

Projet de Fin d'Études (PFE) 2023-2024

L'évolution dans le temps des émissions de CO₂ liées aux mobilités domicile-travail des actifs

Exemple du quartier de la défense à Paris



(Le parisien, 2020)

Sous la direction de
Mindjid Maizia

Auteure :
Marzena Grosse

**L'évolution dans le temps des émissions de CO2 liées
aux mobilités domicile-travail des actifs
Exemple du quartier de la défense à Paris**

**Directeur de recherche
Mindjid MAIZIA**

**Auteure
Marzena GROSSE**

**Année
2024**

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

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance envers Mindjid MAIZIA pour m'avoir soutenue et appuyée durant la réalisation de ce projet. Son encadrement attentif, ses conseils éclairés et son expertise ont été des éléments clés dans le développement de ce travail de recherche. Sa disponibilité et son dévouement ont grandement facilité mon parcours académique, et j'ai bénéficié de sa précieuse guidance à chaque étape du processus.

Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude envers ma famille pour leur soutien inébranlable et leur contribution précieuse à l'achèvement de ce projet. Leur encouragement constant et leur compréhension ont été des piliers essentiels tout au long de ce parcours académique exigeant. Leur présence et leur soutien moral m'ont apporté la force nécessaire pour surmonter les défis inhérents à ce projet.

Table des matières

I.	Introduction	Erreur ! Signet non défini.
II.	État de l’art	10
1.	Émissions de CO2 liées aux transports	10
2.	Méthode de calcul des émissions de CO2	12
3.	Conséquences des émissions de CO2	13
4.	Initiatives prises pour réduire ces émissions	15
5.	Impact du télétravail sur les émissions de CO2	18
6.	Conclusion de l’état de l’art	19
III.	Pistes à explorer	19
IV.	Modélisation	22
1.	Méthodologie	22
2.	Simulation	28
A.	Ordonnancement 1 : Voitures électriques	28
B.	Ordonnancement 2 : Transports en commun	29
C.	Ordonnancement 3 : Métro et Tram (facteurs d’émissions les plus bas)	30
V.	Conclusion	31
VI.	Bibliographie	32

I. Introduction

Les conséquences environnementales de la concentration des activités économiques dans les grands centres d'affaires comme Paris-La Défense sont préoccupantes. Les émissions de gaz à effet de serre provenant des déplacements quotidiens des travailleurs et des infrastructures de ces centres contribuent grandement à la dégradation de l'environnement et au changement climatique. En effet les grands centres d'affaires ont la particularité d'avoir une empreinte carbone importante, notamment en raison de la concentration d'activités économiques, des déplacements quotidiens des travailleurs et des émissions de gaz à effet de serre produites par leurs infrastructures et leurs bâtiments. Paris-La Défense est le quatrième plus grand centre d'affaires du monde et le deuxième en Europe, abritant environ 160 000 salariés et 3 600 entreprises, dont 1 500 sièges sociaux. Ce quartier s'étend autour de la Grande Arche de la Défense et se situe au total sur quatre villes différentes: Puteaux, Nanterre, Courbevoie et La Garenne Colombes.



Figure 1 : Plan de Paris la Défense (plandeparis.info, 2023)

La production de CO₂ est un phénomène qui concerne toutes les activités industrielles qui reposent sur l'utilisation de sources d'énergie fossiles. Cette production résulte de la combustion de matières organiques telles que le bois, le charbon ou le pétrole. Lorsque ces matières sont brûlées, elles libèrent des atomes de carbone qui se combinent avec des atomes d'oxygène pour former des molécules de dioxyde de carbone (CO₂). Les émissions de CO₂ sont des rejets de ce gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Le dioxyde de carbone est le deuxième gaz à effet de serre le plus important, représentant environ 26% des émissions totales de GES. Il est précédé seulement par la vapeur d'eau qui représente environ 60% des émissions. Ces émissions peuvent avoir différentes origines, mais celles étudiées dans le cadre de ce sujet sont exclusivement d'origine anthropique, c'est-à-dire qu'elles sont causées par les activités humaines telles que les déplacements liés au transport. Ainsi, la réduction des émissions de CO₂ est devenue un enjeu majeur pour lutter contre le changement climatique.

Au niveau des différents types de transport, on peut distinguer les transports en communs des transports individuels. A Paris la Défense, les transports les plus utilisés par les employés sont les transports en commun, utilisés par 65% des employés. Sachant que la moyenne en France est de 16%, le taux dans ce quartier s'avère être très élevé. Les transports en commun ont donc une place prépondérante à Paris La Défense et cela a de nombreux avantages en termes d'environnement, de congestion urbaine et de qualité de vie des salariés. En effet, les transports en commun permettent de limiter les émissions de gaz à effet de serre, notamment celles liées aux voitures individuelles, ce qui contribue à réduire l'empreinte carbone du quartier d'affaires. De plus, en évitant les embouteillages sur les routes, les transports en commun réduisent les temps de trajet et améliorent la qualité de vie des salariés en limitant le stress lié aux déplacements domicile-travail. Parmi les employés utilisant les transports en commun pour leur mobilité domicile-travail 40 % déclarent emprunter régulièrement le RER, 44% le métro et 15% le bus. Ce haut pourcentage est dû au fait que seulement moins de 5% des salariés vivent sur place et que, dans ce quartier, le périphérique est extrêmement bouché, surtout aux heures de pointe, ce qui rend presque impossible l'utilisation d'une voiture personnelle pour les déplacements domicile-travail sur ce site. Cependant ce pourcentage a subi une diminution suite à la crise du Covid-19 et l'augmentation du télétravail qui a suivi. Auparavant 71% des employés de Paris-La Défense déclaraient utiliser les transports en commun, ce qui représente une baisse de 6% (en France la moyenne était de 21%, soit une baisse de 5%).

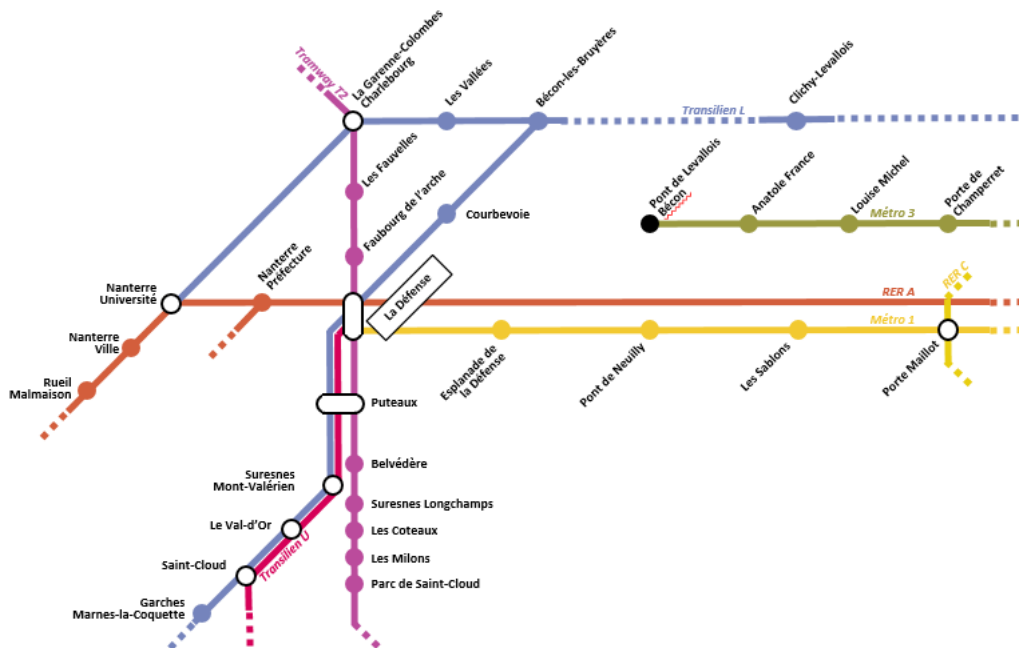


Figure 2 : Plan des transports en commun de Paris La Défense (parisladefense.com, 2023)

Un autre facteur qui a permis la diminution des émissions de GES est le développement du télétravail. Le développement du télétravail, en plus de contribuer à la réduction des émissions de GES, a également eu des impacts sur la qualité de vie des travailleurs. Effectivement, travailler de chez soi permet de réduire les temps de transport, ce qui se traduit par des économies de temps et d'argent pour les employés, ainsi qu'une diminution du stress lié aux trajets. De plus, le télétravail permet une meilleure conciliation entre la vie professionnelle et la vie personnelle, en permettant

aux employés de travailler depuis leur domicile, tout en prenant soin de leur famille et de leurs autres engagements personnels. Cette nouvelle forme de travail était déjà en développement avant la crise sanitaire de 2020 (7.2% des employés pratiquaient le télétravail en 2019), mais a connu une énorme hausse à la suite de cette période (30% en 2020). Depuis lors, bien qu'il reste nettement plus élevé qu'avant la crise sanitaire, ce taux a tout de même légèrement baissé pour atteindre 22% en 2021, montrant ainsi que cette période a entraîné un changement significatif dans les conditions de travail des employés.

Ce sujet de PFE possède donc un objectif lié à la mesure de la quantité de CO₂ émises au niveau des transports par les actifs à Paris la Défense en fonction du temps. Une problématique en lien avec ce sujet est : Sachant que les employés travaillant à Paris la Défense prennent en majorité les transports en commun, comment est-il possible de diminuer encore plus leurs émissions de CO₂ au niveau de l'utilisation des transports ? Avec toutes les mesures mises en place et objectifs fixés, comment pourraient évoluer les émissions de CO₂ liées aux transports de Paris la Défense dans les prochaines années ? Nous chercherons à estimer et modéliser l'évolution de l'utilisation des transports et des émissions de CO₂ qui leurs sont liées.

II. État de l'art

Pour mieux comprendre les notions liées aux émissions de CO₂ des transports sur les mobilités domicile-travail à Paris La Défense il convient d'effectuer un état de l'art.

1. Émissions de CO₂ liées aux transports

Le transport est une infrastructure essentielle au développement économique, mais il contribue de manière significative aux émissions de CO₂ en raison de la consommation élevée de combustibles fossiles. Un nombre croissant d'études ont examiné la relation entre les émissions de CO₂ provenant de la construction d'infrastructures de transport et l'utilisation de ces infrastructures. Les émissions provenant de la construction des infrastructures de transport sont principalement dues à l'utilisation d'équipements lourds à forte consommation de combustibles fossiles, de véhicules de construction et à l'application de grandes quantités de béton et d'asphalte. Les véhicules de construction comprennent les bulldozers, les pelleteuses, les niveleuses et les camions tout-terrain.

L'empreinte carbone de ces activités liées aux infrastructures de transport a été estimée cinq fois plus faible dans les pays en développement que dans les pays développés. D'autres études portant sur des pays en développement tels que la Chine ont montré que les activités de transport telles que le secteur du fret et l'utilisation d'autres routes augmentent les émissions nationales, qui sont en constante augmentation et pourraient doubler avant le milieu du siècle. De plus, l'augmentation de la consommation de carburant dans le secteur des transports accroît les émissions et réduit la qualité de l'environnement. Toutefois, un développement axé sur les transports en commun associé à une réduction des émissions de carbone, comme les stratégies de

transport actif peut constituer un moyen efficace de réduire l'empreinte environnementale des infrastructures de transport. Par conséquent, l'efficacité des transports peut limiter la croissance des émissions de CO₂ grâce à l'amélioration de la structure des transports, de l'infrastructure du trafic et du progrès technologique.

Au fil du temps, les besoins et les demandes en matière de transport continueront d'augmenter. Cependant, il est important de reconnaître que les infrastructures de transport actuelles ne pourront pas répondre à cette demande croissante à long terme, car elles atteindront rapidement leur capacité maximale et deviendront saturées. En conséquence, les coûts associés au transport augmenteront de manière significative, ce qui rendra l'utilisation des transports moins pratique et moins rentable.

De plus, il est impératif de considérer les conséquences environnementales de l'utilisation des transports, notamment en termes d'émissions de CO₂. Il est donc primordial de mettre en place des méthodes et des technologies qui permettent de préserver l'environnement tout en continuant à utiliser les transports. Il est donc nécessaire d'anticiper les futurs besoins en transport tout en prenant en compte les conséquences environnementales afin de garantir un avenir durable pour les générations futures [1].

En France le taux de CO₂ émis par les transports fait l'objet de plusieurs recherches au niveau gouvernemental, notamment avec les travaux du ministère MEEDDM et de l'agence ADEME. Selon ces instituts, le total de CO₂ émis par tous les types de transport en France est estimé à 127 Mt (équivalent à 33% des émissions globales en France). Par ailleurs, le secteur des transports est responsable à lui seul de 33% des émissions de GES global, mais la quantité produite varie selon le type de transport que l'on utilise. En effet, l'utilisation d'un véhicule particulier représente 60% des émissions totales dans ce secteur, alors que l'utilisation des transports en commun représente seulement 4% (2% pour le train et 2% pour le bus) de ces émissions. En termes d'équivalent carbone, le train est environ 20 fois moins polluant que la voiture (<10 gCO₂e par km/passager contre environ 200 gCO₂e pour la voiture) et le bus environ 3 fois moins (68 gCO₂E km/passager=)[2]. En plus d'être le premier secteur contributeur aux émissions de CO₂, le secteur des transports s'avère aussi être le seul dont la production de CO₂ augmente d'année en année depuis 1990, en France comme en Europe.

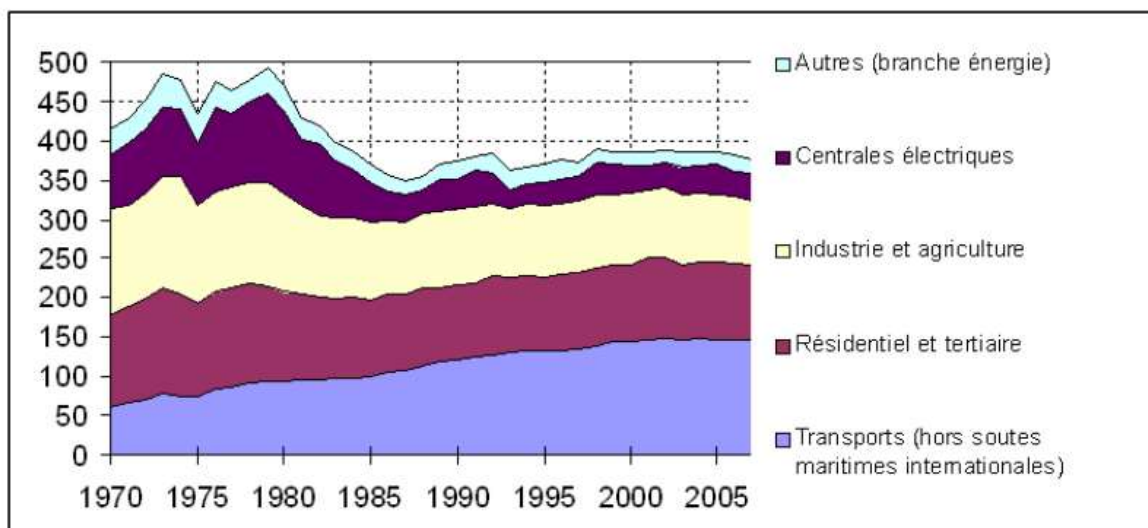


Figure 3 : Émissions de CO₂ émises par secteur chaque année en France (en millions de tonnes de CO₂) (ParisTech, 2010)

2. Méthode de calcul des émissions de CO₂

Selon l'article R229-49, le ministre de l'Environnement a créé un organisme d'expertise appelé "pôle de la coordination nationale", dont il décide de la composition et des modalités de fonctionnement [5]. Ce pôle est chargé de plusieurs missions, notamment celle de développer une méthodologie pour établir les bilans d'émissions de gaz à effet de serre et les plans de transition pour les organisations soumises à des obligations spécifiques. Cette méthodologie est publiée sur le site du ministère de l'Environnement. Le pôle de coordination nationale est également responsable de définir les principes de calcul des équivalents de tonnes de dioxyde de carbone et les facteurs d'émissions à utiliser. Il prépare un modèle pour présenter le bilan des émissions de gaz à effet de serre, qui doit être approuvé par le ministre de l'Environnement. Enfin, il suit la mise en œuvre du dispositif des bilans d'émissions de gaz à effet de serre et peut faire des recommandations sur son évolution si nécessaire.

Les principes de valorisation des émissions de gaz à effet de serre résultant de la combustion d'une source d'énergie ont été établis dans le cadre des travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) [3][4]. Les méthodes de calcul nationales et internationales qui en découlent sont toutes basées sur le même principe, qui consiste à convertir la consommation d'une quantité de source d'énergie en dioxyde de carbone ou en équivalent dioxyde de carbone (lorsque d'autres gaz à effet de serre que le CO₂ sont pris en compte) en utilisant un facteur d'émission spécifique à l'élément consommé.

Le décret n° 2011-1336 [6] expose les différentes méthodes existantes que l'on peut utiliser pour calculer les émissions de CO₂ des prestations de transport. Considérant que l'on s'intéresse ici au transport en commun, la méthode utilisée sera celle où la consommation de source d'énergie est connue et le moyen de transport concerne plusieurs bénéficiaires :

Information CO2 (empreinte carbone) = consommation de source d'énergie x [nombre d'unités transportées pour la prestation / nombre d'unités dans le moyen de transport] x facteur d'émission

Cette formule permet de calculer l'impact en termes d'émissions de CO2 d'une prestation de transport.

- La consommation de source d'énergie correspond à la quantité d'énergie utilisée pour effectuer la prestation de transport. Elle est exprimée en unité d'énergie, telle que le litre de carburant consommé pour un véhicule à essence.
- Le nombre d'unités transportées pour la prestation correspond au nombre d'objets, de personnes ou de quantités de matière transportées. Cette valeur est souvent exprimée en tonnes-kilomètres, ce qui représente la quantité de marchandise transportée sur une distance donnée.
- Le nombre d'unités dans le moyen de transport correspond à la capacité du moyen de transport utilisé pour effectuer la prestation. Cette valeur est souvent exprimée en tonnes, ce qui représente la capacité de charge maximale du véhicule.
- Le facteur d'émission correspond à la quantité d'émissions de CO2 émise pour chaque unité d'énergie consommée. Il est exprimé en grammes de CO2 par unité d'énergie, telle que le litre de carburant.

3. Conséquences des émissions de CO2

Certaines études ont examiné l'impact des émissions de CO2 du secteur des transports sur la dégradation de l'environnement et la santé humaine. Ces études soulignent la nécessité d'un système de transport décarboné qui atténue le changement climatique ou s'y adapte et qui améliore la santé humaine en réduisant l'exposition à la pollution atmosphérique. Bien que de plus en plus d'études aient examiné les liens entre les transports, la santé et le bien-être, la façon dont les infrastructures de transport influent sur la santé et le bien-être est encore très mal comprise [7].

Les émissions de CO2 ont des conséquences néfastes sur notre système et notre planète, notamment au niveau de la détérioration de l'environnement, de l'augmentation de la production et de la diffusion de polluants. En effet, le CO2 est un gaz à effet de serre qui piège la chaleur dans l'atmosphère et contribue au réchauffement climatique. Les émissions de CO2 sont donc l'une des principales causes du changement climatique, ce qui comprend une augmentation des températures, des événements météorologiques extrêmes tels que des tempêtes et des inondations, une fonte des glaciers et des calottes glaciaires, ainsi qu'une élévation du niveau de la mer, ainsi qu'un risque potentiel pour la vie des êtres vivants. L'ozone et la qualité de l'air sont également affectés par ces émissions, entraînant ainsi une réduction de l'espérance de vie et une mortalité accrue chez les êtres vivants [8]. De plus, l'augmentation du taux de CO2 dans l'air mène

à une acidification des océans. Le CO₂ absorbé par les océans réagit avec l'eau de mer pour former de l'acide carbonique, ce qui diminue le pH de l'eau. Cette acidification des océans peut avoir des effets néfastes sur les organismes marins tels que les coraux et les mollusques, ce qui peut perturber les écosystèmes océaniques. Aussi, les changements climatiques causés par les émissions de CO₂ peuvent affecter les habitats naturels des plantes et des animaux, entraînant une perte de biodiversité. Les écosystèmes peuvent également être perturbés par des événements météorologiques extrêmes tels que des incendies de forêt, des sécheresses et des inondations [8].

La pollution atmosphérique est aussi associée à diverses maladies telles que les maladies cardiovasculaires, le cancer, les maladies respiratoires chroniques et le diabète sucré. De plus, la santé mentale, la grande pauvreté et les conflits violents sont liés au changement climatique, qui menace la santé humaine et l'espérance de vie. Par ailleurs, ces émissions sont directement liées à une augmentation des taux de mortalité et d'hospitalisation pour les maladies respiratoires et cardiovasculaires, indépendamment de l'exposition à celles-ci. L'option la plus efficace pour améliorer la santé et les revenus des individus est l'utilisation efficace des énergies renouvelables [1].

Les augmentations anthropiques de CO₂ ont des effets qui s'étendent bien au-delà de 2100. En effet, une fraction considérable du carbone émis à ce jour et au cours des 100 prochaines années restera dans l'atmosphère pendant des dizaines, voire des centaines de milliers d'années. Le long temps de séjour d'une perturbation anthropique du CO₂ dans l'atmosphère, combiné à l'inertie du système climatique, implique que les émissions passées, présentes et futures engagent la planète dans un changement climatique irréversible à long terme. Par conséquent, de nombreuses caractéristiques essentielles du changement climatique futur sont relativement certaines à long terme, même si le moment précis où elles se produiront est incertain.

Depuis 1990, les cinq rapports d'évaluation du Groupe de travail I (GTI) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ont évalué les projections du changement climatique et de ses impacts qui se sont concentrés en grande partie sur le XXI^e siècle. L'intérêt initial pour le changement climatique dû au forçage des gaz à effet de serre (GES) après le XXI^e siècle est né de la reconnaissance du fait que le cycle du carbone et le système climatique ont une grande inertie, de sorte que même si les émissions de carbone sont stabilisées ou réduites, les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère et les températures de surface resteront élevées et le niveau de la mer continuera d'augmenter pendant des millénaires [9]. Il en résulte qu'en l'absence d'un piégeage et d'un stockage efficaces et à grande échelle du carbone en suspension dans l'air, les émissions de carbone qui ont déjà eu lieu ou qui auront lieu dans un avenir proche entraînent un engagement en faveur du changement climatique qui sera irréversible sur des échelles de temps allant de plusieurs siècles à plusieurs millénaires, voire plus.

Plus récemment, le cinquième rapport d'évaluation du GIEC (AR5) a évalué les preuves que les émissions cumulées de CO₂ contrôlent l'ampleur (mais pas nécessairement la vitesse) du réchauffement à long terme, facilitant ainsi l'identification de quotas d'émissions qui limiteraient le

réchauffement planétaire à l'objectif de température prescrit par une politique climatique spécifique [9].

La synthèse des résultats des modèles du cycle du carbone, du climat et de la glace de terre montrent que les perturbations humaines des concentrations de GES produisent un engagement en matière de changement climatique qui dure plusieurs millénaires [9]. En particulier, 20 à 50 % de la fraction atmosphérique des émissions de CO₂ anthropiques libérées au cours des 100 prochaines années reste dans l'atmosphère en l'an 3000 et 60 à 70 % de l'anomalie maximale de la température de surface et près de 100 % de l'élévation du niveau de la mer résultant d'un scénario d'émission donné restent présents après 10 000 ans. Si les émissions de CO₂ se poursuivent sans contrôle, le CO₂ libéré au cours de ce siècle engagera la Terre et ses habitants dans un régime climatique entièrement nouveau.

4. Initiatives prises pour réduire ces émissions

Le gouvernement cherche à réduire ces émissions en prenant de nombreuses initiatives, comme par exemple :

- Prime à la conversion : Le gouvernement a mis en place une prime à la conversion pour encourager les propriétaires de voitures anciennes à les remplacer par des véhicules moins polluants, notamment des véhicules électriques. Cette prime a été mise en place en France en 2018. Elle a été annoncée en novembre 2017 dans le cadre du Plan Climat présenté par le gouvernement français, et est entrée en vigueur le 1er janvier 2018. Depuis sa mise en place, elle a été prolongée plusieurs fois et a connu des modifications dans ses critères d'éligibilité et ses montants. Elle est actuellement en vigueur et fait partie des mesures incitatives pour encourager la transition vers des modes de transport plus durables. Cette prime a pour objectif de retirer du marché des voitures anciennes et polluantes pour les remplacer par des véhicules plus récents et plus respectueux de l'environnement. Pour bénéficier de la prime à la conversion, le propriétaire doit posséder un véhicule ancien qui émet plus de 117 g de CO₂/km et qui doit être mis à la casse. Le propriétaire peut alors bénéficier d'une prime pour l'achat d'un véhicule moins polluant, neuf ou d'occasion, qui émet moins de 117 g de CO₂/km. Le montant de la prime dépend du type de véhicule acheté et des revenus du propriétaire. La prime peut aller jusqu'à 5 000 euros pour l'achat d'un véhicule électrique neuf pour les ménages modestes et jusqu'à 2 500 euros pour l'achat d'un véhicule thermique d'occasion pour les ménages modestes. Le financement de cette prime est assuré par l'Agence de services et de paiement (ASP) et est soutenu par le fonds de transition énergétique (FTE) créé pour encourager la transition vers des modes de transport plus durables. Depuis sa mise en place en 2018, la prime à la conversion a été un succès en France. Environ 600 000 demandes ont été déposées, permettant le retrait de plus de 500

000 véhicules polluants de la circulation et l'achat de plus de 400 000 véhicules plus propres [10] [11].

- **Bonus écologique :** Le gouvernement français a également mis en place un bonus écologique pour encourager l'achat de véhicules électriques et hybrides rechargeables. Ce bonus a été mis en place pour la première fois en France en 2008, dans le cadre du Grenelle de l'Environnement, qui représente une série de mesures prises par le gouvernement français pour lutter contre le changement climatique et la pollution. Depuis sa mise en place initiale, le bonus écologique a connu plusieurs modifications dans ses critères d'éligibilité et ses montants, notamment pour encourager l'achat de véhicules électriques et hybrides rechargeables. La version actuelle du bonus écologique est en vigueur depuis le 1er janvier 2020, avec des montants et des critères d'éligibilité qui ont été mis à jour pour tenir compte de l'évolution de la technologie des véhicules électriques et hybrides rechargeables. Les véhicules éligibles au bonus écologique doivent répondre à certains critères, notamment en termes d'émissions de CO₂, d'autonomie pour les véhicules électriques, de capacité de la batterie, etc. Les critères peuvent varier en fonction du type de véhicule. Le montant du bonus varie en fonction du type de véhicule et des caractéristiques du véhicule, comme sa capacité de batterie pour les véhicules électriques. Pour l'achat d'un véhicule électrique, le bonus peut aller jusqu'à 7 000 euros, tandis que pour l'achat d'un véhicule hybride rechargeable, le bonus peut aller jusqu'à 2 000 euros. Comme pour la prime à la conversion, le financement du bonus écologique est assuré par l'Agence de services et de paiement (ASP) et est soutenu par le fonds de transition énergétique (FTE). Depuis sa mise en place, le bonus écologique a contribué à stimuler les ventes de véhicules électriques et hybrides rechargeables en France. En 2021, près de 150 000 véhicules électriques et hybrides rechargeables ont été immatriculés en France, ce qui représente une augmentation de plus de 50 % par rapport à 2020 [10].
- **Zones à faibles émissions (ZFE) :** Les ZFE sont des zones où seuls les véhicules les moins polluants sont autorisés à circuler. Le gouvernement a encouragé la création de ZFE dans les grandes villes pour réduire les émissions de CO₂ liées aux transports. Ces zones sont définies géographiquement par les autorités locales. Elles sont destinées à réduire les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques dans les zones urbaines densément peuplées. En France, la création de ZFE est encouragée par le gouvernement afin de lutter contre la pollution atmosphérique et le changement climatique. Plusieurs villes, comme Paris, Lyon, Lille et Grenoble, ont déjà mis en place des ZFE pour limiter la circulation des véhicules les plus polluants, en particulier les véhicules diesel. Les règles pour l'entrée dans une ZFE varient selon la ville et la zone concernée, mais généralement seuls les véhicules répondant à certaines normes environnementales peuvent y circuler. Par exemple, à Paris, seuls les véhicules Crit'Air 0 à 3, qui ont une vignette Crit'Air verte, sont autorisés à circuler dans la zone à faibles émissions (ZFE) créée en juin 2021 [10].

- **Plan Vélo :** Le gouvernement a lancé un plan national pour développer les infrastructures cyclables en France. Le Plan Vélo est une initiative du gouvernement français visant à développer les infrastructures cyclables en France. Il a été lancé en septembre 2018 dans le cadre de la loi d'orientation des mobilités. L'objectif est de doubler le nombre de déplacements à vélo d'ici 2024, en encourageant les Français à utiliser davantage ce mode de transport écologique. Pour atteindre cet objectif ambitieux, le plan Vélo prévoit plusieurs mesures concrètes. Tout d'abord, il encourage la création de nouvelles pistes cyclables dans les villes et les zones urbaines, ainsi que la rénovation des infrastructures existantes. Le plan prévoit également le développement des systèmes de vélo en libre-service pour faciliter l'accès au vélo dans les grandes villes. Le gouvernement encourage également l'utilisation du vélo pour les trajets domicile-travail, en offrant des avantages fiscaux pour les employeurs qui encouragent leurs employés à utiliser le vélo pour se rendre au travail [11].
- **Investissements dans les transports en commun :** Le gouvernement français a investi massivement dans les transports en commun pour encourager leur utilisation et réduire les émissions de CO2 liées aux déplacements individuels. Ces investissements visent à améliorer les infrastructures existantes et à en créer de nouvelles pour répondre aux besoins de la population en matière de mobilité. Les investissements dans les transports en commun en France sont financés par l'État, les collectivités territoriales et les entreprises de transport public et ont pour objectif d'augmenter l'offre de transports en commun, d'améliorer la qualité des services et de renouveler le matériel roulant. Ces investissements incluent l'extension des réseaux de métro, de tramway et de bus, ainsi que l'amélioration de leur fréquence et de leur qualité de service. Par exemple, dans la région Île-de-France, le réseau de métro parisien a été étendu avec la création de nouvelles lignes (lignes 14 et 15) et l'extension des lignes existantes. De même, le réseau de tramway a été développé avec la création de nouvelles lignes dans les villes de Nantes, Bordeaux et Montpellier. De plus, ils comprennent également la modernisation du matériel roulant, avec l'achat de nouveaux trains, bus et tramways plus écologiques et plus efficaces en termes d'émissions de CO2 [12]. Par exemple, en 2019, la RATP a commandé 800 bus électriques pour remplacer progressivement sa flotte de bus diesel. Enfin, les investissements dans les transports en commun sont également destinés à améliorer l'intermodalité, c'est-à-dire la facilité de passage d'un mode de transport à un autre. Cela comprend la mise en place de correspondances optimisées entre les différents modes de transport, comme le tramway, le bus et le métro, ainsi que l'intégration des services de mobilité partagée, tels que les vélos en libre-service et les voitures électriques en autopartage. Au total, les investissements dans les transports en commun en France représentent plusieurs milliards d'euros chaque année, reflétant l'engagement du gouvernement et des collectivités territoriales à améliorer la mobilité durable et à réduire les émissions de CO2 liées aux déplacements individuels.

5. Impact du télétravail sur les émissions de CO2

Le monde actuel cherche à combiner l'innovation technologique et les changements de comportement afin de réduire les émissions sociétales. Les organes politiques, administratifs et scientifiques nationaux et internationaux suggèrent que l'humanité doit examiner les technologies utilisées dans la vie de tous les jours pour devenir plus durable. La durabilité étant définie comme le principe selon lequel nos actions d'aujourd'hui ne limitent pas l'éventail des options économiques, sociales et environnementales offertes aux générations futures, toutes les activités doivent sans doute être prises en compte et classées par ordre de priorité en fonction de leur impact [13]. Les technologies futures capables de combler le vide en matière d'émissions, telles que les pompes à chaleur et le stockage du carbone, existent bel et bien, même si, à l'instar des énergies renouvelables et des véhicules électriques, elles ne peuvent pas être mises en œuvre immédiatement. Cela est dû à des questions telles que le développement des produits, les limitations de l'infrastructure, la réticence des premiers utilisateurs et le coût initial élevé. Ce qui peut cependant être mis en œuvre immédiatement est la technologie de l'information. Utilisées de manière innovante pour modifier les comportements dans la façon dont nous travaillons, il est suggéré que le travail à distance facilité par les technologies de l'information peut entraîner une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre.

Un certain nombre d'évolutions majeures ont affecté le marché du travail au cours des dernières décennies, et ont notamment eu tendance à modifier les schémas de travail quotidien en termes d'horaire et de lieu de travail. Les changements dans la journée de travail et, en particulier, dans les lieux de travail (comme dans le cas du télétravail) peuvent potentiellement contribuer à une stratégie de gestion de la demande de transport afin de réduire les embouteillages et les impacts environnementaux négatifs du transport tels que les émissions de gaz à effet de serre (GES). Néanmoins, les études sur le télétravail tendent à identifier une série d'effets de rebond, tels que l'arbitrage entre les déplacements domicile-travail et les déplacements non professionnels, ou le déménagement résidentiel [15].

De plus, la crise sanitaire de 2020 a eu un impact significatif sur les émissions de CO2 des transports en France. La pandémie a entraîné une baisse importante de l'activité économique et de la mobilité des personnes, ce qui a réduit les émissions de CO2 des transports en France. Selon les données du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, les émissions de CO2 des transports en France ont baissé de 17% en 2020 par rapport à 2019 [14]. La baisse des émissions de CO2 des transports a eu lieu grâce à plusieurs facteurs tels que le confinement, les restrictions de déplacement mais surtout le recours accru au télétravail et la baisse de l'activité économique. Ces mesures ont réduit la demande de transport et donc les émissions de CO2 liées aux déplacements.

Une étude menée par le cabinet de conseil Carbone 4 en 2020 a évalué l'impact du télétravail sur les émissions de CO2 liées aux trajets domicile-travail dans la région Île-de-France, qui comprend Paris-La Défense. Les résultats ont montré que si 40% des travailleurs en Île-de-France pratiquent le

télétravail un jour par semaine, cela permettrait de réduire les émissions de CO2 liées aux trajets domicile-travail de 3,3 millions de tonnes de CO2 par an, soit l'équivalent des émissions annuelles de 1,4 million de voitures.

Les principales conclusions sont basées sur la modélisation par équations structurelles (SEM) mettant en œuvre l'analyse des trajectoires et soulignent notamment les effets du travail à domicile sur le comportement en matière de déplacements et les émissions de CO2 qui y sont liées [16]. Les résultats montrent que les personnes qui travaillent à domicile parcourent plus de kilomètres au total pour leurs déplacements non professionnels les jours de semaine. Ainsi, les niveaux d'émission de CO2 correspondant aux déplacements hebdomadaires totaux des travailleurs à domicile sont plus élevés que pour ceux qui travaillent dans un lieu fixe autre que le domicile. Par ailleurs, les télétravailleurs sont responsables des niveaux d'émission de CO2 les plus élevés, car ils ont tendance à parcourir un plus grand nombre de kilomètres pour leurs déplacements professionnels et non professionnels.

6. Conclusion de l'état de l'art

En conclusion, cet état de l'art a mis en lumière l'étendue de la recherche actuelle dans le domaine étudié. Bien que chaque étude ait ses propres limites et biais, l'ensemble des résultats montre une avancée significative dans notre compréhension de ce sujet. Cependant, il reste encore beaucoup à découvrir et à explorer, notamment en ce qui concerne les implications pratiques et les applications potentielles des connaissances acquises. Par conséquent, des recherches futures devraient continuer à s'appuyer sur les résultats existants pour approfondir notre compréhension de ce domaine passionnant.

III. Pistes à explorer

En cherchant des solutions afin de palier au problème d'émissions de CO2 liés aux transports, certaines pistes se sont alors mises en place.

- Aménagement d'horaire afin de limiter l'utilisation des véhicules et transports en commun aux heures de pointes :

Dans le quartier des affaires de Paris-La Défense, le trafic est souvent encombré notamment aux heures de pointe (entre 8h30 et 9h30 et 17h et 18h30). En effet, environ 100 000 personnes se

rendent chaque matin dans le quartier de La Défense à l'heure de pointe, entre 8h30 et 9h30. Et il suffirait que 5 % à 10 % d'entre elles décalent leur trajet d'un quart d'heure pour alléger significativement le réseau de transports en commun. Cela représente jusqu'à 10 000 passagers en moins et de rendre la prise des transports en commun plus agréable, permettant ainsi à plus de salariés de les emprunter, notamment ceux qui ne les empruntent pas à cause du stress que ces derniers engendrent. En novembre 2019 la Région, la RATP et le site Paris La Défense ont ainsi mis en place un test sur une durée d'un an, en partenariat avec quatorze entreprises (Allianz, Axa, Centre de shopping des Quatre Temps, EDF, Engie, EY, HSBC, Indigo, INLI, Primagaz, RTE, Saint-Gobain, Société Générale et Total) [14]. Ce test avait pour but d'encourager ces entreprises et leurs salariés à modifier leurs horaires de travail et réorganiser leur emploi du temps afin de correspondre aux heures où les transports en commun sont moins utilisés. Au total, 55 000 salariés sur les 180 000 du quartier de La Défense travaillaient pour ces entreprises et étaient concernés par ce challenge. Ces entreprises ont signé une charte proposant d'instaurer un socle commun de présence, de 10 heures à 15 heures, et l'absence de réunion ou de rendez-vous avant 10 heures et après 17 heures. Les salariés étaient autorisés à arriver entre 6 h 30 et 10 h 30, avec des heures de départ modifiées en conséquence.

Cependant, avec la crise sanitaire de 2020, les résultats n'ont pas été concluants puisqu'une grande partie des salariés a dû pratiquer le télétravail et n'a donc pas emprunté les transports en commun pendant un certain temps. Depuis, aucun projet de ce type n'a été remis en place, bien que celui-ci était prometteur.

- Utilisation de l'éco-conduite, notamment avec la réduction de la vitesse des transports :

Une autre solution pourrait être l'utilisation de l'éco-conduite pour les transports en commun. Les projets d'éco-conduite visent à réduire la consommation de carburant et les émissions de gaz à effet de serre des véhicules de transport en commun, tout en améliorant la sécurité et le confort des passagers. Les techniques associées pour les transports en commun comprennent la régulation de la vitesse en fonction de la circulation, la réduction des arrêts inutiles et des accélérations brutales, et l'utilisation de systèmes de récupération d'énergie.

De nombreuses villes et entreprises de transport en commun ont mis en place des programmes d'éco-conduite pour leurs conducteurs de bus et de train. Ces programmes comprennent souvent une formation sur les techniques d'éco-conduite, ainsi que des incitations financières pour les conducteurs qui parviennent à réduire la consommation de carburant et les émissions de gaz à effet de serre. Les résultats de ces programmes sont généralement positifs, avec des réductions significatives de la consommation de carburant et des émissions de gaz à effet de serre, ainsi qu'une amélioration de la sécurité et du confort des passagers. En outre, ces programmes peuvent également réduire les coûts d'exploitation des entreprises de transport en commun, ce qui peut permettre d'améliorer les services offerts aux passagers.

Par exemple, au niveau de Paris-La Défense, la mise en place de bus allant directement au lieu de travail (sans effectuer d'arrêts inutiles) permettrait de réduire les émissions de CO2 ainsi que le

temps de trajet pour les salariés. Cependant il faudrait qu'un nombre minimum de personnes prennent ce trajet direct sinon l'intérêt n'aurait plus de sens puisque le bus circulerait avec un nombre réduit de passager et donc augmenterait les émissions de CO2 par passager. Une autre idée pourrait être de réduire la vitesse du métro pour qu'il consomme moins d'énergie cependant les salariés auraient un temps de trajet plus élevé ce qui n'est pas souhaitable, et il serait nécessaire de rajouter des passages de métro notamment aux heures de pointes ou celui-ci est déjà rempli.

- Utilisation d'un nouveau combustible, de véhicules électriques ou hybrides :

Enfin une autre idée serait d'utiliser des combustibles moins polluants que ceux utilisés actuellement. Il existe plusieurs alternatives aux combustibles fossiles traditionnels, tels que l'essence et le diesel, qui sont plus respectueuses de l'environnement et moins polluantes, comme par exemple :

1. L'électricité : Les véhicules électriques sont alimentés par des batteries rechargeables qui stockent de l'électricité. Ils émettent zéro émission de gaz d'échappement et sont donc considérés comme une alternative très propre aux véhicules à essence et diesel.
2. L'hydrogène : Les véhicules à hydrogène sont alimentés par des piles à combustible qui produisent de l'électricité à partir de l'hydrogène et de l'oxygène de l'air. Ils émettent de la vapeur d'eau comme seul produit d'échappement, ce qui les rend très propres.
3. Les biocarburants : Les biocarburants sont produits à partir de matières premières renouvelables telles que les plantes, les algues ou les déchets organiques. Ils peuvent être utilisés dans des véhicules équipés de moteurs spécifiques ou mélangés à de l'essence ou du diesel traditionnels.
4. Le gaz naturel : Le gaz naturel comprimé ou liquéfié peut être utilisé comme carburant alternatif pour les véhicules. Il est moins polluant que l'essence ou le diesel et peut être produit à partir de sources renouvelables telles que les déchets organiques.

L'utilisation de ces alternatives aux combustibles fossiles peut contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques provenant des véhicules, ce qui est bénéfique pour l'environnement et la santé publique. Cependant pour utiliser ces alternatives, des aménagements sont nécessaires. Par exemple, les véhicules électriques ont besoin de points de recharge pour recharger leurs batteries. Les aménagements nécessaires pour les infrastructures de recharge comprennent des bornes de recharge installées dans des lieux publics, des parkings, des entreprises, des domiciles et des autoroutes. Ces bornes de recharge peuvent être installées dans des endroits couverts ou à l'extérieur, et elles peuvent être alimentées par le réseau électrique ou par des sources d'énergie renouvelable telles que l'énergie solaire ou éolienne.

Pour l'utilisation de véhicules à hydrogène, des stations de recharge en hydrogène sont nécessaires. Les stations de recharge en hydrogène sont similaires aux stations-service traditionnelles, mais elles sont équipées de réservoirs de stockage d'hydrogène, de pompes et de compresseurs. Ces stations sont encore relativement rares et coûteuses, mais elles sont en développement dans plusieurs régions du monde.

Les biocarburants quant à eux peuvent nécessiter des modifications des moteurs pour fonctionner efficacement, mais ils peuvent également être utilisés dans les moteurs traditionnels avec un mélange approprié. Il peut également être nécessaire de développer des infrastructures de production et de distribution de biocarburants pour assurer leur disponibilité pour les utilisateurs de véhicules.

Enfin, les véhicules fonctionnant au gaz naturel ont besoin de stations de ravitaillement en gaz naturel. Les stations de ravitaillement peuvent être alimentées par le réseau de gaz naturel existant ou par des sources de gaz naturel renouvelables, telles que les déchets organiques. Les véhicules à gaz naturel peuvent aussi nécessiter des modifications mineures des moteurs pour fonctionner efficacement.

IV. Modélisation

1. Méthodologie

Afin d'étudier et modéliser les émissions de CO₂ générées par les trajets domicile-travail de Paris La Défense, nous allons nous intéresser aux reports modaux envisageables susceptibles de réduire ces émissions. Pour cela, à l'aide du logiciel intégral, j'ai élaboré un logigramme permettant de simuler les émissions de GES pour les années à venir. Cette simulation prend en compte différents facteurs, tels que le report modal que l'on souhaite associer à ces trajets. La collecte des données, comprenant les facteurs d'émissions de CO₂ propres à chaque mode de transport, les distances parcourues par mode, le nombre de déplacements effectués ainsi que la répartition modale actuelle ont été nécessaires afin de mener à bien ces simulations.

$$E = \text{émissions} (F_m, D_m, Nd, P_i, M_{nm}, a)$$

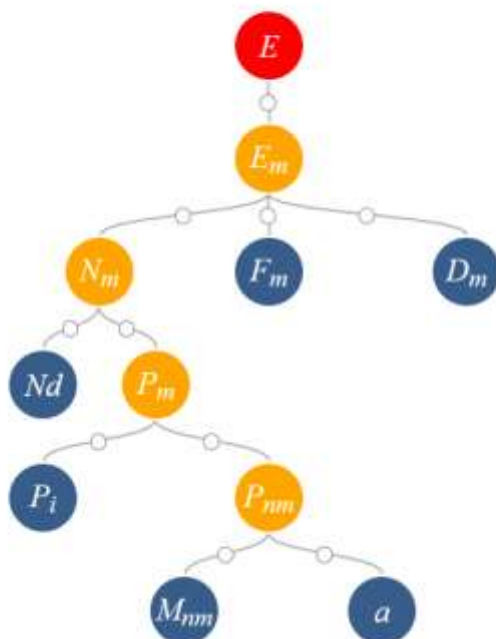


Figure 4 : Logigramme « émissions »
(GROSSE Marzena, 2023-2024)

Emissions de CO2 liées aux trajets domicile-travail

Les émissions de CO2 associées aux trajets domicile-travail dépendent de divers facteurs tels que le mode de transport, le nombre de trajets effectués et la distance parcourue. Notre attention se focalise particulièrement sur les émissions de CO2 générées par les trajets domicile-travail vers et depuis La Défense. Dans le cadre d'une modélisation de substitution modale, notre objectif est de réduire ces émissions de CO2 liées aux trajets domicile-travail depuis La Défense de manière significative. Nous visons une division par quatre de ces émissions d'ici l'année 2050.

Emissions de CO2 totales

$E = \sum_{m=1}^{\text{card}(Em)} \{Em[m]\}$ en tCO2/an

Le but de cette étude consiste à déterminer les émissions totales de dioxyde de carbone (CO2) générées lors des déplacements domicile-travail des employés entre Paris-La-Défense et leur lieu de résidence. Pour ce faire, nous devons calculer les émissions de CO2 associées à chaque mode de transport utilisé, puis les agréger afin d'obtenir une vision globale des impacts environnementaux liés à ces trajets.

```
Script :  
E=sum (Em) ;
```

Emissions de CO2 par mode de transport

$Em = Nm.Fm.Dm$ en tCO2/an

Pour cela, il est nécessaire de procéder à la multiplication des facteurs d'émissions, du nombre de passagers et du nombre de kilomètres parcourus par an pour les divers modes de transport pris en considération. Cette opération nous permettra d'obtenir le taux annuel d'émissions de CO2 attribuable à chaque mode de transport, une fois que nous aurons effectué la modélisation d'une substitution modale sur une période de "a" années.

```
Script :  
Em = [];  
for (var m = 0 ; m < Dm.length  
; m++ ) { Em.push(  
Nm[m] * Fm[m] * Dm[m] * 10** (-6) );  
}
```

Nombre de passager par mode de transport

$Nm = Nd.Pm$ en passagers/an

Le calcul du nombre de passagers utilisant chaque mode de transport par année se réalise en multipliant le nombre de passagers quotidiens pour chaque moyen de transport par la nouvelle

répartition modale. Ainsi, nous obtenons le nombre actualisé de passagers par mode de transport après une période de "a" années, résultant de l'impact de la substitution modale.

```
Script :  
Nm=[ ]  
  
for (var i=0; i < Nd; i++) Nm.push(Pm[i]*Nd)  
}
```

Facteur d'émission par mode de transport

$0 \leq F \leq 111$ en gCO₂/km/passager

Dans le contexte des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) associées aux déplacements, le choix du mode de transport revêt une importance cruciale. Chaque mode de transport présente une empreinte carbone spécifique, exprimée en grammes de CO₂ par kilomètre par passager.

Les émissions répertoriées pour les moyens de transport étudiés sont les suivantes [17] :

- Voiture thermique : 111gCO₂/km/passager
- Voiture électrique : 35gCO₂/km/passager
- Métro : 2.74gCO₂/km/passager
- RER : 7.28gCO₂/km/passager
- Tram : 2.68gCO₂/km/passager
- Bus : 74.4gCO₂/km/passager
- Cyclomoteur : 80gCO₂/km/passager
- À pied/vélo : 0gCO₂/km/passager

Il est alors observé que la voiture thermique se distingue comme le mode de transport le plus émetteur par passager. Ce constat motive notre orientation vers un report modal, en mettant l'accent sur la réduction de l'utilisation de la voiture thermique en faveur de modes de transport plus écologiques comme les transports en commun et la voiture électrique.

Distance parcourue par mode de transport

$1593.4 \leq D \leq 11719.2$ en km/passager/an

La dernière donnée nécessaire pour calculer Em est la distance totale parcourue par chaque mode de transport, représentée ici annuellement. Ces distances varient considérablement selon le mode de déplacement.

Les données recueillies [18] fournissent la moyenne des distances quotidiennes parcourues pour les trajets domicile-travail selon le mode de transport. On ajuste cette valeur en la multipliant par 257 (nombre de jours ouvrés en France) puis par 2 (pour obtenir les trajets allers et retours).

Nombre de déplacements effectués

$154820 \leq Nd \leq 154820$ en déplacements

Le nombre de déplacement effectués par jour par les employés depuis et vers Paris La Défense représente le nombre de trajet effectués (allers et retours confondus). A l'aide de cette donnée [18] on trouve le nombre de passager par mode de transport comme défini précédemment.

Par ailleurs, on ne considère que les flux de déplacements entre 2 zones qui sont supérieurs à 500 personnes. Cela nous permet de respecter les conseils d'utilisation de l'INSEE.

Nouvelle répartition modale

$P_m = P_i \cdot P_{nm}$ en %

Pour obtenir le nombre de passager précédemment défini nous avons besoin de la nouvelle répartition modale. Après multiplication de la répartition modale initiale par la matrice de substitution des flux obtenu précédemment, nous obtenons cette répartition.

En multipliant le vecteur de répartition modale initiale par la matrice de substitution modale élevée à la puissance "a", chaque élément du résultat sera obtenu en combinant les proportions initiales avec les changements proposés par cette matrice. Cela représente la nouvelle répartition modale après "a" années.

```
Script :  
var Pm = [];  
for (var i = 0; i < Pnm.length; i++) { var sum = 0;  
  for (var j = 0; j < Pi.length; j++) { sum += Pnm[j][i] * Pi[j];  
  }  
  Pm.push(sum);  
}
```

Répartition modale initiale

$0.0117 \leq P \leq 0.3783$ en %

La répartition modale initiale [19] peut se représenter à travers un vecteur, dont chaque valeur désigne le pourcentage de déplacement effectué propre à chaque mode.

On s'intéresse ici aux différents modes de transports permettant aux employés d'effectuer leurs déplacements domicile/travail.

Les modes considérés sont dans l'ordre:

- voiture thermique
- voiture électrique
- métro
- RER
- tram
- bus
- cyclomoteur
- à pied/vélo

Matrice de report modal pour "a" années

$P_{nm} = M_{nm}$ puissance a en %

La matrice de report modal élevée à la puissance "a" permet de projeter la répartition modale dans le futur afin d'obtenir la nouvelle répartition, en prenant en compte les tendances de substitution définies dans la matrice sur une période de a années. C'est un moyen de modéliser et d'estimer comment les choix de transport évolueront au fil du temps.

En élevant la matrice de substitution de flux initiale à la puissance "a", on effectue une multiplication répétée de la matrice par elle-même "a" fois. Cela correspond à l'application successives des changements de répartition modale sur "a" années.

Mathématiquement, la matrice de substitution de flux initiale élevée à la puissance "a" représente la matrice résultante après "a" années. Pour effectuer ce calcul, nous avons besoin de la matrice de substitution des flux initiale ainsi que du nombre d'années « a » dans lequel nous voulons nous projeter.

Pour effectuer cette multiplication on crée d'abord la fonction multiplierMatrices qui permet de multiplier 2 matrices de même taille entre elles. Ensuite on crée la matrice P_{nm} qui prend initialement la valeur M_{nm} .

Enfin on crée une boucle qui permet la multiplication de P_{nm} par M_{nm} a-1 fois afin d'obtenir la valeur de P_{nm} donnant M_{nm} puissance a. Dans le cas où a=0, le code renvoie la matrice identité de taille M_{nm} afin d'obtenir en P_m la répartition modale initiale sans report.

```
Script :
function multiplierMatrices(matriceA,
matriceB) { const result = [];

for (var i = 0; i < matriceA.length; i++)
{ result[i] = [];
for (var j = 0; j < matriceB[0].length;
j++) { let sum = 0;
for (var k = 0; k < matriceA[0].length;
k++) { sum += matriceA[i][k] *
matriceB[k][j];
}
result[i][j] = sum;
}
}

return result;
}
if
(a==
0) {
var
Pnm
=
[];
for (var i = 0; i <
Mnm.length; i++) { Pnm[i] =
[];
```

```

for (var j = 0; j <
Mnm.length; j++) { if (i==j) {
Pnm[i][j] =
1 ; } else
{
Pnm[i][j] = 0}
}
}
}
else {
var Pnm = Mnm.map(row =>
[...row]); for (var i = 1; i
< a; i++) {
Pnm = multiplierMatrices(Pnm, Mnm);
}
}
}

```

Matrice de substitution des flux initiale

$0 \leq M \leq 1$ en %

La matrice de substitution de flux (ou matrice de report modal) est la matrice permettant de définir une nouvelle répartition modale.

Cette matrice est utilisée pour modéliser comment les choix de transport peuvent varier dans le temps en fonction des circonstances. Par exemple, elle indique dans quelle mesure les personnes peuvent changer de la voiture thermique à la voiture électrique, du bus au métro, etc.

Chaque élément de la matrice indique la proportion de déplacements qui passent du mode de transport spécifié par la ligne à celui spécifié par la colonne, exprimée en pourcentage.

Par exemple, la première ligne indique le nombre de déplacements initialement effectués en voiture thermique qui restent en voiture thermique ainsi que les déplacements qui sont substitués par des déplacements effectués avec d'autres modes.

De manière similaire, les autres lignes et colonnes indiquent les proportions de substitution pour chaque combinaison de modes de transport.

La somme des lignes est égale à 1, représentant les 100% d'utilisateurs de ce mode de transport. Ainsi l'on considère qu'on ne change pas le nombre d'utilisateur mais uniquement le mode de transport qu'ils empruntent.

Nombre d'années

$1 \leq a \leq 15$ en années

On cherche à se projeter dans le temps avec la modification modale instaurée par la matrice de substitution de flux.

Le nombre d'années dans le futur pour lesquelles nous souhaitons projeter la répartition modale est défini par cette valeur (que nous nommerons "a"). Elle quantifie la période de temps sur laquelle on applique les changements successifs de la matrice de substitution de flux pour estimer l'évolution des habitudes de déplacement. Ainsi, cette valeur détermine l'horizon temporel de la projection, permettant d'anticiper comment la répartition modale pourrait changer au fil des années.

2. Simulation

A l'aide du logigramme précédent, nous pouvons simuler plusieurs taux d'émissions de CO₂ en fonction des reports modaux que nous souhaitons mettre en place. J'ai choisi de m'intéresser à 2 types d'ordonnancement différents permettant de faire diminuer le taux d'émissions de CO₂.

A. Ordonnancement 1 : Voitures électriques

Nous savons qu'à partir de 2035, les voitures thermiques neuves seront interdites à la vente. Cela signifie qu'il sera uniquement possible d'acheter des voitures neuves électriques. Cette nouvelle restriction va nécessairement nous mener à un report modal des voitures thermiques vers les voitures électriques. En effet, en considérant qu'une voiture possède une durée de vie de 20ans, il n'y aura théoriquement plus aucune voiture thermique d'ici 2055.

En janvier 2035, sur 100% des voitures nous estimons qu'environ 95% d'entre elles sont thermiques et 5% sont électriques. À partir de cette date, la vente de voitures thermiques neuves est interdite, ce qui signifie que seules les voitures électriques seront acquises et se développeront. On peut donc définir le nombre maximal de voitures thermiques que l'on aura en 2050 en extrapolant cette tendance.

En considérant la durée de vie de 20ans, on peut définir pour chaque année « a » après 2035 le nombre de voitures électriques et thermiques. Par exemple, sur 100 voitures, en 2036, pour $a=1$, j'aurai donc $95-(95/20)*1$ voitures thermiques et $5+(95/20)*1$ voitures électriques. En 2050 j'aurai donc $95-(95/20)*15$ voitures thermiques et $5+(95/20)*15$ voitures électriques.

Ce calcul nous permet d'obtenir une nouvelle matrice de substitution modale pour chaque année entre 2035 et 2050. On rappelle que l'objectif fixé est de diviser au minimum par 4 les émissions de CO₂ liées aux transports domicile-travail d'ici 2050. En s'intéressant uniquement à ce report modal, nous obtenons cette courbe :

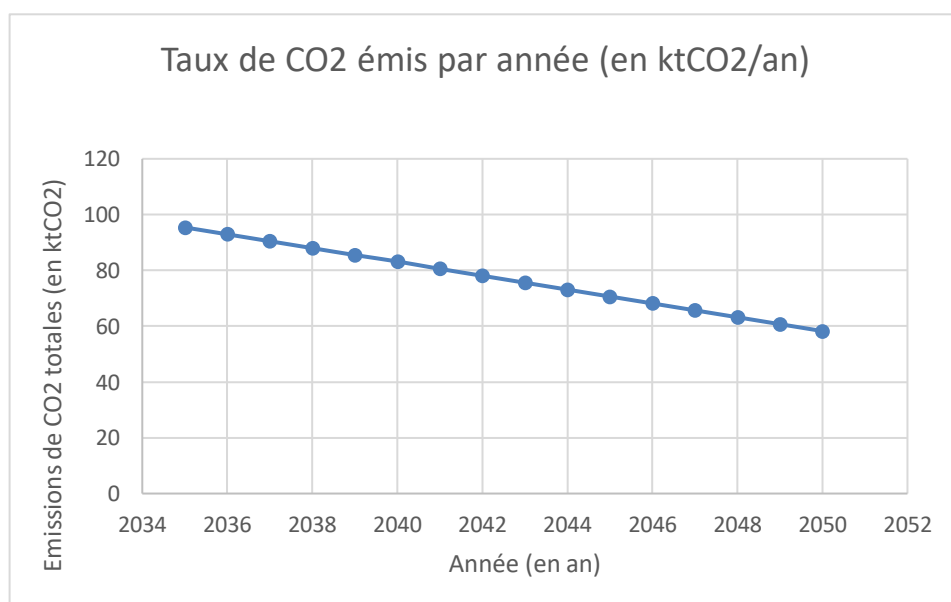


Figure 5 : Taux de CO₂ émis par année (en ktCO₂/an), Ordonnancement A

(GROSSE Marzena, 2023-2024)

Au départ, en janvier 2035, les émissions sont à environ 98.023ktCO₂/an. Avec le report modal des voitures électriques, nous passons à 58,247kt en 2050. Ceci représente une baisse d'environ 40%, ce qui est loin des 75% espérés.

B. Ordonnancement 2 : Transports en commun

Bien que les véhicules électriques affichent une consommation nettement inférieure à celle des véhicules thermiques, d'autres moyens de transport encore moins polluants existent, notamment les transports en commun. Une analyse objective des émissions suggère que les transports en commun semblent être la solution la plus efficace pour réduire les émissions, étant le mode de transport qui émet le moins de gaz à effet de serre. De plus, le Plan Climat Air Énergie Territorial (PCAET) du quartier de La Défense [20] met en avant l'objectif prioritaire de renforcer l'utilisation des transports en commun, en plus de promouvoir l'adoption des voitures électriques.

En effet, le PCAET provenant de Paris La Défense indique qu'un transfert modal de 70% de la voiture vers les transports en commun pourrait éliminer 1.6 million de déplacements en voiture, contribuant ainsi de manière significative à la réduction des émissions de CO₂. Pour atteindre cet objectif d'ici 2050, ce qui équivaut à une période de 15 ans, un transfert modal d'environ 8% par an est nécessaire. Étant donné que nous examinons ici quatre modes de transport en commun différents (métro, TER, tram et bus), j'ai choisi de répartir équitablement ce transfert, attribuant ainsi 2% à chaque mode de transport.

Ce transfert s'effectue des voitures en général vers les transports en commun, incluant également les voitures électriques. Ainsi, si nous examinons l'ensemble des utilisateurs de voitures, seuls 92% d'entre eux continuent d'utiliser la voiture l'année suivante, les 8% restants optant pour les transports en commun. Parmi ces 92%, cependant, le transfert modal de l'ordonnancement 1 de la voiture thermique vers la voiture électrique persiste. En appliquant ces deux calculs, nous obtenons la nouvelle matrice de transfert modal pour l'année suivante, et au final cette courbe :

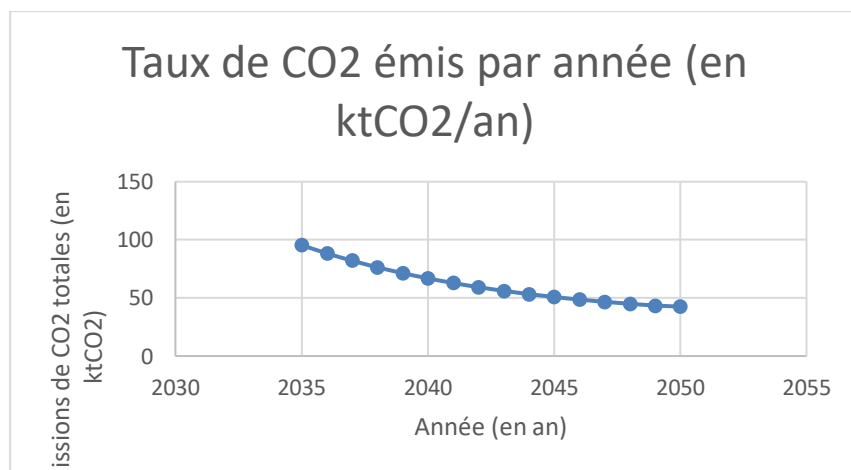


Figure 5 : Taux de CO₂ émis par année (en ktCO₂/an), Ordonnancement B

(GROSSE Marzena, 2023-2024)

Cette nouvelle matrice de transfert modal nous conduit donc à une courbe qui montre une diminution des émissions de CO₂ passant de 98.023 ktCO₂/an à 42.532 ktCO₂/an en 2050. Cela correspond à une baisse d'environ 55%. Bien que cette réduction soit supérieure à celle précédemment obtenue, l'objectif de réduction de 75% n'est toujours pas atteint. Cela peut

s'expliquer par la répartition équitable du report modal vers les transports en commun. En effet, le PCAET ne spécifie pas vers quel type de transport en commun le transfert modal doit s'orienter, ce qui a motivé ma décision de choisir une répartition équitable. Cependant, il est important de noter que le métro et le tram ont un facteur d'émissions de CO₂ bien inférieur à celui du bus et du RER. Ainsi, en dirigeant le transfert modal principalement vers ces deux modes de transport, il est possiblement envisageable d'atteindre l'objectif de réduction de 75%.

C. Ordonnancement 3 : Métro et Tram (facteurs d'émissions les plus bas)

Dans cette dernière simulation, nous allons garder le taux de report modal de 8% par an vers les transports en commun évoqué par les documents de Paris La Défense, cependant nous allons cette fois-ci nous focaliser uniquement sur le métro et le tram qui possèdent des facteurs d'émissions bien inférieurs au bus et au RER. Ainsi chacun des 2 modes recevra un report modal de 4% par an provenant des voitures. Le calcul pour obtenir la matrice de report modal d'une année à l'autre est donc assez similaire à celui de l'ordonnancement 2. On obtient alors cette courbe :

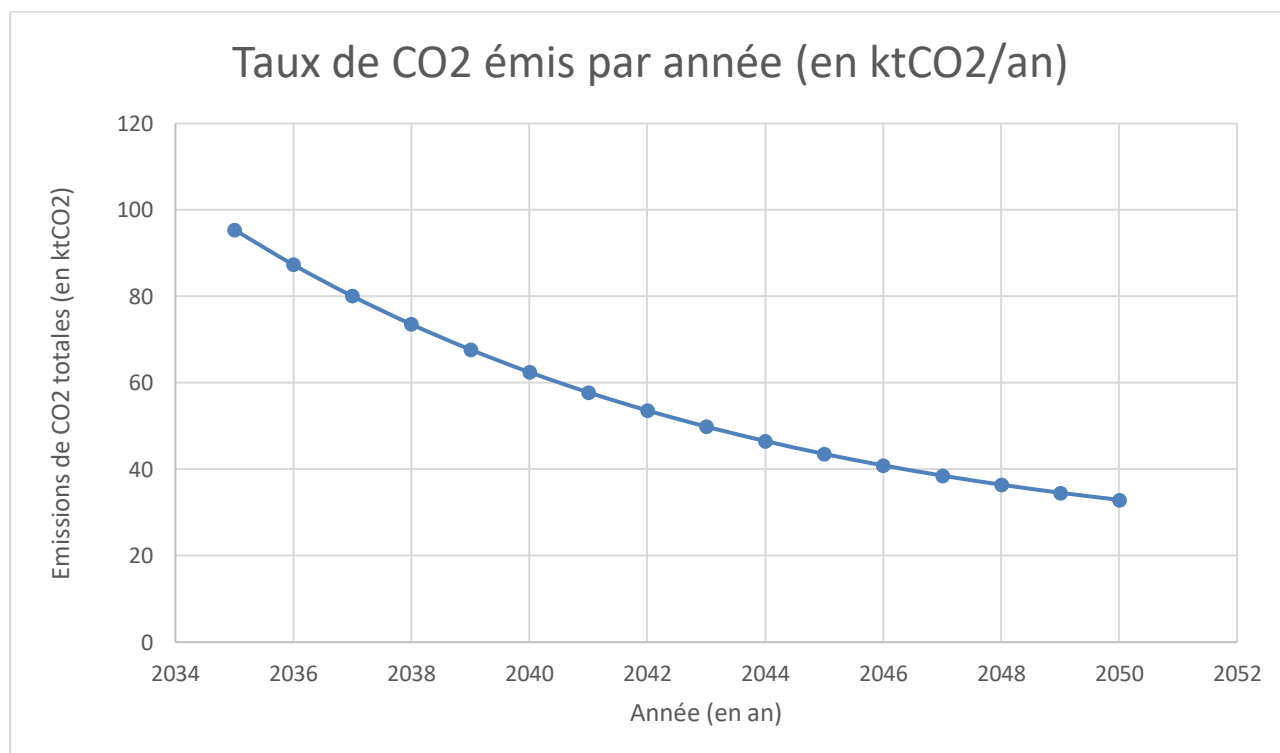


Figure 5 : Taux de CO₂ émis par année (en ktCO₂/an), Ordonnancement B (GROSSE Marzena, 2023-2024)

Comme espéré, la baisse du taux d'émissions de CO₂ est encore plus forte que celle de la modélisation précédente. Cependant, elle n'atteint toujours qu'environ 66%, ce qui est donc en dessous des 75% espérés.

V. Conclusion

En conclusion, on peut constater que les mesures prises par l'état et les objectifs mis en place par le PCAET de Paris la Défense permettent d'obtenir une baisse conséquente au niveau des émissions de CO₂ liés aux trajets domicile-travail du quartier. Cependant, l'objectif d'une réduction d'un quart de ces émissions ne peut être atteint uniquement avec ces mesures. En effet, bien qu'en 2050 il ne devrait rester théoriquement au maximum qu'environ 24% de voitures thermiques et donc plus de 75% de voitures électriques, ces dernières polluent tout de même à hauteur de 35gCO₂/km/passager. Cela représente environ 3 fois moins que la voiture thermique, cependant nous avons vu dans la modélisation 1 que miser uniquement sur ce report modal n'a pas été concluant. En ajoutant alors un report modal vers les transports en commun, correspondant à l'objectif visé par le PCAET de la Défense d'environ 70% d'ici 2050, on obtient à travers 2 simulations différentes des baisses plus fortes mais toujours insuffisantes pour atteindre l'objectif de diviser par 4 les émissions de CO₂ fixé d'ici 2050 par l'état.

Pour atteindre cet objectif, il serait nécessaire d'augmenter le pourcentage de transfert modal des voitures vers les transports en commun, tout en visant un taux plus élevé de voitures électriques en 2050. Cependant, le transfert de 8% des voitures vers les transports en commun est déjà un pourcentage considérable et semble difficile à atteindre sans la mise en place de mesures spécifiques. Par exemple, la réduction de la limite de vitesse des voitures pourrait dégrader l'attrait de l'utilisation de la voiture, incitant ainsi les automobilistes à se tourner vers les transports en commun. Cela pourrait également nécessiter une augmentation de la capacité et de la fréquence des transports en commun existants pour accommoder les nouveaux usagers.

Par ailleurs, en ce qui concerne les voitures électriques, il est probable que les propriétaires de voitures thermiques cherchent à les utiliser jusqu'à ce qu'elles ne soient plus fonctionnelles avant de passer à la voiture électrique. Par conséquent, il semble peu probable que le taux de voitures électriques en France en 2050 soit plus élevé que celui évoqué dans la simulation.

En résumé, à la lumière des résultats émis par les modélisations effectuées, il semble improbable que le secteur des transports à La Défense, dans le cadre des trajets domicile-travail, puisse réaliser une réduction de ses émissions de CO₂ par un facteur de 4 d'ici 2050.

VI. Bibliographie

- [1] NNAEMEKA Vincent Emodi, NKWOMA INEKWE John & ABDULRASHEED Zakari, 2022, Transport infrastructure, CO2 emissions, mortality, and life expectancy in the Global South, «Transportation Research Procedia 8 80 – 88»,
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0967070X2200275X?token=008ADF72D48FAFF3545E8C76B58E8A646B28947B18B9D3C123E2A2ADAC4ED482277A3C52408306CE7A94849DC9E578C1&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230415152124>
- [2] PAN Shenle, 2010, Contribution à la définition et à l'évaluation de la mutualisation de chaînes logistiques pour réduire les émissions de CO2 du transport : application au cas de la grande distribution, Gestion et management, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, NNT : 2010ENMP0051.pastel-00566265, <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00566265v1/document>
- [3] MEUNIER David & QUINET Emile, 2014, Valuing greenhouse gases emissions and uncertainty in transport cost benefit analysis, « European Transport Conference 2014 », Université Paris-Est, LVMT, UMR T9403, and Ecole des Ponts ParisTech & Paris School of Economics, and Ecole des Ponts ParisTech,
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2352146515001209?token=01489D6972E9136E6A033C3B1AB4CEB99527C3A665FAA01DF3EC165C66FF448A5F2CBF1E6333075767B268702C50F30F&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230411190130>
- [4] ROUMEGOUX Jean-Pierre, 1994, Calcul des émissions unitaires de polluants des véhicules utilitaires, « The Science of the Total Environment 169 205-211 », INRETS, Laboratoire Energie-Nuisances, Case 24, 69675 BRON Cedex, France,
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/004896979504649L?token=0B1AE9428A5D24B174E952A31BDD4534D8513314E36182A57DF4061F853CED2EB7141E15EEE42CEB9B8F8A5EC41C035A&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230411190050>
- [5] Ministère de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie, 2013, Information CO2 des prestations de transport, Application de l'article L1431-3 du code des transports, « Guide Méthodologique », https://www.orne.gouv.fr/IMG/pdf/Guide_Information_CO2_cle63b81e.pdf
- [6] LIUHANZI Yang, SHAOJUN Zhang, YE Wu, QIZHENG Chen, TIANLIN Niu, XU Huang, SHIDA Zhang, LIANGJUN Zhang, YU Zhou & JIMING Hao, 2016, Evaluating real-world CO2 and NOX emissions for public transit buses using a remote wireless on-board diagnostic (OBD) approach, « Environmental Pollution 218 453-462 »,
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0269749116305954?token=7148E69550E70A88D3CFB92B347A13454EF91375B82BBF70B886B14481B61DB38E56B4E64CD1C0D5792248B7C04953D9&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230412224508>
- [7] KING Alan & JAFORULLAH Mohammad, 2017, The econometric consequences of an energy consumption variable in a model of CO2 emissions, « Energy Economics 63 84-91 », Department of Economics, University of Otago, PO Box 56, Dunedin 9054, New Zealand,
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S014098831730035X?token=B0BF0835C3EC84CF16453F9A59A9B9C21FE56D968D500882770D188AE45B5FB32FAABC45B8931A7A2500E7B07C7EBC5D&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230415145526>
- [8] SUTTON-PARKER Justin, 2021, Determining commuting greenhouse gas emissions abatement achieved by information technology enabled remote working, «Procedia Computer Science 191 296–303»,
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1877050921014320?token=B77C9A7424C52D95A2DDB758BBF4B372EAE3727C51E124E319C5227C4A4D8B52A66F9B1F2E5FA3D82624EBA0D1A1AA1A&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230415134831>

- [9] LIPEI Fu, ZHANGKUN Ren, WENZHE Si, QIANLI Ma, WEIQIU Huang, KAILI Liao, ZHOULAN Huang, YU Wang, JUNHUA Li & PENG Xu, 2022, Research progress on CO₂ capture and utilization technology, «Journal of CO₂ Utilization 66 10-260»,
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2212982022003791?token=603E98ECF0C6010C72CEF3724C7FD6FC7C9EBD30F8BBB7DF44D1C3F76B9C921C08AE36534A78A70CC9A875331C0D0217&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230415141132>
- [10] PERREAULT Patrice, B KUMMAMURU Nithin, GONZALEZ QUIROGA Arturo & LENAERTS Silvia, 2022, CO₂ capture initiatives: are governments, society, industry and the financial sector ready?, «Current Opinion in Chemical Engineering 38 100-874»,
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2211339822000843?token=41022FC95277CD99E427BB3F1014FFDD8B10304EC7AA3A2FB0CC7939EB1FECD1F7A3772D436F6B27C62813FC35FF9BBF&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230415135119>
- [11] HERZER Dierk, 2022, The impact on domestic CO₂ emissions of domestic government-funded clean energy R&D and of spillovers from foreign government-funded clean energy R&D, «Energy Policy 168 113-126»,
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0301421522003512?token=D3BB1540151086B8BAEB15987A5DF5A282BCC427FD6BA4B2864DEEDEC1A86C4679EEC943BF4FC1537F95D718EB5E997B&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230415135450>
- [12] TEVFIK KARTAL Mustafa, KORKUT PATA Ugur, KILIC DEPREN Serpil & DEPREN Ozer, 2023, Effects of possible changes in natural gas, nuclear, and coal energy consumption on CO₂ emissions: Evidence from France under Russia's gas supply cuts by dynamic ARDL simulations approach, « Applied Energy 339 120-983 »,
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0306261923003471?token=4F7B53E7CA8554A2DB48D7CF632C7908E0EF70DAA53A1732AE1DA5DB087EB4C54E4E1DC8F5CAD3DEAB3DD2C2D277465B&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230415135719>
- [13] DORIA VIAN CERQUEIRA Eugenia, MOTTE-BAUMVOL Benjamin, BELTON CHEVALLIER Leslie & BONIN Olivier, 2020, Does working from home reduce CO₂ emissions? An analysis of travel patterns as dictated by workplaces, « Transportation Research Part D 83 102-338 »,
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1361920919314026?token=6FE68CA3EB8A9EC19F8E9E6A67D28D8AED8534894110E2B9978A648E078E569C9E95030D00924880522D7F9780757EFO&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230415140033>
- [14] Le Parisien, 2019, La Défense : un grand jeu pour inciter les salariés à éviter les heures de pointe, <https://www.leparisien.fr/info-paris-ile-de-france-oise/transports/la-defense-un-grand-jeu-pour-inciter-les-salaries-a-eviter-les-heures-de-pointe-24-04-2019-8059611.php>
- [15] LARI Adeel, 2012, Telework/Workforce flexibility to reduce congestion and environmental degradation?, « Procedia - Social and Behavioral Sciences 48 712 – 721»,
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1877042812027851?token=FFB10032B55E5D2FB979306375279D77D211B17077D9252C7299DDA2939C7EDBAB657FECCFBDAD9F4BCD0A3A5CDF9DF&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230415141543>
- [16] ELEFThERIOS Giovanis, 2018, The relationship between teleworking, traffic and air pollution, «Atmospheric Pollution Research 9 1-14»,
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1309104217302003?token=909687FE0BEE5468B1BD312959F733A545F8AEE63F11AC73E5CE475457D486F499D918C816E334EC7D4BFABD5CF74FA8&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230415141743>
- [17] Jacid Montoya-Torres, Ortzi Akizu-Gardoki, Carlos Alejandro, Maider Iturrondobeitia, 2023, Towards sustainable passenger transport: Carbon emission reduction scenarios for a medium-sized city, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623023077>
- [18] Sandrine Chaumeron, Aude Lécroart (Insee), 2023, Le trajet médian domicile-travail

augmente de moitié en vingt ans pour les habitants du rural,

<https://www.insee.fr/fr/statistiques/7622203>

[19] Céline Clavier et Françoise Jacquesson, 2015, En Ile-de-France, l'usage de la voiture pour aller travail diminue, <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1285604>

[20] Paris Ouest La Défense, 2016, Plan Climat Air

Energie, [https://www.parisouestladerfense.fr/wp-](https://www.parisouestladerfense.fr/wp-content/uploads/2022/02/POLD_200330_PCAET_Brochure_EXEV2-final-1.pdf)

[content/uploads/2022/02/POLD_200330_PCAET_Brochure_EXEV2-final-1.pdf](https://www.parisouestladerfense.fr/wp-content/uploads/2022/02/POLD_200330_PCAET_Brochure_EXEV2-final-1.pdf)



Directeur de recherche :

Mindjid MAIZIA

Marzena GROSSE
PFE/DAE5
DAE-Réseau
2023-2024

L'évolution dans le temps des émissions de CO2 liées aux mobilités domicile-travail des actifs

Exemple du quartier de la défense à Paris

Résumé :

L'objectif de ce Projet de Fin d'Études était d'analyser les niveaux d'émissions de CO2 générés par les transports, en se focalisant particulièrement sur les déplacements domicile-travail dans le quartier de La Défense. Par la suite, j'ai entrepris d'explorer les moyens de réduire ces émissions au cours des prochaines années, dans le but ultime d'atteindre une diminution par un facteur de 4 d'ici 2050.

Pour ce faire, j'ai élaboré des simulations au moyen d'un logigramme que j'ai créé à l'aide du logiciel "intégral", me permettant ainsi de modéliser divers scénarios de transferts modaux sur plusieurs années. J'ai réalisé trois simulations en fonction de différents ordonnancements. Ces changements modaux ont été guidés par les directives de l'État, qui prévoit l'interdiction de la vente de voitures neuves à moteur thermique d'ici 2035, et par le Plan Climat Air Énergie Territorial (PCAET) de La Défense, qui ambitionne un transfert modal de 70% des voitures vers les transports en commun d'ici 2050.

Malgré ces deux grandes lignes qui ont orienté mes choix en matière de transferts modaux, les modélisations indiquent que l'objectif fixé par l'État, visant à réduire les émissions de CO2 de ce secteur par un facteur de 4 d'ici 2050, ne sera pas atteint selon mes analyses.

Mots Clés : Report modal, Transport, Emissions de CO2, Modélisation