricité, le fuel, le bois et le réseau de chaleur urbain.

Outre le chauffage, nous considérons les autres postes qui utilisent l'électricité comme source d'énergie, c'est-à-dire la climatisation, la consommation des outils numériques et l'éclairage⁴⁹.

Le bilan GES au domicile du travailleur est donc la somme des émissions liées aux outils numériques *BdoN_i*, au chauffage, *BdoC_i* et aux autres postes nécessitant de l'électricité, *BdoA_i*.

$$\begin{aligned} Bdo_i(1,1) &= BdoN_i(1,1) + BdoC_i(1,1) + BdoA_i(1,1); \\ Bdo_i(2,1) &= BdoC_i(2,1) \end{aligned}$$

BdoN_i : Bilan GES du poste de l'énergie au domicile du poste du numérique en kWh/j

⁴⁷ La distance moyenne des déplacements entre le domicile et lieu de travail est celle des résidents du département d'Indre-et-Loire. Les déplacements ont été déterminés sous le motif combiné. "Les motifs combinés sont l'association du motif à l'origine avec le motif à destination, indépendamment du sens du déplacement. Les déplacements du domicile vers le travail ou du travail vers le domicile sont tous comptés sous le motif combiné "domicile-travail". Les déplacements secondaires correspondent à des déplacements dont ni l'origine, ni la destination n'est le domicile".

⁴⁸ Enquête Mobilités Certifiée CEREMA (EMC²) Touraine 2019 <https://emc2-touraine-mobilites.scan-datamining.com/motif-distances-moyennes-de-deplacements-selon-le-motif-combine-pour-les-residents-de-id?destination=print/site>

⁴⁹ ADEME, « Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail ».

Le bilan GES du poste du numérique indique les émissions de CO₂eq liées à l'utilisation des outils numériques. Au lieu du domicile du travailleur, on observe ces émissions de CO₂eq seulement lors des heures de télétravail. Elles sont déterminées en multipliant le nombre d'heures d'utilisation des différents types d'outil numérique o , $dndo_o$ par le facteur d'émissions associé ν_o .

$$BdoN_i = \text{sum}(dndo_o * \nu_o)$$

ν_o : Emission de kgCO₂eq par type d'outil numérique o mobilisé en kgCO₂eq/h

Le facteur ν_o correspond à la quantité de CO₂eq libérée afin d'utiliser diverses outils numériques. Ces émissions comprennent celles nécessaires à la production de l'énergie, à sa distribution et au fonctionnement des serveurs⁵⁰.

Emission de CO ₂ eq selon les outils numériques mobilisés [kg/h]	Visio (vidéo + audio)	Visio (audio)
Télétravail	0.200	0.0080

$dndo_o$: Durée d'utilisation par type d'outil numérique o par jour de télétravail en h

Selon les profils des télétravailleurs, la durée d'utilisation des outils numériques varie. Nous avons considéré dans un premier temps des valeurs arbitraires mais celles-ci peuvent évoluer selon les travailleurs.

Durée d'utilisation journalière des outils numériques k [h]	Visio (vidéo + audio)	Visio (audio)
Télétravail	3	0,5

$BdoC_i$: Bilan GES du chauffage au domicile en kWh/j

Le bilan GES du chauffage au domicile est la somme des bilans GES des différents types de chauffage k pour les différents type de travail i , $BdoC_{i_k}$, précédemment évoqués.

$$BdoC_i(1,1) = \text{sum}(BdoC_{i_k} (1,:)) ;$$

⁵⁰ The overlooked environmental footprint of increasing Internet use, avril 2021, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344920307072?via%3Dihub>

$$BdoC_i(2,1) = \text{sum}(BdoC_{i_k}(2,:)) ;$$

$BdoC_{i_k}$: Bilan GES du chauffage au domicile selon le type de chauffage k et du type de travail i en kWh/j

Le bilan GES du chauffage diffère selon le type de chauffage et donc de la source d'énergie qui lui est associée. Par exemple, les émissions de CO2_{eq} pour apporter 1kWh d'énergie seront plus importantes pour un chauffage au gaz qu'un chauffage fonctionnant à l'électricité. Les émissions de CO2_{eq} associées à chaque type de chauffage sont alors le produit de leur consommation respective, Cdo_{i_k} par le facteur d'émissions v_k .

$$BdoC_{i_k} = Cdo_{i_k} * v_k$$

v_k : Emissions de kgCO2_{eq} par kWh consommé pour chaque type de chauffage k en kg_{eq}CO2/kWh

Le facteur d'émission désigne, pour chaque source d'énergie, la quantité de CO2_{eq} libérée dans l'atmosphère afin d'apporter 1kWh d'énergie⁵¹.

v_k Facteur d'émissions de 1kWh de chauffage en kg _{eq} CO2	Gaz	Electricité	fioul	bois	Chauffage urbain	PAC
Télétravail	0,227	0,147	0,324	0,03	0,01	0,049
Présentiel	0,227	0,147	0,324	0,03	0,01	0,049

Cdo_{i_k} : Consommation du chauffage au domicile par type de travail i et de chauffage k en kWh/j

Afin de prendre en considération les différents types de chauffage utilisés en France et les variations sur les émissions de CO2_{eq} qui en découlent, la consommation d'énergie au domicile du travailleur Cdo_i a été multipliée par les parts d'utilisation moyenne des différents chauffages en France pour le secteur résidentiel $Pcdo_k$.

$$Cdo_{i_k}(1,:) = Cdo_i(1,1) * Pcdo_k(1,:) ;$$

$$Cdo_{i_k}(2,:) = Cdo_i(2,1) * Pcdo_k(2,:) ;$$

$Pcdo_k$: Part d'utilisation des différents types de chauffage k (sans unité)

⁵¹ Carbone 4, « Chauffage électrique en France : une bonne idée pour le climat ? », juin 2020, <https://www.carbone4.com/wp-content/uploads/2020/06/Publication-FE-Chaleur-et-%C3%A9lectricit%C3%A9-.pdf>

La part d'utilisation des différents types de chauffage indique le pourcentage d'utilisation d'un chauffage, en moyenne, dans le secteur résidentiel français⁵². Il est important de l'intégrer au modèle car l'objectif est d'obtenir des résultats qui reflètent les émissions de CO₂eq d'un individu représentatif de l'ensemble de la population française.

<i>Pcdo_k</i> Part d'utilisation chauffage	Gaz	Electricité	fioul	bois	Chauffage urbain
Télétravail	0,44	0,34	0,14	0,04	0,03
Présentiel	0,44	0,34	0,14	0,04	0,03

Cdo_i : Consommation du chauffage au domicile par type de travail *i* en kWh/j

Afin de déterminer la quantité de chaleur appelée par les différents types de chauffage au cours de la journée, nous multiplions la puissance surfacique nécessaire à chauffer un mètre carré *Pscdo* par la superficie de la pièce à chauffer *Sdo* et la durée *Nh_i* d'utilisation du chauffage.

Sachant qu'un chauffage allumé n'appelle pas en permanence de l'énergie, nous avons considéré arbitrairement que sur les 7 heures de travail quotidien où le chauffage fonctionne, il appelle de l'énergie pendant 2,8h (soit 40% de la durée totale). Dans le cas d'une journée de présentiel, la programmation ou non chauffage au domicile (*Progdo*) rentre également en compte.

Pour un télétravailleur, on considère qu'il n'y a pas de programmation de son chauffage puisqu'il est présent à son domicile. La puissance *Pscdo_i* du chauffage est donc maximale : $Pscdo(i, 1) = Pscdo(1,1) = 100W/m^2$

On a alors : $Cdo_i(1,1) = 0.4 * Nh_i(1,1) * Pscdo(1,1) * Sdo;$

Un travailleur en présentiel peut soit programmer son chauffage en cas d'absence, soit ne pas le programmer.

$Cdo_i(2,1) = 0.4 * Nh_i(2,1) * Pscdo(Progdo, 1) * Sdo ;$

En cas de programmation, la puissance *Cdo_i* du chauffage est minimale. *Progdo* prend alors la valeur 2 et on a : $Pscdo(Progdo, 1) = Pscdo(2,1) = 60W/m^2$

En revanche, s'il n'a pas programmé son chauffage, la puissance *Cdo_i* du chauffage est maximale. *Progdo* prend alors la valeur 1 et on a : $Pscdo(Progdo, 1) = Pscdo(1,1) = 100W/m^2$

Prendre en compte ce paramètre est important car pour un individu travaillant en présentiel et qui n'a pas l'habitude de programmer son chauffage lors de son absence, le passage au télétravail n'aura pas d'effets rebonds sur sa consommation de chauffage.

Progdo : Programmation du chauffage au domicile (sans unité)

⁵² ADEME, modes de chauffage dans l'habitat individuel, 2014,
<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/avis-ademe-modes-chauffage-individuels.pdf>

Nous considérons que le chauffage peut délivrer deux puissances différentes selon la température demandée. Si un individu appelle une température de « confort » (car il est en télétravail ou il n'a pas programmé son chauffage : $P = 1$ lors de son absence), alors la puissance sera maximale. En revanche, la puissance du chauffage sera minimale si l'individu travaille en présentiel et a programmé son chauffage pour diminuer la température lors de son absence (mode « économique » : $P = 2$).

Pscdo : Puissance surfacique du chauffage au domicile en kW/m²

On considère que la puissance nécessaire pour chauffer à 19°C (mode confort) une pièce est de 100W/m² (lorsque l'utilisateur est présent ou qu'il ne programme pas son chauffage). Elle est de 60W/m² pour chauffer à 15°C (mode éco, lorsque l'utilisateur est absent du domicile et a programmé son chauffage).⁵³

	Puissance surfacique du chauffage [kW/m ²]
Mode confort	0.100
Mode économique	0.060

Sdo : Surface du domicile en m²

La consommation de chauffage dépend naturellement de la surface à chauffer.

On choisit une surface de domicile de 90m². Cette valeur correspond à la moyenne nationale diffusée par l'INSEE en 2013⁵⁴.

Nh_i : Nombre d'heures travaillées par jour par type de travail i en h

Considérant une semaine de travail de 5 jours ouvrés comprenant 35h de travail, le nombre d'heures travaillées par jour s'élève à 7h. ici, le nombre d'heures travaillées en télétravail ou en présentiel est identique.

	Nombre d'heures travaillées par jour [h]
Télétravail	7
Présentiel	7

⁵³ ENGIE, Calcul de la puissance d'un radiateur, <https://particuliers.engie.fr/depannages-services/conseils-equipements-chauffage/conseils-radiateurs/quelle-puissance-radiateur-par-m2.html>

⁵⁴ INSEE, Les conditions de logement en France, 2017, https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/2586024/LOGFRA17k2_F6.2.pdf

$BdoA_i$: Bilan GES du poste de l'énergie au domicile, autres que le chauffage et le numérique (climatisation et éclairage) par type de travail i en kgCO₂éq

La variable $BdoA_i$ correspond à la somme des bilans GES de la climatisation $BAdo$ et de l'éclairage $BEdo$.

$$BdoA_i = BAdo + BEdo$$

$BAdo$: Bilan GES de la climatisation au domicile en kgCO₂éq/j

Afin de déterminer le bilan GES de la climatisation, la consommation énergétique nécessaire Ado est multipliée par le facteur d'émission de l'électricité ν .

$$BAdo = Ado * \nu$$

Ado : Consommation électrique de la climatisation au domicile en kWh/j

La variable Ado représente la consommation électrique de la climatisation sur une journée. Celle-ci est exprimée en kWh/j.

Concrètement, il s'agit de la puissance surfacique du climatiseur $PAdo$ multipliée par la surface de la pièce de télétravail $Stdo$. Ce résultat est multiplié par le nombre d'heure travaillées en télétravail $Nh_i(1)$. Nous considérons donc que le télétravailleur rafraîchit seulement la pièce où il travaille et utilise à cette fin un climatiseur.

Selon l'étude de l'ADEME, *La climatisation de confort dans les bâtiments résidentiels et tertiaires*, en Indre-et-Loire, 11% des habitants possèdent un climatiseur. Parmi ceux-ci, 60% sont des actifs. On considère donc que $11\% * 60\% = 6,6\%$ des actifs climatisent leur domicile⁵⁵.

Sachant qu'un climatiseur allumé n'appelle pas en permanence de l'énergie, nous avons considéré arbitrairement que sur les 7 heures de travail quotidien où la climatisation est allumée, celle-ci appelle de l'énergie pendant 2,8h (soit 40% de la durée totale).

Finalement,

$$Ado = 0.066 * 0.4 * Nh_i(1) * PAdo * Stdo$$

Bien entendu, lorsque la consommation énergétique du chauffage est non nulle, nous attribuons une valeur nulle à la consommation de la climatisation et vice-versa, selon la saison retenue (hiver, été, etc.).

⁵⁵ Rapport ADEME, *La climatisation de confort dans les bâtiments résidentiels et tertiaires*, 2020, https://librairie.ademe.fr/air-et-bruit/4745-la-climatisation-de-confort-dans-les-batiments-residentiels-et-tertiaires.html?search_query=climatisation&results=46

ν : Quantité de CO₂ équivalent émis pour un kWh d'énergie électrique consommée en kg_{eq}CO₂/kWh

Ce facteur d'émission est issu de références bibliographiques. On sait qu'en France, un kWh électrique produit émet environ 0,1 kg CO₂_{eq}⁵⁶.

PAdo : Puissance surfacique du climatiseur au domicile en kW/m²

La variable *PAdo* représente la puissance par unité de surface du climatiseur. D'après l'ADEME, en moyenne, cette puissance s'élève à 100W/m²⁵⁷.

Stdo : Surface pièce de travail au domicile en m²

La variable *Stdo* représente la surface de la pièce de télétravail. Cette pièce n'est pas nécessairement une pièce spécialement dédiée au travail. Les télétravailleurs peuvent également travailler dans leur salon par exemple. En 2017, comme l'indique l'INSEE la surface moyenne de logement est de 90m²⁵⁸. Nous avons considéré arbitrairement que 33% de cette superficie étaient dédiés à la pièce de travail, soit 30m².

BEdo : Bilan GES éclairage au domicile en kgCO₂_{eq}/j

Afin de déterminer le bilan GES de l'éclairage, la consommation énergétique nécessaire au domicile *Edo* est multipliée par le facteur d'émission de l'électricité ν .

$$BEdo = Edo \times \nu$$

Edo : Consommation électrique de l'éclairage au domicile en kWh/j

La variable *Edo* représente la consommation électrique de l'éclairage d'un télétravailleur sur la journée. Celle-ci est exprimée en kWh/j.

En considérant un éclairage avec les caractéristiques suivants :

- L'éclairement lumineux règlementaire pour un bureau E_v [lux]
- Le Flux lumineux Φ [Lumen]

⁵⁶ Page web GreenIT, Emission d'1kWh d'énergie, 2009, <https://www.greenit.fr/2009/04/24/combien-de-co2-degage-un-1-kwh-electrique/>

⁵⁷ Page web ADEME, Caractéristiques de la climatisation, 2021, <https://agirpourlatransition.ademe.fr/particuliers/maison/travaux/climatisation-comment-bien-choisir#:~:text=Pour%20la%20r%C3%A9glementation%2C%20ce%20n,par%20deux%20la%20consommation%20%C3%A9lectrique.>

⁵⁸ INSEE, Surface moyenne d'un logement en France, 2017, https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/2586024/LOGFRA17k2_F6.2.pdf

- La Puissance P_l d'une lampe [W],
- La surface à éclairer $Stdo$ [m²]

et que $1 \text{ lux} = 1 \frac{\text{lumen}}{\text{m}^2}$, le nombre de lampe nécessaire est $\left\lceil \frac{E_v * St}{\Phi} \right\rceil$. Pour obtenir la consommation électrique sur la journée, il faut multiplier par la puissance des lampes utilisées P_l et de la durée d'utilisation Nh_i .

On retient ici l'hypothèse que le bureau est éclairé artificiellement en permanence (journée d'hiver), la durée d'utilisation est donc la durée de travail Nh_i .

$$E = \left\lceil \frac{E_v * Stdo}{\Phi} \right\rceil * P_l * Nh_i$$

Pour simplifier le modèle, nous regroupons les caractéristiques de l'éclairage dans la variable composite **Udo** :

Udo : Caractéristiques de l'éclairage bureau au domicile (variable composite)⁵⁹

Variable	Valeur
Eclairement lumineux réglementaire bureau minimisé E_v [lx]	200
Flux lumineux Φ [Lumen]	240
Puissance P_l [W]	3

$$\text{Ainsi, } Edo = \left\lceil \frac{Udo(1,1) * Stdo}{Udo(2,1)} \right\rceil * Udo(3,1) * Nh_i(1,1)$$

4) Emissions de GES dues à la consommation énergétique à l'entreprise

Cette partie du modèle s'intéresse à la consommation énergétique au lieu de travail en présentiel du travailleur. Dans notre modèle, nous considérons que ce lieu est un bureau individuel situé à l'entreprise. Cette consommation est évaluée aussi bien lors de journées en télétravail que de journées en présentiel.

Bent_i : Bilan GES du poste de l'énergie à l'entreprise par type de travail i en kgCO₂éq/j

Parmi les émissions de GES à l'entreprise, on calcule les émissions de GES liées au chauffage. Les sources d'énergie considérées dans le modèle pour le chauffage sont le gaz, l'électricité, le fuel, le bois les Pompes à chaleur (PAC) et le réseau de chaleur urbain.

En plus du chauffage $BentC_i$, nous intégrons les autres postes qui utilisent l'électricité, c'est-à-dire la climatisation et l'éclairage ($BentA_i$) ainsi que la consommation des outils numériques $BentN_i$ ⁶⁰.

⁵⁹ Page web Keria, Calcul de la quantité d'éclairage dans une pièce, <https://www.keria.com/guides/comment-calculer-la-quantite-declairage-necessaire-dans-une-piece/>
<https://www.lampesdirect.fr/philips-ledtube-t8-master-em-mains-high-output-8w-840-blanc-froid-60cm-equivalent-18w-8718696697498>

⁶⁰ ADEME, « Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail ».

Le bilan GES à l'entreprise du travailleur est donc la somme des émissions liées aux outils numériques, au chauffage et aux autres postes nécessitant de l'électricité.

$$Bent_i(1,1) = BentC_i(1,1) + BentA_i(1,1) + BentN_i(1,1) ;$$

Lors d'une journée de télétravail, nous estimons que le chauffage à l'entreprise est tout de même en fonctionnement mais avec une température de consigne éventuellement abaissée.

$$Bent_i(2,1) = BentC_i(2,1)$$

$BentN_i$: Bilan GES du poste de l'énergie à l'entreprise du poste du numérique par type de travail i en kWh/j

Le bilan GES du poste du numérique indique les émissions de CO₂eq liées à l'utilisation des outils numériques. Au lieu de travail en présentiel, on observe ces émissions de CO₂eq seulement lors des heures de travail. Nous faisons ici l'hypothèse que la pratique du télétravail s'étant démocratisée, le recours à la visioconférence, même depuis le lieu de travail en présentiel pour échanger avec des collaborateurs à distance, est possible. Elles sont déterminées en multipliant le nombre d'heures d'utilisation $dnent_o$ par le facteur d'émissions v_o , définie dans la partie précédente, page 31.

$$BentN_i = sum(dnent_o \otimes v_o)$$

$dnent_o$: Durée d'utilisation par type d'outil numérique o par jour en h

Selon les profils des travailleurs, la durée d'utilisation des outils numériques varie. Nous retenons dans un premier temps des valeurs arbitraires mais celles-ci peuvent évoluer selon les travailleurs.

Durée d'utilisation journalière des outils numériques k [h]	Visio (vidéo + audio)	Visio (audio)
Télétravail	0.5	0

$BentC_i$: Bilan GES du chauffage à l'entreprise selon le type de travail i en kWh/j

Le bilan GES du chauffage à l'entreprise est la somme des bilans GES des différents types de chauffage précédemment évoqués.

$$BentC_i(1,1) = \text{sum}(BentC_{i_k}(1,:));$$

$$BentC_i(2,1) = \text{sum}(BentC_{i_k}(2,:));$$

$BentC_{i_k}$: Bilan GES du chauffage à l'entreprise selon le type de chauffage k et le type de travail i en kWh/j

Le bilan GES du chauffage diffère selon le type de chauffage et donc de la source d'énergie qui lui est associée. Par exemple, les émissions de CO2_{eq} pour apporter 1kWh d'énergie seront plus importantes pour un chauffage au gaz qu'un chauffage fonctionnant à l'électricité. Les émissions de CO2_{eq} associées à chaque type de chauffage sont alors le produit de leur consommation respective $Cent$ par le facteur d'émissions v_k , défini dans la partie précédente, page 32.

$$BentC_{i_k} = Cent \otimes v_k$$

$Cent_{i_k}$: Consommation du chauffage à l'entreprise par type de travail i et de chauffage k en kWh/j

Afin de prendre en considération les différents types de chauffage utilisés en France et les variations sur les émissions de CO2_{eq} qui en découlent, nous avons multiplié la consommation individuelle d'énergie à l'entreprise du travailleur $Cent_i$ par les parts d'utilisation moyenne des différents chauffages en France dans le secteur tertiaire $Pcent_k$.

$$Cent_{i_k}(1,:) = Cent_i(1,1) \otimes Pcent_k(1,:);$$

$$Cent_{i_k}(2,:) = Cent_i(2,1) \otimes Pcent_k(2,:);$$

$Pcent_k$: Part d'utilisation des différents types de chauffage (sans unité)

La part d'utilisation des différents types de chauffage indique le pourcentage d'utilisation d'un chauffage, en moyenne, pour le secteur tertiaire en France⁶¹. Il est important de l'intégrer au modèle car l'objectif est d'obtenir des résultats qui reflètent les émissions de CO2_{eq} d'un individu représentatif de l'ensemble de la population française.

$Pcent_k$ Part d'utilisation chauffage	Gaz	Electricité	fioul	bois	Chauffage urbain	PAC
Télétravail	0,547	0,16	0,173	0	0,081	0,068
Présentiel	0,547	0,16	0,173	0	0,081	0,068

⁶¹ Données consommation énergétique par usage du tertiaire, ministère du développement durable, décembre 2021, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/consommation-denergie-par-usage-du-tertiaire>

$Cent_i$: Consommation du chauffage à l'entreprise par type de travail i en kWh/j

Afin de déterminer la quantité de chaleur appelée par les différents types de chauffage au cours de la journée, nous multiplions la puissance surfacique nécessaire à chauffer un mètre carré $Pscent$ par la superficie du bureau, $Sbent$ et le nombre d'heures Nh_i où le chauffage est en marche, variable définie dans la partie précédente, page 34.

Sachant qu'un chauffage allumé n'appelle pas en permanence de l'énergie, nous avons considéré arbitrairement que sur les 7 heures de travail quotidien où le chauffage est allumé, il appelle de l'énergie pendant 2,8h (soit 40% de la durée totale). Dans le cas d'une journée en télétravail, la programmation ou non chauffage à l'entreprise, $Progent$, rentre également en compte.

Pour un travailleur classique, on considère qu'il n'y a pas de programmation de son chauffage puisqu'il est présent à l'entreprise. La puissance $Pscent$ du chauffage est donc maximale : $Pscent(i, 1) = Pscent(1,1) = 100W/m^2$

On a alors : $Cent_i(1,1) = 0.4 * Nh_i(1,1) * Pscent(1,1) * Sbent$;

L'entreprise d'un télétravailleur peut soit programmer le chauffage en cas d'absence de son employé (en situation de télétravail notamment), soit ne pas le programmer.

$$Cent_i(2,1) = 0.4 * Nh_i(2,1) * Pscent(Progent, 1) * Sbent ;$$

En cas de programmation, la puissance $Pscent$ du chauffage est minimale. $Progent$ prend alors la valeur 2 et on a : $Pscent(Progent, 1) = Pscent(2,1) = 60W/m^2$

En revanche, s'il n'a pas programmé son chauffage, la puissance $Pscent$ du chauffage est maximale. $Progent$ prend alors la valeur 1 et on a : $Pscent(Progent, 1) = Pscent(1,1) = 100W/m^2$

$Progent$: Programmation du chauffage à l'entreprise (sans unité)

Nous considérons que le chauffage peut délivrer deux puissances différentes selon la température demandée. Si un individu appelle une température de « confort » (car il est en télétravail ou il n'a pas programmé son chauffage : $Progent = 1$ lors de son absence), alors la puissance sera maximale. En revanche, la puissance du chauffage sera minimale si l'individu télétravaille et le chauffage est programmé à son bureau en entreprise pour diminuer la température lors de son absence (mode « économique » : $Progent = 2$).

$Pscent$: Puissance surfacique du chauffage à l'entreprise en kW/m²

On considère un seul type de chauffage capable de délivrer deux puissances surfaciques différentes. La première pour une température de « confort » (lorsque l'utilisateur est présent ou qu'il ne

programme pas son chauffage), la seconde pour un « mode économique » (lorsque l'utilisateur est absent de son bureau individuel en entreprise)⁶².

	Puissance surfacique du chauffage [kW/m²]
Mode confort	0.100
Mode économique	0.060

Pour le mode économique, nous considérons une température de chauffage de 15°C, soit une puissance de 0.060kW/m².

S_{bent} : Surface du bureau individuel en entreprise en m²

La consommation de chauffage dépend naturellement de la surface à chauffer. La valeur retenue pour la surface d'un bureau traditionnel fermé est celle utilisée par l'ADEME⁶³, c'est-à-dire 22m². Il s'agit de la surface individuelle allouée par employé.

BentA_i : Bilan GES du poste de l'énergie à l'entreprise, autres que le chauffage et le numérique (climatisation et éclairage) pour chaque type de travail *i* en kgCO₂éq

La variable *BdoA_i* correspond à la somme des bilans GES de la climatisation, *BAent* et de l'éclairage, *BEent*. Lorsque le travailleur est absent de son bureau, aucune émissions de GES n'est observée pour la climatisation et l'éclairage. Les émissions de GES liées à ces postes sont donc seulement celles d'une journée de présentiel.

$$BentA_i = BAent + BEent$$

BAent : Bilan GES de la climatisation à l'entreprise en kgCO₂éq/j

Afin de déterminer le bilan GES de la climatisation, la consommation énergétique nécessaire est multipliée par le facteur d'émission de l'électricité en quantité de CO₂éq, *ν*, défini dans la partie précédente, page 36.

$$BAent = Aent * \nu$$

⁶² ⁶² ENGIE, Calcul de la puissance d'un radiateur, <https://particuliers.engie.fr/depannages-services/conseils-equipements-chauffage/conseils-radiateurs/quelle-puissance-radiateur-par-m2.html>

⁶³ ADEME, « Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail ».

A_{ent} : Consommation électrique de la climatisation à l'entreprise en kWh/j

La variable *A_{ent}* représente la consommation électrique de la climatisation sur une journée. Celle-ci est exprimée en kWh/j.

Concrètement, il s'agit de la puissance surfacique du climatiseur *PA_{ent}* multipliée par la surface de la pièce de travail *S_{bent}*. Ce produit est multiplié par le nombre d'heure travaillées en télétravail *Nh_i(1)*. D'après l'ADEME⁶⁴, 64% des entreprises en France sont dotées de climatiseurs pour leurs employés. Pour que les résultats de notre modèle soient représentatifs de l'ensemble des salariés français, nous retenons 64% de la consommation énergétique calculée.

Sachant qu'un climatiseur allumé n'appelle pas en permanence de l'énergie, nous avons considéré arbitrairement que sur les 7 heures de travail quotidien où la climatisation est allumée, celle-ci appelle de l'énergie pendant 2,8h (soit 40% de la durée totale).
Finalement,

$$A_{ent} = 0.64 * 0.4 * Nh_i(1) * PA_{ent} * S_{bent}$$

Bien entendu, lorsque la consommation énergétique du chauffage est non nulle, nous attribuons une valeur nulle à la consommation de la climatisation et vice-versa selon la saison (hiver, été, etc.) à laquelle on se place.

PA_{ent} : Puissance surfacique du climatiseur à l'entreprise en kW/m²

La variable *PA_{ent}* représente la puissance par unité de surface du climatiseur. D'après l'ADEME⁶⁵, en moyenne, cette puissance s'élève à 100W/m².

BE_{ent} : Bilan GES éclairage à l'entreprise en kgCO₂éq/j

Afin de déterminer le bilan GES de l'éclairage, la consommation énergétique nécessaire est multipliée par le facteur d'émission de l'électricité en quantité de CO₂éq.

$$BE_{ent} = E_{ent} * \nu$$

⁶⁴ La climatisation de confort dans les bâtiments résidentiels et tertiaires en Indre-et-Loire, ADEME, 2020, https://bibliothèque.ademe.fr/air-et-bruit/4745-la-climatisation-de-confort-dans-les-batiments-residentiels-et-tertiaires.html?search_query=climatisation&results=46

⁶⁵ ADEME, page web caractéristiques de la climatisation, <https://agirpourtatransition.ademe.fr/particuliers/maison/travaux/climatisation-comment-bien-choisir#:~:text=Pour%20la%20r%C3%A9glementation%2C%20ce%20n,par%20deux%20la%20consommation%20%C3%A9lectrique.>

Eent : Consommation électrique de l'éclairage à l'entreprise en kWh/j

La variable *Eent* représente la consommation électrique de l'éclairage d'un travailleur en présentiel sur la journée. Celle-ci est exprimée en kWh/j.

En considérant un éclairage avec les caractéristiques suivants :

- L'éclairement lumineux règlementaire pour un bureau E_v [lux]
- Le Flux lumineux Φ [Lumen]
- La Puissance P_l d'une lampe [W],
- La surface à éclairer S_{bent} [m²]

et que $1 \text{ lux} = 1 \frac{\text{lumen}}{\text{m}^2}$, le nombre de lampe nécessaire est $\left\lceil \frac{E_v * S_{bent}}{\Phi} \right\rceil$. Pour obtenir la consommation électrique sur la journée, il faut multiplier par la puissance des lampes utilisées P_l et de la durée d'utilisation Nh_i .

On fait ici l'hypothèse que le bureau est éclairé artificiellement en permanence (journée d'hiver), la durée d'utilisation est donc la durée de travail Nh_i .

$$E = \left\lceil \frac{E_v * S_{bent}}{\Phi} \right\rceil * P_l * Nh_i$$

Pour simplifier le modèle, nous regroupons les caractéristiques de l'éclairage dans la variable composite ***Uent*** :

Uent : Caractéristiques de l'éclairage bureau à l'entreprise (variable composite)⁶⁶

Variable	Valeur
Eclairement lumineux règlementaire bureau minimisé E_v [lx]	200
Flux lumineux Φ [Lumen]	240
Puissance P_l [W]	3

$$\text{Ainsi, } E_{do} = \left\lceil \frac{Udo(1,1) * S_{bent}}{Udo(2,1)} \right\rceil * Udo(3,1) * Nh_i(1,1)$$

⁶⁶ Page web Keria, Calcul de la quantité d'éclairage dans une pièce, <https://www.keria.com/guides/comment-calculer-la-quantite-declairage-necessaire-dans-une-piece/>

E. Résultats de l'étude

1) Bilan de GES d'un individu type

Le premier résultat de notre modélisation porte sur la différence de bilan de gaz à effet de serre entre une journée de travail en présentiel et une journée de télétravail. Cette modélisation se veut générale dans le sens où les données utilisées sont issues de statistiques moyennes à l'échelle de la France ou de la région Centre-Val-de-Loire. A ce titre, les valeurs absolues du bilan de GES trouvé ne constituent pas un aperçu de ce qu'un français pourrait émettre. Il s'agit d'une agrégation de comportements permettant de visualiser la différence en termes d'émissions de GES entre deux situations (présentiel/distanciel). Les valeurs des variables exogènes sont celles présentées dans les tableaux de la partie précédente. Concernant la distance domicile-travail, il s'agit également de la distance moyenne domicile-travail en Indre et Loire (enquête EMC²), soit 20,8km selon le motif combiné. Pour ce premier résultat, nous nous positionnons en situation hivernale. Le chauffage est donc responsable d'une partie des émissions de CO₂ observées et la climatisation n'est pas prise en compte.

Dans ces conditions, les bilans de GES pour une journée de travail en présentiel et en télétravail ne présentent pas une grande différence. Le passage au télétravail induit une diminution de 9% des émissions de CO₂ équivalent par rapport à une journée classique de présentiel, soit 800g de CO₂eq économisés. (figure 4)

Cette valeur peut, à première vue, sembler très faible puisque les déplacements domicile-travail sont responsables à eux seuls de 4% des émissions de GES en France⁶⁷. En supprimant ces déplacements avec la mise en place du télétravail, il serait logique de trouver une grande quantité de CO₂ évitée. L'ADEME⁶⁸ estime en effet à 1,18kg la quantité de CO₂ équivalent économisée quotidiennement par la suppression des déplacements domicile-travail. Pour comprendre la faible quantité de CO₂ économisé qui résulte de la modélisation, il est nécessaire de s'intéresser plus en détails au bilan GES de chacun des postes d'émission.

Premièrement, concernant le poste des déplacements, qui est le poste d'émission majoritaire lors d'une journée de présentiel (50% du bilan), plusieurs enseignements sont à tirer. Il est possible de noter que, les déplacements domicile-travail sont responsables de plus de la moitié (62%, 2,7kg eqCO₂) des émissions de GES du poste des déplacements lors d'une journée de présentiel. (figure 5)

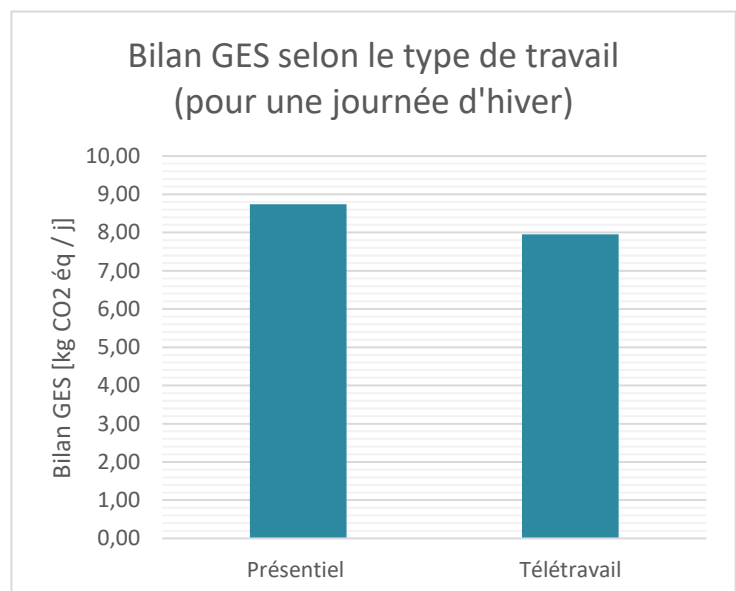


Figure 4: Bilan GES selon le type de travail (hiver)

⁶⁷ Les émissions de co2 liées aux déplacements domicile-travail, INSEE, 2011 <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1285962>

⁶⁸ ADEME, « Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail ».

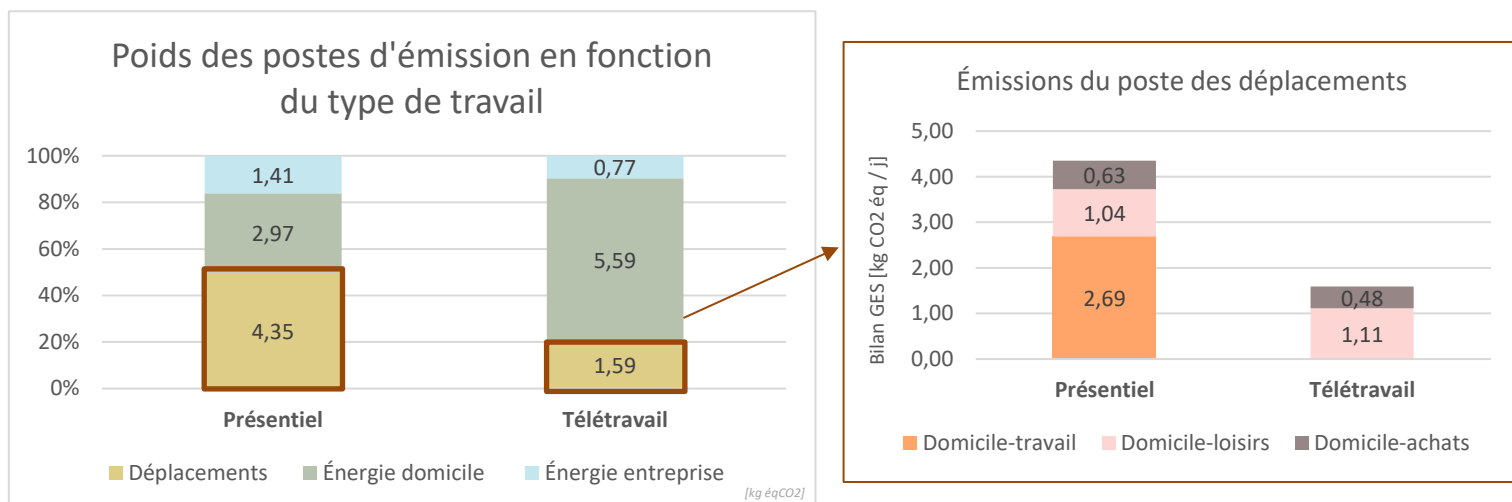


Figure 5: Poids des postes d'émission en fonction du type de travail et focus sur les émissions des déplacements

Les déplacements ayant pour motif les loisirs et les achats sont également responsables d'une part non négligeable de GES en représentant respectivement 12% et 7% du bilan total d'une journée en présentiel.

Pour une journée de télétravail, il est possible de noter que les émissions imputées aux motifs loisirs augmentent puisque, selon l'ADEME, le télétravail augmente de 7% la distance parcourue pour pratiquer des loisirs⁶⁹. Cette observation est conforme à la règle de Zahavi selon laquelle, le temps économisé dans les transports (ici suppression des déplacements domicile-travail) est réinvesti dans d'autres trajets (pour des motifs de loisirs par exemple). D'un point de vue des émissions de GES, 74g de CO₂ sont émis en plus chaque jour avec le télétravail pour le motif de loisirs, soit une augmentation de 7,2% par rapport à une situation en présentiel.

Dans le même temps, la distance domicile-achat diminue avec la mise en place du télétravail. Il est intéressant de noter que cette diminution de 22% des kilomètres parcourus engendre une baisse des émissions de CO₂ de près de 25% pour ce motif. Cette différence s'explique par le report modal. En effet, la distance parcourue pour réaliser des achats étant plus faible, l'usage des mobilités décarbonées est plus importante et contribue de ce fait à la baisse du bilan GES d'une journée en télétravail.

Finalement, le distanciel permet de réduire drastiquement les émissions de CO₂. Les 2,76 kg CO₂ économisés sont en adéquation avec les chiffres exposés dans la littérature⁷⁰. La réduction globale des émissions de GES de seulement 800g pour le passage en télétravail présenté en première partie (page 44) témoigne donc de l'existence d'effets rebonds dans les autres postes d'émissions lors du recours au télétravail.

⁶⁹ 6t bureau de recherche pour l'Ademe, « Télétravail, (im)mobilité et modes de vie. Étude du télétravail et des modes de vie à l'occasion de la crise sanitaire de 2020 ».

⁷⁰ ADEME, « Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail ».

Le graphe de la figure 6 semble mettre en évidence que les effets rebonds se situent dans le poste de la consommation au domicile puisque ses émissions représentent 70% du bilan GES global en télétravail (5,6kg éqCO₂).

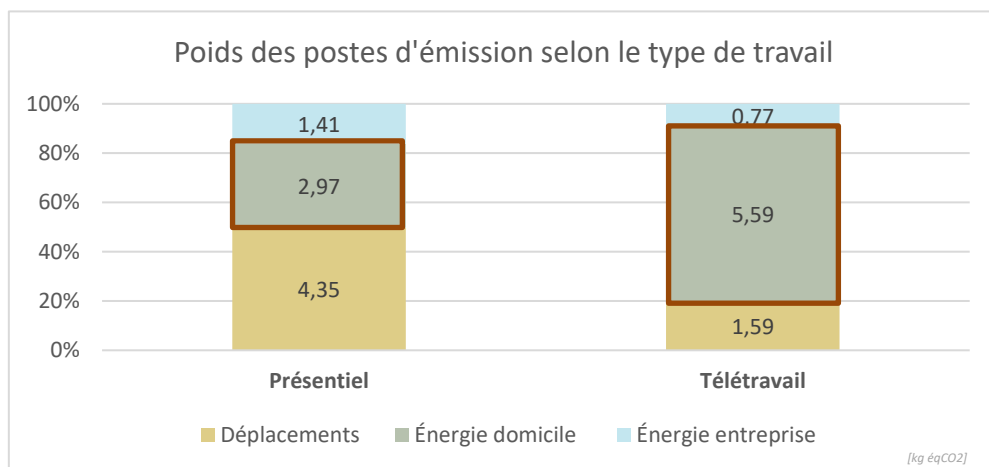


Figure 6: Poids des postes d'émission selon le type de travail

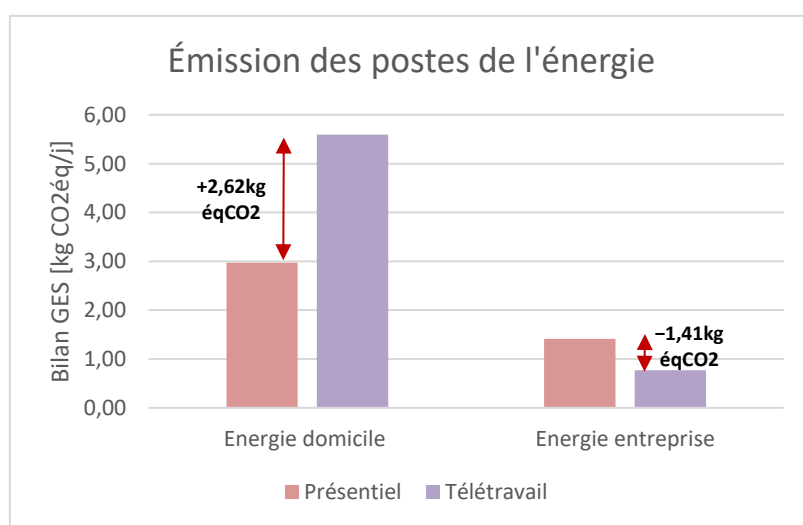


Figure 7: Émission des postes de l'énergie

Plus précisément, passer du travail en présentiel au télétravail, induit une augmentation de 88% de l'émission de GES au domicile (+2,62 kg éqCO₂) tandis que les émissions à l'entreprise ne baissent que de 46% (-1,41 kg éqCO₂). Le poste de l'énergie au domicile semble donc bien être l'origine de la très faible baisse du bilan GES total lors du passage en télétravail. (figure 7)

En s'intéressant en détails à ce poste, nous observons que deux facteurs sont responsables de ces émissions. Le chauffage, avec 4,96kg éqCO₂ par jour de télétravail est l'émetteur de GES majoritaire, suivi de la consommation numérique. Comme expliqué dans la littérature, le bilan GES des outils numériques constitue un effet rebond non négligeable puisqu'avec 0,6 kg CO₂ équivalent par jour de télétravail, il contribue à hauteur de 8% au bilan total de GES. (figure 8)

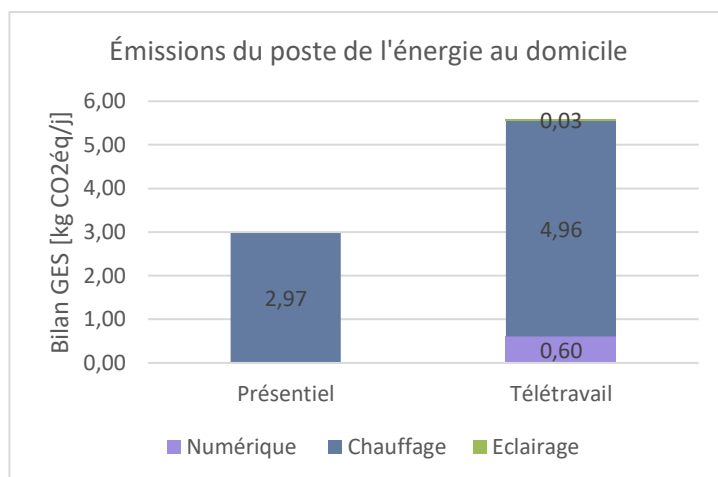


Figure 8: Émissions du poste de l'énergie au domicile

Finalement, la faible baisse des émissions de GES en passant du présentiel au distanciel s'explique par des effets rebonds parmi lesquels figurent le chauffage au domicile et l'utilisation plus soutenue d'outils numériques. Ce constat est donc à nuancer avec la saisonnalité puisqu'une grande partie de

l'année, le chauffage n'est pas utilisé. Il s'avère donc intéressant de regarder dans quelle mesure ces effets rebonds sont importants dans le bilan GES selon les périodes de l'année.

2) Influence de la période de l'année sur le bilan GES

Nous nous positionnons ici sur une journée de travail en été. L'objectif est d'étudier l'impact du télétravail sur les émissions de GES en comparaison avec une période hivernale. Ainsi, nous pourrions déterminer si les effets rebonds observés en hiver exercent la même influence en été.

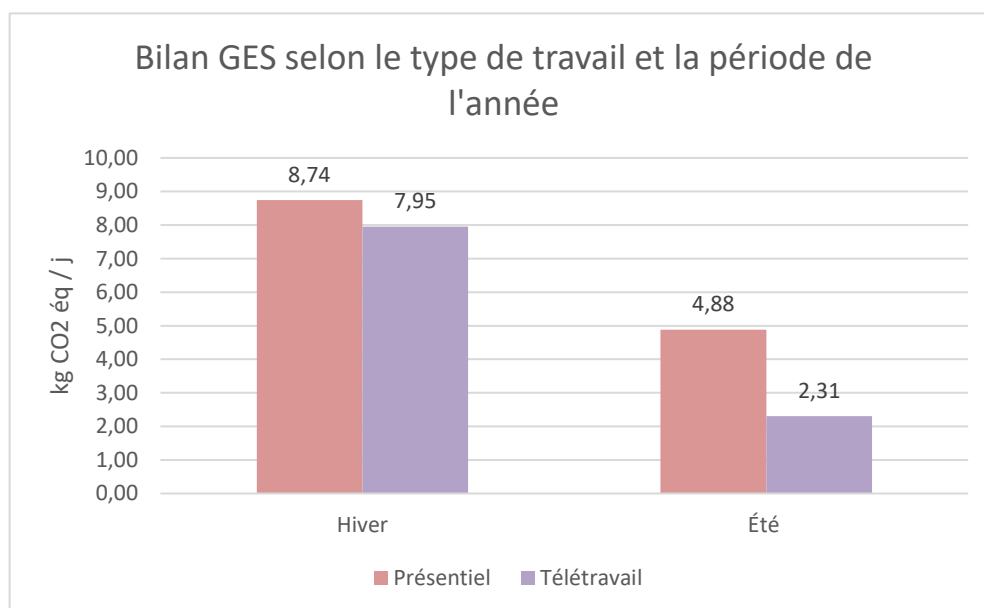


Figure 9: Bilan GES selon le type de travail et la période de l'année

Comme observé dans la partie précédente, la mise en place du télétravail en hiver permet une chute de seulement 9% des émissions de GES, soit 800 gCO₂eq. (figure 9)

Nous observons sur le graphique ci-dessus que les émissions de GES en été chutent de 55% d'une journée de télétravail à une journée classique en présentiel. Cela représente un total de 2,8kg de CO₂eq. (figure 9) Par rapport à une journée d'hiver, le télétravail en été permet donc d'éviter 2kg de plus d'émissions. D'un point de vue environnemental, la mise en œuvre du télétravail apparaît donc nettement plus pertinente en été plutôt qu'en hiver.

Nous avons vu précédemment que la mise en place du télétravail générerait principalement des émissions de GES supplémentaires pour le poste de l'énergie au domicile. Nous allons donc nous concentrer sur ce poste dans le point suivant afin de savoir quel poids occupe ce poste dans les effets rebonds en été.

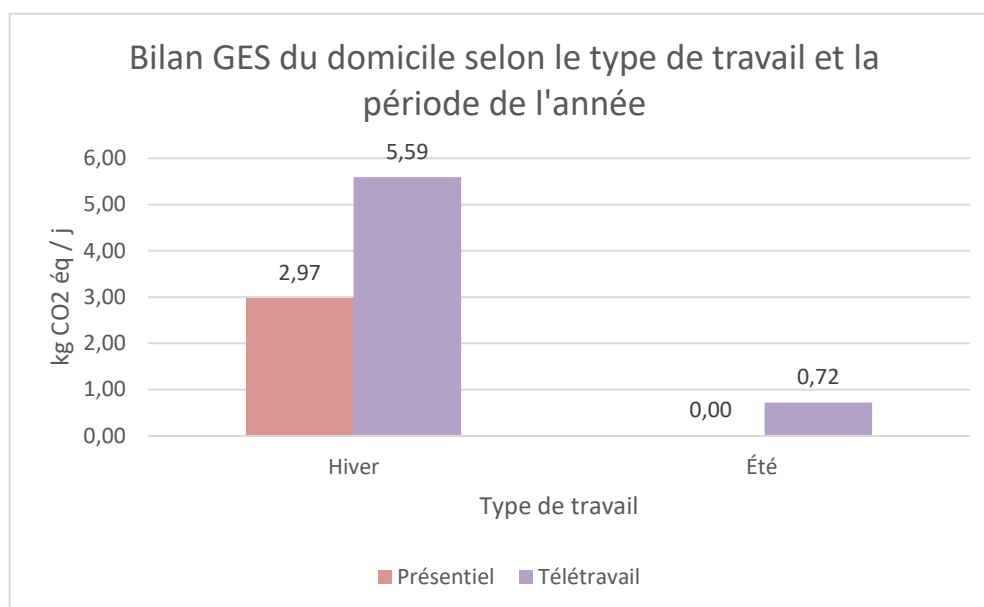


Figure 10: Bilan GES du domicile selon le type de travail et la période de l'année

Le graphique ci-dessus révèle que le passage au télétravail en hiver engendre une véritable explosion des émissions de GES. Elles augmentent de 88%, soit une quantité de 2,62 kgCO₂éq rejetées en plus dans l'atmosphère par rapport au travail en présentiel. (figure 10) En été, le télétravail engendre l'émission de seulement 720g de CO₂éq supplémentaires au domicile par rapport au présentiel. L'effet rebond de la consommation énergétique au domicile du travailleur est donc nettement plus faible en été qu'en hiver.

L'analyse détaillée des consommations énergétiques au domicile révèlent que l'éclairage et l'utilisation d'outils numériques n'est pas plus émettrice de CO₂éq en été qu'en hiver. En revanche les émissions liées à la climatisation en été (80g CO₂éq) sont nettement inférieures à celles du chauffage en hiver (4,96kg CO₂éq). Ceci s'explique par le taux d'équipement en climatiseurs qui est très faible en France. Seulement 6% des actifs d'Indre-et-Loire en possèdent à leur domicile. Le modèle calcule le bilan GES d'un individu qui est représentatif de la population française active. Il est donc cohérent que les émissions liées à la climatisation soient très faibles pour cet « individu moyen » en comparaison à celles liées au chauffage. Soulignons tout de même que le taux d'équipement de climatiseurs en France est en constante augmentation⁷¹. Il serait alors intéressant de prendre en considération l'évolution de ce facteur afin d'estimer dans quelle mesure la climatisation des logements est susceptible d'impacter, à terme, le bilan GES du télétravail en été.

L'étude des postes des déplacements et de la consommation énergétique en entreprise montrent que l'impact environnemental des déplacements en été est équivalent à celui en hiver. Le télétravail permet d'économiser l'émission de 2,76kg éqCO₂ pour ce secteur (figure 11). Néanmoins, la période estivale est susceptible de modifier le comportement des individus. Les journées plus longues sont en effet propices à l'augmentation du nombre de déplacements. Ce paramètre n'est pas modélisé dans la présente étude.

⁷¹ Climatisation dans les bâtiments résidentiels et tertiaires, ADEME, 2020 https://librairie.ademe.fr/air-et-bruit/4745-la-climatisation-de-confort-dans-les-batiments-residentiels-et-tertiaires.html?search_query=climatisation&results=46

Concernant la consommation d'énergie en entreprise, 650g de CO2 éq (figure 11) sont évitées par le télétravail en hiver contre 530g en été (moins 120g de différence). Les déplacements et l'énergie au domicile n'expliquent donc pas les différences saisonnières.

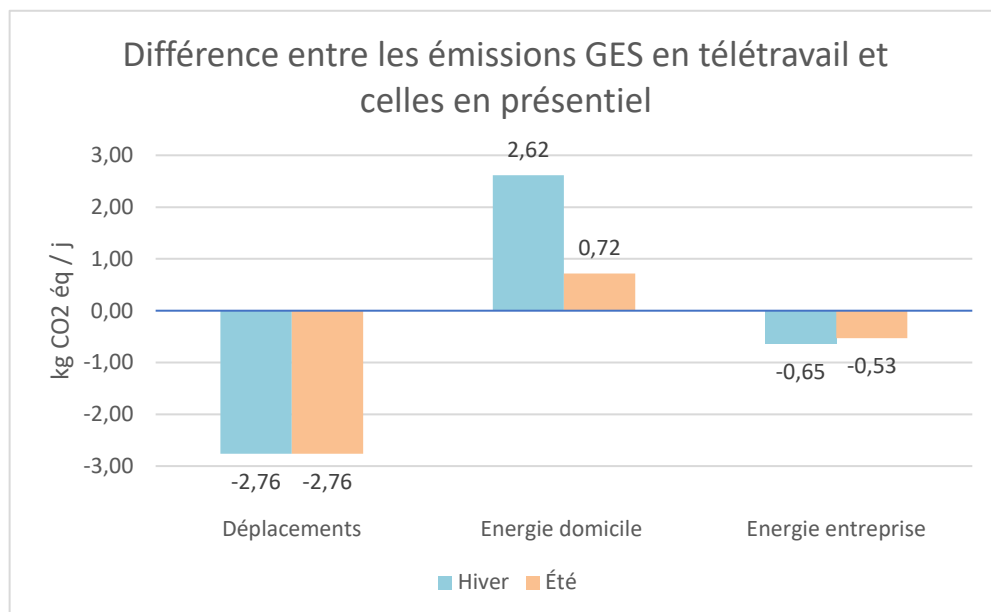


Figure 11: Différence entre les émissions GES en télétravail et celles en présentiel

En résumé, la différence d'émissions de GES entre la saison hivernale et la saison estivale s'explique uniquement par le poste de l'énergie au domicile où le chauffage constitue un effet rebond majeur.

3) Bilan de GES selon la distance domicile-travail

Cette partie caractérise l'influence que la distance domicile-travail exerce dans les bénéfices environnementaux du télétravail. Il est important de souligner en premier lieu que nous faisons varier seulement la distance domicile-travail. Les autres variables, telles que la surface du domicile ou la consommation du numérique, conservent des valeurs fixes.

La variation de la distance domicile-travail met en exergue un effet de seuil (figure 12). Pour une distance domicile-travail inférieure à 17km, la pratique du télétravail émet davantage de gaz à effet de serre que le travail en présentiel. En revanche, au-delà de 17km, le télétravail engendre moins d'émissions GES en comparaison au présentiel. Il devient alors plus intéressant d'un point de vue de la réduction des émissions de GES de pratiquer le télétravail. Notons que ce premier résultat s'inscrit en période hivernale (consommation de chauffage) et avec une part modale des différents moyens de transport fixe. Celle-ci correspond à la moyenne nationale pour les déplacements domicile-travail.⁷²

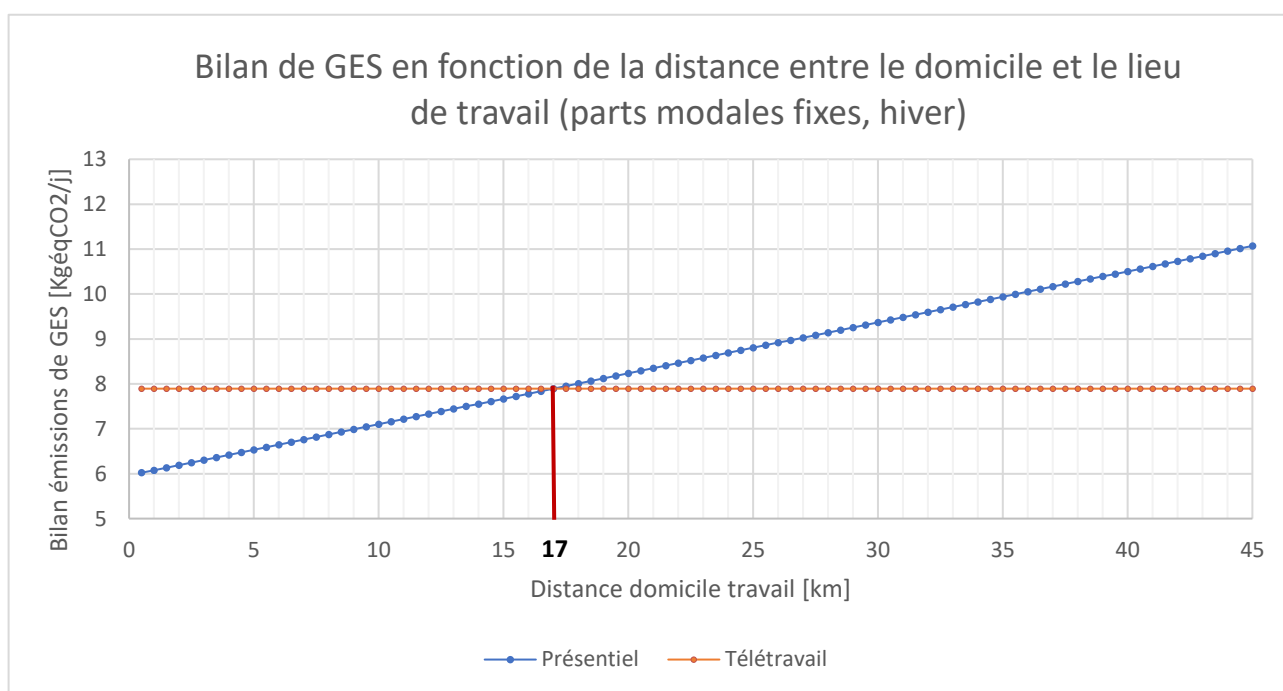


Figure 12: Bilan GES en fonction de la distance entre le domicile et le lieu de travail

En affinant le modèle, nous avons considéré que les parts modales des différents moyens de transport étaient relatives à la distance parcourue. En effet, d'après l'Enquête Mobilités Certifiée CEREMA (EMC²) Touraine de 2019, plus la distance domicile-travail est faible, plus le recours aux mobilités actives, et donc décarbonées, est importante. Entre 0 et 1 kilomètre de distance domicile-travail, par exemple, la part de la marche à pied est de 50 à 70%. (figure 13) L'usage du vélo occupe quant à lui une part d'environ 10% pour les trajets compris entre 1 et 5km. Les transports collectifs urbains représentent eux aussi une part modale de 10% environ mais pour des distances plus longues, entre 2 et 10 kilomètres. La voiture reste largement majoritaire pour des distances supérieures à 2 kilomètres. Il est possible de noter que sa part avoisine les 95% pour des distances de 10 à 25 kilomètres. De plus, à partir de 25km de distance, sa part fléchit car les transports interurbains et interrégionaux notamment sont utilisés à hauteur de 12%.

⁷² EMC² Touraine 2019

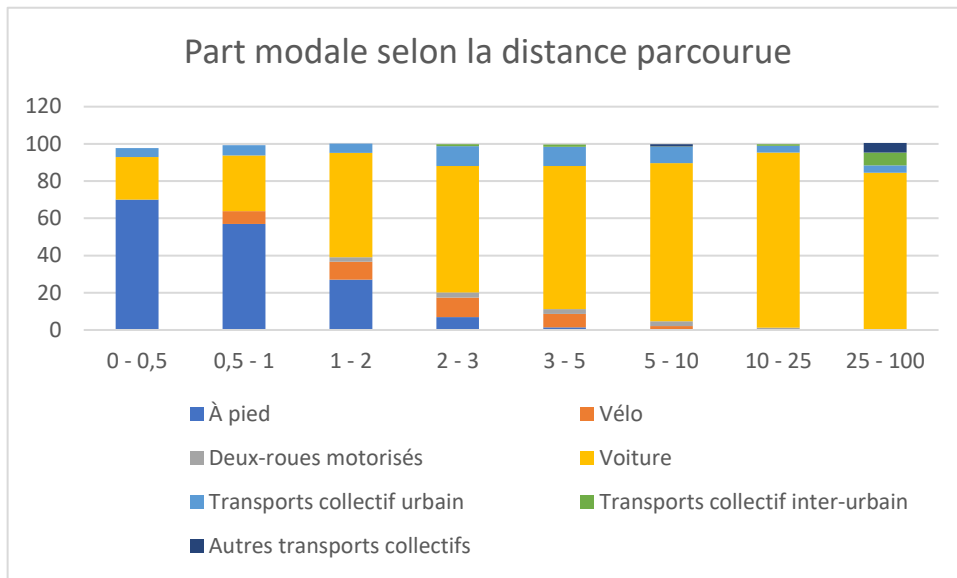


Figure 13: Histogramme empilé représentant la part modale selon la distance parcourue (source données: EMC² Touraine)

Cette corrélation entre distance parcourue et part modale des moyens de transport impacte alors le bilan GES du travail. L'effet de seuil est alors légèrement décalé. En effet, la distance domicile-travail à partir de laquelle il est plus intéressant de télétravailler est de 15km. (figure 14) Cette baisse s'explique par la part modale de la voiture plus importante (aux alentours de 90% pour une distance supérieure à 10km alors qu'elle est fixée à 78% quelle que soit la distance dans le précédent résultat). Il devient alors plus rapidement intéressant de télétravailler.

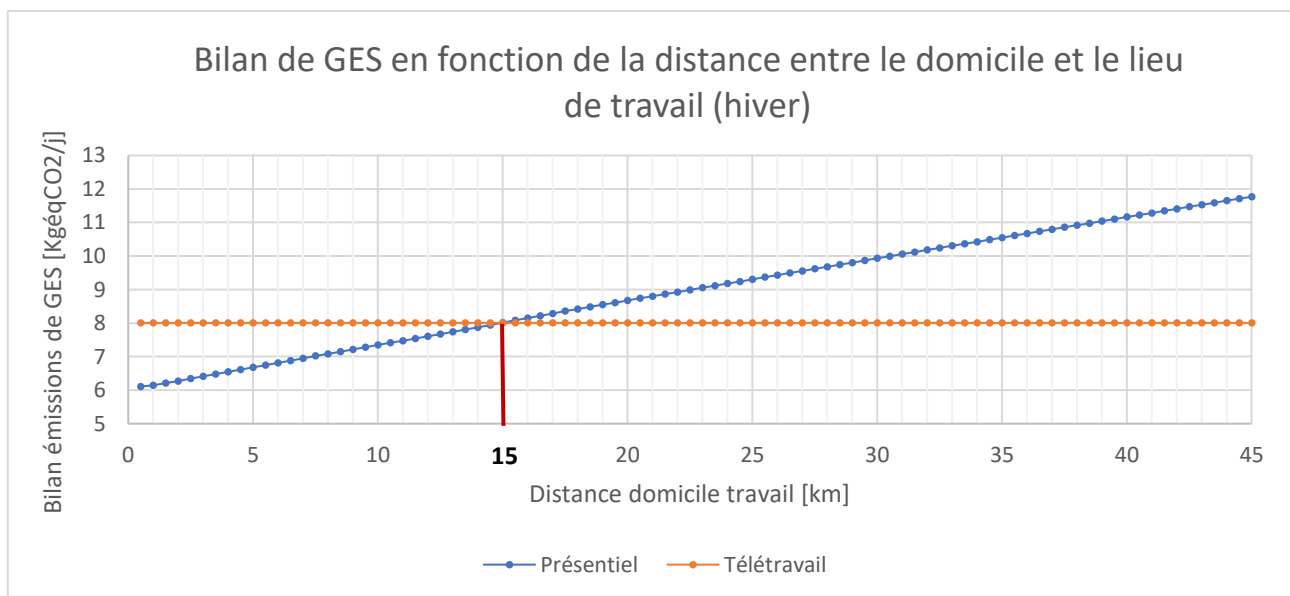


Figure 14: Bilan GES en fonction de la distance entre le domicile et le lieu de travail

Cette distance domicile-travail de 15 kilomètres correspond à un aller-retour. La distance séparant le domicile et le lieu de travail est donc d'environ 7,5km. D'un point de vue géographique, il s'agit de la frontière entre une ville moyenne et les communes de sa première couronne.

Selon l'INSEE, en 2013, la moitié des actifs parcourent moins de 15km pour le motif domicile-travail en région Centre-Val-de-Loire⁷³. La distance seuil de 15km modélisée précédemment concerne alors un grand nombre d'actifs.

Par exemple, pour la ville de Tours, l'INSEE indique que 40 000 actifs travaillent dans le tertiaire. Parmi ces derniers, 25 000 individus résident et travaillent à la fois au sein de la ville de Tours. De plus, on estime que 6 000 Tourangeaux travaillent dans l'une des 10 communes frontalières, situées à moins de 7,5km de Tours. Au total, ce sont donc 31 000 personnes pour lesquelles le télétravail ne constitue pas une solution à la réduction des émissions de GES.

A l'inverse, 9000 Tourangeaux travaillent dans des communes situées au-delà de 7,5km de Tours. En considérant que la possibilité de télétravailler dans le secteur tertiaire est de 30%⁷⁴, le télétravail constitue une opportunité de réduction des émissions GES pour seulement 2700 d'entre eux (soit 7% des actifs tertiaires de Tours).

La généralisation du télétravail dans l'optique de baisser les émissions de GES est donc à nuancer, et ce, particulièrement en hiver lorsque les effets rebonds sont importants. Cette distance seuil démontre donc que l'éloignement du lieu de travail est un élément important dans la balance environnementale du télétravail. On observe aujourd'hui, une volonté des Français de déménager pour trouver un lieu de vie plus calme et éloigné des nuisances de la ville⁷⁵. En outre, le télétravail encourage ce changement de vie. Dans ce contexte et au vu des résultats exposés précédemment dans notre modélisation, il semble opportun d'affirmer que le télétravail constitue un levier pour réduire les émissions de CO₂. En effet, les lieux recherchés par ces nouveaux résidents se situent souvent au-delà de la première couronne urbaine et donc du seuil à partir duquel le télétravail permet de réduire le bilan GES d'un travailleur.

Néanmoins, le télétravail sur une semaine complète étant peu répandu, il serait pertinent de prendre en compte à quelle fréquence le travailleur se rend à son bureau. En effet, la distance domicile-travail étant plus élevée dans le cas d'une relocalisation du domicile, le bilan GES de ces journées pourrait contrebalancer les bénéfices des jours télétravaillés.

Ce lien entre la distance domicile-travail et pertinence du télétravail dépend également de la saisonnalité. La distance domicile-travail à partir de laquelle il est préférable de télétravailler pour limiter ses émissions de GES en été est de seulement 1km. Cette faible distance s'explique par le taux d'équipement en climatisation dans la région Centre-Val-de-Loire qui n'est pour le moment que de 6,6% au domicile contre 64% en entreprise. L'effet rebond que constitue le chauffage en hiver est absent en période estivale.

Enfin, concernant une journée « d'automne » ou de « printemps », lorsque ni le chauffage, ni la climatisation ne sont en fonctionnement, la distance domicile-travail à partir de laquelle il est intéressant de télétravailler est de 4km. Cette distance seuil plus importante qu'en été s'explique par l'utilisation des outils numériques beaucoup plus soutenus en télétravail qu'en présentiel.

Finalement, la généralisation du télétravail afin de baisser les émissions de GES est à prendre avec précaution. Bien que dans un certain nombre de cas les bénéfices environnementaux puissent être

⁷³ Statistiques Centre-Val-de-Loire, INSEE, <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2019783>

⁷⁴ {Citation}

⁷⁵ Cooptalis, étude sur la demande de télétravail longue distance, <https://www.cooptalis.com/groupe-cooptalis/etude-teletravail-longue-distance>

intéressants il est important de souligner que l'impact de la distance domicile-travail sur ces bénéfices est importante et qu'il convient de ce fait, de regarder à l'échelle individuelle, suivant les caractéristiques de différents travailleurs, la pertinence d'une telle mesure.

Conclusion

Le télétravail peut être considéré comme un outil pour réduire les émissions de CO₂. Le secteur qui permet la réduction la plus visible de l'empreinte carbone du télétravail est celui des déplacements. Plus précisément, la baisse des déplacements domicile-travail permet d'éviter le rejet de 218kgCO₂éq dans l'atmosphère chaque année d'après l'ADEME. En outre, cette déclinaison du travail à distance joue également un rôle important au sein des entreprises. En effet, le télétravail encourage la réorganisation des espaces de travail de bureaux individuels fermés à des espaces de travail collectifs, tels que le flex-office. Ce phénomène a pour conséquence une réduction des consommations énergétiques et donc des émissions de GES associées.

Néanmoins, la littérature précise d'autres changements, imputés au télétravail, qui nuancent ses bénéfices environnementaux. Ces impacts, qualifiés d'effets rebonds, se traduisent par exemple par une augmentation conséquente de la consommation énergétique au domicile du télétravailleur. De même, la nécessité de s'équiper d'un matériel numérique pour télétravailler n'est pas sans impact pour le bilan GES d'un télétravailleur. Enfin, une modification des habitudes de déplacements est constatée avec la mise en place du télétravail. Alors que l'on observe normalement des trajets en chaîne lors d'une exécution classique du travail, lorsque celui-ci se déroule à distance, le nombre de déplacements augmente résultant de trajets en étoile.

Ces effets rebonds une fois précisés, le bénéfice environnemental du télétravail n'apparaît donc pas comme une évidence. La modélisation permet de quantifier ces effets et de les intégrer au bilan GES du télétravail afin d'affirmer ou non, son intérêt environnemental. D'après cette modélisation, on peut affirmer qu'en moyenne en France, le télétravail permet la réduction des émissions de GES. Néanmoins, ce constat n'est pas aussi flagrant en période hivernale qu'en été. En effet, alors qu'une journée de télétravail permet d'éviter le rejet de 2,6kgéqCO₂ en été, ce chiffre chute à 0,8kgCO₂éq en hiver. Ainsi, la modélisation a révélé le poids qu'occupent certains effets rebonds dans le bilan GES du télétravail. En hiver, les émissions liées au chauffage augmentent de 88% après la mise en place du télétravail. Ce poste représente alors l'effet rebond majeur dans le bilan GES du télétravail. En été, à cause du faible taux d'équipement de la population française en climatiseurs, l'effet rebond de la climatisation n'a pas aujourd'hui un impact fort sur le bilan GES du télétravail. (+80gCO₂éq). L'augmentation de la distance parcourue en télétravail pour exercer des activités de loisirs n'impacte pas non plus significativement l'empreinte carbone en comparaison au chauffage. On observe seulement le rejet de 70gCO₂éq supplémentaires.

Comme toute modélisation, celle exposée dans ce rapport ne présente pas une vision parfaite de la réalité. Soulignons par exemple que les valeurs choisies pour les variables exogènes du modèle sont celles observées en moyenne en France (distance domicile-travail, surface domicile, ...). Les résultats exprimés sont donc représentatifs d'un ensemble d'individus, celui formé par les Français, mais ne sont pas valables pour un individu en particulier. Ce modèle considère le Scope 1 et 2 du bilan

carbone. Une modélisation plus fine pourrait être développée en incluant le cycle de vie des produits (Scope 3) dans le bilan GES.

En outre, nous nous sommes concentrés sur les émissions de GES d'une seule journée de télétravail ou de présentiel. La modélisation ne prend donc pas en compte l'influence du nombre de jours télétravaillés dans une semaine. En effet, selon ce nombre, les comportements des individus diffèrent et influencent donc le bilan GES.

Malgré les limites inhérentes à la modélisation, ce travail permet de tirer des enseignements vis-à-vis de l'aménagement du territoire. En effet, certaines variables constituent des leviers pour la réduction des émissions de GES. L'étude de la distance domicile-travail révèle qu'en moyenne, le travail présente des bénéfices environnementaux seulement à partir de 15 km parcourus quotidiennement en hiver. Ainsi, le télétravail ne constitue pas un outil à la réduction des émissions de GES pour les habitants résidant et travaillant dans la première couronne d'une ville moyenne. Ceci s'explique bien sûr par une proximité entre lieu d'emploi et de résidence mais également par le recours privilégié aux mobilités douces pour de faibles distances de déplacement.

Bibliographie

- 6t bureau de recherche pour l'Ademe. (2020). Télétravail, (im)mobilité et modes de vie. Étude du télétravail et des modes de vie à l'occasion de la crise sanitaire de 2020 (p. 92).
<https://www.ademe.fr/teletravail-immobilite-modes-vie>
- ADEME. (2020). Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail (p. 46).
Greenworking et ADEME. <https://www.ademe.fr/caracterisation-effets-rebond-induits-teletravail>
- ADEME. (2021a). Eco-responsable au bureau. 19.
- ADEME. (2021b). La face cachée du numérique. 13.
- Carbone Conseil. (2021). Bilan Carbone de l'Université de Tours sur l'année 2019.
- CTI (Commission des Titres d'Ingénieur). (2020). Note sur l'enseignement numérique distanciel (p. 6). https://www.cti-commission.fr/wp-content/uploads/2020/02/CTI_Colloque_2020_2_Note_Enseignement_distanciel_202001.pdf
- DATAR. (1998). Télétravail, téléactivités : Outils de valorisation des territoires. DOCUMENTATION FRANCAISE. PARIS. <https://side.developpement-durable.gouv.fr/NVAQ/doc/SYRACUSE/32315/teletravail-teleactivites-outils-de-valorisation-des-territoires>
- Ferreboeuf, H. (2018). LEAN ICT pour une sobriété numérique.
<https://theshiftproject.org/article/pour-une-sobriete-numerique-rapport-shift/>
- Ferreboeuf, H., Efoui-Hess, M., Marraud, L., & Lescop, C. (2020). Déployer la sobriété numérique. Shift Project. https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2020/10/Deployer-la-sobriete-numerique_Rapport-complet_ShiftProject.pdf
- Giraud, G., Guitto, P., Romero, M., Roy, D., & Viéville, T. (2020). Éducation et numérique, défis et enjeux. <https://www.inria.fr/sites/default/files/2020-12/Livre%20Blanc%20Inria%20%C3%A9ducation%20et%20num%C3%A9rique.pdf>
- Obringer, R., Rachunok, B., Maia-Silva, D., Arbabzadeh, M., Nateghi, R., & Madani, K. (2021). The overlooked environmental footprint of increasing Internet use. *Resources, Conservation and Recycling*, 167, 105389. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105389>
- Jancovici, J.-M. (s. d.). Qu'est-ce que le bilan carbone ? Consulté 11 avril 2021, à l'adresse <https://jancovici.com/changement-climatique/les-ges-et-nous/bilan-carbone/>
- Nilles, J. M. (1974). Development of Policy on the Telecommunications-Transportation Tradeoff.
- O'Brien, W., & Yazdani Aliabadi, F. (2020). Does telecommuting save energy? A critical review of quantitative studies and their research methods. *Energy and Buildings*, 225. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110298>

Pallez, F., Le Breton, M., & Gourdon, T. (2017). L'élaboration d'une politique publique environnementale, le Bilan Carbone®. Annales des Mines - Gérer et comprendre, N° 129(3), 13. <https://doi.org/10.3917/geco1.129.0013>

Tinetti, B., de Veron, S., Duvernois, P.-A., Brun, O., Roucher, C., Olagne, R., & Chamignon, D. (2015). Evaluation de l'impact du télétravail & des tiers-lieux sur la réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre et sur l'organisation des entreprises (p. 207). ADEME. <https://www.ademe.fr/evaluation-limpact-teletravail-tiers-lieux-reduction-consommations-denergie-emissions-gaz-a-effet-serre-lorganisation>

Tissandier, P., & Mariani-Rousset, S. (2019). Les bénéfices du télétravail : Mobilité modérée : réduction du stress et des émissions de gaz à effets de serre. Revue francophone sur la santé et les territoires, 17.

Le modèle a été réalisé en partie avec la suite logiciel Toaster Intégral©

Directeur de recherche :

Hervé BAPTISTE

Arthur GAILLARD, Julien VANTOUROUX

PFE/DAE5

UIT/RESEAU

2021-2022

Le télétravail, outil réellement efficace pour réduire les émissions de gaz à effet de serre ? : Modélisation des effets rebonds du télétravail sur l'émission de gaz à effet de serre dans le secteur tertiaire

Résumé :

Dans un contexte de crise sanitaire qui a conduit à une démocratisation du télétravail, ce projet de fin d'études interroge l'impact environnemental de cette nouvelle pratique.

Le projet s'attache d'abord à effectuer un état des lieux des postes d'émissions de GES liés à la mise en place du télétravail. D'un côté, il est clairement visible que le télétravail permet la réduction d'émissions de GES grâce à la suppression des trajets domicile-travail ou à la réorganisation de l'espace dans les entreprises. Néanmoins, cette alternative au travail en présentiel est également responsable d'émissions de GES qui contrebalancent son bilan environnemental. Nous pouvons citer par exemple la consommation énergétique au domicile du télétravailleur ou encore la modification des habitudes de déplacement avec une augmentation des distances parcourues pour exercer des loisirs.

La deuxième partie de notre projet se concentre donc à intégrer ces effets dits « rebonds » dans le bilan des émissions GES d'un travailleur afin de les quantifier. A travers un modèle, la comparaison des émissions GES entre un jour de télétravail et un jour en présentiel est réalisée. Les résultats permettent ainsi d'estimer, d'après un contexte précis (surface de domicile, distance trajet domicile-travail, ...), quelle forme de travail est la plus judicieuse du point de vue de la réduction de l'empreinte carbone.

Au vu des résultats exposés, le poids des différentes sources d'émissions dans le bilan GES est alors déterminé. La modélisation permet également de quantifier l'impact des effets rebonds dans ce bilan.

Enfin, des variables leviers pour l'aménagement du territoire sont identifiées afin d'étudier ensuite leur rôle dans le bilan GES du télétravail.

Mots Clés : bilan de gaz à effet de serre, télétravail, déplacements domicile-travail, effets rebonds