

École polytechnique de Louvain

Analyse de l'impact de la mise en place du Télé-Travail sur le bilan carbone de l'UCLouvain

Auteur: **Grégoire HAVENNE**
Promoteur: **Hervé JEANMART**
Lecteurs: **Patricia Luis ALCONERO, Didier SMITH**
Année académique 2019–2020
Master [120] : ingénieur civil mécanicien

Remerciements

Ce travail de fin d'étude est l'aboutissement des nombreuses années d'apprentissage au sein de l'Ecole Polytechnique de Louvain-la-Neuve et n'aurait pu voir le jour sans les acquis apportés par celles-ci.

Un premier remerciement revient naturellement à mon promoteur, le Prof. Hervé Jeanmart, dont l'attrait en vers les problèmes environnementaux ouvrent la porte à des sujets de mémoire porteurs de sens.

Je remercie également les lecteurs, Madame Patricia Luis Alconero et Monsieur Didier Smits, pour avoir eu la curiosité de se pencher sur ce travail. Je remercie tout particulièrement Messieurs Didier Smits et Xavier Marichal pour leur partage de connaissances et de données nécessaires à ce travail.

Je remercie les différentes revues scientifiques donnant libre accès à d'innombrables articles rendant l'accès à l'information documentée aisée et universelle.

Et pour finir, je tiens à remercier mes proches pour m'avoir permis d'évoluer dans un environnement sain et constructif durant la réalisation de ce mémoire ainsi que dans ma vie jusqu'à ce jour.

Ce travail n'aurait pas été réalisé sans vous.

Abstract

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique et de dégradation de l'environnement suite à l'activité humaine, l'Université Catholique de Louvain souhaite s'engager dans une politique environnementale plus responsable et durable. Afin de déterminer le cadre d'exécution de cet engagement, un bilan carbone a été effectué durant l'année 2018-2019 sur base des données relatives à l'année précédente, permettant de discerner les postes émetteurs de gaz à effet de serre et l'ampleur de ceux-ci. Les résultats montrent que les émissions proviennent principalement du déplacement des étudiants et du personnel, ainsi que de la consommation d'énergie des bâtiments.

Suite à ce constat, différents plans d'actions peuvent être imaginés afin de réduire ces émissions. Un plan d'action en particulier soulève l'attention de ce travail : la mise en place du télétravail.

Solution à première vue miraculeuse permettant de réduire à la fois le nombre de trajets effectués par semaine, ainsi que l'énergie dépensée dans les bâtiments de l'université, la mise en place de celle-ci n'est pas aisée et nécessite l'analyse au préalable des différentes contraintes à maîtriser afin d'assurer l'effet escompté. Le télétravail est considéré dans ce travail comme un outil. L'objectif est donc de déterminer comment utiliser cet outil afin de réduire effectivement les émissions de gaz à effet de serre liées à l'activité humaine sur le site de Louvain-la-Neuve de l'Université Catholique de Louvain.

Les effets de la mise en place du télétravail sont estimés et les contraintes devant être maîtrisées pour l'efficacité de celle-ci sont identifiées et analysées. A partir de cela, une réflexion sur une méthodologie de mise en place d'un programme de télétravail sera proposée.

Abréviations

VMT - Vehicle miles traveled : Distance parcourue par un véhicule (exprimée en miles)

GES - Gaz à effet de serre

TW - Telework : télétravail

NTW - Non Telework : Absence de télétravail

EI_{TW} - Impact environnemental du télétravail

EI_{NTW} - Impact environnemental sans télétravail

EI_{TR} - Contribution du transport à l'impact environnemental

EI_{EE} - Contribution de l'utilisation d'équipements électroniques à l' impact environnemental

EI_{OS} - Impact environnemental lié à l'espace de travail en entreprise

EI_{HS} - Impact environnemental lié à l'espace de travail au domicile

NEI_{TW} - Impact environnemental net lié au télétravail

ppm - page par minute

cpm - copies par minute

n.a - non applicable

CO_{2e} - Dioxyde de carbone équivalent

kWh - énergie consommée par un appareil électrique d'une puissance de 1 kilowatt fonctionnant pendant

Table des matières

Remerciements	ii
Abstract	iii
Abréviations	v
Table des matières	vi
Liste des Figures	ix
Introduction	1
1 Etat de l’art	6
1.1 CO _{2e} (1)	6
1.2 Degré-Jour	7
1.3 Etudes portées sur l’impact du Télétravail	8
1.3.1 <i>Energy-related emissions from Telework</i> , E. Kitou and A. Horvath (2)	8
1.3.2 <i>The impact of telecommuting on personal vehicle usage and envi- ronmental sustainability</i> , P. Zhu and S. Mason (3)	9
1.3.3 Approche privilégiée	9
1.4 Complément d’étude	10

1.4.1	<i>Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail</i> , ADEME, 2020	10
2	Méthodologie	11
2.1	Explication du modèle de E.Kitou et A.Horvath	11
2.2	Application du modèle à un scénario de télétravail illustratif	14
2.2.1	Analyse d'un scénario déterministe illustratif de télétravail	15
2.2.2	Analyse d'un scénario probabiliste de télétravail	20
2.3	Amélioration du modèle	23
2.3.1	Quantification de l'impact environnemental des effets rebonds par l'ADEME	23
3	Application à l'Université Catholique de Louvain	27
3.1	Obtention de chaque composant du modèle	27
3.1.1	Composant 1 : Le Transport	29
3.1.2	Composant 2 : Espace à Domicile	31
3.1.3	Mix électrique de l'UCLouvain	35
3.1.4	Composant 3 : Espace à l'UCLouvain	37
3.1.5	Composant 4 : Equipement électronique	40
3.2	Effet d'un jour de télétravail par semaine	41
3.3	Impact sur le bilan carbone	46
3.3.1	Compatibilité de la méthode avec le bilan carbone réalisé	46
3.3.2	Sélection des secteurs impactés	46
3.4	Proposition de méthodologie de mise en place de programme de Télé-travail	49
	Conclusion	52
	A Données relatives aux scénarios déterministe et probabiliste	54

Table des matières	viii
---------------------------	------

B Enquête mobilité 2017	62
--------------------------------	-----------

Références	64
-------------------	-----------

Table des figures

1.1	Valeurs des PRG à 100 ans des GES du 5ème rapport du GIEC (4)	7
2.1	Modèle systémique du télé-travail (2)	12
2.2	Résultats du scénario déterministe en grammes par 7 jours (Semaine) (2) .	17
2.3	Résultats de la simulation Monte Carlo du scénario probabiliste (en grammes par 7 jours) (2)	22
2.4	Contributions des différents composants du modèle dans les émissions de CO_2 pour le scénario probabilistique (par 7 jours) (2)	22
2.5	Comparaison des mobilités sur une journée habituelle vs une journée de télétravail.(.)	25
2.6	Exemple d’impacts liés à différents types de relocalisation.(.)	26
3.1	Modèle systémique du télé-travail (2)	28
3.2	Moyen de déplacement en fonction de la distance du lieu de travail du personnel de l’UCLouvain LLN (1)	29
3.3	Emissions liées au chauffage du domicile pour une jour de télétravail en fonction du mois de l’année en 2018	33
3.4	35
3.5	37
3.6	Emissions gCO_2e liées au chauffage à l’UCLouvain pour une journée de travail pour un employé en fonction du mois de l’année en 2018	39

A.1	Paramètres de base à inclure dans le scénario déterministe et probabiliste (2)	55
A.2	Ensemble des émissions considérées par le modèle (2)	56
A.3	Données relatives au transport du scénario déterministe (2)	56
A.4	Données relatives aux équipements à l'entreprise du scénario déterministe (2)	57
A.5	Données relatives aux équipements à domicile du scénario déterministe (2)	58
A.6	Données relatives à la part d'énergie induite de l'utilisation d'équipements à domicile (2)	59
A.7	Données relatives à la climatisation à domicile et à l'entreprise pour le scénario déterministe (2)	60
A.8	Données relatives à l'éclairage à domicile pour le scénario déterministe (2)	61
A.9	Données relatives à l'éclairage à l'entreprise pour le scénario déterministe (2)	61
B.1	Moyen de déplacement en fonction de la distance du lieu de travail du personnel de l'UCLouvain LLN (1)	62
B.2	Moyen de déplacement en fonction de la distance du lieu de travail du personnel de l'UCL Woluwe (1)	63

Introduction

Introduction au concept de Télétravail

Le concept de télétravail a gagné énormément en attention durant la fin du 20ème siècle, ceci provenant de l'avènement des technologies avancées de communication. Le terme "télétravail" fut mentionné pour la première fois dans un article de l'Université de Caroline du Sud consacré à l'élaboration d'un projet visant à éliminer les heures de traffics denses (5).

La définition du télétravail a été sujette à de nombreuses évolutions depuis son introduction, il y a à présent 45 ans de ça. Une pléthore de définitions de ce concept existent et diffèrent principalement sur l'inclusion ou l'exclusion des caractéristiques suivantes (6) :

- Lieux de travail alternatifs.
- Suppression partielle ou totale des déplacements liés au travail.
- Intensité de l'activité de télétravail.
- Accès aux technologies de communication et accès à l'information.

Par exemple, si on cite, en traduisant de l'anglais au français, le père fondateur du concept de télétravail, J.Nilles, celui-ci ne serait que "le phénomène selon lequel les employés prennent accès à l'information présentes au lieu de travail en utilisant des technologies sans pour autant être physiquement présents" (7).

Il est donc important de remarquer que le télétravail n'implique pas forcément de travailler depuis chez soi. Il est envisageable qu'une entreprise mette en place un centre de télétravail

situé entre le lieu de résidence et le lieu de travail d'un individu. Il est donc impératif de comprendre quelle définition est utilisée lors de la lecture et l'analyse d'un article qui fait référence à ce concept.

Dans ce travail, il sera question de la définition suivante : "*Le télétravail est défini comme étant le fait de travailler depuis son lieu de résidence, en lieu et place du lieu de travail conventionnel.*" Aucun caractère temporel lié à la durée de ce travail effectué chez soi n'est inclu dans la définition. Il s'agit là d'un caractère d'utilisation du télétravail et sera discuté plus tard.

De nombreux articles révèlent les différents avantages du télétravail (8) (9) (10). Les employeurs y verraient comme bénéfiques une hausse de la productivité, un engagement accru des employés, une économie de coûts lié à l'espace de travail et des parkings, etc. Du côté des employés, une réduction du stress serait induite, leur coût moyen de déplacements journaliers serait réduit, une meilleure satisfaction serait atteinte et un équilibre de vie entre travail et vie personnel serait plus accessible de part cet accroissement de flexibilité horaire acquis. Différents avantages globaux seraient à noter, tels que l'amélioration de la qualité de l'air, la réductions des distances de trajets parcourues par semaine par les véhicules (VMT Vehicle miles traveled), etc. Cependant, des désavantages furent aussi pointés du doigt (11), relevant pour la plupart de la subjectivité de la réaction de chaque télétravailleur. Un sentiment de solitude et d'isolation hors de la culture de l'entreprise peuvent se produire et ne sont pas souhaitable. De plus, la nature intrinsèque de certains métiers n'est pas compatible avec le télétravail.

Contexte

Les changements climatiques et la dégradation de l'environnement provoqués par l'activité humaine, poussent les institutions politiques à fixer des objectifs de stabilisation des émissions de GES. Le Parlement wallon a adopté en 2012 le décret climat (12) imposant

aux institutions wallonnes une réduction des émissions de GES. L'Université Catholique de Louvain, souhaitant continuer son engagement dans une politique environnementale plus responsable et durable, a établi, durant l'année 2018-2019, un bilan carbone, afin de faire un état des lieux des émissions de GES de ses différents sites. Comme indiqués dans le tableau suivant, les résultats obtenus informent que les deux postes d'émissions les plus importants sont les transports (étudiants et employés) ainsi que l'énergie consommée sur les sites (consommation électrique et de gaz naturel).

Secteur	Émissions (tonnes CO ₂ e)	Proportion
Energie	23 680	34.6 %
Intrants	488	0.7%
Déchets directs	194	0.3%
Déplacements	37 235	54.4 %
Immobilisations	4 589	6.7 %
Data	2 291	3.3 %
Total	68 478	100 %

Résultats globaux de l'empreinte carbone de l'UCLouvain (ensemble des sites) (1)

Le bilan étant fait, il est temps d'établir différents scénarios d'amélioration de l'impact environnemental de l'Université. Vu les postes d'émission les plus importants, la mise en place d'un programme de télétravail semble judicieuse. Néanmoins, il est nécessaire d'analyser au préalable les effets de la mise en place de télétravail et de déterminer les différents paramètres à maîtriser afin d'assurer l'effet escompté. Le télétravail est donc vu comme un outil dont il faut déterminer l'utilisation optimale afin de réduire effectivement les émissions de gaz à effet de serre liées à l'activité des employés sur les sites de l'Université Catholique de Louvain.

Objectifs

Les objectifs de ce travail sont :

- **Estimer l'impact environnemental de la mise en place du télétravail au sein de l'UCLouvain** : l'objectif est de proposer des résultats chiffrés témoignant de la possibilité de réduire les émissions de GES des employés de l'Université. Une méthodologie sera donc déterminée, expliquée et suivie.
- **Déterminer et analyser les paramètres critiques influençant l'impact environnemental de la mise en place du télétravail** : les paramètres critiques dont les variations d'amplitudes auront le plus d'impact sur les émissions des employés, seront déterminés dans le but de comprendre les conditions de possibilités de la réduction des émissions de GES.
- **Proposer un plan d'action** : Un plan d'action cohérent avec les résultats obtenus et les analyses effectuées sera alors proposé.

Structure

Ce travail est structuré comme suit :

1. **Etat de l'art** : Ce chapitre voit en revue différents articles publiés traitant de la question de l'impact environnemental du télétravail.
2. **Méthodologie** : Le modèle utilisé et l'obtention des paramètres requis à son utilisation y seront expliqués. Les résultats d'un scénario de mise en place de télétravail aux Etats-Unis en 2002 utilisant ce modèle y seront illustrés. Le type de données nécessaires ainsi que leur traitement seront expliqués.
3. **Application à l'UCLouvain** : Le modèle sera appliqué au cas de l'UCLouvain. Les résultats obtenus seront analysés. L'impact sur le bilan carbone de l'université y sera détaillé.
4. **Proposition de plan de mise en place de télétravail** : La structure d'un plan

d'action compatible avec les résultats obtenus sera présentée.

5. **Améliorations** : Les restrictions du travail seront spécifiées et une amélioration de celui-ci sera proposée.
6. **Conclusion** : Les résultats importants seront repassés en revue, rappelant les analyses effectuées.

Chapitre 1

Etat de l'art

Dans ce chapitre sera présenté, dans un premier temps, l'unité utilisée afin de quantifier l'impact environnemental dans ce travail ainsi dans la méthodologie Bilan Carbone appliquée lors de l'élaboration du bilan carbone par C.Meyers durant l'année 2018-2019 (1). Ensuite, la notion de Degré-Jour sera définie ainsi que son utilité. Suivront le résumé qualitatif des méthodes et résultats de deux articles portant sur l'impact du télétravail. Le modèle développé dans le premier article va être retenu et utilisé dans ce travail contrairement aux résultats du second. Ce choix sera alors justifié. Pour finir, un dernier article permettant de compléter les informations du précédent sera résumé.

1.1 CO_{2e} (1)

Le CO₂ équivalent est une unité créée par le GIEC afin d'unifier et cumuler les impacts environnementaux des différents GES en une seule et même unité. Rendant l'accès aux analyses plus directe, cette unité permet alors de faciliter les actions de lutte contre les changements climatiques.

Pour ce faire, un potentiel de réchauffement global (PRG) est attribué à chaque GES dont le CO₂ sert d'étalon. Ce PRG est temporellement dépendant, un gaz voit son PRG évoluer au cours du temps. Il est donc nécessaire de spécifier pour quelle durée de temps

Nom du gaz	PRG à 100ans	
	4ème rapport du GIEC	5ème rapport du GIEC
CO ₂ f	1	1
CH ₄ f	25	30
CH ₄ b	25	28
N ₂ O	298	265
SF ₆	22800	26100

FIGURE 1.1: Valeurs des PRG à 100 ans des GES du 5ème rapport du GIEC (4)

sont spécifiés les PRG. Les valeurs affichées dans la Base Carbone® sont calculées avec les PRG à 100 ans du 5ème rapport du GIEC et sont spécifiées à la Figure 1.1.

1.2 Degré-Jour

Est reprise ci-dessous la définition de Degré-Jour disponible via l'outil internet *Énergie+* METTRE REFERENCE réalisé par l'unité de recherche Architecture et climat de l'Université catholique de Louvain avec le soutien de la Direction du Bâtiment durable de la Région Wallonne :

La notion de Degré-Jour a été introduite pour permettre la détermination de la quantité de chaleur consommée sur une période donnée et pour effectuer des comparaisons entre des bâtiments situés dans des zones climatiques différentes.

Le principe consiste à additionner, jour après jour, les écarts de température existant entre l'intérieur et l'extérieur.

En additionnant tous les écarts entre intérieur et extérieur sur tous les jours de la période de chauffe, on aura un nombre proportionnel au besoin de chaleur

du bâtiment : les Degrés-Jours du lieu.

Les degrés-jours s'obtiennent en retranchant $16,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (limite à partir de laquelle on commence à chauffer) de la température équivalente calculée. La température équivalente s'obtient en ajoutant 60 % de la température moyenne du jour J à 30 % de la température du jour J-1, auquel on ajoute encore 10 % de la température du jour J-2.

1.3 Etudes portées sur l'impact du Télétravail

1.3.1 *Energy-related emissions from Telework*, E. Kitou and A. Horvath (2)

Dans cet article (réalisé en 2003) est appliqué un modèle systémique à des scénarios de télétravail et d'absence de télétravail dans le but de quantifier les émissions de GES des trajets, du chauffage, du refroidissement, de l'éclairage et des équipements électroniques utilisés à la fois dans les entreprises et aux bureaux résidentiels des travailleurs. Basé sur des données provenant d'enquêtes du NHTS (National Household Travel Surveys) des Etats-Unis, un cas typique représentant l'activité hebdomadaire de télétravailleurs et de travailleurs sans télétravail est analysé ce qui dévoile que le télétravail a le potentiel de réduire les émissions de GES. Une simulation Monte Carlo fut effectuée sur différents paramètres influant sur l'impact du télétravail révélant les paramètres critiques influençant l'efficacité de la mise en place de celui-ci à réduire les émissions de GES.

1.3.2 *The impact of telecommuting on personal vehicle usage and environmental sustainability* , P. Zhu and S. Mason (3)

Dans cet article de 2012 est analysé si le télétravail réduit ou non la distance journalière parcourue en voiture (VMT) par les employés. L'étude se base sur des enquêtes de 2001 et 2009 provenant de NHTS (National Household Travel Surveys), portant sur les habitudes journalières de télétravailleurs ces années là. Leurs résultats indiquent que les télétravailleurs ont des trajets journaliers plus importants que les travailleurs sans télétravail. Cette augmentation de VMT s'accroît d'ailleurs entre 2001 et 2009.

1.3.3 Approche privilégiée

Ces deux articles adoptent des méthodes totalement différentes afin d'analyser la question de l'impact environnemental du télétravail. Là où P.Zhu et S.Mason analysent l'effet que le télétravail a eu ces dernières années sur les habitudes de conduites des travailleurs, E.Kitou et A.Horvath cherchent à modéliser l'impact environnemental du télétravail, indépendamment de l'utilisation qu'il y en a eu. E.Kitou et A.Horvath observent donc le télétravail comme un outil, possédant différentes caractéristiques, dont l'effet peut varier suivant l'utilisateur, alors que P.Zhu et S.Mason analysent l'utilisation de cet outil ces dernières années.

Le modèle défini par E. Kitou and A. Horvath sera retenu, expliqué et utilisé dans ce travail. Celui-ci permet de quantifier exhaustivement les émissions de GES liées aux activités hebdomadaires des employés en télétravail et hors-télétravail.

Les résultats alarmants obtenus par P. Zhu and S. Mason sont explicables à la lumière de ce que nous apprend la thèse de doctorat de 2015 de H. Asgari de l'Université Internationale de Floride (6). Celle-ci nous explique que l'attrait des employés envers le télétravail en journées partielles s'est accru au fil du temps. Ce type de télétravail ne réduit pas le VMT et voit même le VMT augmenter suite aux trajets induits par l'augmentation de

la flexibilité horaire des employés. C'est ce phénomène qui a été observé par P.Zhu et S.Mason. Ceci nous permet déjà de décider que le télétravail en journées partielles doit être exclu de la proposition de mise en place de programme de télétravail.

1.4 Complément d'étude

1.4.1 *Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail, ADEME, 2020*

Cette étude a consisté à identifier et caractériser les effets rebond induits par le télétravail, à sélectionner dans la littérature le modèle quantitatif le plus pertinent pour chacun d'entre eux et à en déduire la balance environnementale globale.

Les résultats obtenus permettent, dans le cadre de ce travail, de compléter le modèle développé par E.Kitou et A.Horvath en y incorporant la prise en compte des effets rebond observés.

Chapitre 2

Méthodologie

Dans ce chapitre sera présentée la méthodologie suivie dans ce travail. Dans un premier temps, le modèle développé par E. Kitou et A. Horvath permettant de quantifier l'impact environnemental du télétravail sera détaillé. Ensuite, les différents effets rebonds identifiés et caractérisés par l'ADEME seront présentés, permettant de compléter le modèle. Une sélection des effets rebonds pertinents à notre étude sera effectuée. Finalement, une liste exhaustive du type de données et de leur traitement nécessaire à notre étude sera détaillée, ciblant les éléments du modèle jugés pertinents dans le contexte d'une étude portée sur l'UCLouvain.

2.1 Explication du modèle de E.Kitou et A.Horvath

Ce modèle est illustré à la figure 2.1.

L'impact environnemental du télétravailleur (EI_{TW}) et du travailleur sans télétravail (EI_{NTW}) provient des mêmes composants :

- Le transport (EI_{TR})
- L'utilisation d'équipements électroniques (EI_{EE})
- Le chauffage, la climatisation des batiments/pièces et l'éclairage à l'entreprise (EI_{OS})

- Le chauffage, la climatisation des batiments/pièces et l'éclairage à la résidence du travailleur (EI_{HS})

$$EI_{TW} = EI_{TR} + EI_{EE} + EI_{OS} + EI_{HS}$$

$$EI_{NTW} = EI_{TR} + EI_{EE} + EI_{OS} + EI_{HS}$$

L'impact environnemental net associé au télétravail (NEI_{TW}) est donc défini comme ceci :

$$NEI_{TW} = EI_{TW} - EI_{NTW}$$

Les émissions prises en compte par le modèles sont répertoriées en Annexe A, Figure A.2. L'unité temporelle choisie pour l'analyse est d'une durée hebdomadaire (semaine de 7 jours).

Ce modèle peut être appliqué à un individu seul ou à un ensemble de participants à un programme de télétravail

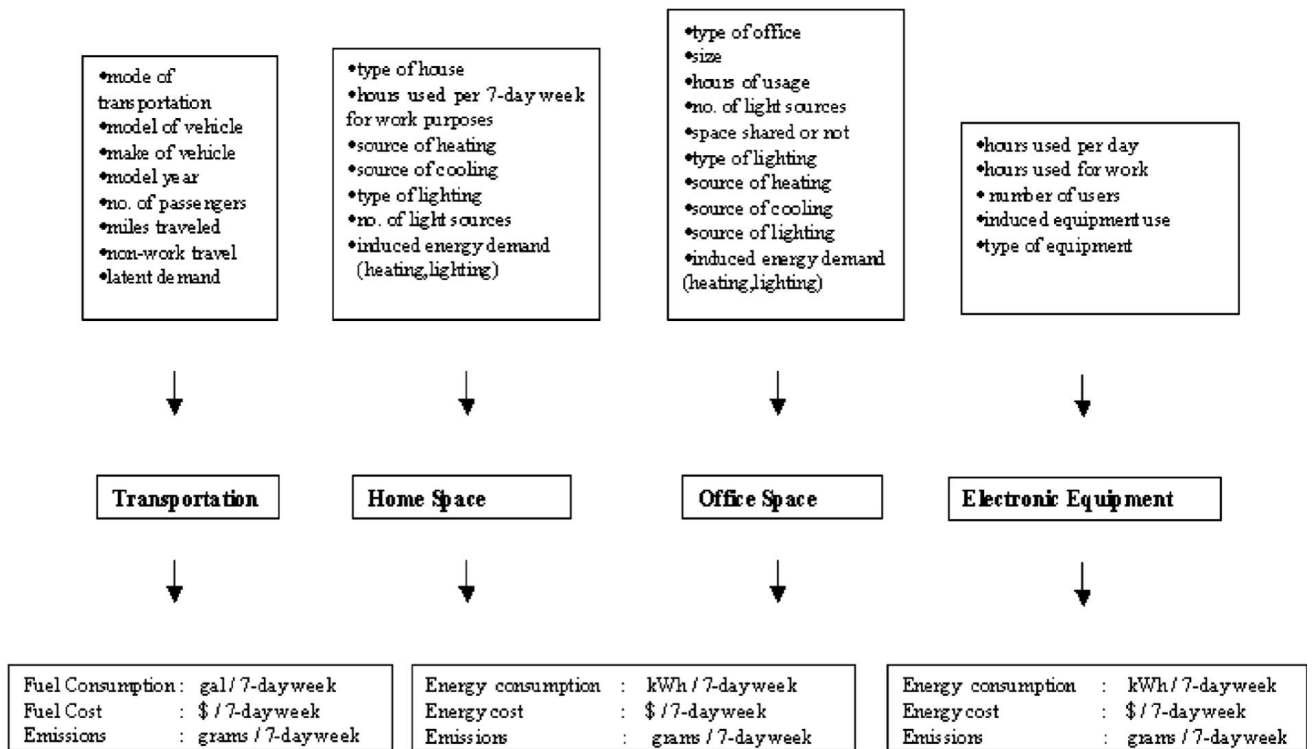


FIGURE 2.1: Modèle systémique du télé-travail (2)

Description de chaque composant :— *Transport :*

Afin de déterminer la consommation énergétique attribuée au transport du travailleur et du télétravailleur et d'en déduire les émissions de CO_2e , sont prise en compte : La longueur, le nombre de trajets journaliers et le mode de transport (véhicules à passagers, co-voiturages, bus urbains, trains, bateaux, avions, avec pour chaque type le modèle, l'année, les certificats d'émissions et le nombre de passagers).

— *Equipements à l'entreprise et résidentiel :*

Afin de déterminer la consommation énergétique attribuée aux équipements électriques utilisés au bureau résidentiel et à l'entreprise et d'en déduire les émissions de CO_2e , sont prise en compte :

Le type d'équipement (desktop, laptop, photo-copieuse, imprimante à encre, imprimante laser, téléphone sans fil, téléphone fixe), la puissance de fonctionnement de chaque équipement pour chacun de ses modes de fonctionnement (stand-by, éteint, utilisation active), le temps où l'équipement est allumé activement, est en stand-by, et éteint, par jour, ainsi que le nombre de personnes partageant l'utilisation de ces équipements dans l'entreprise.

— *Espace de travail à l'entreprise et résidentiel :*

D'anciennes recherches ont montré que l'utilisation d'énergie à domicile représente 11 à 25% des économies d'énergie obtenues dans le transport (13). Ces anciennes recherches prenaient en compte le fait que l'augmentation de consommation d'énergie à domicile est contrecarrée par la diminution d'énergie consommée sur le lieu de travail dans l'entreprise. Le modèle présenté ici se veut plus précis en analysant en parallèle le domicile et l'entreprise sans devoir poser l'hypothèse forte que la consommation engendrée à domicile est entièrement compensée par l'économie

de consommation sur le lieu de l'entreprise.

Afin de déterminer la consommation énergétique attribuée à l'occupation du bureau résidentiel et à l'entreprise et d'en déduire les émissions de CO_2e , sont prise en compte dans le modèle :

- - au domicile : le type de domicile, le nombre d'heures attribuées au travail, le type de sources lumineuses, le nombre de sources lumineuses artificielles, la puissance d'utilisation de ces sources, le type de source de conditionnement de l'air (chauffage et refroidissement de l'air) et la puissance d'utilisation de celle-ci.
- - à l'entreprise : le type de bureau (dimensions et occupation), le nombre d'heures d'occupation du bureau, le type de sources lumineuses, le nombre de sources lumineuses artificielles, la puissance d'utilisation de ces sources, le type de source de conditionnement de l'air (chauffage et refroidissement de l'air) et la puissance d'utilisation de celle-ci, le nombre d'heures d'occupation partagée du bureau.

Il est important de noter que les heures de travail à domicile en télétravail sont celles passées à travailler à domicile auxquelles on réduit le nombre d'heures que l'employé passe habituellement déjà à travailler chez lui hors période de télétravail (on fait l'hypothèse que le télétravailleur travail autant d'heure en télétravail qu'en travail en entreprise). Pour chaque consommation électrique reprise dans le modèle, le mix énergétique de la zone géographique concernée est pris en compte afin de déterminer les émissions engendrées.

2.2 Application du modèle à un scénario de télétravail illustratif

Le modèle développé ci-dessus est utilisé afin d'analyser différents types de scénarios de télétravail. Chaque scénario est constitué d'un ensemble de données différents le ca-

ractérisant. Ces données proviennent de résultats d'enquêtes, d'interviews personnelles ainsi que des émissions liées à l'utilisation de véhicules, des équipements électroniques, du chauffage, du refroidissement, et de l'éclairage de l'entreprise et des domiciles concernés. Ci-dessous est développée l'analyse d'un scénario effectuée par E.Kitou et A.Horvath afin d'illustrer l'utilisation du modèle.

Dans ce scénario illustratif, le mix électrique de l'état de Californie de 2002 est utilisé pour calculer les émissions (50% gaz naturel, 16% nucléaire, 12% énergies renouvelables, 11% charbon, 10% hydro-électrique et 1% d'autres sources) (14). Les valeurs des utilisations induites (appelées "effets rebond") par le télétravail ont été estimées par les auteurs. Ces estimations sont consciemment élevées pour pouvoir apercevoir le potentiel effet rebond contrecarrant les effets bénéfiques du télétravail (méthode d'estimation qui ne sera pas utilisée dans ce travail-ci, les résultats de l'ADEME nous permettront d'évaluer plus précisément l'impact de ces effets rebonds).

2.2.1 Analyse d'un scénario déterministe illustratif de télétravail

E. Kitou et A. Horvath ont établi un scénario de télétravail pour un employé américain type suivant le modèle développé. Ce scénario est expliqué ci-dessous.

Obtention des paramètres

La liste des paramètres sélectionnés est donnée en Annexe A.

— *Transport*

Des enquêtes de l'époque montrent que le moyen de transport préféré par les américains est la voiture (15) (16). Ce mode de transport est donc celui utilisé dans ce scénario. L'occupation moyenne d'une voiture en 2002 pour un trajet lié au travail est de une seule personne, tandis qu'il s'agit de deux personnes pour des trajets autres (16). Le véhicule considéré est la Honda Accord, voiture typique de

taille moyenne, ayant comme note environnementale EPA, une note moyenne de 6/10 (17). L'âge moyen des voitures en circulation aux USA étant de 9 ans, le modèle utilisé ici est de 1994 (2003 - 9 ans). La longueur moyenne de trajet pour aller à l'entreprise est de 12 miles (19.3km) (16). La distance de trajets induits par le télétravail est estimée à 6 miles (9,65km) (15)(16).

— *Équipements électriques*

Les équipements sont considérés comme ayant une utilisation partagée en entreprise. Les temps d'utilisation sont basés sur des enquêtes (18) (19). L'estimation de l'impact des équipements à domicile est aussi basée sur le fait que 45% de travailleurs possèderaient un espace propre pour le travail de bureau à domicile (20). Il est difficile d'estimer l'usage exacte de l'équipement au domicile, l'utilisation est donc jugée similaire à celle en entreprise à laquelle ils ont ajouté un paramètre d'usage induit.

— *Chauffage, air conditionné, éclairage*

Les chaudières à gaz naturel et une climatisation centrale sont considérés comme le choix le plus répandu pour les domiciles et les entreprises aux États-Unis en 2003. Les ampoules incandescentes sont choisies pour les domiciles tandis que le calcul d'énergie consommée par l'éclairage à l'entreprise est estimé sur base de la surface au sol, étant donné qu'il est commun de voir une unité centrale déterminer l'éclairage indépendamment des employés.

Observons à présent ce que ce choix illustratif de paramètres implique comme émissions de CO_2e à attribuer au télétravail.

Résultats du scénario déterministe illustratif

		CO ₂	SO ₂	NO _x	N ₂ O	CH ₄	CO	PM ₁₀
transportation	NTW	46 000	N/A	160	N/A	N/A	1700	14
	1-day	38 000	N/A	130	N/A	N/A	1400	11
	3-day	22 000	N/A	73	N/A	N/A	800	6.4
	5-day	5100	N/A	17	N/A	N/A	180	1.5
	no rebound (5-day)	0	N/A	0	N/A	N/A	0	0
office electronic and electrical equipment	NTW	1800	1.2	1.4	0.003	0.003	N/A	N/A
	1-day	1600	1.1	1.2	0.002	0.003	N/A	N/A
	3-day	1100	0.7	0.8	0.002	0.002	N/A	N/A
	5-day	0	0	0	0	0	N/A	N/A
	no rebound (5-day)	0	0	0	0	0	N/A	N/A
home electronic and electrical equipment	NTW	310	0.2	0.2	0.0004	0.001	0	0
	1-day	1800	0.5	1.6	0.04	0.04	0.7	0.1
	3-day	7100	2	6.2	0.2	0.2	2.9	0.5
	5-day	11 000	3	9.3	0.2	0.3	4.3	0.8
	no rebound (5-day)	1600	1.1	1.2	0	0	0	0
office lighting	NTW	1800	1.3	1.4	0.003	0.003	N/A	N/A
	1-day	1800	1.3	1.4	0.003	0.003	N/A	N/A
	3-day	880	0.6	0.7	0.001	0.002	N/A	N/A
	5-day	0	0	0	0	0	N/A	N/A
	no rebound (5-day)	0	0	0	0	0	N/A	N/A
home lighting	NTW	50	0.04	0.0	0.0001	0.0001	N/A	N/A
	1-day	180	0.1	0.1	0	0	N/A	N/A
	3-day	550	0.4	0.4	0	0	N/A	N/A
	5-day	910	0.6	0.7	0	0.001	N/A	N/A
	no rebound (5-day)	470	0.3	0.4	0	0	N/A	N/A
office heating	NTW	3000	0.03	2.8	0.05	0.06	1	0.2
	1-day	3000	0.03	2.8	0.05	0.06	1	0.2
	3-day	1400	0.01	1.3	0.02	0.03	0.5	0.1
	5-day	0	0	0	0	0	0	0
	no rebound (5-day)	0	0	0	0	0	0	0
office cooling	NTW	9800	6.8	7.7	0.01	0.02	N/A	N/A
	1-day	9800	6.8	7.7	0.01	0.02	N/A	N/A
	3-day	4600	3.2	3.6	0	0.01	N/A	N/A
	5-day	0	0	0	0	0	N/A	N/A
	no rebound (5-day)	0	0	0	0	0	N/A	N/A
home heating	NTW	0	0	0	0	0	0	0
	1-day	5300	0.04	5	0.1	0.1	1.8	0.3
	3-day	16 000	0.1	15	0.3	0.3	5.3	1
	5-day	27 000	0.2	25	0.5	0.5	9	1.7
	no rebound (5-day)	27 000	0.2	25	0.5	0.5	9	1.7
home cooling	NTW	0	0	0	0	0	N/A	N/A
	1-day	1600	1.1	1.2	0.002	0.003	N/A	N/A
	3-day	4800	3.3	3.7	0.01	0.01	N/A	N/A
	5-day	8000	5.5	6.2	0.01	0.02	N/A	N/A
	no rebound (5-day)	8000	5.5	6.2	0.01	0.02	N/A	N/A
total for heating days	NTW	53 000	2.8	170	0.007	0.007	1700	14
	1-day	52 000	3.1	140	0.2	0.2	1400	12
	3-day	49 000	3.8	97	0.5	0.5	800	8
	5-day	44 000	3.8	52	0.7	0.8	190	4
	no rebound (5-day)	29 000	1.6	27	0.5	0.5	9	2
total for cooling days	NTW	60 000	9.5	170	0.02	0.03	1700	14
	1-day	55 000	11	140	0.06	0.07	1400	11
	3-day	41 000	10	88	0.2	0.2	800	7
	5-day	25 000	9.1	33	0.2	0.3	180	2
	no rebound (5-day)	10 000	6.9	7.8	0.01	0.02	0	0

FIGURE 2.2: Résultats du scénario déterministe en grammes par 7 jours (Semaine) (2)

On observe sur la Figure 2.2 qu'une diminution nette d'émission de CO₂ est remarquable lors de télétravail, allant de 2% (1 jour de télétravail par semaine en période de chauffage)

à 80% (5 jours de télétravail par semaine en période de refroidissement et sans effet rebond). Les émissions de NO_X diminuent de 20 à 100%, celles de PM_{10} de 10 à 100% et de CO de 20 à 100%, tandis que celles de SO_2 diminuent ou augmentent de 40% suivant qu'on est en période de chauffage ou de refroidissement des bâtiments et suivant la prise en compte d'un effet rebond ou non. Les émissions de CH_4 et de N_2O augmentent de 10 à 100%, néanmoins leurs valeurs restent négligeables face aux émissions d'autres GES tel que le CO_2 .

Le transport est la source principale d'émission, mais cet impact tend à diminuer lorsque le nombre de jours de télétravail augmente. Avec 5 jours de télétravail par semaine, cet impact va de 10 à 90% suivant si on chauffe ou refroidit les bâtiments et en prenant compte des trajets induits. On observe une augmentation attendue des équipements à domicile. L'employé passant plus de temps chez lui, il est plus enclin à utiliser sa machine à laver, son sèche-linge, etc...

Lorsque les effets rebonds ne sont pas considérés avec 5 jours de télétravail par semaine (là où ces effets rebonds sont les plus importants), une diminution d'émissions liées aux équipements est remarquée lorsqu'on travail depuis chez soi, mais les émissions liées au chauffage, à la climatisation et éclairage augmentent.

Éliminer la considération de l'effet rebond a un fort impact. Cela revient à réduire le total d'émissions de 30 à 60% ($29kg$ de CO_2 au lieu de $44kg$ en période de chauffage pour 5 jours de TW ; $10kg$ de CO_2 au lieu de $25kg$ en période de refroidissement).

Les bénéfices obtenus grâce à la réduction de l'impact du transport peuvent-ils être contre-carrés par les autres composants de ce modèle ? Durant les périodes de chauffage, la réduction d'émission de CO_2 est proche d'être entièrement contre-carrée, contrairement à la période de refroidissement où la réduction d'émission reste supérieure à 20% malgré la prise en compte des effets rebonds.

Ce scénario déterministe illustratif nous a permis d'apercevoir le type d'analyse réalisable à propos de l'impact environnemental du télétravail en utilisant le modèle de E.Kitout et A.Horvath. Avant d'appliquer ce modèle au cas de l'UCLouvain, penchons-nous encore sur une dernière analyse effectuée par E.Kitou et A.Horvath : l'analyse d'un scénario probabiliste de télétravail.

2.2.2 Analyse d'un scénario probabiliste de télétravail

Après avoir analysé un scénario déterministe illustrant l'utilisation de leur modèle, E.Kitou et A.Horvath ont appliqué leur modèle à un scénario probabiliste. Celui-ci a pour différence avec le scénario déterministe le fait qu'il fait varier les paramètres utilisés grâce à une simulation Monte Carlo. Ceci permet de comprendre l'impact de la variation des données sur les résultats du modèle. L'objectif est d'identifier les paramètres critiques qui ont le pouvoir de réduire fortement les réductions d'émission recherchées lors de télétravail.

Cadre pour effectuer l'analyse sensitive

L'analyse probabiliste est basée sur le même jeu de paramètres utilisé pour le scénario déterministe illustratif de 3 jours de télétravail par semaine. La simulation Monte Carlo est utilisée pour estimer les émissions moyennes pour le scénario de télétravail et d'absence de télétravail en faisant varier les données dans un interval défini.

Principes d'une simulation Monte Carlo (21)

La simulation de Monte-Carlo est une méthode d'estimation d'une quantité numérique qui utilise des nombres aléatoires. Stanisław Ulam et John von Neumann l'appelèrent ainsi, en référence aux jeux de hasard dans les casinos. Cette quantité en question dans notre cas sont les émissions moyennes pour les employés en télétravail et hors télétravail.

Résultats du scénario probabiliste

Les paramètres critiques identifiés par E.Kitou et A.Horvath sont les suivants :

	Hors-télétravail	En télétravail
Transport	Nombre moyen de passagers	Nombre moyen de passagers
	Distance du domicile	Distance du domicile
	Emissions du véhicule	Nombre d'aller-retour
	Nombre d'aller-retour	Fréquence de télétravail
		Emissions du véhicule
Equipement électrique	No d'h d'utilisation	No d'h d'utilisation
	Emissions consommation électrique	Emissions consommation électrique
		Fréquence de télétravail
Eclairage	Dimensions bureau	Dimensions bureau
	Type de bureau	Type de bureau
	Emissions consommation d'électricité	Emissions consommation d'électricité
		Fréquence de télétravail
Chauffage et conditionnement d'air	% temps d'utilisation du bureau	Consommation gaz naturel
	Dimensions bureau	Dimensions bureau
	Emissions gaz naturel	Emissions gaz naturel
		Consommation gaz naturel

Les résultats repris à la Figure 2.3 montrent une diminution globale d'émissions, néanmoins, les déviations standards nous indiquent que le choix des paramètres peut réellement faire basculer la conclusion de positive à négative.

Les diagrammes de la Figure 2.4 indiquent les contributions relatives de chaque composant du modèle pour les émissions de CO_2 . Les émissions liées au transport forment une majorité. Cependant, lors de télétravail cette majorité est égalée par les autres composants, révélant l'importance de l'estimation de paramètres critiques.

		CO ₂	SO ₂	NO _x	N ₂ O	CH ₄	CO	PM ₁₀
TW-NTW	mean	-3600	-4	-36	0.1	0.1	-120	-1.5
	st.dev	7800	12	33	0.1	0.1	100	1.5
TW _{total}	mean	23 000	27	94	0.2	0.1	240	3.7
	st.dev	10 000	22	51	0.1	0.1	160	2.3
NTW _{total}	mean	27 000	30	130	0.1	0.1	360	5.2
	st.dev	11 000	23	70	0.06	0.03	220	3.2
TW _{TR}	mean	12 000	N/A	75	N/A	N/A	240	N/A
	st.dev	7900	N/A	50	N/A	N/A	160	N/A
NTW _{TR}	mean	18 000	N/A	110	N/A	N/A	360	N/A
	st.dev	11 000	N/A	69	N/A	N/A	220	N/A
TW _{EE}	mean	7800	16	12	0.1	0.1	1.1	0.2
	st.dev	6000	15	9	0.1	0.1	1.5	0.3
NTW _{EE}	mean	3600	16	9	0.1	0.02	N/A	N/A
	st.dev	1800	12	5	0.03	0.01	N/A	N/A
TW _L	mean	2500	11	6	0.03	0.02	N/A	N/A
	st.dev	1400	9	4	0.02	0.01	N/A	N/A
NTW _L	mean	3300	15	8	0.04	0.02	N/A	N/A
	st.dev	2100	13	6	0.03	0.01	N/A	N/A
TW _{HC}	mean	1900	0	2	0.03	0.04	0.6	0.1
	st.dev	800	0	1	0.02	0.02	0.3	0.1
NTW _{HC}	mean	2000	0	2	0.04	0.04	0.7	0.1
	st.dev	1000	0	1	0.02	0.02	0.3	0.1

^a Note: TR = transportation, EE = electronic and electrical equipment, L = lighting, HC = heating or cooling, and N/A = not available.

FIGURE 2.3: Résultats de la simulation Monte Carlo du scénario probabiliste (en grammes par 7 jours) (2)

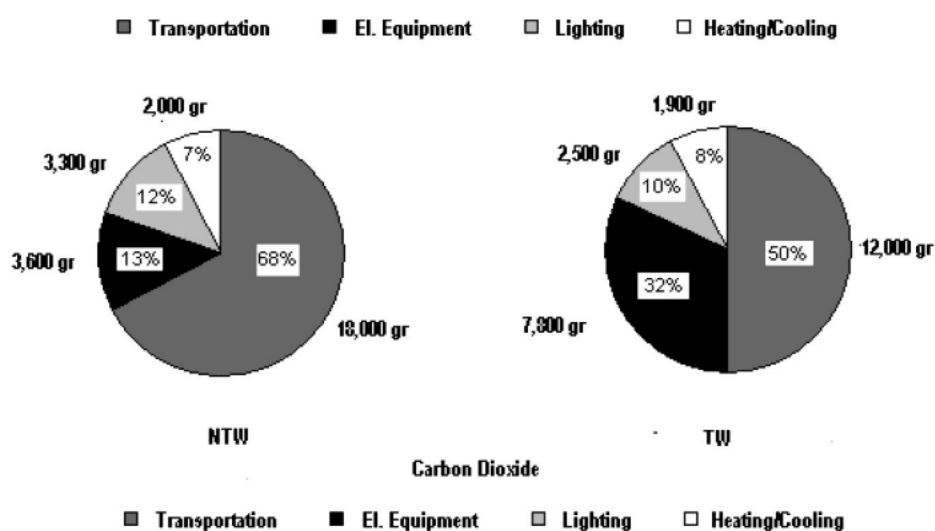


FIGURE 2.4: Contributions des différents composants du modèle dans les émissions de CO₂ pour le scénario probabilistique (par 7 jours) (2)

2.3 Amélioration du modèle

Dans ce travail est proposé une amélioration du modèle développé par E.Kitou et A.Horvath en y incorporant la quantification de l'impact environnemental des effets rebonds liés au télétravail, réalisée en 2020 par l'ADEME. METTRE LA REFERENCE ICI

2.3.1 Quantification de l'impact environnemental des effets rebonds par l'ADEME

Ci-dessous sont repris les résultats obtenus par l'ADEME, réunis dans le rapport "Etude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail" réalisé en septembre 2020.

Liste de effets rebond et de leur impact

— **Effet "Chaines Modales"** : Le trajet domicile-bureau est souvent marqué par plusieurs arrêts, à l'aller comme au retour (déposer les enfants à l'école, faire des courses, etc). Ces trajets peuvent être maintenus lors de la journée de télétravail. La suppression du trajet domicile-bureau peut alors conduire vers une mobilité en étoile à la place d'une mobilité en chaîne (voir Figure 2.5).

En revanche, des reports modaux favorables vers des mobilités "actives" (vélo, marche) ont été relevés, confirmant que la complexité des trajets accroît statistiquement la probabilité de recours à la voiture. De plus, la suppression des trajets pendulaires (domicile-entreprise) accroît l'attractivité des transports en commun, ce qui ajoute un cas de report modal favorable.

Les effets rebond défavorables engendré par cet effet Chaines Modales sont estimés à **+67.7 kg CO₂e/an/jour** de télétravail hebdomadaire.

— **Effet "Relocalisation"** : En réduisant les temps de trajet, le télétravail rend soutenables de distances domicile - bureau plus importantes et pourrait donc les accroître dans le cas où l'éloignement confère un avantage économique ou un gain

de qualité de vie. Ceci implique alors un report modal défavorable : augmentation de la distance parcourue en voiture et potentiellement un accroissement de la taille du logement. Ces effets n'ont aujourd'hui pas encore été observables, mais afin d'anticiper les effets à long terme, des scénarios individuels ont été étudiés comme repris dans la Figure 2.6.

- **Effet "Logement"** : La plupart des études supposent que la consommation d'énergie au domicile pendant la journée de télétravail augmente mécaniquement : chauffage, éclairage, Internet, équipements branches, préparation de repas, etc. Toutefois, plusieurs phénomènes peuvent modérer cette surconsommation. Le chauffage du logement peut rester allumé dans la journée quelle que soit la situation du salarié, les ménages possédant un chauffage individuel avec régulation possèdent généralement un dispositif permettant de maintenir une température un plus basse dans la journée, mais l'écart n'est pas prépondérant. De plus, ce transfert de consommation énergétique du bureau vers le domicile pourrait s'accompagner d'une responsabilisation car la charge financière incombe au télétravailleur et non plus à l'entreprise, ce qui pourrait limiter la consommation d'énergie lors de journée de télétravail. Par ailleurs, une partie significative des logements n'est pas vides pendant le travail (présence d'enfants, de proches, de colocataires, etc), ce qui tempère la consommation d'énergie additionnelle lors de journées de télétravail.

En prenant ceci en compte, la totalité de la consommation additionnelle à domicile lors de télétravail s'élève à **+20.7 kg CO₂e/an/jour** de télétravail hebdomadaire.

- **Effet "Visio-Conférence"** : La consommation d'énergie et la sollicitation des serveurs nécessaires aux services de visio-conférence génèrent des émissions de gaz à effet de serre. Différents scénarios d'utilisation de visio-conférence furent faits et une moyenne fut obtenue : **+2.6 kg CO₂e/an/jour** de télétravail hebdomadaire.
- **Effets systémiques** : De nombreux effets systémiques induits par le télétravail sont à noter : Effet "Congestion routière", Effet "flexibilité horaire", Effet "extension des horizons professionnels", Effet "dématérialisation de l'entreprise" etc.

Ceux-ci sont difficilement modélisable et n'ont pas été quantifié dans l'étude de l'ADEME.

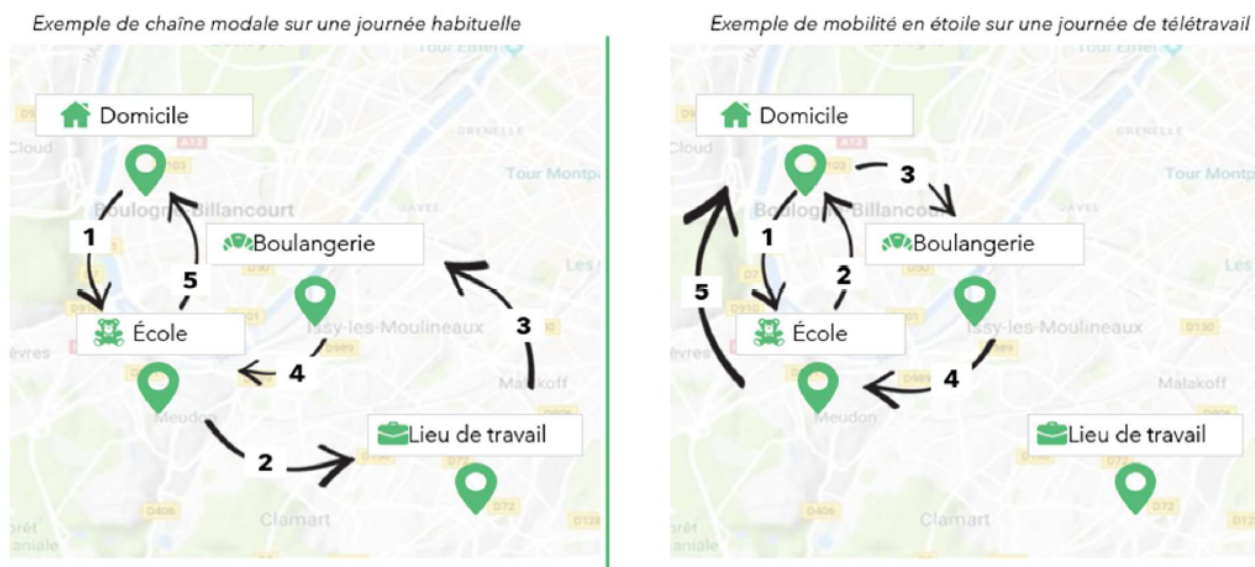


FIGURE 2.5: Comparaison des mobilités sur une journée habituelle vs une journée de télétravail.()

Relocalisation	Habitudes de transport	Impact d'un A/R sur site (kg eq CO2)	Nombre d'allers-retours sur site nécessaires au dépassement de la référence
Périurbaine	<ul style="list-style-type: none"> Habite à 18km en voiture de la gare la plus proche (Rambouillet) Prend le transilien jusqu'à Montparnasse (51km), puis fait 15km de métro jusqu'à la Défense 	7,6	3 par semaine
Rurale	<ul style="list-style-type: none"> Habite à 30 km en voiture de la gare TGV la plus proche à 400 km de Paris en train 	13,5	2 par semaine
Aérienne	<ul style="list-style-type: none"> Déménagement vers Nice 700 km d'avion pour aller jusqu'à l'aéroport Roissy Charles de Gaulle, puis prend les transports en commun pour aller dans Paris 	322	3 par an

FIGURE 2.6: Exemple d'impacts liés à différents types de relocalisation.()

Chapitre 3

Application à l'Université Catholique de Louvain

Dans la section traitant de la méthodologie ont été décrits le modèle utilisé afin de quantifier l'impact environnemental du télétravail en entreprise, ainsi que les données supplémentaires apportées par l'ADEME quant à la quantification de l'impact environnemental des effets rebond induits par le télétravail.

A présent, nous pouvons appliquer ce modèle au cas du site de Louvain-la-Neuve de l'UCLouvain. Dans un premier temps seront expliqués les données récoltées nécessaires à l'utilisation du modèle et le traitement de celles-ci. Ensuite seront présentés les émissions de CO_2e obtenues avec ce modèle pour le cas de l'UCLouvain. Pour finir, l'impact sur le bilan carbone de l'UCLouvain sera quantifié et discuté.

3.1 Obtention de chaque composant du modèle

Rappelons le modèle développé par E.Kitou et A.Horvath illustré à la figure 3.1.

L'impact environnemental du télétravailleur (EI_{TW}) et du travailleur sans télétravail (EI_{NTW}) provient des mêmes composants :

- Le transport (EI_{TR})

- L'utilisation d'équipements électroniques (EI_{EE})
- Le chauffage, la climatisation des batiments/pièces et l'éclairage à l'entreprise (EI_{OS})
- Le chauffage, la climatisation des batiments/pièces et l'éclairage à la résidence du travailleur (EI_{HS})

$$EI_{TW} = EI_{TR} + EI_{EE} + EI_{OS} + EI_{HS}$$

$$EI_{NTW} = EI_{TR} + EI_{EE} + EI_{OS} + EI_{HS}$$

L'impact environnemental net associé au télétravail (NEI_{TW}) est donc défini comme ceci :

$$NEI_{TW} = EI_{TW} - EI_{NTW}$$

L'unité temporelle choisie pour l'analyse est d'une durée hebdomadaire (semaine de 7 jours).

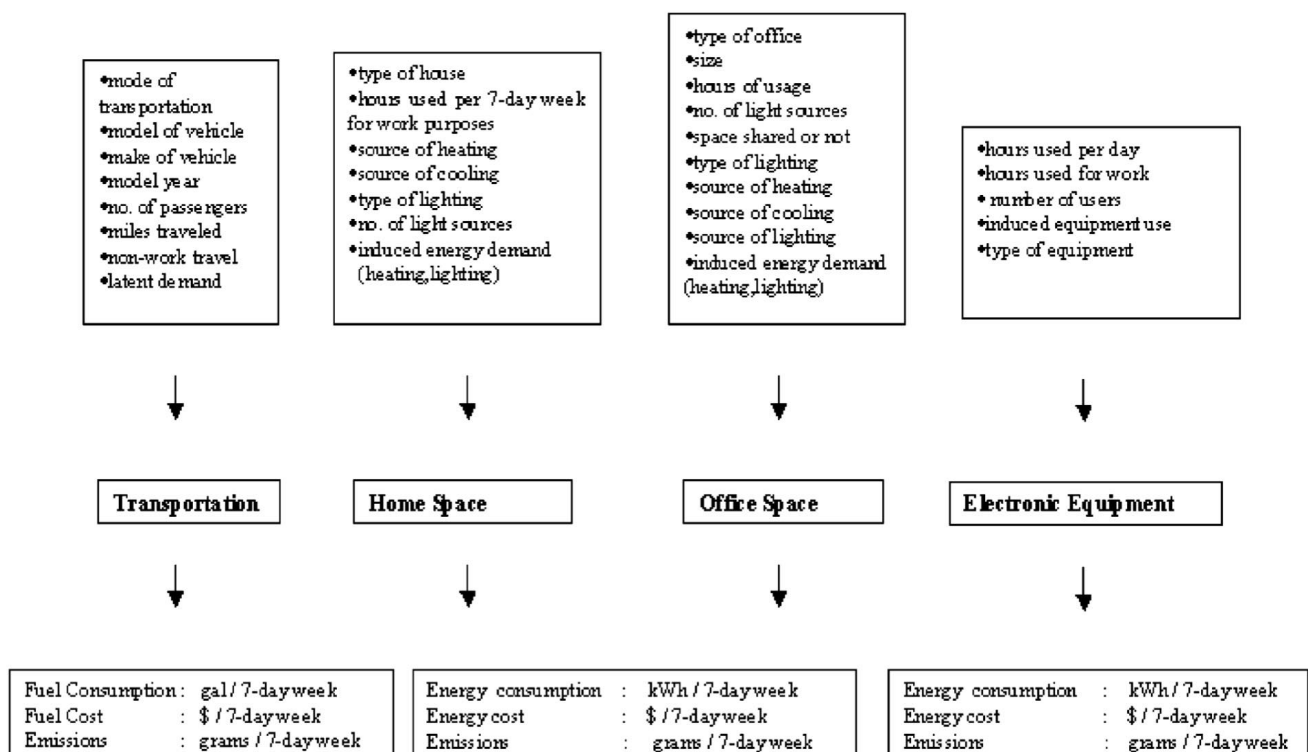


FIGURE 3.1: Modèle systémique du télé-travail (2)

Notre objectif ici est de quantifier chaque composant de l'impact environnemental du télétravailleur et du travailleur sans télétravail pour le cas de l'UCLouvain.

3.1.1 Composant 1 : Le Transport

Données

Une large enquête mobilité a été effectuée en 2017 à l'UCLouvain. Les résultats obtenus, repris à la Figure 3.2 nous informent de tous les cas de transport d'employés existant à l'UCLouvain.

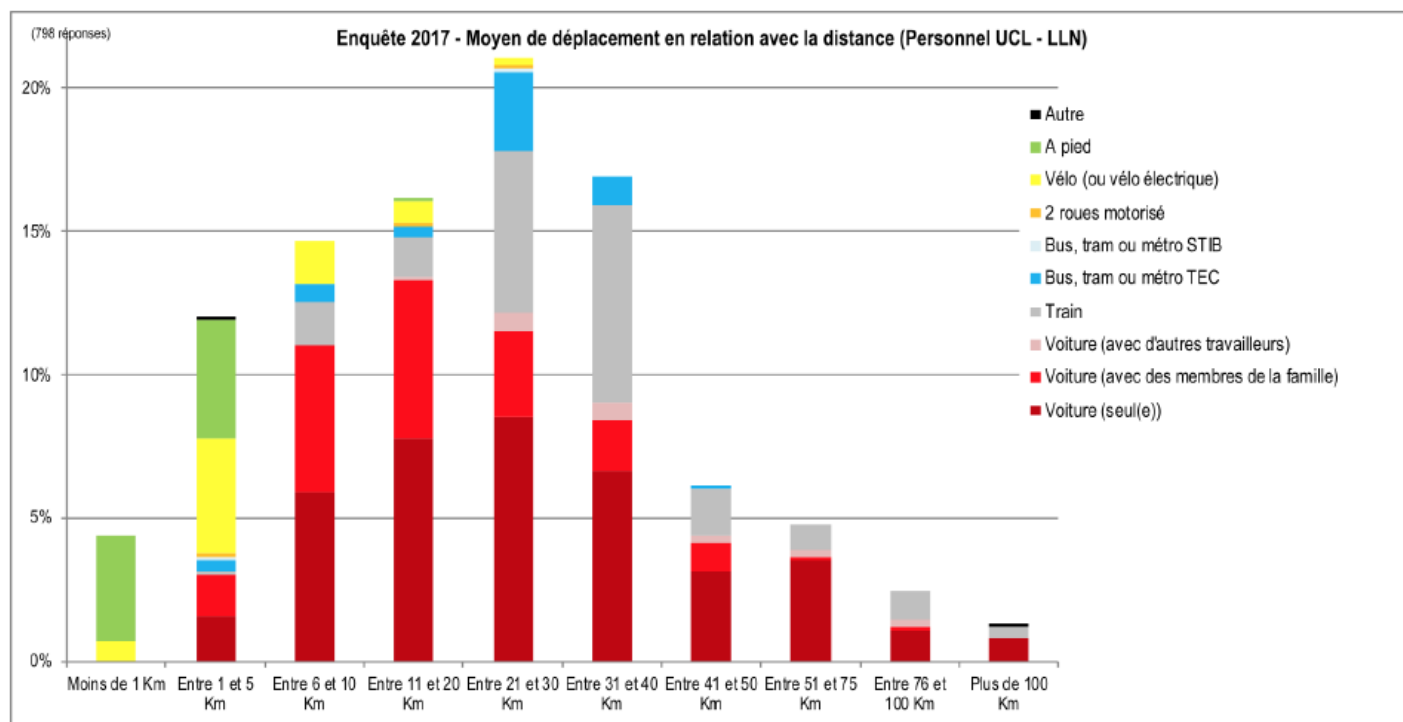


FIGURE 3.2: Moyen de déplacement en fonction de la distance du lieu de travail du personnel de l'UCLouvain LLN (1)

Les résultats de cette enquête nous indiquent la distance parcourue ainsi que le moyen de transport utilisé par chaque employé. Ceci constitue notre ensemble de données pour le composant de transport.

Traitement des données

Afin d'obtenir les émissions qui résultent des déplacements des employés, il faut multiplier la distance parcourue par le facteur d'émissions correspondant au moyen de transport utilisé.

Les facteurs d'émissions des moyens de transport sont reprises ci-dessous. Ceux-ci proviennent de la vaste base de données de l'ADEME ainsi que des données provenant de la STIB :

- 2 roues motorisées : $< 250 \text{ cm}^3 = 0.0616 \text{ gCO}_2\text{e/km}$; $> 250 \text{ cm}^3 = 0.168 \text{ gCO}_2\text{e/km}$
- Bus, Tram, métro STIB : Bus = $110 \text{ gCO}_2\text{e/km}$; Métro = $20 \text{ gCO}_2\text{e/km}$; Train = $26 \text{ gCO}_2\text{e/km}$; Tram = $30 \text{ gCO}_2\text{e/km}$
- Train TEC = $26 \text{ gCO}_2\text{e/km}$
- Co-Voiturage = $0.0965 \text{ gCO}_2\text{e/km}$
- Voiture = $0.193 \text{ gCO}_2\text{e/km}$
- Les émissions engendrées par la marche à pieds et l'utilisation du vélo sont considérées nulles.

Suite aux résultats de l'enquête, seront pris en compte dans ce travail les cas de transport allant de 3 à 35.5 km, représentant plus de 80% des employés de l'UCLouvain. Les émissions journalières et hebdomadaires liées au transport des travailleurs sans télétravail pour chaque cas de transport est repris dans le tableau ci-dessous.

Distance	Type de véhicule	Emissions journalières (gCO_2e)	Emissions hebdomadaires (gCO_2e)
3 km	Voiture	1158	5790
	Bus	660	3300
	2 roues	689.7	3448.5
	pieds, vélo	0	0
8 km	Voiture	3088	15440
	Train	416	2080
	Bus	1760	8800
	Vélo	0	0
15.5 km	Voiture	5983	29915
	Train	806	4030
	Bus	3410	17050
	Vélo	0	0
25.5 km	Voiture	9843	49215
	Co-voiturage	4921.5	24607.5
	Train	1326	6630
	Bus	5610	28050
	Vélo	0	0
35.5 km	Voiture	13703	68515
	Co-voiturage	6851.5	34257.5
	Train	1846	9230
	Bus	7810	39050

3.1.2 Composant 2 : Espace à Domicile

Ce composant consiste en la prise en compte des émissions liées au chauffage, refroidissement et éclairage du domicile lors du télétravail. Il est considéré ici qu'en Belgique peu de personnes refroidissent leur habitation. Seuls le chauffage et l'éclairage sont donc considérés.

1. Chauffage

Données

Nous utilisons comme données les consommations moyennes de gaz naturel pour chauffer les appartements et maisons en France, ainsi que leurs surfaces moyennes respectives provenant de la base de donnée de l'ADEME. Nous faisons l'hypothèse que ces moyennes restent pertinentes en Belgique. Les facteurs d'émissions des chaudières au fioul et au gaz sont reprises d'une étude de 2018 effectuée par l'entreprise de conseil *Carbone4*. Ces données sont représentées dans le tableau suivant :

Consommation moyenne annuelle de gaz naturel en appartement	191 kWh/m^2
Consommation moyenne annuelle de gaz naturel pour une maison	178 kWh/m^2
Surface moyenne chauffée d'un appartement	68 m^2
Surface moyenne chauffée d'une maison	106 m^2
Facteur d'émission d'une chaudière au fioul	324 gCO_2e/kWh
Facteur d'émission d'une chaudière au gaz	227 gCO_2e/kWh

Traitement des données

L'objectif est d'obtenir les émissions liées au chauffage du domicile par jour de télétravail. Pour ce faire, différentes hypothèses supplémentaires ont été faites :

- 60% des employés vivent dans une maison et 40% dans un appartement.
- 50% des employés utilisent une chaudière au gaz et les 50% autres utilisent une chaudière au fioul.
- La surface chauffée dont le télétravailleur est responsable lorsqu'il est chez lui est estimée comme étant équivalente à la surface moyenne d'un appartement (bureau + cuisine + salle de bain + couloirs) à savoir : 68 m^2 .
- Le télétravailleur travaille 8h par jour de télétravail.

Nous multiplions alors les consommations moyennes par la moyenne des facteurs d'émission et obtenons ainsi les émissions liées au chauffage. Néanmoins, afin d'être plus précis, il serait plus judicieux d'exprimer ces émissions en fonction du mois de l'année durant lequel cette journée de télétravail est effectuée. Nous pondérons alors les consommations suivant les degrés-jours de chaque mois de l'année 2018 (année de la réalisation du bilan carbone de l'UCLouvain). Cette pondération permet d'obtenir une consommation plus élevée en hivers et nulle en été, représentant fidèlement le comportement de chauffe du domicile des travailleurs.

Les résultats suivants ont été obtenus, exprimés en gCO_2e /jour de télétravail pour chaque mois de l'année :

Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
4754.5	5820	4620	2350	1450	577
Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
0	0	723	2600	4189	4336

FIGURE 3.3: Emissions liées au chauffage du domicile pour une jour de télétravail en fonction du mois de l'année en 2018

2. Eclairage

L'objectif est d'obtenir les émissions liées à l'éclairage du domicile par jour de télétravail. Pour ce faire, différentes hypothèses supplémentaires ont été faites :

- 2 ampoules sont utilisées simultanément en continu lors du travail de l'employé.
- On ne prend pas en compte la saisonnalité (en réalité, on éclaire plus ou moins suivant l'éclairage naturel, mais cette variation est minime comparé aux ordres de grandeurs des autres composants d'émissions).
- On considère que 50% des employés utilisent des ampoules LED et les autres des ampoules halogènes.

— Le télétravailleur travaille 8h par jour de télétravail.

Données

Consommation moyenne d'une ampoule LED	10 W
Consommation moyenne d'une ampoule halogène	75 W
Mix électrique belge	168.23 gCO_2e/kWh
Mix électrique belge en l'absence de nucléaire	378.37 gCO_2e/kWh

Les mix électriques repris ci-dessus proviennent de ce qui est indiqué sur les factures électriques d' *ENGIE Electrabel* en 2018. L'origine de la livraison totale d'électricité du fournisseur étant à l'époque : sources d'énergie renouvelables (10,80%), cogénération de qualité (1,07%), combustibles fossiles (16,26%), nucléaire (69,92%), inconnu (1,94%). Les facteurs d'émission de chaque source d'énergie sont ceux détaillés par l'entreprise de conseil *Carbone4* : charbon (1060 gCO_2e/kWh_e), Fioul (730 gCO_2e/kWh_e), Gaz (418 gCO_2e/kWh_e), Biomass (230 gCO_2e/kWh_e), Hydraulique par effacement (135 gCO_2e/kWh_e), Hydraulique par turbinage (73 gCO_2e/kWh_e), Solaire (55 gCO_2e/kWh_e), Géothermie (45 gCO_2e/kWh_e), Eolien (14 gCO_2e/kWh_e), Nuclaire (6 gCO_2e/kWh_e). Le mix électrique considéré avec l'absence de nucléaire est obtenu en remplaçant la totalité de la part du nucléaire du mix électrique par du gaz. Ceci est proposé étant donnée la volonté politique belge de réduire la part du nucléaire du mix électrique.

Traitement des données

Pour obtenir les émissions liées à l'éclairage du domicile par jour de télétravail, nous multiplions la consommation moyenne de deux ampoules par le nombre d'heures de télétravail journalier, que nous multiplions ensuite par le facteur d'émission du mix énergétique belge.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Emissions journalières	80 gCO_2e
Emissions journalières en l'absence du nucléaire	184 gCO_2e

3.1.3 Mix électrique de l'UCLouvain

Avant de continuer notre analyse des composants, il est nécessaire de déterminer le facteur d'émission du mix électrique de l'UCLouvain. L'UCLouvain dispose d'une cogénération et n'achète donc pas la totalité de son électricité sur le réseau électrique belge. La couverture du besoin en électricité par la cogénération en 2018 est illustrée à la Figure 3.4.

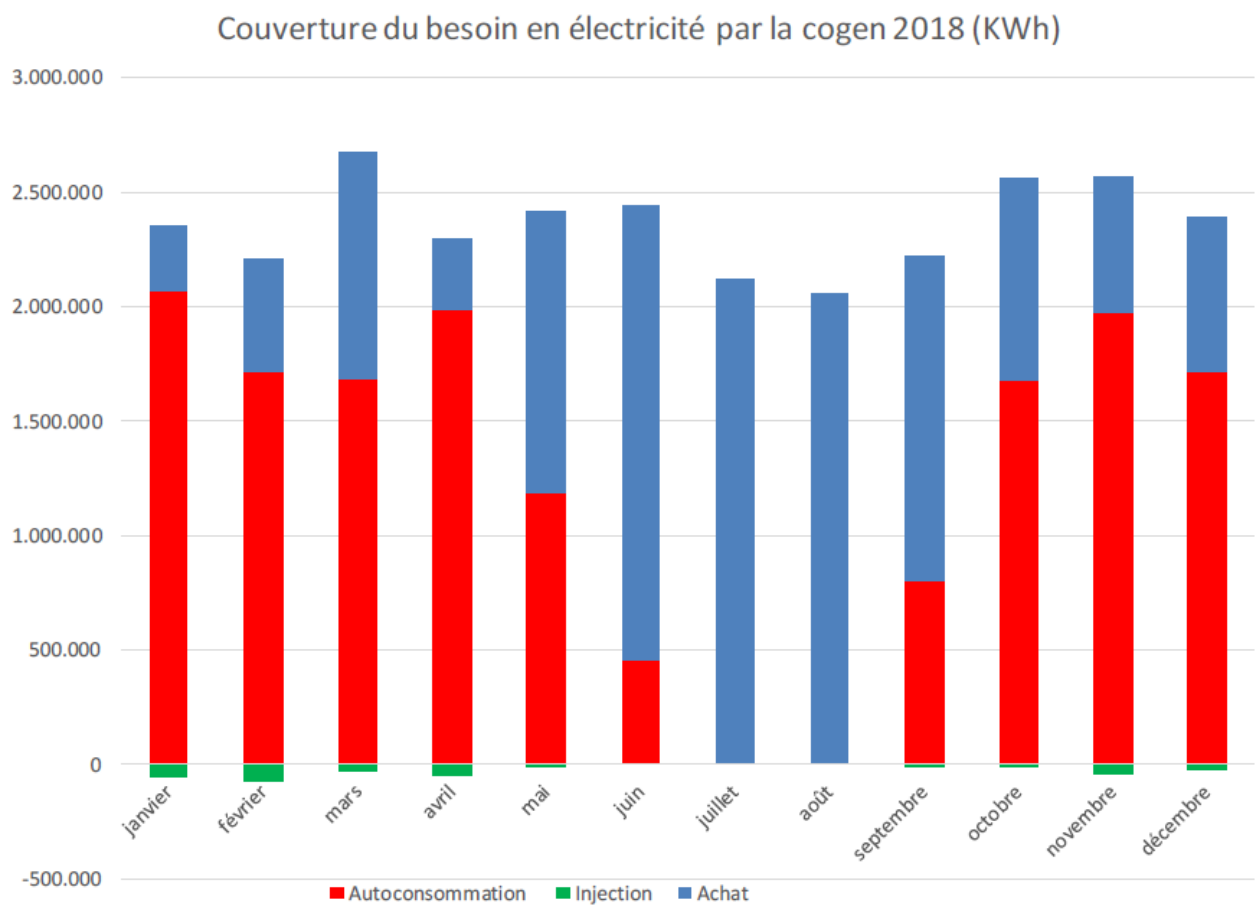


FIGURE 3.4

Notre objectif est d'établir ce facteur d'émission mois par mois, en fonction de l'utilisation

de la cogénération ainsi que de la provenance de l'électricité restante achetée sur le réseau belge.

Données

- Consommation mensuelle totale en électricité du site de Louvain-la-Neuve de l'UCLouvain.
- Production électrique mensuelle de la cogénération.
- Mix électrique acheté du réseau mis à disposition par *ENGIE Electrabel* à l'UCLouvain, obtenu sur des factures de 2018 : cogénération de qualité (1,20%), combustibles fossiles (18,23%), nucléaire (78,39%), inconnu (2,17%). Ce qui représente un facteur d'émission de $174.8 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$
- Facteur d'émission de la cogénération : $306 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}_e$.

Traitement des données

Le facteur d'émission du mix électrique de l'UCLouvain est obtenu avec la formule suivante :

$$MIX_{UCL} = \frac{elec_{achat} \cdot MIX_{achat} + elec_{cogen} \cdot MIX_{cogen}}{elec_{achat} + elec_{cogen}}$$

avec : $elec_{achat}$ = la consommation d'électricité achetée sur le réseau belge et $elec_{cogen}$ = l'électricité produite par la cogénération de l'UCLouvain.

Les facteurs d'émissions obtenus, exprimés mois par mois en $\text{gCO}_2\text{e/kWh}_e$ sont représentés sur la Figure 3.5.

Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
14% achetée 86% cogénération UCL 287,6 gCO₂e/kWh	25% achetée 75% cogénération UCL 273,2 gCO₂e/kWh	29% achetée 71% cogénération UCL 267,9 gCO₂e/kWh	36% achetée 64% cogénération UCL 258,7 gCO₂e/kWh	60% achetée 40% cogénération UCL 227,3 gCO₂e/kWh	80% achetée 20% cogénération UCL 201 gCO₂e/kWh
Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
100% achetée 0% cogénération UCL 174,8 gCO₂e/kWh	100% achetée 0% cogénération UCL 92,17 gCO₂e/kWh	77% achetée 23% cogénération UCL 141,35 gCO₂e/kWh	33% achetée 67% cogénération UCL 287,6 gCO₂e/kWh	19% achetée 81% cogénération UCL 265,37 gCO₂e/kWh	23% achetée 73% cogénération UCL 244,6 gCO₂e/kWh

FIGURE 3.5

3.1.4 Composant 3 : Espace à l'UCLouvain

Ce composant consiste en la prise en compte des émissions liées au chauffage, refroidissement et éclairage de l'espace de travail à l'UCLouvain. L'UCLouvain ne refroidissant pas leurs bâtiments, seuls le chauffage et l'éclairage sont donc considérés.

1. Chauffage

Données

- Consommations mensuelles de gaz naturel de l'UCLouvain durant l'année 2018, représentée dans le tableau ci-dessous, fournies par Mr. Smits membre du service des études du patrimoine immobilier de l'UCLouvain.
- Le pourcentage de consommation académique : de Janvier à Mai (65.10 %), de Juin à Septembre (53.59 %), de Octobre à Décembre (65.1 %).
- La consommation surfacique moyenne des bâtiments de l'UCLouvain : 120 kWh/m^2
- Le facteur d'émission lié à la consommation de gaz par une chaudière de l'UCLouvain ou par sa cogénération : $306 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$.

Janvier	10 698 <i>MWh</i>	Juillet	235 <i>MWh</i>
Février	11 823 <i>MWh</i>	Aout	276 <i>MWh</i>
Mars	10 449 <i>MWh</i>	Septembre	1 920 <i>MWh</i>
Avril	5 117 <i>MWh</i>	Octobre	5 842 <i>MWh</i>
Mai	3 325 <i>MWh</i>	Novembre	9 110 <i>MWh</i>
Juin	1 526.24 <i>MWh</i>	Décembre	9 669 <i>MWh</i>
		Total	69 991 <i>MWh</i>

Traitement des données

En multipliant les consommations mensuelles données par le pourcentage de consommation académique, nous obtenons la consommation académique mensuelle. On divise la consommation totale de l'UCLouvain par la consommation moyenne surfacique pour obtenir la surface chauffée totale de l'UCLouvain. On divise la consommation académique par la surface chauffée totale pour obtenir la consommation académique par m^2 . On fait l'hypothèse que la surface moyenne d'un bureau est de $10 m^2$. On multiplie alors la consommation académique par m^2 par 10 pour obtenir finalement la consommation par employé occupant un bureau de $10 m^2$. Cette consommation est celle du mois entier concerné. Il suffit de diviser celle-ci par le nombre de jour composant le mois en question et on obtient la consommation par employé par jour travaillé.

Les résultats obtenus sont les suivants exprimés en gCO_2e /jour de travail pour un employé pour chaque mois de l'année :

Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
206,7	252,9	201,9	102	64,2	25
Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
3	4,4	31,5	113	182	187

FIGURE 3.6: Emissions gCO_2e liées au chauffage à l'UCLouvain pour une journée de travail pour un employé en fonction du mois de l'année en 2018

2. Eclairage

L'objectif est d'obtenir les émissions liées à l'éclairage de l'UCLouvain par jour de travail pour un employé. Pour ce faire, différentes hypothèses supplémentaires ont été faites :

- 2 ampoules sont utilisées simultanément en continu lors du travail de l'employé.
- On ne prend pas en compte la saisonnalité (en réalité, on éclaire plus ou moins suivant l'éclairage naturel, mais cette variation est minime comparé aux ordres de grandeurs des autres composants d'émissions).
- On considère que 50% des bureaux utilisent des ampoules LED et les autres des ampoules halogènes.
- L'employé travaille 8h par jour.
- Le mix électrique moyen de l'UCLouvain est considéré, l'ordre de grandeur des émissions liés à l'éclairage étant plus faible que les autres composants, une analyse mois par mois est jugées inutiles, une moyenne suffira et ne faussera pas les analyses.

Données

Consommation moyenne d'une ampoule LED	10 W
Consommation moyenne d'une ampoule halogène	75 W
Moyenne du facteur d'émission du mix électrique de l'UCLouvain	226.8 gCO_2e/kWh

Traitement des données

Pour obtenir les émissions liées à l'éclairage du bureau de l'employé par jour de travail, nous multiplions la consommation moyenne de deux ampoules par le nombre d'heures de travail journalier, que nous multiplions ensuite par le facteur d'émission du mix électrique de l'UCLouvain.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Emissions journalières	108 gCO_2e
------------------------	--------------

3.1.5 Composant 4 : Equipement électronique

L'objectif est d'obtenir les émissions liées à l'utilisation d'équipement électronique pour un employé pendant un jour de travail à l'UCLouvain ainsi que par jour de télétravail à domicile. Les équipements pris en compte sont les suivants : ordinateur portable, ordinateur fixe et imprimante.

Données

Consommation moyenne d'un ordinateur portable	90 W
Consommation moyenne d'un ordinateur de bureau fixe	500 W
Consommation moyenne d'une imprimante	45 W
Moyenne du facteur d'émission du mix électrique de l'UCLouvain	226.8 gCO_2e/kWh
Facteur d'émission du mix électrique belge	168.23 gCO_2e/kWh

Traitement des données

Pour obtenir les émissions liées à l'équipement électronique du bureau de l'employé par jour de travail, nous multiplions la consommation moyenne des équipements par le nombre d'heures de travail journalier, que nous multiplions ensuite par le facteur d'émission du mix électrique de l'UCLouvain pour le cas du travailleur rester sur site, et par le facteur d'émission du mix électrique belge pour l'employé en télétravail.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Emissions journalières sur le site de l'UCLouvain	533.14 gCO_2e
Emissions journalières à domicile pour un employé en télétravail	513 gCO_2e
Emissions journalières pour un employé en télétravail sans nucléaire	1 166.3 gCO_2e

3.2 Effet d'un jour de télétravail par semaine

Rappelons une dernière fois le modèle développé par E.Kitou et A.Horvath illustré à la figure 3.1.

L'impact environnemental du télétravailleur (EI_{TW}) et du travailleur sans télétravail (EI_{NTW}) provient des mêmes composants :

- Le transport (EI_{TR})

- L'utilisation d'équipements électroniques (EI_{EE})
- Le chauffage, la climatisation des batiments/pièces et l'éclairage à l'entreprise (EI_{OS})
- Le chauffage, la climatisation des batiments/pièces et l'éclairage à la résidence du travailleur (EI_{HS})

$$EI_{TW} = EI_{TR} + EI_{EE} + EI_{OS} + EI_{HS}$$

$$EI_{NTW} = EI_{TR} + EI_{EE} + EI_{OS} + EI_{HS}$$

L'impact environnemental net associé au télétravail (NEI_{TW}) est donc défini comme ceci :

$$NEI_{TW} = EI_{TW} - EI_{NTW}$$

L'objectif à présent est de déterminer NEI_{TW} , l'impact environnemental net associé au télétravail. On effectue ceci pour chaque mois de l'année 2018. Premièrement, effectuons ceci sans prendre en compte le composant de transport. Les résultats sont repris dans le tableau ci-dessous.

Janvier	4499.66 gCO_2e	Juillet	-51.14 gCO_2e
Février	5518.96 gCO_2e	Aout	-52.54 gCO_2e
Mars	4369.96 gCO_2e	Septembre	643.36 gCO_2e
Avril	2199.86 gCO_2e	Octobre	2438.86 gCO_2e
Mai	1337.66 gCO_2e	Novembre	3958.86 gCO_2e
Juin	503.86 gCO_2e	Décembre	4100.86 gCO_2e

Ajoutons à présent à ces résultats la quantification des effets rebond proposé par l'ADEME et présenté plus tôt dans ce travail.

Janvier	5995.36 gCO_2e	Juillet	1444.56 gCO_2e
Février	7014.66 gCO_2e	Aout	1443.16 gCO_2e
Mars	5865.66 gCO_2e	Septembre	2139.06 gCO_2e
Avril	3695.56 gCO_2e	Octobre	3934.56 gCO_2e
Mai	2833.36 gCO_2e	Novembre	5454.56 gCO_2e
Juin	1999.56 gCO_2e	Décembre	5596.56 gCO_2e

Rappelons que ces résultats sont ceux obtenus sans prendre en compte l'économie de trajet effectué par jour de télétravail. L'objectif est à présent de voir pour quel employé le télétravail permettra de réduire sa quantité d'émission de CO_2e . Pour chaque mois, la valeur reprise dans le tableau ci-dessus doit être compensée par l'économie d'émission de CO_2e que la diminution de trajets de l'employés permet. Ci-dessous sont reprises les émissions journalières liées au transport des employés de l'UCLouvain :

Distance	Type de véhicule	Emissions journalières (gCO_2e)
3 km	Voiture	1158
	Bus	660
	2 roues	689.7
	pieds, vélo	0
8 km	Voiture	3088
	Train	416
	Bus	1760
	Vélo	0
15.5 km	Voiture	5983
	Train	806
	Bus	3410
	Vélo	0
25.5 km	Voiture	9843
	Co-voiturage	4921.5
	Train	1326
	Bus	5610
	Vélo	0
35.5 km	Voiture	13703
	Co-voiturage	6851.5
	Train	1846
	Bus	7810

Les valeurs reprises dans ce tableau représentent la diminution d'émission de CO_2e liée au transport qu'entraînerait un jour de télétravail. Nous pouvons, à partir de cela, déterminer pour quel employé le télétravail permettra de réduire ses émissions de CO_2e de sa journée de travail en fonction du mois de l'année. Ces employés sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Janvier	> 15.5 km en Voiture; > 25.5 km en Bus ; > 35.5 km en voiture, en co-voiturage ou en Bus <i>gCO₂e</i>
Février	> 25.5 km en voiture; > 35.5 km en voiture ou en bus
Mars	> 15.5 km en voiture; > 35.5 km en voiture ou en bus
Avril	> 15.5 km en voiture; > 25.5 km en voiture ou en Bus ou en co-voiturage
Mai	> 8 km en voiture; > 15.5 km en voiture ou en bus ; > 25.5 km en voiture ou en co-voitage ou en bus ; > 35.5 km en voiture ou en co-voiturage ou en bus
Juin	> 8 km en voiture; > 15.5 km en voiture ou en bus ; > 25.5 km en voiture ou en co-voitage ou en bus ; > 35.5 km en voiture ou en co-voiturage ou en bus
Juillet	> 8 km en voiture ou bus; > 15.5 km en voiture ou en bus ; > 25.5 km en voiture ou en co-voitage ou en bus ; > 35.5 km en voiture ou en co-voiturage ou en bus ou en train
Aout	> 8 km en voiture ou bus; > 15.5 km en voiture ou en bus ; > 25.5 km en voiture ou en co-voitage ou en bus ; > 35.5 km en voiture ou en co-voiturage ou en bus ou en train
Septembre	> 8 km en voiture; > 15.5 km en voiture ou en bus ; > 25.5 km en voiture ou en co-voitage ou en bus ; > 35.5 km en voiture ou en co-voiturage ou en bus
Octobre	> 15.5 km en voiture ; > 25.5 km en voiture ou en co-voitage ou en bus ; > 35.5 km en voiture ou en co-voiturage ou en bus
Novembre	> 15.5 km en voiture; > 25.5 km en voiture ou en bus ; > 35.5 km en voiture ou en co-voiturage ou en bus
Décembre	> 15.5 km en voiture; > 25.5 km en voiture ou en bus ; > 35.5 km en voiture ou en co-voiturage ou en bus

Nous avons à présent déterminé tous les types d'employés pour lesquels le télétravail permet de réduire les émissions journalières de CO_2e au cours d'une journée de télétravail.

3.3 Impact sur le bilan carbone

L'objectif à présent est de déterminer l'impact que peut avoir la mise en place du télétravail sur le bilan carbone de l'UCLouvain. Pour ce faire, nous allons premièrement établir ce qui est inclu dans le bilan carbone et ce qui n'y est pas, afin de comprendre l'impact du télétravail sur celui-ci.

3.3.1 Compatibilité de la méthode avec le bilan carbone réalisé

La démarche suivie lors de l'élaboration du bilan carbone est constituée des étapes suivantes (1) :

- Détermination du périmètre d'étude ;
- Sélection des secteurs impactés ;
- Collecte et traitement des données ;
- Analyse des résultats ;
- Etablissement d'un plan d'action.

Parcourons les étapes de *Sélection des secteurs impactés* et de *Collecte et traitement des données* afin de déterminer les éléments utiles à notre modèle.

3.3.2 Sélection des secteurs impactés

La méthodologie Bilan Carbone décompose l'empreinte carbone de l'Université en 5 secteurs (1) :

- **Energie** : émissions liées à l'utilisation directe d'énergie (gaz naturel, achat d'électricité) ;

- **Intrants** : émissions liées à la fabrication des biens achetés et consommés rapidement ;
- **Déplacements** : émissions liées aux déplacements professionnels, aux navettes des employés et des étudiants, aux véhicules appartenant à l'UCLouvain et aux étudiants partant et arrivant en mobilité internationale ;
- **Déchets directs** : émissions liées au traitement et au transport des déchets générés ;
- **Immobilisation** : émissions liées à l'énergie intrinsèque provenant de la production, de la construction et de la rénovation d'infrastructures, d'équipements, de mobilier et de véhicules appartenant à l'Université.
- **Data** : émissions liées aux données échangées entre Internet et le réseau UCLouvain.

Rappelons à présent les différents composants du modèle utilisé pour l'analyse de scénario de télétravail (2) :

- Le transport (EI_{TR})
- L'utilisation d'équipements électroniques (EI_{EE})
- Le chauffage, la climatisation des bâtiments/pièces et l'éclairage à l'entreprise (EI_{OS})
- Le chauffage, la climatisation des bâtiments/pièces et l'éclairage à la résidence du travailleur (EI_{HS})

$$EI_{TW} = EI_{TR} + EI_{EE} + EI_{OS} + EI_{HS}$$

$$EI_{NTW} = EI_{TR} + EI_{EE} + EI_{OS} + EI_{HS}$$

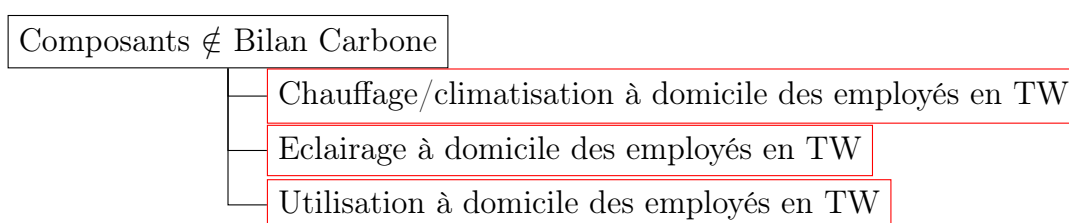
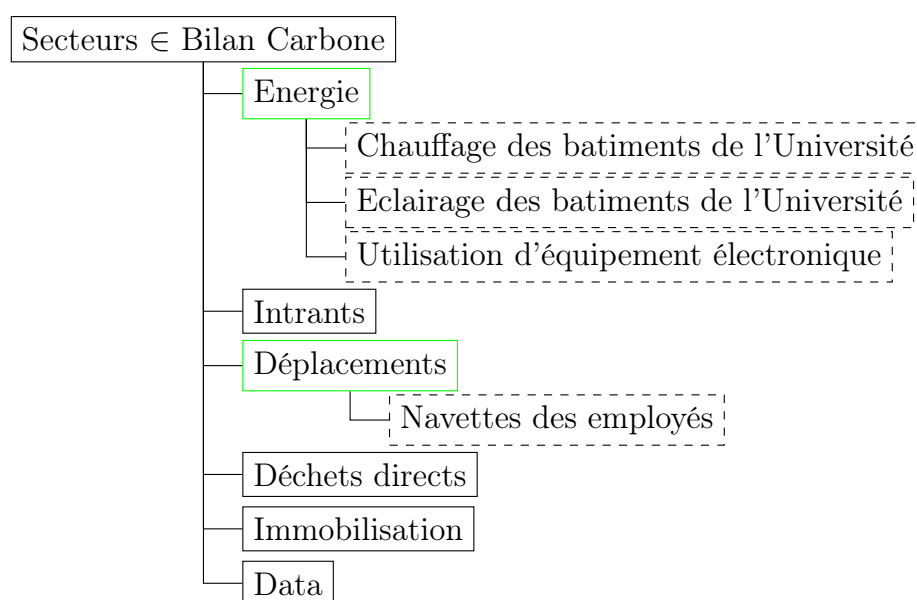
Comme illustré dans l'arbre ci-dessous, les composants du modèle inclus dans l'étude du bilan carbone sont les suivant :

- Chauffage des bâtiments de l'Université ;
- Eclairage des bâtiments de l'Université ;

- Utilisation d'équipement électronique sur le site de l'Université.
- Navettes des employés.

Néanmoins, certains composants ne s'y retrouvent pas :

- Chauffage à domicile des employés en TW ;
- Eclairage à domicile des employés en TW ;
- Utilisation d'équipement à domicile des employés en TW.



Prenant en compte ce qui est inclu dans le calcul du bilan carbone et excluant ce qui n'y est pas, on obtient comme bilan d'émissions d'une journée de télétravail sans prendre en compte les économies de trajet :

Janvier	-847.85 gCO_2e	Juillet	-644.14 gCO_2e
Février	-894.04 gCO_2e	Aout	-645.54 gCO_2e
Mars	-843.04 gCO_2e	Septembre	-672.64 gCO_2e
Avril	-743.14 gCO_2e	Octobre	-754.14 gCO_2e
Mai	-705.34 gCO_2e	Novembre	-823.14 gCO_2e
Juin	-666.14 gCO_2e	Décembre	-828.14 gCO_2e

Si à présent, à titre illustratif, on considère que tous les travailleurs habitant à plus de 15.5 km et qui utilisent une voiture pour se rendre à l'UCLouvain venant à faire une journée de télétravail par semaine durant un an, on aurait une réduction de 364 $kgCO_2e$ par employé concerné, soit une réduction de 819 tCO_2e sur l'année. Ceci représente une diminution de 2% des émissions comptabilisée dans le bilan carbone. Ce résultat est bien évidemment trompeur car il ne prend pas en compte les émissions effectuées au domicile du télétravailleur. On constate donc une capacité très limitée de réduction des émissions grâce au télétravail. Cette diminution est inférieure à 2% du bilan carbone total de l'université.

3.4 Proposition de méthodologie de mise en place de programme de Télé-travail

Différentes étapes sont proposées :

1. Campagne de sensibilisation destinée aux employés portée sur le contrôle des paramètres critiques et des effets rebonds.
2. Etablir de nouvelles enquêtes ciblées sur les paramètres nécessaires au modèle de E.Kitou. Suite à des périodes de bouleversement de l'organisation journalière des employés telle que la période d'épidémie de Covid vécue actuellement, il est nécessaire de sonder à nouveau les employés pour s'assurer d'une cohérence entre la simulation et la réalité.
3. Utiliser les résultats d'enquêtes et les introduire comme paramètres d'entrée du

Web-tool créé par l'Université de Berkeley (22) sur base du modèle de E.Kitou. Ceci apportera des résultats similaires à ceux obtenus dans ce travail lors de l'établissement du scénario déterministe, mis à jour grâce aux enquêtes effectuées.

4. Appliquer des contraintes au TW visant à maîtriser les paramètres critiques et les effets rebonds. Les paramètres sur lesquels l'institution ne peut avoir de pouvoir sont laissés au bon vouloir des employés à qui on continuerait de présenter une campagne de sensibilisation, tandis que les paramètres influençables et maîtrisables doivent être identifiés et une méthode de contrôle de ceux-ci doit être présentée. Par exemple, le fait d'imposer des heures de vidéo-conférence aux heures de travail prédéfinies, permet de limiter la flexibilité horaire apportée par le TW à l'employé qui est à la cause d'utilisation induite d'équipements électroniques ou de trajet induit. Le TW en partie de journée doit évidemment être déconseillé voir remplacé par du TW en journée complète. Un autre exemple consisterait à inciter les employés à choisir leur période de TW en période au climat agréable afin de limiter l'impact du chauffage des domiciles et optimiser la réduction des émissions de l'employé.

Piste d'amélioration

Une première piste d'amélioration à ce travail serait, comme proposé dans le plan d'action ci-dessus, de sonder les employés précisément à propos des paramètres nécessaires au modèle utilisé. Cela permettra d'obtenir des résultats plus proches de la réalité, dont l'analyse serait d'autant plus pertinente. Néanmoins, l'intérêt le plus important ne se trouve pas dans l'estimation exacte des émissions, mais plutôt dans l'impact de la variation des paramètres critiques. Effectuer une analyse probabiliste de ces variations mises à jour sur base de nouvelles enquêtes permettra de percevoir les conditions de possibilité d'une diminution d'émissions des GES par le TW actuelle. L'analyse portée sur ces variations dans ce travail est basée sur des enquêtes datant du début du 21ème siècle dont la pertinence décroît d'années en années.

Une seconde piste d'amélioration serait d'établir une analyse de l'évolution et variation des effets rebonds. Les effets rebonds peuvent varier drastiquement d'un employé à un autre, la situation sociale de celui-ci joue un rôle impactant dans les effets induits du TW. Un employé dont l'entourage est aussi en TW aura d'autant plus d'interactions sociales possibles et donc d'effets induits (trajets, utilisation d'équipement électronique, etc) comparé à une personne esseulée lors de son TW, qui devra attendre le week-end pour avoir des interactions sociales, rendant nuls les effets induits liés à ces interactions. Les effets induits devraient donc être catégorisés et étudiés comme des variables aléatoires ayant leur modèle propre.

Conclusion

L'objectif de ce travail était de définir les conditions de possibilités de réduction des émissions de GES des employés en appliquant un programme de TW à l'UCLouvain. Le TW est donc vu comme étant un outil dont la bonne utilisation permettrait de réduire les résultats du bilan carbone de l'UCLouvain. Il faut donc définir ce qu'est cette "bonne utilisation".

La difficulté fut de déterminer un modèle permettant d'estimer l'impact de la mise en place de TW en englobant exhaustivement toutes les émissions liées aux activités des employés en TW comparées à ceux en NTW. Le modèle utilisé dans ce travail fut déterminé par E.Kitou et A. Horvath et réutilisé dans le cadre de l'UCLouvain.

Les paramètres nécessaires à l'utilisation de ce modèle furent déduits du bilan carbone de l'UCLouvain effectué en 2019 par C. Meyers, de ses données et résultats. Les résultats obtenus indiquent l'existence de la possibilité de réduction des émissions de GES des employés en appliquant un programme de TW. La réduction possible sur le bilan carbone de l'UCLouvain est de l'ordre de grandeur de 2%.

Ces résultats apportent un ordre de grandeur des possibles réductions d'émissions. L'intérêt réel du travail se porte plutôt sur la mise en évidence faite des paramètres critiques dont les valeurs déterminent l'efficacité du TW à réduire le bilan carbone de l'UCLouvain.

Pour finir, un plan d'action de mise en oeuvre d'un programme de TW fut proposé sur base des analyses effectuées lors de l'étude du scénario déterministe.

Avec ce travail, l'UCLouvain peut comprendre la place que prend le TW dans sa politique de réduction de ses émissions de GES. Marié à d'autres plans d'action, le TW pourra montrer son potentiel à condition d'une application exemplaire et rigoureuse, prix à payer pour garantir son efficacité.

Annexe A

Données relatives aux scénarios déterministe et probabiliste

Note :

ppm = page par minute

cpm = copies par minute

n.a = non applicable

Scenario 1	
<i>Component</i>	<i>Selected Variables</i>
Transportation	<ul style="list-style-type: none"> • Passenger vehicle
Electronic Equipment - Office	<ul style="list-style-type: none"> • Desktop • Copier • Printer • Fax machine
Electronic Equipment - Home	<ul style="list-style-type: none"> • Desktop • Copier • Printer • Fax machine • Cordless phone /Answering machine <p>Induced:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Clothes washer • Electric clothes dryer • Dishwasher • Gas range • Gas oven • Digital TV • Compact stereo
Lighting Office	<ul style="list-style-type: none"> • Lighting not controlled by the employee • Small office
Heating and Cooling - Office	<ul style="list-style-type: none"> • Natural gas
Heating and Cooling - Home	<ul style="list-style-type: none"> • Natural gas

FIGURE A.1: Paramètres de base à inclure dans le scénario déterministe et probabiliste
(2)

											Toxic Substances		
	Criteria Air Pollutants				Greenhouse Gases (GHG)			Ozone Precursors			Hazardous Air Pollutants (HAPs)		
	CO	NO _x	SO ₂	PM ₁₀	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	HC	NMVOCS	Aldehydes	Organic Acids	Hg	
Passenger Vehicle Emissions	X	X			X			X					
Urban Transit Bus	X	X		X	X								
Commuter Express Bus	X	X		X	X								
Commuter Rail	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Amtrak (diesel-electric)	X	X	X		X								
Ferry Boat Natural Gas		X		X					X				
Ferry Boat Diesel		X		X					X				
Airplane LTO	X	X	X	X	X	X							
Airplane Cruise	X	X	X		X			X					
Light Rail		X	X		X	X	X					X	
Electricity		X	X		X	X	X					X	
Natural Gas/Oil No.2/LPG	X	X	X	X	X	X	X					X	

FIGURE A.2: Ensemble des émissions considérées par le modèle (2)

Transportation Inputs	Miles Traveled/7-Day Week
Non-telework part	120
1-day telework	99
3-day telework	57
5-day telework	15

FIGURE A.3: Données relatives au transport du scénario déterministe (2)

Office Equipment	<i>On (hrs)</i>	<i>Low-Power (hrs)</i>	<i>Off (hrs)</i>	<i>Active (hrs) (by other employees)</i>
Desktop				
Non-telework	19	61	88	0
1-day telework	15	48	105	0
3-day telework	7	24	40	48
5-day telework	0	0	0	168
Black-and-white laser printer (16-18 ppm)	<i>On (hrs)</i>	<i>Off (hrs)</i>	<i>% personal active use</i>	
Non-telework	129	39	10	n.a.
1-day telework	129	39	10	n.a.
3-day telework	129	39	5	n.a.
5-day telework	129	39	0	n.a.
Copier (21-44 cpm)				
Non-telework	140	28	10	n.a.
1-day telework	140	28	10	n.a.
3-day telework	140	28	10	n.a.
5-day telework	140	28	0	n.a.
Fax				
Non-telework	150	18	10	n.a.
1-day telework	150	18	10	n.a.
3-day telework	150	18	5	n.a.
5-day telework	150	18	0	n.a.

FIGURE A.4: Données relatives aux équipements à l'entreprise du scénario déterministe (2)

Home Equipment	<i>On</i> <i>(hrs)</i>	<i>Low-Power</i> <i>(hrs)</i>	<i>Off</i> <i>(hrs)</i>	<i>Active (hrs)</i> <i>(by others)</i>
Desktop				
Non-telework	4	2	0.8	10
1-day telework	9	4	2	10
3-day telework	18	8	40	10
5-day telework	30	13	70	10
Black-and-white laser printer (16-18 ppm)	<i>On</i> <i>(hrs)</i>	<i>Off</i> <i>(hrs)</i>	<i>% personal</i> <i>active use</i>	
Non-telework	5	163	25%	n.a.
1-day telework	5	163	35%	n.a.
3-day telework	5	163	70%	n.a.
5-day telework	5	163	95%	n.a.
Fax				n.a.
Non-telework	0	0	0	n.a.
1-day telework	0	0	0	n.a.
3-day telework	140	28	80%	n.a.
5-day telework	140	28	95%	n.a.
Cordless phone/ Answering device	<i>On</i> <i>(hrs)</i>	<i>Sleep</i> <i>(hrs)</i>	<i>Charge</i> <i>(hrs)</i>	
Non-telework	1	17	150	n.a.
1-day telework	3	15	150	n.a.
3-day telework	10	8	150	n.a.
5-day telework	17	5	146	n.a.

FIGURE A.5: Données relatives aux équipements à domicile du scénario déterministe (2)

<i>Induced Usage:</i>				
	<i>On (hrs)</i>	<i>Active (hrs)</i>	<i>Sleep (hrs)</i>	<i>Low-power (hrs)</i>
TV				
1-day telework	2	2	0	0
3-day telework	6	6	0	0
5-day telework	10	10	0	0
Stereo system				
1-day telework	3	3	0	0
3-day telework	9	9	0	0
5-day telework	15	15	0	0
	<i>No. of hours/loads</i>	<i>Increase/decrease</i>		
Gas range				
1-day telework	1 hour	increase	n.a.	n.a.
3-day telework	4 hours	increase	n.a.	n.a.
5-day telework	6 hours	increase	n.a.	n.a.
Gas oven				
1-day telework	1 hour	increase	n.a.	n.a.
3-day telework	4 hours	increase	n.a.	n.a.
5-day telework	6 hours	increase	n.a.	n.a.
Dishwasher				
1-day telework	1 load	increase	n.a.	n.a.
3-day telework	3 loads	increase	n.a.	n.a.
5-day telework	4 loads	increase	n.a.	n.a.
Washing machine				
1-day telework	0	-	n.a.	n.a.
3-day telework	1 load	increase	n.a.	n.a.
5-day telework	2 loads	increase	n.a.	n.a.
Electric clothes dryer				
1-day telework	0	-	n.a.	n.a.
3-day telework	1 load	increase	n.a.	n.a.
5-day telework	1 load	increase	n.a.	n.a.

FIGURE A.6: Données relatives à la part d'énergie induite de l'utilisation d'équipements à domicile (2)

Office Heating and Cooling	<i>type of office</i>	<i>size</i>	<i>source of heating</i>	<i>source of cooling</i>
	small	100 ft ²	Natural gas furnace	Electricity, central
	<i>Hours of personal occupancy</i>	<i>Hours others occupy the office</i>		
Non-telework	40	0	n.a.	n.a.
1-day telework	32	0	n.a.	n.a.
3-day telework	16	24	n.a.	n.a.
5-day telework	0	0	n.a.	n.a.
Home Heating and Cooling	<i>type of house</i>		<i>source of heating</i>	<i>source of cooling</i>
	Existing single-family		Natural gas furnace	Electricity, central
	<i>Increase/decrease</i>		<i>Percentage/7-day week</i>	
Non-telework	n.a.		n.a.	n.a.
1-day telework	increase		10%	n.a.
3-day telework	increase		30%	n.a.
5-day telework	increase		50%	n.a.

FIGURE A.7: Données relatives à la climatisation à domicile et à l'entreprise pour le scénario déterministe (2)

Home Lighting	El. Consumption (Watts)	No.of lamps	Type of lamp	Usage/7-day week
Non-telework	60	2 lamps	Incandescent	2 hours
1-day telework	60	2 lamps	Incandescent	5 hours
3-day telework	60	2 lamps	Incandescent	11 hours
5-day telework	60	2 lamps	Incandescent	18 hours
Induced:				
	El. Consumption (Watts)	Type of lighting	Type of room	Usage/7-day week
1-day telework	110	fixture	Family room	1 hour
3-day telework	110	fixture	Family room	3 hours
	95	fixture	Kitchen	3 hours
5-day telework	110	fixture	Family room	5 hours
	95	fixture	Kitchen	5 hours

FIGURE A.8: Données relatives à l'éclairage à domicile pour le scénario déterministe (2)

Office Lighting	<i>type of office</i>	<i>size</i>
	small	100 ft ²
	<i>Hours of personal occupancy</i>	<i>Hours others occupy the office</i>
Non-telework	n.a.	n.a.
1-day telework	32	n.a.
3-day telework	16	24
5-day telework	0	0

FIGURE A.9: Données relatives à l'éclairage à l'entreprise pour le scénario déterministe (2)

Annexe B

Enquête mobilité 2017

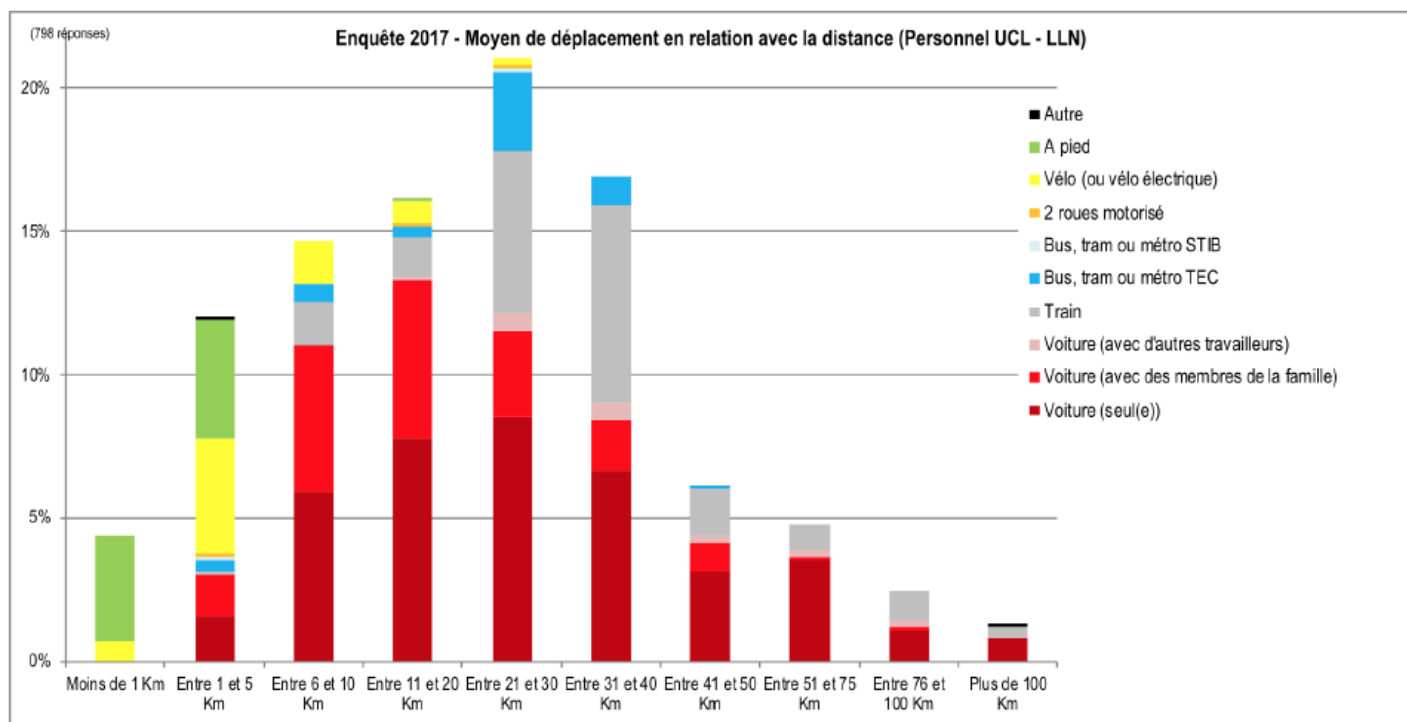


FIGURE B.1: Moyen de déplacement en fonction de la distance du lieu de travail du personnel de l'UCLouvain LLN (1)

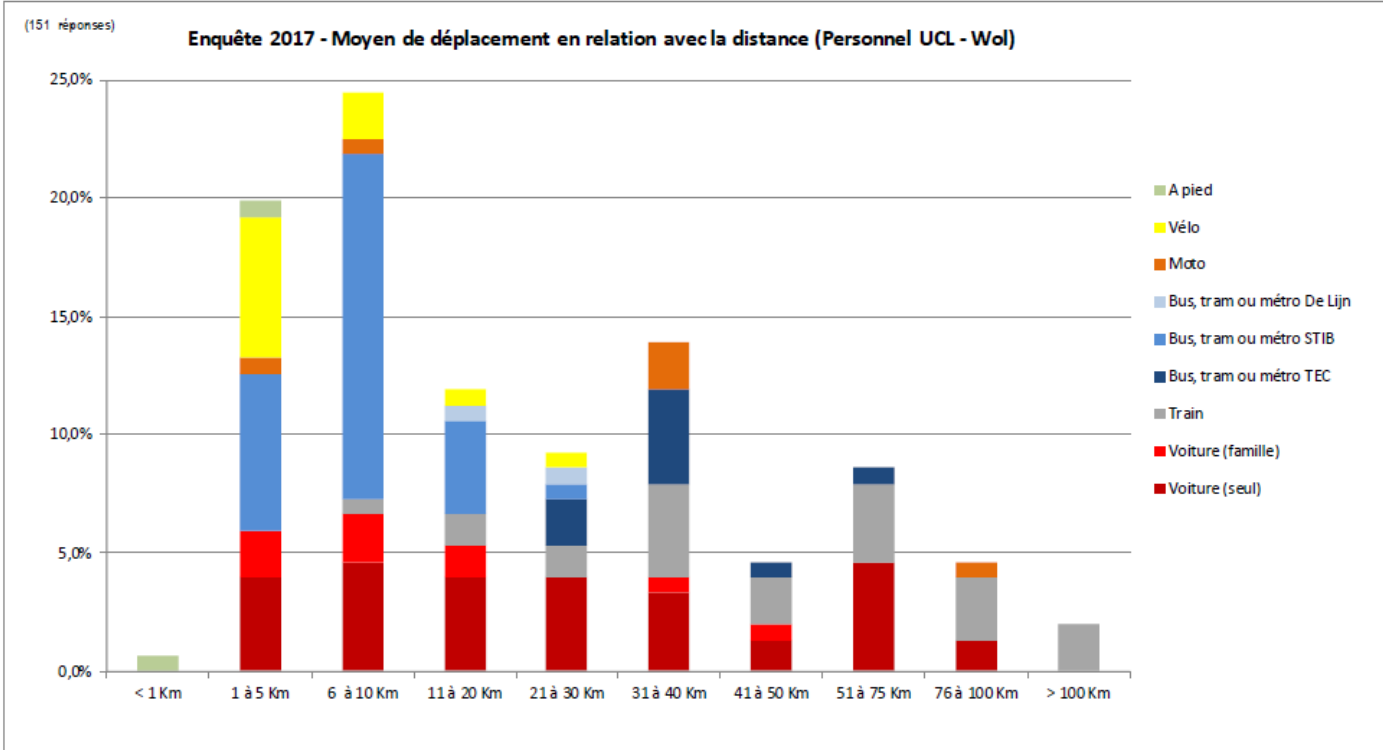


FIGURE B.2: Moyen de déplacement en fonction de la distance du lieu de travail du personnel de l’UCL Woluwe (1)

Bibliographie

- [1] C. Meyers. Bilan Carbone de l'UCLouvain : méthodologie, résultats et plan d'action. *Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve*, 2019.
- [2] A. Kitou, E. Horvath. Energy-Related Emissions from Telework. *Environmental Science Technology*, pages 3467–3475, 2003. University of California.
- [3] P. Zhu and S. Mason. The impact of telecommuting on personal vehicle usage and environmental sustainability. *Environmental Science and Technology*, 11, 2012.
- [4] <http://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/accueil/contenu/index/page/m%C3%A9thodes+de+calcul/siGras/0>. Consulté le 10 août 2020.
- [5] J. Nilles. Development of policy on the telecommunications-transportation tradeoff. *University of Southern California and the National Science Foundation*, Report NSF-RA-5-74-020, 1974.
- [6] H. Asgari. On the impact of telecommuting over Daily Activity / Travel Behavior : A Comprehensive Investigation through Different Telecommuting Patterns. *Florida International University* , 2015.
- [7] J. Nilles. Making telecommuting happen : A guide for telemanagers and telecommuters. *Van Nostrand Reinhold, New York*, 1994.
- [8] Fitzgerald and Halliday. VDOT/DRPT tele-work study. *Technical memorandum prepared for Virginia Department of Transportation*, 2001.

-
- [9] K. Turnbull. Telecommuting programs in texas, case studies. *Texas Transportation Institute*, 1996. report 1446-F study number 0-1446.
- [10] K. Shafizadeh. The costs and benefits of telecommuting : a review and evaluation of micro-scale studies and promotional literature. *Institue of transportation studies, University of California*, 2000. report UCD-ITS-RR-00-24.
- [11] G. Gordon. Pilot project features activity-tracking software. *Telecommuting Review*, 1995.
- [12] Parlement wallon. Décret Climat. , Février 2014.
- [13] S. Handy, P. Mokhtarian. Transportation res.a. pages 283–302, 1995.
- [14] California Energy Commision. *California’s Power Content Label*, March 20, 2003. http://www.energy.ca.gov/consumer/power_content_label.html.
- [15] J. Pratt. Costs/Benefits of Teleworking to Manage Work/Life Responsibilities. *American National Telework Survey, International Telework Association and Council*, 1999.
- [16] National Transportation Statistics 2000. *U.S. Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics*, April 2002. <http://www.bts.gov/btsprod/nts/>.
- [17] Federal and California Exhaust and Evaporative Emission Standards for Light-duty Vehicules and Light-Duty Trucks 2001. *U.S. Environmental Protection Agency*, Avril 2003. <http://www.epa.gov/otaq/stds-id.htm>.
- [18] B. Nordman, M. Piette, B. Pon, and K. Kinney. It’s Midnight...Is Your Copier On? Energy Star Copier Performance. *Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory*, 1998.
- [19] Energy Star Purchasing Initiative ; Online Calculator/Database. *U.S. Environmental*

Protection Agency, Lawrence Berkeley National Laboratory, Avril 2002. <http://www.epa.gov/appdstar/purchasing/calculators>.

[20] Telework and Environment ; White paper sponsored by National Environmental Policy Institute. *Washington DC*, 1999.

[21] B. Tuffin. La simulation de monte carlo. *Edition Hermès*.

[22] <http://cgdm.berkeley.edu/telework/> , consulté en mai 2020.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl