



Comment évaluer le potentiel d'une solution numérique face à l'urgence écologique ? Application aux plateformes de covoiturage régulier à l'échelle locale

Aina Rasoldier

► To cite this version:

Aina Rasoldier. Comment évaluer le potentiel d'une solution numérique face à l'urgence écologique ? Application aux plateformes de covoiturage régulier à l'échelle locale. Systèmes embarqués. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2024. Français. NNT : 2024GRALM004 . tel-04702139v2

HAL Id: tel-04702139

<https://theses.hal.science/tel-04702139v2>

Submitted on 19 Sep 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : MSTII - Mathématiques, Sciences et technologies de l'information, Informatique

Spécialité : Informatique

Unité de recherche : Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique

Comment évaluer le potentiel d'une solution numérique face à l'urgence écologique ? Application aux plateformes de covoiturage régulier à l'échelle locale

Assessing the potential of a digital solution in the context of ecological urgency: application to regular carpooling platforms at local scale

Présentée par :

Aina RASOLDIER

Direction de thèse :

Alain GIRAUT

DIRECTEUR DE RECHERCHE, Centre INRIA de l'UGA

Directeur de thèse

Sophie QUINTON

CHARGEÉE DE RECHERCHE, Centre INRIA de l'UGA

Co-encadrante de thèse

Jacques COMBAZ

INGENIEUR DE RECHERCHE, CNRS Délégation Alpes

Co-encadrant de thèse

Rapporteurs :

Anne-Laure LIGOZAT

PROFESSORESSE, Laboratoire LISN

Pierre-Olivier VANDANJON

DIRECTEUR DE RECHERCHE, Université Gustave Eiffel

Thèse soutenue publiquement le **12 février 2024**, devant le jury composé de :

Alain GIRAUT

DIRECTEUR DE RECHERCHE, Centre INRIA de l'UGA

Directeur de thèse

Anne-Laure LIGOZAT

PROFESSORESSE, Laboratoire LISN

Rapportrice

Pierre-Olivier VANDANJON

DIRECTEUR DE RECHERCHE, Université Gustave Eiffel

Rapporteur

Nicolas COULOMBEL

MAITRE DE CONFERENCES, École des Ponts ParisTech / LVMT

Examinateur

Peter STURM

DIRECTEUR DE RECHERCHE, Centre INRIA de l'UGA

Président

Denis TRYSTRAM

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Grenoble INP-UGA

Examinateur

Invités :

Sophie QUINTON

CHARGEÉE DE RECHERCHE, Centre INRIA de l'UGA

Jacques COMBAZ

INGENIEUR DE RECHERCHE, CNRS Délégation Alpes

Kevin MARQUET

MAITRE DE CONFERENCES, Université Grenoble Alpes

**COMMENT ÉVALUER LE POTENTIEL
D'UNE SOLUTION NUMÉRIQUE FACE À
L'URGENCE ÉCOLOGIQUE ?**

**Application aux plateformes de covoiturage régulier à
l'échelle locale**

AINA RASOLDIER

Thèse de doctorat
Informatique et Mathématiques
École doctorale MSTII
Université Grenoble-Alpes

2024 – Version définitive

Aina Rasoldier : *Comment évaluer le potentiel d'une solution numérique face à l'urgence écologique ? Application aux plateformes de covoiturage régulier à l'échelle locale*, Thèse de doctorat, 2024

ENCADRANT·E·S :

Alain Girault
Sophie Quinton
Jacques Combaz
Kevin Marquet

LIEU :

Centre INRIA de l'UGA, France

RÉSUMÉ

Au vu de l'urgence écologique actuelle, il est légitime de se demander quel est le potentiel des solutions numériques pour faire face à cette situation. Actuellement, nous manquons de fondements scientifiques permettant de décider si une solution numérique devrait être développée ou mise en place en fonction de ses effets sur l'environnement et la société, des obstacles à sa mise en œuvre et des incertitudes associées. Dans ce contexte, une première partie du travail consiste à étudier les méthodologies permettant d'évaluer les impacts environnementaux évités par des solutions numériques. Il est notamment montré que les évaluations dans la littérature scientifique présentent des limites récurrentes. En premier lieu, il est souligné que les évaluations restreignent souvent leur périmètre, en ignorant notamment les impacts directs des technologies et leurs impacts sur la société, y compris les effets rebond. De plus, d'autres limitations sont à regretter dans le contexte de l'urgence écologique : le lien entre le potentiel des solutions numériques et les stratégies d'atténuation, ou leur intégration dans un scénario de durabilité souhaitable, est rarement abordé. Ce travail de thèse propose donc des recommandations méthodologiques pour évaluer les impacts évités grâce à une solution numérique, dans le but de pallier les limitations précédemment évoquées. Dans une seconde partie, l'étude se penche sur le potentiel d'une solution numérique particulière : les plateformes de covoiturage régulier (par exemple, BlaBlaCar Daily, Karos et Klaxit), dont l'un des avantages attendus est la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur du transport de passagers, l'un des secteurs les plus émetteurs en France. Le potentiel de ces plateformes est évalué à l'échelle de la métropole grenobloise (France) grâce à une nouvelle méthode, la Méthode d'évaluation du potentiel du covoiturage à l'échelle locale (MEPCEL). Lors de l'évaluation du potentiel environnemental de cette solution, une attention particulière est accordée à l'examen des hypothèses sur lesquelles repose le gain environnemental. Ces hypothèses sont-elles现实的？En comparant les résultats aux objectifs environnementaux définis, entre autres, par les stratégies d'atténuation, il apparaît que, même si l'objectif est réalisable, une évolution significative et rapide des comportement est nécessaire pour l'atteindre. Dans l'ensemble, cette thèse met en lumière le fait qu'il reste encore un défi important à relever concernant le potentiel du numérique et pose une question : dans quelle mesure pouvons-nous encore compter sur les solutions numériques face à l'urgence écologique ?

ABSTRACT

Given the current ecological urgency, it is legitimate to ask what the potential of digital solutions is to deal with this situation. Currently, we lack the scientific basis to decide whether a digital solution should be developed or implemented based on its effects on the environment and society, the barriers to its implementation, and the associated uncertainties. In this context, the first part of the work consists of studying methodologies to assess the environmental impacts avoided by digital solutions. In particular, the thesis shows that the existing studies in the scientific literature present recurring limitations. Firstly, it is emphasized that evaluations often restrict their scope, ignoring, in particular, the direct impacts of technologies and their impacts on society, including rebound effects. In addition, other limitations are to be regretted in the context of the ecological urgency: the link between the potential of digital solutions and mitigation strategies, or their integration into a desirable sustainability scenario, is rarely addressed. Therefore, this thesis proposes methodological recommendations to evaluate the impacts avoided thanks to a digital solution, aiming to overcome the previously mentioned limitations. In the second part, the study looks at the potential of a particular digital solution: regular carpooling platforms (such as BlaBlaCar Daily, Karos, and Klaxit). Their expected advantage is the reduction of greenhouse gas emissions in the passenger transport sector, one of the highest emitting sectors in France. The potential of these platforms is evaluated at the scale of the Grenoble metropolis (France) using a new method, the Method for evaluating the potential of carpooling at the local scale (MEPCEL). When evaluating the environmental potential of this solution, particular attention is given to examining the assumptions on which the environmental gain is based. Are these assumptions realistic? By comparing the results to the environmental objectives defined, among other things, by the mitigation strategies, it appears that even if the objective is achievable, a significant and rapid evolution of behavior is necessary to achieve it. Overall, this thesis highlights that there remains a significant challenge regarding the potential of digital and poses a question: To what extent can we still rely on digital solutions in the face of ecological urgency?

PUBLICATIONS

- Rasoldier, A., Combaz, J., Girault, A., Marquet, K., & Quinton, S. (2022). How realistic are claims about the benefits of using digital technologies for GHG emissions mitigation? *Eighth Workshop on Computing within Limits 2022*.
<https://doi.org/10.21428/bf6fb269.6d7bd21b>
- Rasoldier, A., Girault, A., Quinton, S., Combaz, J., & Marquet, K. (2023). Assessing the Potential of Carpooling for Reducing Vehicle Kilometers Traveled. *2023 International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*, 120-131.
<https://doi.org/10.1109/ICT4S58814.2023.00021>

REMERCIEMENTS

Le doctorat ayant, pour moi, été une expérience humaine intense, cette page de remerciement n'est rien par rapport à ce que toutes les personnes qui m'ont entouré m'ont apporté pendant cette période. Le moins que je puisse dire, c'est que chacune d'entre elles a participé à faire vivre ce travail, d'une manière ou d'une autre.

Merci

à Alain Girault, dont la rigueur scientifique a été déterminante dans mes travaux, Kevin Marquet qui savait m'encourager, Jacques Combaz qui savait discuter même s'il ne savait pas s'arrêter, et Sophie Quinton qui me comprenait;

à Anne-Laure Ligozat et Pierre-Olivier Vandajon pour leur lecture fine de mon manuscrit;

à Peter Sturm, Nicolas Coulombel, Denis Trystram, pour avoir montré leur intérêt dans mon travail de thèse;

à Nadège Troussier, qui a su trouver un peu de temps pour suivre mes travaux et me conseiller;

à tout Verimag pour son accueil, et ses non-permanents, dont Dr. Akshay, Alban, Alexandre, Ana, Baptiste, Basile, Dr. Basile, Dr. Hakim, Dr. Léo, Lucas, Marco, Oussama pour les déjeuners, les fêtes et la bonne humeur;

à l'équipe SPADES, qui également, m'a intégré malgré le grand écart thématique, et ses non-permanents, dont Dr. Alexandre, Aurélie, Giovanni, Ludmilla, Dr. Martin, comprenant mes co-bureaux par intermittence Maxime, Pietro et Dr. Thomas — villageois très robuste;

à Lou Grimal — cousine de thèse —, Thibault Pirson, David Ekchajzer, Clément Morand, aux autres camarades de la SICT, et à toute une nouvelle génération de chercheur·e·s, sans oublier les jeunes de STEEP et d'Archipel, pour m'avoir donné l'espoir en un monde de la recherche qui soit en phase avec mes convictions;

à Ilan, Sam, Sophie, Flo, blac, qui ont été impliqués dans le passé, de près ou de loin, dans ce qu'on appelait « Ingénieurs Engagés », groupe qui a joué un rôle dans le développement de mes convictions, et qui sont toujours présents à mes côtés aujourd'hui;

à Adeline, Armand, Gaspard, Margot, à tout l'ensemble de guitare du conservatoire de Grenoble, mes professeurs Christophe, FX, Otavio et Rémi, pour m'avoir permis de respirer, de m'ouvrir à de nouvelles sensibilités pour m'avoir introduit à la rigueur artistique;

à mes parents, mon frère et ma sœur, qui même loin de chez moi restent proches de mon cœur;

à Hadi, le co-bureau, tantôt cuisine, tantôt chanson, qui a rythmé mon séjour à l'IMAG, et qui mérite tout le bonheur;

à Léa.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Pourquoi m'intéresser au numérique?	3
1.2	Contexte scientifique : une communauté naissante	5
1.3	Problématique et plan général	8
1.4	Note sur le contexte scientifique de mon travail de thèse	9
1.5	Note sur la disponibilité du code et des données	11
I CONTRIBUTIONS À L'ÉVALUATION DES IMPACTS ÉVITÉS DE SOLUTIONS NUMÉRIQUES 12		
2	LE NUMÉRIQUE FACE À L'URGENCE CLIMATIQUE : ENJEUX ET PROBLÉMATIQUE	13
2.1	L'urgence écologique	13
2.1.1	Les limites planétaires	14
2.1.2	L'urgence climatique	15
2.2	Les stratégies de décarbonation	17
2.2.1	L'Accord de Paris	19
2.2.2	La Stratégie Nationale Bas-Carbone	19
2.2.3	Stratégies non officielles	21
2.3	Le potentiel du numérique face à l'urgence climatique	22
2.3.1	Numérique : de quoi parle-t-on?	22
2.3.2	Potentiel d'impacts évités des solutions numériques : de quoi parle-t-on?	24
2.3.3	Les controverses à propos de l'impact environnemental du numérique	25
2.4	Problématique	26
3	ÉTAT DE L'ART DES MÉTHODES D'ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU NUMÉRIQUE	29
3.1	Classifications des effets du numérique	30
3.1.1	Effets directs et indirects	30
3.1.2	Modèle LES de Hilty et Aebscher (2015)	30
3.1.3	Classification de Horner et al. (2016)	31
3.2	Évaluer une solution numérique grâce à l'ACV	35
3.2.1	Méthodologie de l'ACV	35
3.2.2	L'ACV comparative	39
3.2.3	Approches attributionnelle et conséquentielle	39

3.3	Autres méthodes d'évaluation	41
3.3.1	Évaluer les impacts liés à l'effet de substitution grâce à la méthode <i>ICT Enablement</i>	41
3.3.2	Autre méthode d'évaluation : cas de l'effet rebond du covoitage régulier	42
3.4	Évaluer les impacts du numérique à l'échelle mondiale	44
3.4.1	Évaluer les impacts directs du numérique à l'échelle mondiale	44
3.4.2	Prendre en compte les effets indirects du numérique à l'échelle mondiale	50
3.5	Conclusion	51
4	LIMITES MÉTHODOLOGIQUES DES ÉVALUATIONS DES IMPACTS ÉVITÉS PAR UNE SOLUTION NUMÉRIQUE	52
4.1	Limites liées au périmètre d'évaluation	53
4.1.1	Les effets du 1 ^{er} ordre ne sont pas (complètement) pris en compte	53
4.1.2	Les effets du 3 ^{ème} ordre sont ignorés	55
4.2	Limites liées aux incertitudes	56
4.3	Limites liées aux hypothèses d'évaluation	57
4.3.1	Dans le cas <i>a priori</i>	58
4.3.2	Dans le cas <i>a posteriori</i>	60
4.4	Limites liées à la déconnexion des stratégies globales	61
4.4.1	Les interactions éventuelles entre les leviers sont ignorées	62
4.4.2	Les impacts évités pourraient être négligeables par rapport aux objectifs	63
4.5	Limites déjà relevées par la littérature	63
4.5.1	Horner et al. (2016)	64
4.5.2	J. C. T. Bieser et Hilty (2018b)	64
4.5.3	Bremer et al. (2023)	65
4.6	Conclusion	65
5	RECOMMANDATIONS POUR L'ÉVALUATION DES IMPACTS ÉVITÉS PAR UNE SOLUTION NUMÉRIQUE	66
5.1	Recommandations existantes pour l'évaluation des solutions numériques	67
5.1.1	Horner et al. (2016)	67
5.1.2	Coroamă et al. (2020)	69
5.2	Recommandations liées au périmètre	69
5.2.1	Utiliser une approche ACV	70
5.2.2	Considérer les effets du 3 ^{ème} ordre	70
5.3	Recommandations liées aux incertitudes	71
5.3.1	Lister les sources d'incertitudes	72

5.3.2	Évaluer les incertitudes sur les données d'entrée par analyse de sensibilité	73
5.4	Recommandations liées à la scénarisation	73
5.4.1	Évaluations a priori et a posteriori	73
5.4.2	Explicitier la scénarisation	74
5.4.3	Définir avec soin le scénario « sans solution numérique »	77
5.5	Remettre en perspective les résultats	77
5.5.1	Discuter des obstacles et des verrous à la mise en place de la solution numérique dans le contexte de l'urgence écologique	78
5.5.2	Recontextualiser l'évaluation dans les stratégies d'atténuation	78
5.5.3	Comparer la solution numérique avec des alternatives	79
5.6	Conclusion	79

II LE CAS PARTICULIER DES PLATEFORMES DE COVOITURAGE RÉGULIER 81

6	INTRODUCTION 82	
6.1	Définition du covoiturage	83
6.2	Les objectifs de mise en place du covoiturage	85
6.2.1	La SNBC	86
6.2.2	Le PDU de l'aire grenobloise	88
6.3	Problématique	88
7	ÉTAT DE L'ART DE L'ÉVALUATION DU POTENTIEL DU COVOITURAGE 93	
7.1	Questions de recherche	95
7.2	Modalités d'organisation	95
7.3	Modalités de rencontre et de séparation	100
7.4	Approches de modélisation de la demande en mobilité	101
7.4.1	Modèles à 4 étapes	103
7.4.2	Modèle basé sur les activités	104
7.4.3	Modèles intégrés transport-urbanisme	105
7.5	Méthodes d'appariement	106
7.6	Limites de l'état de l'art et choix méthodologiques	108
8	IMPACT ACTUEL DU COVOITURAGE RÉGULIER 111	
8.1	Données d'entrée et logiciels utilisés	112
8.1.1	Parts modales par distance parcourue	113
8.1.2	Registre de Preuves de Covoitage	114
8.1.3	Données pour les calculs d'itinéraire	115

8.1.4	Logiciels pour le calcul d'itinéraires	115
8.2	Étude du report modal vers le covoiturage régulier	118
8.2.1	Évaluation basée sur un modèle de choix fonction de la distance parcourue	118
8.2.2	Étude basée sur la comparaison des durées d'itinéraire entre VP et modes alternatifs	119
8.3	Potentiel actuel des modes alternatifs pour les trajets covoiturés	121
8.4	Conclusion	123
9	MÉTHODE DE MODÉLISATION DU COVOITURAGE	126
9.1	Présentation générale	127
9.2	Formalisation de la demande en mobilité	128
9.3	Filtrage de la demande en mobilité	130
9.4	Construction du graphe d'appairabilité	130
9.4.1	Covoiturage à l'identique	131
9.4.2	Covoiturage partiel	132
9.5	Appariement des trajets	134
9.5.1	Algorithme d'appariement ne tenant pas compte des circuits	135
9.5.2	Algorithme d'appariement tenant compte des circuits	136
9.6	Erreurs potentiellement introduites par la méthode	138
9.6.1	Appariement à heuristique gloutonne	138
9.6.2	Non prise en compte des détours	139
9.6.3	Non prise en compte des réorganisations possibles des emploi du temps pour le covoiturage	140
10	VÉRIFICATION DE LA SYNTHÈSE DE DEMANDE EN MOBILITÉ	141
10.1	Synthèse de la demande en mobilité	142
10.1.1	Données d'entrée	143
10.1.2	Étape 1 : synthèse de la population	145
10.1.3	Étape 2 : affectation des chaînes d'activités	146
10.1.4	Étape 3 : localisation des activités	148
10.1.5	Itinéraires des trajets	152
10.2	Propriétés attendues de la demande pour l'évaluation de la distance évitée grâce au covoiturage	152
10.3	Biais de la demande en mobilité	154
10.3.1	Corrélations entre les chaînes d'activités et les caractéristiques socioéconomiques	155
10.3.2	Distribution spatiale des logements et des activités primaires	155
10.3.3	Utilisation des itinéraires les plus courts	156
10.4	Conclusion	157

11 EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS	159
11.1 Présentation des objectifs relatifs au covoiturage dans le PDU	160
11.2 Plan d'expériences	161
11.2.1 Scénarios	161
11.2.2 Plan d'expérience en étoile	162
11.3 Résultats	163
11.4 Interaction avec d'autres leviers de la stratégie	165
11.5 Interprétation des résultats	167
11.6 Conclusion	168
12 IMPLÉMENTATION	170
12.1 Architecture du code	170
12.1.1 Présentation du concept de pipeline	171
12.1.2 Pipeline de calcul de la distance parcourue en VP passager	172
12.2 Détails d'implémentation des graphes d'appairabilité	173
12.2.1 Graphe d'appairabilité pour le covoiturage à l'identique	173
12.2.2 Graphe d'appairabilité pour le covoiturage partiel	176
12.3 Conclusion	178
 CONCLUSION GÉNÉRALE 180	
13 CONCLUSION GÉNÉRALE	181
13.1 Discussion	184
13.2 Travaux futurs	186
A DOCUMENTATION DE DÉVELOPPEMENT	189
A.1 Structures de données	189
A.2 Données d'entrée	190
A.3 Implémentation d'une étape	190
A.4 Organisation du répertoire	192
B LIMITES IDENTIFIÉES PAR BREMER ET. AL (2023)	194
C BIBLIOGRAPHIE	196

TABLE DES FIGURES

- 1.1 Évolution, entre 1750 et 2010, de différents indicateurs socio-économiques (à gauche, en orange) et d'indicateurs liés au système Terre (à droite, en bleu) (Steffen, Broadgate et al., 2015) 2
- 1.2 Évolution des émissions de GES annuelles mondiales de 1970 à 2022 (Crippa et al., 2023) 4
- 1.3 Projection des émissions de GES du numérique à partir de 2020 par Andrae et Edler (2015) et Belkhir et Elmeliqi (2018) (Freitag et al., 2021) 5
- 2.1 Limites planétaires (Richardson et al., 2023)^a 15
- 2.2 Doughnut (Jfpochon, 2021; Raworth, 2012)^b 15
- 2.3 Cinq trajectoires socio-économiques partagées, représentant différents compromis entre les défis pour l'atténuation et ceux pour l'adaptation au changement climatique (O'Neill et al., 2017) 17
- 2.4 Cadre d'évaluation intégré sur le climat futur, ses impacts et son atténuation (Calvin et al., 2023, p. 65) 18
- 2.5 Catégories de scénario (Calvin et al., 2023, p. 65) 18
- 2.6 Émissions mondiales de GES des scénarios modélisés (a), et résultats projetés des émissions issues des évaluations des politiques à court terme pour 2030 (b) (Calvin et al., 2023, p. 59) 20
- 2.7 Trajectoire des émissions et des puits de GES sur le territoire national entre 2005 et 2050 dans la SNBC 2 (SNBC, 2020) 21
- 3.1 Modèle LES (Hilty & Aebischer, 2015) 32
- 3.2 Étapes de l'ACV (AFNOR, 2006c) 36
- 3.3 ACV comparative pour le calcul des impacts d'une solution numérique liés aux effets du 1^{er} et 2^{ème} ordre (Coroamă et al., 2020) 39
- 3.4 Méthode « ICT Enablement » (GeSI, 2015), repris de J. C. T. Bieser et Hilty (2018b) 42
- 3.5 Séparation des secteurs du numérique par Malmordin et Lundén (2018) 45
- 3.6 Principe de la décomposition de Kaya et illustration de l'augmentation nette des émissions de GES 49
- 4.1 Illustration de l'impact du rebond direct, avant et après substitution et surestimation de l'impact du 2^{ème} ordre par omission des effets rebond direct, repris de Coroamă et al. (2020) 61
- 6.1 Affiche du gouvernement des États-Unis durant la Seconde Guerre mondiale (Pursell, 1943) 84

- 6.2 Évolution du taux de remplissage des **VP** en France et le scénario **SNBC** 87
- 6.3 Le cœur urbain et les espaces périurbains sur le ressort territorial du **SRTC** (Plan de déplacements urbains de l'agglomération grenobloise, 2019) 89
- 6.4 Délimitation de mon objet d'étude 91
- 6.5 Contextualisation des différents niveaux d'impacts des plateformes de covoiturage 92
- 7.1 Les différentes modalités de rencontre et de séparation vues dans Furuhata et al. (2013) 102
- 8.1 Parts modales en fonction de la distance parcourue (Brutel & Pages, 2021) 113
- 8.2 Distance covoiturée totale et nombre d'enregistrements par mois (en haut); distances covoiturées pour chaque enregistrement du **RPC** (en bas) 116
- 8.3 Trajets du **RPC** en Isère en octobre 2021 117
- 8.4 Parts modales des trajets pendulaires (en haut, issues de Brutel & Pages, 2021) et parts modales résultant de l'application du modèle de choix simpliste (en bas) 119
- 8.5 Pondération des parts modales de l'INSEE ([Figure 8.1](#)) par rapport aux nombres d'enregistrements mensuels du **RPC** 120
- 8.6 Comparaison des durées à vélo (à gauche), en **TC** (à droite) et en **VP** pour les trajets **RPC** dans le périmètre du **SMMAG** 121
- 8.7 Distributions cumulées des différences (à gauche) et rapports (à droite) entre les durées à vélo (en haut), en **TC** (en bas) et en **VP** pour les trajets **RPC** dans le périmètre du **SMMAG** 122
- 8.8 Distributions cumulatives de la distance covoiturée en fonction de la durée d'itinéraire à vélo (à gauche) et en **TCs** (à droite) 123
- 8.9 Dans le périmètre du **SMMAG**, évolutions en distances covoiturées de la faisabilité des trajets en **TCs** (1^e graphique) et de la faisabilité des trajets à vélo (2^e graphique); de la distribution des distances (3^e graphique) et de la distance totale covoiturée (4^e graphique) 124
- 9.1 Enchaînement des grandes étapes pour calculer le potentiel du covoiturage avec **MEPCEL** 128
- 9.2 Graphe d'appairabilité 131
- 9.3 Illustration des contraintes spatiales pour le covoiturage à l'identique 132

9.4	Illustration des contraintes spatiales pour le covoiturage partiel	133
9.5	Graphe d'appairabilité appairé	135
10.1	Flux synthétiques recalculés à partir de la matrice OD au départ de A vers les communes B, C et D	151
10.2	Exemple d'affectation des lieux de travail aux habitant·e·s de A	151
11.1	Distance parcourue évitée en fonction de la variation de différents paramètres et pour plusieurs scénarios	165
11.2	Distance évitée en VP grâce au covoiturage en fonction de la part de la population participant au covoiturage (calcul restreint aux trajets sortant ou entrant du cœur urbain)	166
11.3	Comparaison du potentiel du covoiturage par rapport aux potentiels des TC et des modes doux	167
12.1	Exemple de pipeline	171
12.2	Pipeline de données de MEPCEL (gros grain)	172
12.3	Pipeline de données de MEPCEL (grain fin)	174
12.4	Illustration de la construction du graphe d'appairabilité pour le covoiturage à l'identique sur un petit nombre de trajets	177
12.5	Exemple de création de graphe d'appairabilité pour le covoiturage partiel	179
A.1	Arborescence d'un exemple de pipeline	191
A.2	Structure du répertoire du code pour l'analyse du potentiel du covoiturage	193

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Les domaines scientifiques qui lient numérique et environnement (Hilty & Aebscher, 2015)	6
2.1	Cas d'étude sélectionnés pour les évaluations du potentiel global du numérique, par secteur (J. C. T. Bieser et al., 2023)	23
2.2	Les principaux discours sur les grandes tendances du numérique vis-à-vis de son rôle dans le changement climatique (Freitag et al., 2021)	27
3.1	Taxonomie des effets du numérique (Horner et al., 2016)	33
3.2	Méthodes d'évaluation utilisées en fonction du secteur du numérique	47

3.3	Proxys utilisés par Bol et al. (2021) pour l'identité de Kaya	49
5.1	Recommandations de Horner et al. (2016)	68
5.2	Taxonomies d'incertitudes (Barahmand & Eikeland, 2022)	72
5.3	Limites dans la littérature et recommandations pour l'évaluation des impacts environnementaux évités grâce à une solution numérique	80
6.1	Évolution de chaque facteur et contributions à la variation absolue des émissions de GES du secteur des transports de voyageurs entre 2015 et 2050 (Bigo, 2020)	87
7.1	Formes de covoiturage	99
7.2	Matériel nécessaire par type de plateforme de covoiturage	100
10.1	Exemple de matrice OD des trajets pendulaires	149
11.1	Scénarios	162
11.2	Valeur des paramètres pour les plans en étoile	163
B.1	Limites identifiées pour l'évaluation des impacts directs (Bremer et al., 2023)	194
B.2	Limites identifiées pour l'évaluation des impacts indirects (Bremer et al., 2023)	195

LISTE DES ALGORITHMES

9.1	Algorithme glouton basique de Hartman et al. (2014)	136
9.2	Algorithme glouton en tenant compte des circuits	138

ACRONYMES

ABM	activity-based model. 103–105 , 109
ACV	Analyse de Cycle de Vie. viii , ix , xiii , xvii , 6 , 29 , 35–41 , 45 , 47 , 52 , 53 , 55–57 , 66 , 69 , 70 , 73 , 80
ACV-A	ACV attributionnelle. 39 , 40 , 71
ACV-C	ACV conséquentielle. 40 , 71
BAN	Base Adresse Nationale. 146
BAU	business-as-usual. 74 , 77
CDN	contribution déterminée au niveau national. 19 , 20 , 58 , 185
EMD	Enquête Ménages et Déplacements. 83 , 143 , 147 , 156
EMP	Enquête sur la mobilité des personnes. 143
ENTD	Enquête Nationale Transports et Déplacements. 82 , 83 , 143 , 156
EPCI	établissement public de coopération intercommunale. 115
Filosofi	Fichier Localisé Social et Fiscal. 145 , 146
GES	gaz à effet de serre. xiii , xvi , 3–5 , 16 , 17 , 19–21 , 23–25 , 27 , 30 , 33 , 34 , 41 , 44 , 46 , 48 , 49 , 54 , 56 , 58–60 , 62 , 63 , 70 , 75 , 78 , 82 , 85–87 , 90 , 94 , 106 , 112 , 127 , 167 , 183 , 194 , 195
GeSI	Global Enabling Sustainability Initiative. 63 , 64
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 3 , 15–17 , 19–21 , 62 , 185
IA	intelligence artificielle. 53 , 55
ICT4S	ICT for Sustainability. 5 , 7 , 9 , 10 , 31 , 53
ICV	inventaire du cycle de vie. 37 , 38
ILCD	International Reference Life Cycle Data System. 41
IRIS	Ilot Regroupé pour l'Information Statistique. 145 , 146
LES	Life-Cycle-Enabling-Structural. viii , xiii , 29–32 , 69
LUTI	Land Use and Transport Interaction. 42 , 43 , 103 , 105 , 106
MaaS	Mobility-as-a-Service. 105
MAP	marche à pied. 103 , 112 , 118 , 165 , 166 , 183

MEGC	modèle d'équilibre général calculable. 71
MEPCEL	Méthode d'évaluation du potentiel du covoiturage à l'échelle locale. xiv , xv , 126–129 , 131 , 134 , 138–142 , 152–154 , 156 , 157 , 159–161 , 166 , 167 , 170–172 , 174 , 178 , 183 , 186 , 189
OD	origine-destination. xv , xvi , 96 , 106 , 148 , 149 , 151 , 156
ONG	organisation non gouvernementale. 4 , 17 , 181
ONU	Organisation des Nations Unies. 15
OSM	OpenStreetMap. 113 , 115
PAN	Point d'Accès National. 113 , 115 , 166
PDU	Plan de Déplacements Urbains. x , xii , 82 , 85 , 88 , 90 , 91 , 108 , 111 , 126 , 153 , 157 , 159–161 , 164 , 165 , 168 , 169 , 182–185
PUE	Power Usage Effectiveness. 48 , 49
RPC	Registre de Preuves de Covoiturage. x , xiv , 11 , 111 , 114–123 , 125 , 126 , 165 , 182
Sirene	Système national d'identification et du répertoire des entreprises et de leurs établissements. 145
SMA	système multi-agents. 103 , 105 , 107 , 108 , 140 , 152 , 186
SMMAG	Syndicat Mixte des Mobilités de l'Aire Grenobloise. xiv , 88 , 103 , 112 , 114 , 115 , 118 , 119 , 121 , 122 , 124 , 160 , 163 , 164 , 168 , 183 , 184
SMTC	Syndicat Mixte des Transports en Commun. xiv , 89
SNBC	Stratégie Nationale bas-carbone. xiv , 13 , 17 , 19 , 76 , 82 , 85–88 , 185
TAZ	Traffic Analysis Zone. 103 , 104
TC	transport en commun. xiv , xv , 43 , 60 , 62 , 99 , 103 , 111 , 112 , 115 , 117–125 , 127 , 155 , 165–169 , 183 , 184
TIC	technologies de l'information et de la communication. 5–7 , 10 , 70 , 71
UE	Union Européenne. 19 , 41
UF	unité fonctionnelle. 36 , 39 , 40
VP	véhicule particulier. xi , xii , xiv , xv , 82 , 86 , 87 , 111–113 , 115 , 118–123 , 125 , 127 , 128 , 142 , 156 , 159 , 163–167 , 170 , 172 , 183 , 185

INTRODUCTION

L'influence de l'humanité sur les équilibres du système Terre est telle que l'on parle de définir une nouvelle ère géologique : l'*Anthropocène*, terme construit selon l'idée que l'humanité (*Anthro-*) a une influence majeure sur la géologie et sur les écosystèmes (Crutzen, 2002). Steffen, Broadgate et al. (2015) proposent de dater le début de cette ère au milieu du XX^e siècle, période depuis laquelle on observe une accélération simultanée de grandes tendances socio-économiques (p. ex., taux d'accroissement démographique et économique^I, consommation d'eau et d'énergie primaire) et de changements dans l'état et le fonctionnement du système du Terre (p. ex., émissions de CO₂, de méthane, augmentation de la température de la surface terrestre, acidification des océans), dite *Grande Accélération*. L'évolution de ces indicateurs est illustrée dans la [Figure 1.1](#).

Une telle accélération peut-elle continuer indéfiniment ? Le premier rapport du Club de Rome *Halte à la croissance* (Meadows et al., 1974) suggère qu'un *effondrement* du système économique mondial pourrait advenir si la dynamique actuelle de croissance continuait, par manque de ressources naturelles ou par une pollution globale devenue ingérable. Plus récemment, des chercheur·e·s posent des seuils à l'augmentation des indicateurs du système Terre sous lesquels les risques de déséquilibres environnementaux et de catastrophes naturelles sont réduits, appelés *limites planétaires*^{II}. Rester au sein de ces limites planétaires nécessiterait soit de *découpler* les dynamiques de croissance socio-économiques et celles des impacts environnementaux (ce qui va à l'encontre des conclusions du rapport du Club de Rome et fait l'objet de controverses quant à sa faisabilité), soit d'inverser ces dynamiques socio-économiques, c.-à-d., de faire décroître globalement la production et la consommation.

Face à ce constat, la notion de *développement durable* (« *sustainable development* ») apparaît pour la première fois dans le *Rapport Brundtland* (WCED, 1987), commissionné par l'Organisation des Nations Unies. Elle est définie comme il suit : « un mode de développement qui répond aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. » Le rapport fait reposer le *développement durable* sur trois piliers : la société, l'économie et l'environnement. Si ces trois piliers sont conciliés, nous vivrions alors une au sein d'une société

I. Par croissance économique, j'entends croissance du Produit Intérieur Brut.

II. Je présente les *limites planétaires* dans la [Section 2.1.1](#).

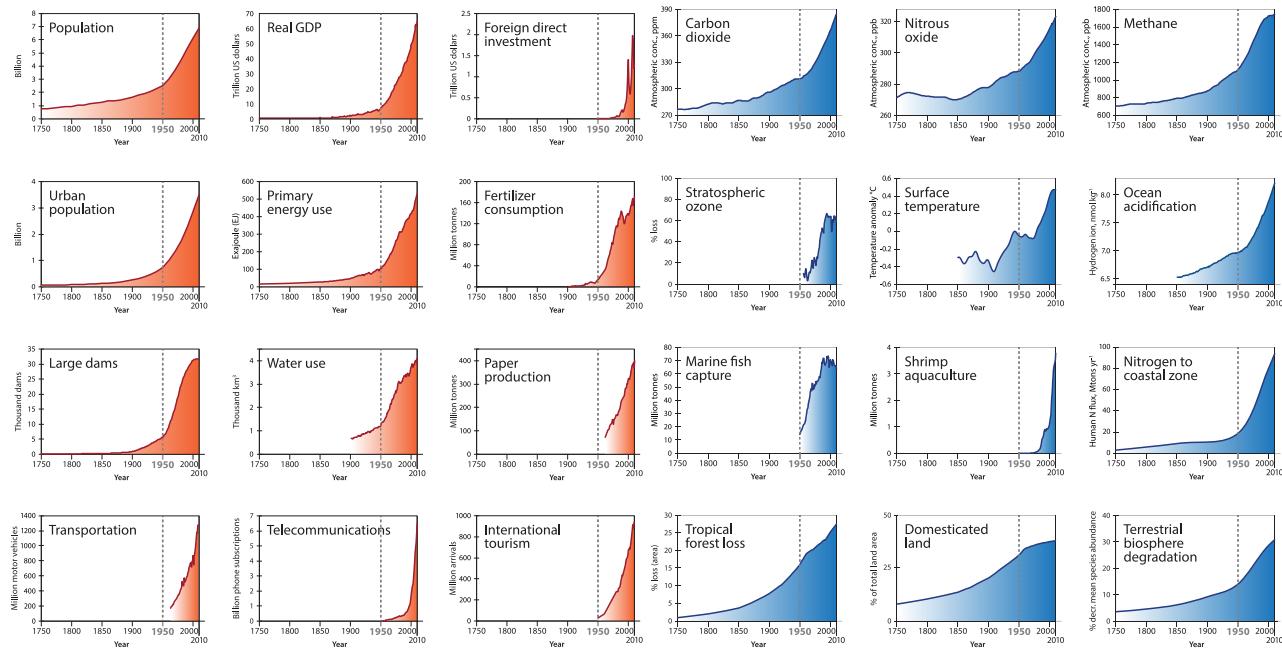


FIGURE 1.1 – Évolution, entre 1750 et 2010, de différents indicateurs socio-économiques (à gauche, en orange) et d'indicateurs liés au système Terre (à droite, en bleu) (Steffen, Broadgate et al., 2015)

soutenable^{III}. Cette définition est assez large pour laisser libre cours à deux principales interprétations qui s'opposent : la *soutenabilité faible* et la *soutenabilité forte*.

La *soutenabilité faible* repose sur le principe que les trois piliers sont d'importance égale et que l'objectif du développement durable serait d'obtenir un équilibre entre ceux-ci. Elle postule notamment que cet équilibre peut être obtenu par substitution des capitaux de chacun de ces piliers (respectivement aux trois piliers mentionnés ci-dessus, on parle de capitaux *humains*, *financiers* et *naturels*). En particulier, tout manque de ressource ou pollution (c.-à-d., déplétion du capital *naturel*) pourrait être compensé par des avancées technologiques (c.-à-d., augmentation des capitaux *financiers* et *humains*). Cette interprétation est notamment partagée par les économistes néoclassiques (Vivien, 2009).

La *soutenabilité faible* ayant été vivement critiquée par les économistes écologiques (Vivien, 2009), celleux-ci proposent la notion *soutenabilité forte*, où, à l'inverse, les capitaux ne sont pas substituables. En particulier, cette autre interprétation « est caractérisé[e] par la nécessité de maintenir, à travers le temps, un stock de « capital naturel critique », dont les générations futures ne

III. En fonction des traductions, on retrouve également les termes « durable » et « durabilité ».

sauraient se passer » (Vivien, 2009). Les piliers ne sont alors plus d'importance égale : le capital naturel est le plus important, suivi, dans cette ordre, par les capitaux humains puis financiers. Je m'inscris dans cette notion de *soutenabilité forte* au cours de ce manuscrit, que j'appelle simplement *soutenabilité*.

Dans ce contexte de *soutenabilité forte*, sont proposées des stratégies d'atténuation, dont l'objectif final est de réduire les impacts sur le système Terre selon un ou plusieurs indicateurs, et d'adaptation aux risques induits par l'augmentation de ces impacts. Le changement climatique, phénomène directement lié aux indicateurs d'émissions de CO₂, de méthane et d'augmentation de la température de la surface terrestre illustrés dans le cadre de la *Grande Accélération* par Steffen, Broadgate et al. (2015) dans la Figure 1.1, est le meilleur exemple de limite pour laquelle des stratégies sont énoncées. Notamment, l'Accord de Paris est signé en 2015 par 195 pays, qui s'engagent alors à maintenir le réchauffement climatique en deçà de 2 °C, et de préférence en deçà de 1,5 °C, par rapport aux niveaux préindustriels. D'après le *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)*, qui étudie les causes du changement climatique, les stratégies d'atténuation et d'adaptation, il faudrait une réduction massive, rapide et globale des émissions de *gaz à effet de serre (GES)* pour atteindre l'objectif posé par l'Accord de Paris. Cependant, malgré cet accord qui fait suite à des décennies d'alertes et de décisions prises en réponse au changement climatique (notamment le Sommet de Rio en 1992 et le Protocole de Kyoto en 1997), les émissions de *GES* continuent d'augmenter d'année en année (voir la Figure 1.2). Si bien qu'en 2020, plus de 11 000 scientifiques signent une déclaration : la planète Terre fait face à une *urgence climatique* (Ripple et al., 2020).

J'inscris mon travail de thèse dans le contexte plus général d'*urgence écologique*^{IV}, terme qui insiste sur les délais courts qu'il reste à l'humanité pour mettre en place des changements profonds aux échelles internationale, nationale et individuelle afin de répondre aux enjeux de la *Grande Accélération*, incluant non seulement le changement climatique, mais aussi toutes les autres limites planétaires.

1.1 Pourquoi m'intéresser au numérique ?

Freitag et al. (2021) est une revue de la littérature des évaluations des émissions de *GES* liées au cycle de vie de l'infrastructure

IV. L'expression « *urgence écologique* » est entrée dans le droit français en 2009 avec la loi du premier Grenelle de l'environnement (Barrière, 2022; LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (1), 2009).

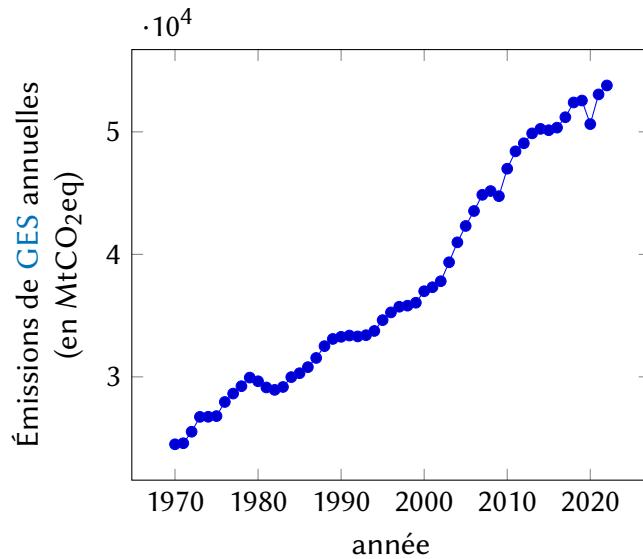


FIGURE 1.2 – Évolution des émissions de GES annuelles mondiales de 1970 à 2022 (Crippa et al., 2023)

numérique mondiale, comprenant les terminaux, réseaux et datacentres, appelées *impacts directs*^V. D'après ces évaluations les impacts directs ont augmenté environ deux fois plus rapidement que l'ensemble des émissions (Freitag et al., 2021), inscrivant ainsi cette dynamique dans la *Grande Accélération*. Toujours d'après Freitag et al. (2021), les impacts directs du numérique continueront d'augmenter au moins aussi rapidement, au moins jusqu'en 2030 (voir Figure 1.3). Ces tendances à venir à l'échelle mondiale sont confortées par l'Arcep (Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse) pour le périmètre français (Lees Perasso et al., 2022).

De fait, il existe un consensus sur le fait que les impacts directs du numérique ne s'inscrivent pas dans une trajectoire compatible avec l'Accord de Paris (Freitag et al., 2021). Cependant, un certain nombre d'acteurs (organisation non gouvernementale (ONG), politiques, industriels) fondent une partie de leurs espoirs face à l'urgence écologique sur des solutions numériques pour réduire les impacts dans d'autres secteurs.

Les réductions d'impact permises par le numérique pourraient être par exemple :

- l'optimisation de processus (p. ex., réduction de la distance parcourue par les véhicules en optimisant les itinéraires),

V. Pour faciliter la lecture, dans ce chapitre, je fais le raccourci entre émissions de GES et impact environnemental. La notion d'impact direct est décrite dans la Section 3.1.

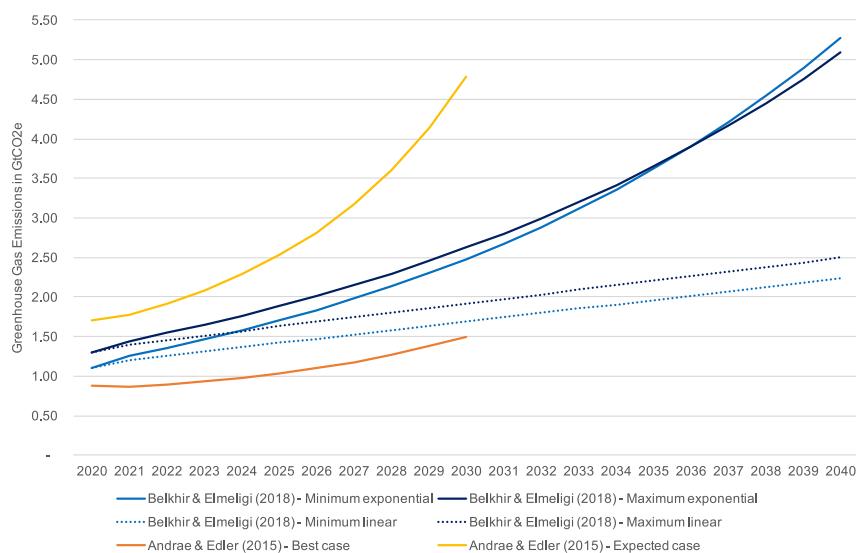


FIGURE 1.3 – Projection des émissions de GES du numérique à partir de 2020 par Andrae et Edler (2015) et Belkhir et Elmeliqi (2018) (Freitag et al., 2021)

- la substitution de produits ou de services non numériques (p. ex., remplacement de documents papier par des liseuses numériques), et,
- l’incitation (p. ex., *We Act For Good*, une application mobile promue par WWF pour inciter ses utilisateur·ices à changer de comportement).

L’effet du numérique sur l’environnement à l’échelle mondiale, c.-à-d., le fait que le numérique nous aide effectivement à réduire globalement nos impacts sur l’environnement ou non, reste l’objet de débats scientifiques. Pour certains, le numérique augmente les impacts, notamment à travers l’augmentation de la consommation d’énergie globale du numérique et les effets rebonds (Lange et al., 2020). Pour d’autres, le numérique les réduit globalement, notamment en réduisant les émissions de GES d’autres secteurs (p. ex., dans le secteur de la production d’énergie en facilitant la production et la consommation des énergies renouvelables Haldar & Sethi, 2022)^{VI}.

1.2 Contexte scientifique : une communauté naissante

Le questionnement sur le potentiel d’un numérique au service de l’environnement se reflète dans la diversité de communautés scientifiques en informatique qui traitent de la soutenabilité. Le domaine **ICT for Sustainability (ICT4S)**^{VII}, pour « *TIC pour la*

VI. Ces récits contradictoires sont résumés dans le [Chapitre 2, Tableau 2.2](#).

VII. Ici, je fais référence au domaine et non aux conférences scientifiques.

TABLE 1.1 – Les domaines scientifiques qui lient numérique et environnement (Hilty & Aebischer, 2015)

Nom du domaine	Méthodes principales	Contribution au développement durable
Informatique environnementale	Systèmes d'information, modélisation et simulation, traitement de données spatiales	Modéliser l'environnement Comprendre les systèmes complexes Partager les données et construire un consensus
Soutenabilité computationnelle	Modélisation, optimisation, raisonnement par contraintes, apprentissage automatique, etc.	Aide à la décision pour la gestion de ressources naturelles Trouver un compromis entre les objectifs contradictoires
IHM soutenable	Méthodes IHM empiriques, design, méthodes d'autres domaines	Longévité des dispositifs, promouvoir les modes de vie et comportements écoresponsables
Éco-TIC (Green IT)	Gestion de l'informatique Ingénierie du logiciel	Réduire l'impact environnemental du matériel et du logiciel (le Green by IT étant couvert par d'autres domaines)
<i>ICT for sustainability</i> (ICT4S)	Méthodes d'évaluation environnementale (p. ex., ACV), méthodes empiriques (incluant les sciences sociales), construction de scénario, modélisation et simulation	Réduire les impacts (flux matériels et énergétiques) induits par le numérique Permettre des schémas soutenables de consommation et de production Comprendre et utiliser le numérique comme une technologie transformationnelle

soutenabilité » en français, est un domaine récent qui comprend à la fois la dimension du « numérique soutenable », qui cherche à réduire l'impact direct du numérique, et du « numérique pour la soutenabilité », qui cherche à concevoir des solutions numériques pour réduire l'impact d'autres secteurs. À première vue, cette nouvelle discipline recouvre les méthodes et questions de recherche de domaines préexistants, d'après la classification de Hilty et Aebischer (2015) (Tableau 1.1) :

- Éco-TIC, un domaine de recherche qui s'intéresse à la réduction de l'impact environnemental de l'infrastructure numérique,
- Interaction Humain-Machine (IHM) soutenable, IHM étant un domaine multidisciplinaire qui s'intéresse à la conception des technologies basées sur les ordinateurs et aux interactions entre l'humain et la machine, et,
- informatique environnementale, qui consiste notamment en la modélisation de l'environnement, mais aussi à la compréhension des systèmes complexes, au partage de données environnementales et à la construction de consensus.

D'après Hilty et Aebischer (2015), ce qui distingue **ICT for Sustainability (ICT4S)** de ces autres domaines est sa dimension critique à l'égard du numérique : quel est l'effet d'une solution numérique sur la société en général — a-t-elle le potentiel de contribuer au « développement durable » ?^{VIII} Par conséquent, c'est une discipline tout à fait pertinente par rapport au débat scientifique présenté.

Les méthodes utilisées dans ce domaine sont très variées, de sorte à pouvoir répondre correctement aux questions de recherches. Parmi celles-ci, on retrouve bien entendu les méthodes classiques d'évaluation environnementale, mais également des méthodes issues des sciences sociales (Hilty & Aebischer, 2015).

Cette discipline se retrouve dans les communautés de la conférence éponyme au domaine **ICT4S** et du workshop *Computing within LIMITS*. Elles se donnent toutes deux pour objectif de réunir des travaux qui traitent du lien entre le numérique et l'environnement au sens large : on peut y trouver des résultats d'évaluation environnementale, mais également des documents de position plus généraux, des travaux novateurs par leur interdisciplinarité et même des performances artistiques engagées.

Dans ce contexte environnemental et scientifique, la question générale qui anime mon travail de thèse est la suivante : quel est le potentiel des solutions numériques face à l'urgence écologique ?

VIII. « What is the effect of the solution on society at large – does it have a potential to contribute to sustainable development? » (Hilty & Aebischer, 2015)

1.3 Problématique et plan général

Au cours de ce manuscrit, je traite principalement la sous-question suivante : comment mener une évaluation environnementale d'une solution numérique qui soit pertinente vis-à-vis de l'urgence écologique? ^{IX}.

Dans la [Partie I](#), je fais d'abord l'état de l'art sur les potentiels risques et opportunités du numérique face à l'urgence écologique ([Chapitre 2](#)). Ensuite, je présente et illustre les méthodologies d'évaluation des impacts environnementaux du numérique ([Chapitre 3](#)). Puis, je présente les faiblesses que j'ai constatées dans la littérature académique sur l'évaluation des impacts environnementaux de solutions numériques ([Chapitre 4](#)). Enfin, je propose des recommandations méthodologiques afin de pallier ces faiblesses ([Chapitre 5](#)).

Dans la [Partie II](#), j'étudie le potentiel d'une solution numérique particulière : les plateformes numériques de covoiturage régulier. J'illustre, à travers cette étude de cas, les limites des méthodologies d'évaluation environnementale et les recommandations présentées dans la [Partie I](#). Je commence par présenter le contexte de cette étude de cas ([Chapitre 6](#)). Ensuite, je fais l'état de l'art des évaluations du potentiel environnemental du covoiturage régulier ([Chapitre 7](#)). Dans la suite, je présente mes contributions techniques et mes résultats dans le contexte de l'étude de cas : ma première contribution est une méthode d'évaluation de la distance parcourue évitée actuellement grâce aux plateformes numériques de covoiturage régulier à partir de données ouvertes ([Chapitre 8](#)) ; ma deuxième contribution répond directement à l'étude du potentiel des plateformes de covoiturage avec la proposition d'une nouvelle méthode d'évaluation de la réduction des impacts environnementaux par le covoiturage régulier ([Chapitre 9](#)). Puis, étant conscient des imperfections de ma méthode, j'étudie ses limites. ([Chapitre 10](#)). J'applique cette méthode à l'échelle de la métropole de Grenoble (France) ([Chapitre 11](#)). Je montre notamment que les objectifs fixés par les stratégies de la métropole de Grenoble en termes de distance covoiturée^X sont très ambitieux : environ 70 % des autosolistes actuels, ce qui représente une part colossale, doivent se mettre à covoiturer pour atteindre ces objectifs. Enfin, je présente les éléments techniques relatifs à mon

IX. D'autres sous-questions sont tout aussi intéressantes : Comment mettre en œuvre une stratégie de décarbonation du numérique ? Quelles méthodes de conception du numérique, comprenant ou non une évaluation environnementale, sont pertinentes face à l'urgence écologique ? Cependant, ces sous-questions nécessitent des compétences que je n'ai pas pu acquérir au vu de mon contexte scientifique de travail de thèse.

X. La distance parcourue est souvent utilisée comme proxy pour évaluer les impacts environnementaux de mobilités.

implémentation en Python de ma méthode d'évaluation du potentiel du covoiturage régulier ([Chapitre 12](#)).

1.4 Note sur le contexte scientifique de mon travail de thèse

Cette question, « Quel est le potentiel des solutions numériques face à l'urgence écologique ? », a guidé mon travail vers l'exploration des objets de recherche et des méthodes de la sous-communauté scientifique informaticienne ayant une forte prise de conscience environnementale. Dans mon cas, les communautés que j'ai le plus côtoyées, et qui ont ainsi plus fortement influencé mon travail, sont celles de la conférence [ICT4S](#) et du workshop Computing within LIMITS.

La conférence [ICT for Sustainability \(ICT4S\)](#)^{XI} est la conférence principale de la discipline éponyme, présentée précédemment. La première édition a été organisée à Zurich (Suisse) en 2013 par Lorenz Hilty, professeur dans le domaine *Informatique et soutenabilité* qui a popularisé les taxonomies habituelles utilisées pour classifier les impacts environnementaux du numérique (« impacts directs », « indirects » et « structurels »^{XII}). À l'exception de l'édition 2018 qui a eu lieu à Toronto (Canada), toutes les éditions d'[ICT4S](#) de 2013 à 2024 se sont déroulées en Europe.

Le workshop Computing within LIMITS, ou plus simplement LIMITS^{XIII}, regroupe initialement des chercheur·e·s proches de l'IHM. Sa première édition a eu lieu en 2015 à Irvine (États-Unis). Le workshop a évolué depuis sa première édition, celui-ci accueillant désormais d'autres domaines de recherche, plus ou moins proches de l'informatique. Les premiers membres du comité d'organisation étaient Daniel Pargman de l'Institut Royal de Technologie (KTH) de Stockholm (Suède) et Barath Raghavan, qui était à l'époque à l'International Computer Science Institute (ICSI) à Berkeley (États-Unis). Depuis l'édition 2020, ce workshop se déroule exclusivement en ligne.

Les deux événements semblent s'adresser à une communauté unique : parmi les grands noms qui font aujourd'hui ces communautés, on retrouve notamment une fraction commune non négligeable de chercheur·e·s dans les deux comités de programme.

En France, un acteur majeur du milieu académique est [EcoInfo](#)^{XIV}, un groupement de service du CNRS. Bien que ce groupe n'ait pas à l'origine vocation à produire des travaux de recherche, une partie de ses membres sont des chercheur·e·s actifs du domaine. De plus,

XI. <https://conf.researchr.org/series/ict4s>

XII. Cette taxonomie est présentée dans le [Chapitre 3](#).

XIII. <https://computingwithinlimits.org>

XIV. <https://ecoinfo.cnrs.fr>

EcoInfo s'est rapidement imposé comme une source importante d'informations sur le sujet^{XV}.

Ces communautés s'efforcent à diversifier les méthodes et tendent vers l'interdisciplinarité. De plus, à ma connaissance, la plupart des chercheur·e·s ou ingénieur·e·s en informatique participant à ces communautés^{XVI}, soit ne font pas de la soutenabilité leur sujet principal (c.-à-d., publient habituellement sur des sujets autres ou dans d'autres communautés), soit ont dû effectuer une transition ou *bifurcation*, dans leurs thématiques de recherche après une prise de conscience écologique. Cette proportion importante de chercheur·e·s et d'ingénieur·e·s issus d'autres domaines a ses avantages et ses inconvénients : d'un côté les contributeur·rice·s sont plus à même de prendre du recul que d'autres parmi les praticiens de l'évaluation environnementale ou des chercheur·e·s dans les domaines de l'écologie industrielle ou l'économie écologique, par exemple en réutilisant des méthodes de leur domaine d'origine; de l'autre, les méthodes ne sont pas stabilisées et leur diversité rend les travaux difficilement comparables. Ce manuscrit est l'occasion de présenter un aperçu de l'état des connaissances qui ont trait au domaine **ICT4S**.

Enfin, j'ai également eu la chance de rencontrer la communauté liée à l'école d'été pour doctorant·e·s Sustainable ICT (SICT)^{XVII}, qui a eu lieu à Louvain-la-Neuve (Belgique) et à Grenoble (France) pendant ma thèse. J'ai eu l'honneur de participer à l'organisation de celle-ci en 2022, SICT ayant la particularité d'être organisée essentiellement par des doctorant·e·s, en particulier en ce qui concerne le choix des thématiques quotidiennes et des orateur·ice·s. Cette expérience a été l'occasion pour moi de découvrir une nouvelle génération de chercheur·e·s pour qui la prise de conscience environnementale généralement antérieure à leur entrée dans le monde de la recherche a d'emblée dirigé les questionnements scientifiques.

Notons que, mis à part *Computing within LIMITS*, tous les noms de communautés que j'ai cités (en français : « **TIC** pour la soutenabilité », « **TIC Soutenable** » et EcoInfo qui semble regrouper les mots « Écologie » et « Informatique ») laissent entendre la possibilité pour le numérique de répondre aux enjeux environnementaux. Pourtant, certain·e·s chercheur·e·s issu·e·s des communautés ICT4S, SICT et EcoInfo se demandent si on ne devrait pas plutôt se passer du numérique pour revenir à l'intérieur des limites planétaires^{XVIII}.

XV. Le groupe EcoInfo s'est notamment vu décerner un *Cristal collectif* du CNRS en 2023 soulignant la reconnaissance de son expertise (INS2I, 2023).

XVI. Mis à part les plus jeunes chercheur·e·s, dont je parle juste après.

XVII. <https://www.sictdoctoralschool.com>

XVIII. D'après discussions avec les chercheur·e·s concernées. Sur ce thème, voir « *Pourquoi et comment démanteler le numérique ?* » (Couillet & Poissonnier, 2023) et « *Que la transition écologique soit, et la transition numérique fut.* » (Garin et al., 2023).

1.5 Note sur la disponibilité du code et des données

Une recommandation transversale et générale qui s'applique aux évaluations environnementales du numérique, comme pour tout autre travail scientifique, est de garantir leur reproductibilité. En effet, par nature, les recommandations que je présente dans le [Chapitre 5](#) visent essentiellement à rendre explicites des hypothèses et des choix qui tendent à être négligés. Dans un but de cohérence scientifique, il est alors essentiel de veiller à ce que les évaluations soient vérifiables et réutilisables. Il est d'autant plus important de mettre les données à la disposition de la communauté des chercheur·e·s et de faire en sorte que les moyens nécessaires à la reproductibilité soit les plus accessibles possible^{XIX}. A minima les outils, y compris les sources des logiciels, s'il y en a, devraient être à la disposition du public.

C'est pourquoi toutes les implémentations décrites sont distribuées en tant que logiciels libres^{XX} sur des dépôts publics. De même, les données utilisées sont presque toujours publiques et facilement accessibles. C'est le cas en particulier des deux principales contributions techniques de ce manuscrit, qui sont détaillées dans la [Partie II](#) :

- Le calculateur des émissions évitées actuellement grâce aux plateformes de covoiturage régulier à partir des données du [Registre de Preuves de Covoiturage \(RPC\)](#) :
<https://purl.archive.org/rasoldier.limits2022>,
- La suite logicielle de traitement de données pour l'évaluation du potentiel du covoiturage régulier : <https://gitlab.inria.fr/carpooling-potential/carpooling-potential-analyzer>.

Ces deux contributions techniques sont détaillées dans la [Partie II](#).

XIX. En ce qui concerne les problématiques liées à l'ouverture des données, se référer à l'introduction du [Chapitre 4](#).

XX. Qui respectent les libertés énoncées par la Free Software Foundation (FSF) : « les utilisateurs ont la liberté d'exécuter, copier, distribuer, étudier, modifier et améliorer ces logiciels » (Stallman, [s. d.](#)). Plus d'informations sur le site de la FSF (fsf.org) ou de GNU (gnu.org).

Première partie

CONTRIBUTIONS À L'ÉVALUATION DES
IMPACTS ÉVITÉS DE SOLUTIONS
NUMÉRIQUES

LE NUMÉRIQUE FACE À L'URGENCE CLIMATIQUE : ENJEUX ET PROBLÉMATIQUE

Structure du chapitre

2.1	L'urgence écologique	13
2.1.1	Les limites planétaires	14
2.1.2	L'urgence climatique	15
2.2	Les stratégies de décarbonation	17
2.2.1	L'Accord de Paris	19
2.2.2	La Stratégie Nationale Bas-Carbone	19
2.2.3	Stratégies non officielles	21
2.3	Le potentiel du numérique face à l'urgence climatique	22
2.3.1	Numérique : de quoi parle-t-on ?	22
2.3.2	Potentiel d'impacts évités des solutions numériques : de quoi parle-t-on ?	24
2.3.3	Les controverses à propos de l'impact environnemental du numérique	25
2.4	Problématique	26

L'urgence écologique est la motivation de tout le travail présenté dans ce manuscrit. Dans ce contexte, les stratégies officielles dont l'objectif est de faire face à l'urgence écologique et à l'urgence climatique fournissent une base pour discuter et décider des actions à mettre en place.

Dans ce chapitre, je présente d'abord les enjeux environnementaux ([Section 2.1](#)). Ensuite, je présente deux stratégies pour répondre à l'urgence climatique proposées à l'échelle internationale, l'Accord de Paris, et en France, la [Stratégie Nationale bas-carbone \(SNBC\)](#) ([Section 2.2](#)). Enfin, je me concentre sur les solutions numériques ([Section 2.3](#)), et plus particulièrement sur les questions suivantes : que dit-on sur le potentiel des solutions numériques pour répondre à l'urgence écologique ? Quelle fiabilité peut-on accorder aux discours qui mettent en avant ce potentiel, et quelles sont les controverses à ce sujet ?

2.1 L'urgence écologique

Quand on parle d'urgence écologique, on entend souvent parler de *réchauffement, changement, crise ou urgence climatique*. Pourtant, ce n'est pas l'unique menace provoquée par la pression de la société humaine sur son environnement. Pour donner une vision plus générale des enjeux environnementaux auxquels l'humanité fait face,

je rappelle en premier lieu les enjeux environnementaux de façon succincte, dont l'urgence climatique fait partie.

Dans un deuxième temps, je décris plus en détail le changement climatique qui est l'une des menaces les plus médiatisées et étudiées de notre époque. C'est par rapport à celui-ci que sont définies les stratégies internationales d'atténuation auxquelles nous nous intéresserons par la suite.

2.1.1 *Les limites planétaires*

Les limites planétaires (« planetary boundaries » en anglais), sont un concept introduit par Rockström et al. (2009) puis étendu par Persson et al. (2022) et Wang-Erlundsson et al. (2022). Ce concept définit un ensemble de neuf limites au sein desquelles l'humanité devrait opérer afin d'éviter des perturbations majeures des équilibres écologiques de la Terre pouvant conduire à des modifications brutales, non-linéaires, potentiellement catastrophiques et difficilement prévisibles de l'environnement. Plus précisément, pour un processus donné lié au système Terre, une limite se caractérise par une valeur associée à une variable de contrôle, dont le dépassement ne permet plus de garantir l'équilibre du système Terre. Par exemple, le changement climatique est quantifié par la concentration en dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère, exprimée en partie par million en volume (p.p.m.v.) et par le forçage radiatif, c.-à-d. la différence entre la puissance radiative émise par la planète et reçue de l'espace au niveau du haut de l'atmosphère, exprimée en $\text{W} \cdot \text{m}^2$. Un autre exemple est celui de l'acidification des océans, qui est quantifié par la concentration d'ions carbonates dans l'eau à la surface de l'océan.

Ces limites sont (dans le sens anti-horaire de la Figure 2.1) : le changement climatique, l'érosion de la biodiversité, les modifications des usages des sols, la perturbation du cycle de l'eau, la perturbation des cycles biochimiques de l'azote (N) et du phosphore (P), l'acidification des océans, les aérosols atmosphériques, la diminution de la couche d'ozone et la pollution chimique (nouvelles entités). En 2023, neuf limites planétaires sont caractérisées, dont six sont déjà dépassées : celles qui concernent la pollution chimique, les nouvelles entités, l'usage des sols, l'érosion de la biodiversité, les eaux vertes et bleues et le changement climatique (Richardson et al., 2023). Suivant le principe de précaution, les limites planétaires prennent en compte les incertitudes provenant à la fois du manque de connaissances scientifiques et des incertitudes géophysiques à proprement parler.

Le concept de limites planétaires a été étendu par Raworth (2012, 2017) pour représenter sur un même diagramme les limites planétaires et les besoins humains minimaux, « de la nourriture au logement en passant par les soins et la démocratie ». Selon ce modèle,

il serait possible de répondre aux besoins humains sans dépasser les limites planétaires (cf. Figure 2.2). De par la forme du diagramme, ce modèle étendu s'appelle le *doughnut*.

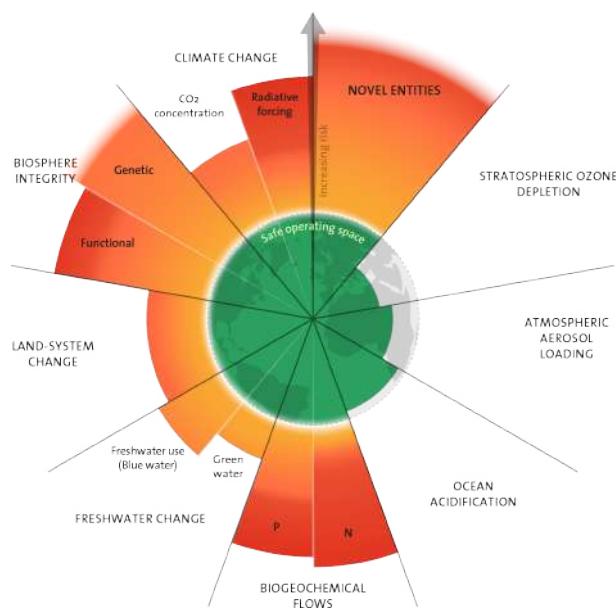


FIGURE 2.1 – Limites planétaires (Richardson et al., 2023)^a

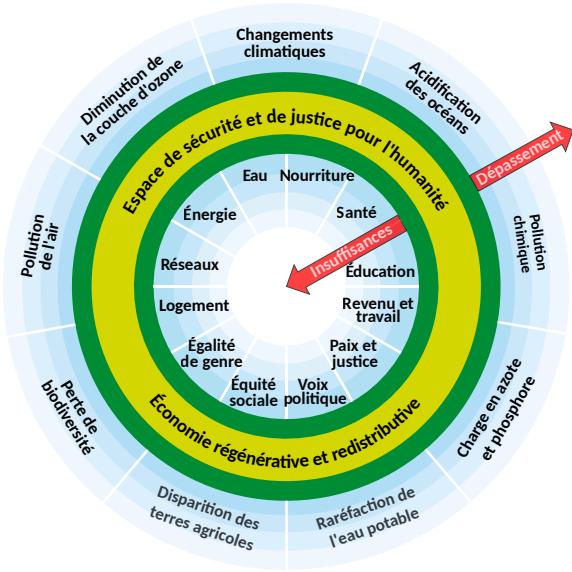


FIGURE 2.2 – Doughnut (Jfpochon, 2021; Raworth, 2012)^b

(À gauche) La perturbation des cycles d'eau douce est divisée en eau verte (précipitations terrestres, évaporation et humidité du sol) et en eau bleue (rivières, lacs et réservoirs renouvelables). L'érosion de la biodiversité est divisée en diversité fonctionnelle et génétique (Steffen, Richardson et al., 2015). Les limites ayant déjà été dépassées ont une jauge orange.

Licences : ^aCC BY-NC-ND 3.0, ^bCC BY-SA 4.0

Par la suite, je me concentre sur le changement climatique, car il est l'enjeu pour lequel le plus de scénarios d'évolutions sont construits aux échelles internationale et nationale, et pour lequel le plus de stratégies d'atténuation sont proposées. En effet, cet enjeu est le plus étudié de ceux couverts par les limites planétaires.

2.1.2 L'urgence climatique

Le **Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)** est une organisation internationale créée en 1988 sous les auspices de l'**Organisation des Nations Unies (ONU)**. Son objectif principal est d'évaluer les connaissances scientifiques sur le changement climatique pour l'atténuer et s'y adapter. Dans le Rapport de synthèse du sixième rapport d'évaluation paru en 2023, les conclusions du **GIEC** sont claires :

1. Le réchauffement climatique observé est principalement dû aux activités humaines, notamment aux émissions de GES. La température de surface globale a augmenté de 1,1 °C par rapport à la période 1850-1900 en 2011-2020. Les émissions mondiales de GES continuent d'augmenter, avec des contributions inégales liées à l'utilisation insoutenable de l'énergie, à l'utilisation des terres, aux modes de vie et aux modèles de consommation et de production.
2. Le réchauffement mondial a une probabilité élevée d'atteindre 1,5 °C à court terme. Chaque degré de réchauffement intensifiera les risques climatiques. Certaines conséquences du changement climatique sont inévitables et/ou irréversibles (p. ex., augmentation du niveau des océans, perte de biodiversité), mais peuvent être limitées par des réductions rapides des émissions de GES.
3. Une action climatique avec des mesures profondes, rapides et soutenues d'atténuation et d'adaptation est nécessaire pour réduire les pertes et dommages humains et environnementaux. La transition vers des options d'atténuation et d'adaptation efficaces est nécessaire dans tous les secteurs pour assurer un avenir viable et durable. Une action équitable est essentielle, tout comme la gouvernance et les politiques efficaces, le financement, la technologie et la coopération internationale.

Les rapports du GIEC se basent sur des modèles d'évaluation intégrés : ce sont des simulations numériques qui représentent les interactions et rétroactions entre le système socioéconomique et le système naturel, conçues pour l'aide à la décision (van Beek et al., 2020). Autrement dit, ces modèles lient des variables socio-économiques avec des variables physiques liées à l'environnement. Ils permettent d'évaluer le changement climatique pour des scénarios d'émissions possibles associés à différents récits. Ces récits correspondent à ce qu'on appelle les trajectoires socio-économiques partagées (SSP pour *Shared Socioeconomic Pathways*)¹. Les SSP retenues dont dérivent les scénarios du dernier rapport du GIEC sont les suivantes :

1. « Soutenabilité : prendre la route verte »
2. « Milieu de la route »
3. « Rivalité régionale : une route rocallieuse »
4. « Inégalités : une route divisée »

I. Six catégories de variables définissent ces récits : la démographie; le développement humain; l'économie et le mode de vie; les politiques et les institutions (politiques climatiques exclues); la technologie; l'environnement et les ressources naturelles (O'Neill et al., 2017).



FIGURE 2.3 – Cinq trajectoires socio-économiques partagées, représentant différents compromis entre les défis pour l’atténuation et ceux pour l’adaptation au changement climatique (O’Neill et al., 2017)

5. « Développement par les énergies fossiles : prendre l’autoroute »

Les SSP sont alors associées à des trajectoires d’émissions, illustrées dans Figure 2.4. Parmi les cinq trajectoires d’émissions, les SSP1-1.9 et SSP1-2.6 (trajectoires associées au SSP *Soutenabilité*) permettent de limiter ce réchauffement à 1,5 °C et 2 °C respectivement.

2.2 Les stratégies de décarbonation

Se rapprocher au plus possible des trajectoires souhaitables définies par le GIEC en limitant le réchauffement climatique bien en dessous de 2 °C, et de préférence à 1,5 °C par rapport à l’ère préindustrielle, était justement l’objectif de l’Accord de Paris. Dans cette section, je présente cet Accord (Section 2.2.1), ainsi que la SNBC (Section 2.2.2), qui sont respectivement, un traité international et la stratégie d’atténuation des émissions de GES, dite *stratégie de décarbonation*, à l’échelle de la France. L’Accord de Paris et la SNBC me servent de référence dans le reste du manuscrit. Dans une dernière sous-section (Section 2.2.3), je présente quelques autres stratégies proposées par des ONG.

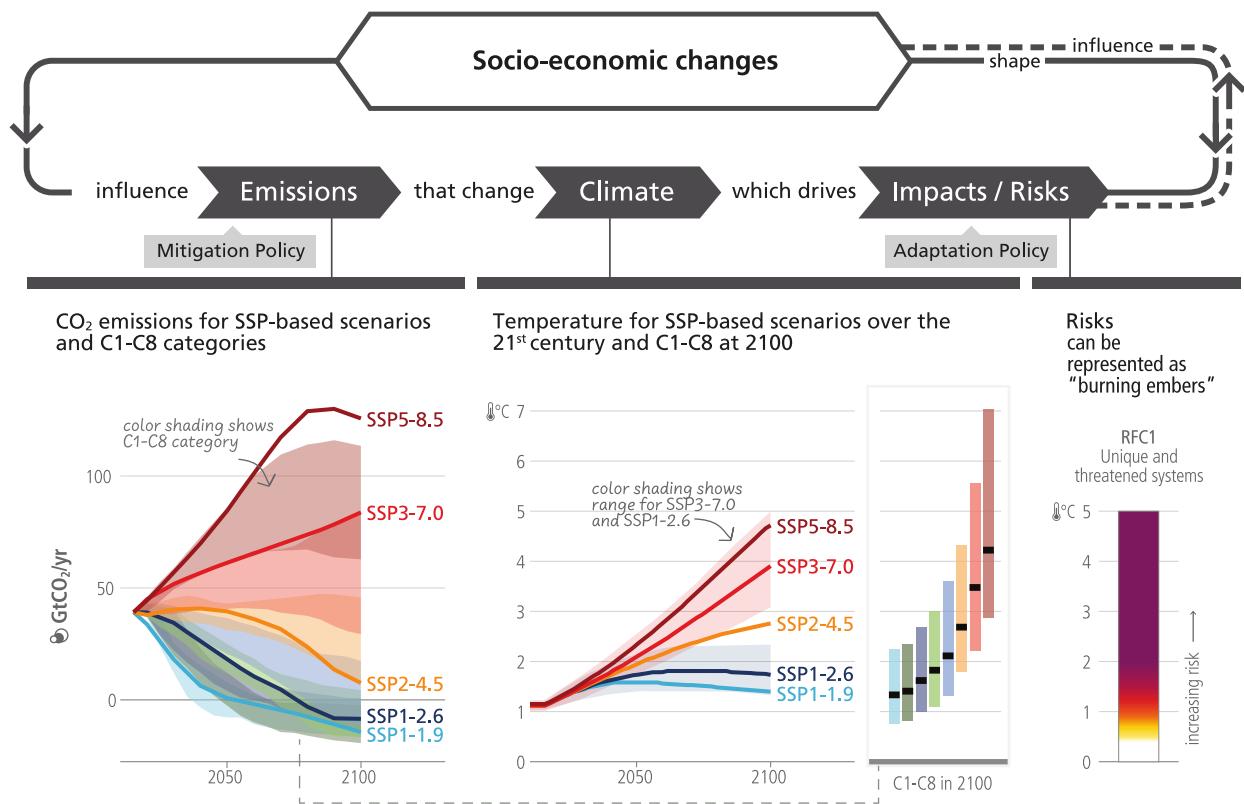


FIGURE 2.4 – Cadre d'évaluation intégré sur le climat futur, ses impacts et son atténuation (Calvin et al., 2023, p. 65)

Traduction du diagramme supérieur :

« Les changements socio-économiques influencent les émissions, qui modifient le climat, ce qui conduit à des impacts ou des risques, qui eux-mêmes influencent les changements socio-économiques. » Les noms des scénarios sont sous la forme SSPx-y, x étant le numéro du scénario SSP, et y étant le forçage radiatif atteint en 2100 en W · m².

Les zones d'ombre colorées sur les différentes figures mettent en avant 8 catégories (C1 à C8) d'augmentation de la température globale moyenne en 2100.

Category in WGIII	Category description
C1	limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot
C2	return warming to 1.5°C (>50%) after a high overshoot
C3	limit warming to 2°C (>67%)
C4	limit warming to 2°C (>50%)
C5	limit warming to 2.5°C (>50%)
C6	limit warming to 3°C (>50%)
C7	limit warming to 4°C (>50%)
C8	exceed warming of 4°C (>50%)

FIGURE 2.5 – Catégories de scénario (Calvin et al., 2023, p. 65)

2.2.1 L'Accord de Paris

L'Accord de Paris est un traité signé par 195 États lors de la 21^{ème} Conférence des Parties (COP21) à Paris en 2015. L'Accord engage les États signataires à publier une **contribution déterminée au niveau national (CDN)**, c.-à-d., des informations sur les objectifs de décarbonation à atteindre et des mesures politiques de réduction des émissions de **GES** et d'adaptation aux impacts du changement climatique. Ces **CDN** doivent être mises à jour tous les 5 ans à partir de 2020. D'après le dernier rapport du **GIEC**, les mesures des **CDN** actuelles ne permettent probablement pas de rester sous les 1,5 °C de réchauffement global et rendra plus difficile la limitation à 2 °C après 2030 (voir [Figure 2.6](#)).

Les pays de l'**Union Européenne (UE)** ayant signé l'accord d'un seul bloc, la **CDN** de la France est donc celle de l'**UE**. Dans l'optique d'atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050, l'objectif à l'échelle de l'**UE**, donnée par le *Pacte Vert de l'Europe*, est de réduire ses émissions de **GES** de 55 % par rapport aux années 1990 d'ici à 2030 (« *Fit for 55* ») « dans tous les secteurs et dans l'ensemble de l'Union » (Loi européenne sur le climat, [2020](#)). Cet objectif de réduction de l'ensemble des pays de l'**UE** se décline différemment pour chacun de ses pays membres.

2.2.2 La Stratégie Nationale Bas-Carbone

Indépendamment du Pacte Vert de l'Europe, la France se dote de sa propre stratégie de décarbonation, la **SNBC** ([SNBC, 2020](#)). La **SNBC** est introduite en 2015, peu avant la signature de l'Accord de Paris, par la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV). Elle définit une trajectoire de réduction des émissions de **GES** pour atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050. La **SNBC** a été révisée en 2019, cette nouvelle version^{II} étant publiée au début de l'année 2020. C'est de cette version dont il est question dans le reste du manuscrit.

La **SNBC** fixe des budgets d'émissions de **GES** (*budgets carbone*) pour des périodes successives de cinq ans jusqu'en 2050 ([Figure 2.7](#)). Pour faire respecter ces budgets, des orientations générales sont fixées, dans lesquelles des recommandations sont données. Les budgets et orientations sont regroupés par secteur : transports, bâtiment, agriculture, forêt-bois, industrie, production d'énergie et déchets.

La **SNBC** s'appuie non seulement sur des mesures de sobriété, mais aussi sur des leviers technologiques. Par exemple, l'efficacité énergétique des véhicules et des bâtiments, l'évolution vers un mix énergétique décarboné, ou encore, les outils pour accompagner

II. Cette version est aussi appelée *SNBC 2*.

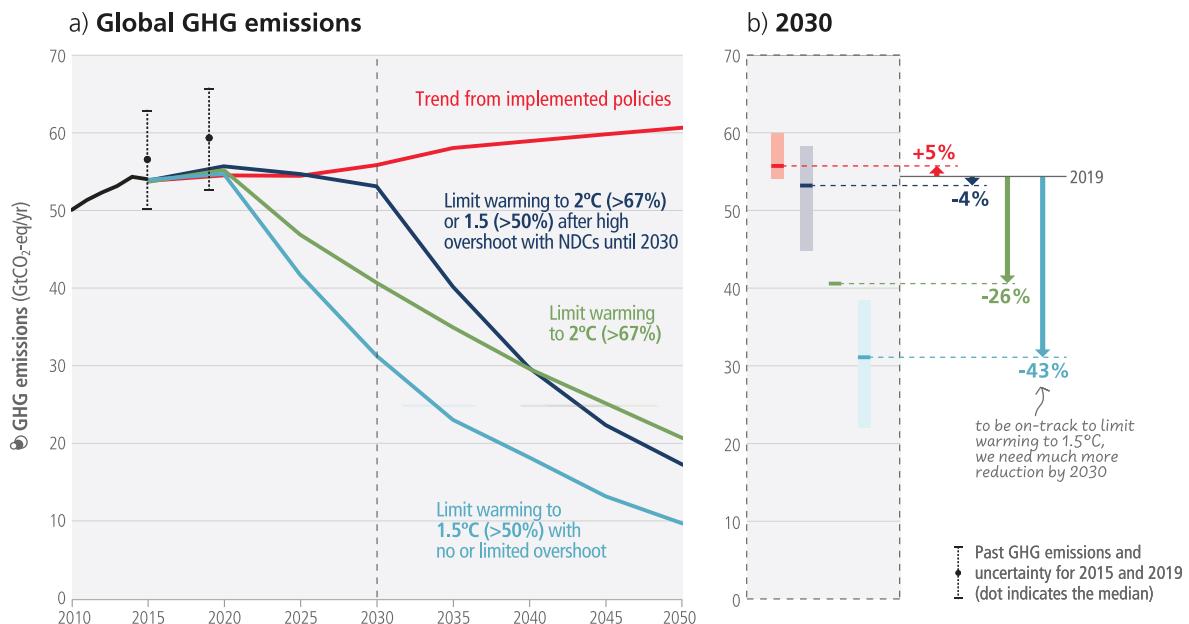


FIGURE 2.6 – Émissions mondiales de GES des scénarios modélisés (a), et résultats projetés des émissions issues des évaluations des politiques à court terme pour 2030 (b) (Calvin et al., 2023, p. 59)

Ci-après, traduction de la légende originale. Catégories de la Figure 2.5.
 (a) montre les émissions mondiales de GES de 2015 à 2050 pour quatre types de scénarios :

COURBE ROUGE Trend from implemented policies : scénarios avec des émissions de GES prévues à court terme conformes aux politiques mises en œuvre jusqu'à la fin de 2020 et étendues avec des niveaux d'ambition comparables au-delà de 2030 [C5-C7].

COURBE BLEU FONCÉ Limit to 2 °C (> 67 %) or return warming to 1,5 °C (> 50 %) after a high overshoot, with NDCs until 2030 : scénarios avec des émissions de GES jusqu'en 2030 associées à la mise en œuvre des CDN annoncées avant la COP26, suivies de réductions accélérées des émissions susceptibles de limiter le réchauffement à 2 °C ou de ramener le réchauffement à 1,5 °C avec une probabilité de 50 % ou plus après un dépassement important [C2].

COURBE VERTE Limit to 2 °C (> 67 %) with immediate action : scénarios limitant le réchauffement à 2 °C (> 67 %) avec action immédiate après 2020 [C3].

COURBE BLEU CLAIR Limit to 1,5 °C (> 50 %) with no or limited overshoot : scénarios limitant le réchauffement à 1,5 °C sans ou avec un dépassement limité [C1].

Tous ces scénarios supposent une action immédiate après 2020. Les émissions de GES pour la période 2010–2015 utilisées pour projeter les résultats du réchauffement global des scénarios modélisés sont indiquées par une ligne noire.

(b) montre un instantané des plages d'émissions de GES des scénarios modélisés en 2030 et des résultats projetés des émissions issues des évaluations des politiques à court terme en 2030 du chapitre 4.2 du rapport du Groupe de travail III du GIEC.

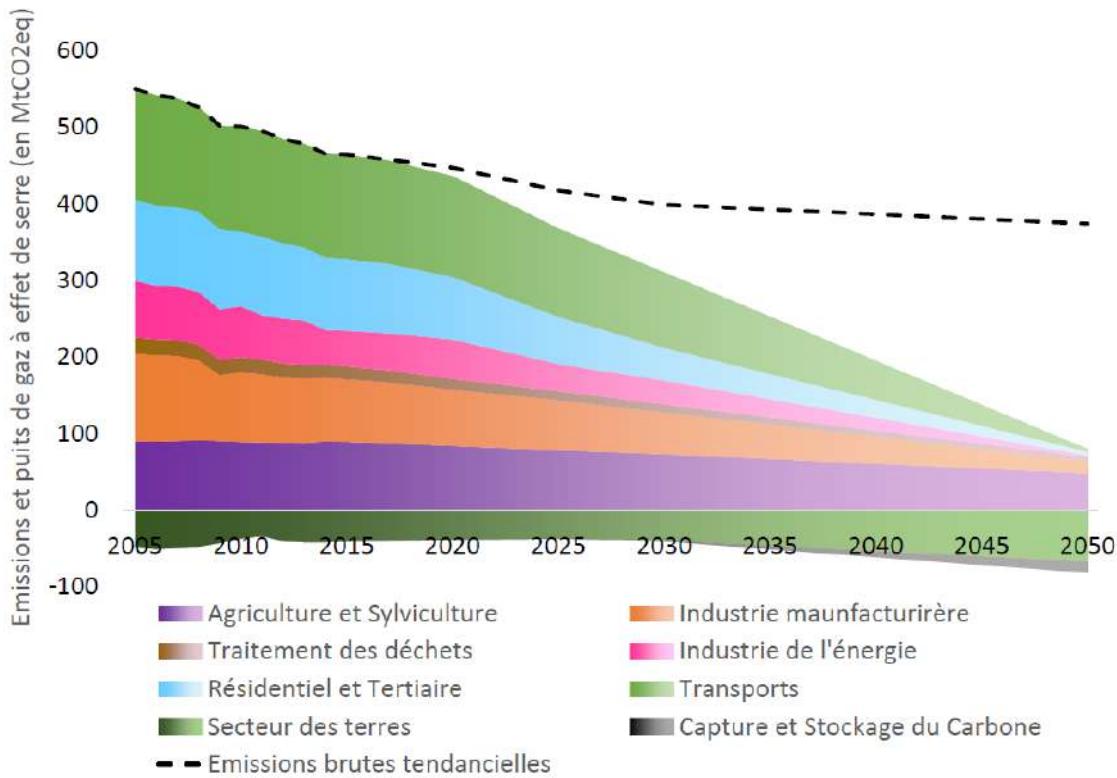


FIGURE 2.7 – Trajectoire des émissions et des puits de GES sur le territoire national entre 2005 et 2050 dans la SNBC 2 (SNBC, 2020)

l'essor des mobilités partagées telles que le covoiturage. Ce technosolutionnisme soulève un certain nombre de questions, telles que : ces technologies seront-elles prêtes à temps et aussi efficaces que prévu ? Quels changements sociaux sont-ils nécessaires pour que ces technologies atteignent leur plein potentiel ? Par la suite, je m'intéresse à certaines de ces interrogations dans le cas des solutions basées sur le numérique.

2.2.3 Stratégies non officielles

Suite à la publication des différents rapports du GIEC, d'autres stratégies de décarbonation non officielles ont vu le jour :

- Le *Plan de transformation de l'économie française* (PTEF) (The Shift project, 2022),
- Scénario négaWatt (négaWatt, 2021),
- *Transition(s) 2050* (Ademe, 2021),
- *Exponential Roadmap Initiative* (Falk et al., 2020),
- Futurs énergétiques 2050 de RTE (secteur de l'énergie français uniquement) (RTE, 2022),

- *Net Zero by 2050* (secteur de l'énergie uniquement) (IEA, 2021),
- Scénario de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA, 2019),
- Neutralité et logement de Pouget Consultants et Carbone 4 (Arquin et al., 2020)

Toutes ces stratégies ont pour objectif la neutralité carbone. Elles diffèrent néanmoins dans les moyens utilisés (p. ex., en ce qui concerne les sources d'énergie à utiliser ou les accents sur les nouvelles technologies).

2.3 *Le potentiel du numérique face à l'urgence climatique*

Parmi les nouvelles technologies présentées comme des solutions pour lutter contre le changement climatique, on trouve de nombreuses applications numériques. Par exemple, plus de la moitié des innovations labellisées *Greentech innovation* par le Laboratoire d'innovation pour la transition écologique (*Ecolab*) en 2023 sont des applications numériques. Je regroupe l'ensemble des solutions recensées par J. C. T. Bieser et al. (2023) dans sa revue de la littérature sur le potentiel du numérique dans le [Tableau 2.1](#).

2.3.1 *Numérique : de quoi parle-t-on ?*

Commençons par préciser le terme « solution numérique ». En anglais, le terme ICT ou IT pour *Information (and Communication) Technologies* est souvent employé pour ce que j'appelle plus simplement *numérique*. Ces termes désignent généralement l'ensemble des dispositifs d'électronique numérique, typiquement tous les systèmes basés sur un microprocesseur, ainsi que les programmes qu'exécutent ces dispositifs, qu'on pourrait aussi appeler *informatique*. Cependant, le périmètre de ce qu'on entend par « numérique » n'est pas figé, le choix de celui-ci étant un enjeu des évaluations environnementales du numérique (ce sur quoi je reviens dans le [Chapitre 3](#)).

Une application numérique est un cas d'usage de ces dispositifs (p. ex., une messagerie instantanée). J'emploie le plus souvent le terme *solution numérique* pour souligner le fait que ces applications sont présentées comme des éléments de solution à l'urgence climatique (p. ex., on peut penser que le courrier électronique permettrait d'empêcher les impacts environnementaux dus à l'utilisation de papier).

TABLE 2.1 – Cas d'étude sélectionnés pour les évaluations du potentiel global du numérique, par secteur (J. C. T. Bieser et al., 2023)

Secteur	Cas d'étude
Électricité et chauffage	<ul style="list-style-type: none"> – Promotion des comportements économes en énergie par la mesure et l'affichage de la consommation d'énergie (p. ex., compteurs électriques intelligents) – Flexibilisation de la demande d'électricité et couplage de la demande flexible avec la disponibilité d'électricité provenant de sources d'électricité renouvelables (« gestion de la demande ») afin d'augmenter la part des énergies renouvelables dans la consommation d'électricité – Réduction des pertes de transmission (p. ex., grâce à une distribution optimisée de l'électricité)
Transport : mobilité virtuelle	<ul style="list-style-type: none"> – Éviter les déplacements grâce au travail mobile (p. ex., le télétravail à domicile) – Éviter les déplacements professionnels grâce aux réunions virtuelles (p. ex., les vidéoconférences) – Réduction des déplacements pour achats grâce au commerce électronique – Réduction des déplacements vers les banques grâce à la banque en ligne – Réduction des déplacements à des fins éducatives grâce à l'apprentissage en ligne – Réduction des déplacements vers les médecins grâce à la santé en ligne
Transport : mobilité partagée	<ul style="list-style-type: none"> – Réduction du nombre de véhicules grâce aux véhicules partagés – Réduction du nombre de véhicules et de la distance parcourue par les véhicules grâce au partage des trajets (p. ex., le covoiturage)
Transport : transport intelligent	<ul style="list-style-type: none"> – Éviter les kilomètres parcourus par les véhicules grâce à une planification optimisée des itinéraires (p. ex., grâce aux systèmes de navigation) – Surveillance et contrôle intelligents du trafic (p. ex., en contrôlant le flux du trafic et en évitant les embouteillages) – Augmentation de l'efficacité énergétique grâce à l'utilisation de technologies numériques dans les véhicules (p. ex., gestion efficace du moteur)
Transport : logistique intelligente	<ul style="list-style-type: none"> – Amélioration de la planification des systèmes de transport (p. ex., grâce à des simulations informatiques) – Report modal du transport individuel motorisé vers des modes de transport plus efficaces en termes d'émissions de GES (p. ex., grâce à des plateformes de mobilité intermodales) – Utilisation accrue de la capacité des véhicules et évitement des kilomètres parcourus et des trajets à vide grâce à la logistique partagée – Passage de modes de transport à forte intensité de GES à des modes de transport plus efficaces en termes d'émissions de GES (p. ex., grâce à des plateformes de transport intermodales) – Maintenance prédictive
Bâtiments	<ul style="list-style-type: none"> – Surveillance de la consommation d'énergie dans les bâtiments et amélioration de la transparence de la consommation (p. ex., pour identifier les défauts ou le gaspillage) – Contrôle automatisé des bâtiments (p. ex., contrôle adaptatif du chauffage et de la ventilation) – Amélioration de la planification des bâtiments (p. ex., au moyen de simulations informatiques)
Production industrielle	<ul style="list-style-type: none"> – Optimisation des processus de production (p. ex., maintenance à distance) – Augmentation de l'efficacité énergétique des moteurs (p. ex., gestion efficace du moteur) – Développement de matériaux produisant moins d'émissions de GES lors de la production, de l'utilisation et de l'élimination (p. ex., par le biais de simulations informatiques)
Agriculture	<ul style="list-style-type: none"> – Optimisation des processus de production dans l'agriculture (p. ex., grâce à l'automatisation) – Amélioration de la surveillance et du contrôle des machines agricoles (p. ex., <i>Controlled Traffic Farming</i>) – Augmentation de la productivité grâce à la surveillance de l'état de santé des animaux d'élevage – Réduction des émissions par animal grâce à une alimentation optimisée – Réduction de l'utilisation d'engrais (p. ex., fertilisation de précision en surveillant les facteurs environnementaux dans les champs à l'aide de capteurs ou de drones) – Réduction du gaspillage et des pertes alimentaires grâce à une plus grande transparence tout au long de la chaîne de valeur
Médias	<ul style="list-style-type: none"> – Remplacement des documents papier par des documents numériques (factures, déclarations fiscales, journaux, etc.) – Remplacement des appareils physiques par des appareils virtuels (p. ex., répondeurs téléphoniques) – Remplacement des supports de données physiques pour les médias audiovisuels par le stockage de données dans le nuage (p. ex., distribution de musique et de films via des plateformes de diffusion en continu et non via des CD/DVD).

2.3.2 Potentiel d'impacts évités des solutions numériques : de quoi parle-t-on ?

En introduction du manuscrit et dans la plupart des études que je cite, les potentiels des solutions numériques sont quantifiés à l'aide d'une évaluation *a priori* (ou *ex-ante*) sous forme d'*impacts environnementaux* évités, ou d'*émissions (de GES)* évitées dans le cas où seul le potentiel sur le changement climatique est évalué.

Illustrons cette notion sur l'exemple des bâtiments intelligents en se posant la question suivante : quel est le potentiel de cette solution numérique pour participer à l'objectif de neutralité carbone ? Les bâtiments intelligents permettraient de réduire les émissions de **GES** liées au chauffage et à la climatisation par leur contrôle automatisé, la surveillance de leur consommation énergétique, etc. Les impacts évités potentiels seraient alors ceux dus à l'utilisation d'un bâtiment intelligent plutôt qu'un bâtiment traditionnel, ceux-ci tenant compte d'hypothèses sur des évolutions possibles de la société en 2050 qui peuvent être, p. ex., des moyens financiers qui empêchent ou autorisent la construction de tels bâtiments, des limitations ou incitations réglementaires sur leur construction...

On peut aussi évaluer des impacts évités *actuels* d'une solution numérique déjà en place à l'aide d'une évaluation *a posteriori* (ou *ex-post*) : ils sont la différence entre les impacts observés (dans un passé plus ou moins proche) et les impacts d'un scénario *contrefactuel* où la solution numérique n'aurait pas été mise en place.

En réalité, le calcul des impacts évités nécessite la compréhension de tous les phénomènes conséquents à la mise en place de la solution numérique, phénomènes qui sont possiblement adverses, contrairement à ce que l'exemple des bâtiments intelligents peut laisser penser (p. ex., la production de capteurs a des impacts négatifs sur l'environnement, l'augmentation de l'efficacité énergétique peut mener par effet rebond à davantage de consommation énergétique...).

Ces notions d'impacts évités potentiels et actuels sont couvertes par le concept général des *impacts évités* ([Définition 1](#)).

DÉFINITION 1 : IMPACTS ÉVITÉS PAR UNE SOLUTION NUMÉRIQUE

Les impacts évités sont la différence nette, comprenant à la fois les effets positifs et les effets adverses, d'impacts environnementaux entre deux scénarios :

- un où la solution numérique est en place, et,
- un où la solution numérique n'existe pas (des substituts pouvant être utilisés à la place).

L'impact des phénomènes adverses anime les débats au sein des communautés scientifiques à propos des impacts évités des solutions

numériques et surtout à propos du bénéfice global que le numérique pourrait avoir sur l'environnement.

2.3.3 *Les controverses à propos de l'impact environnemental du numérique*

En 2015, la GeSI (Global Enabling Sustainability Initiative) publie #SMARTer2030 *ICT Solutions for 21st Century Challenges*^{III}. Ce rapport affirme que le numérique permettrait de réduire de 20 % les émissions de GES mondiales en 2030. Le rapport de GSMA et Carbon Trust (2019), de son côté, déclare : « Par rapport à l'empreinte carbone globale des réseaux mobiles eux-mêmes, le niveau d'émissions évitées grâce aux technologies de communication mobile est 10 fois plus élevé - un impact positif décuplé. » Autrement dit, les technologies de communication mobile permettraient d'éviter 10 fois plus d'impacts que leurs impacts directs, c'est-à-dire un *facteur habilitant* égal à 10. Cependant, la validité de ces rapports est pour le moins discutable, comme nous allons le voir.

Premièrement, les méthodes de calcul utilisées dans les rapports manquent de rigueur, comme mis en avant par Roussilhe (2021)^{IV}, si bien que ce dernier décourage fortement l'utilisation des estimations de ces rapports pour toute aide à la décision.

Deuxièmement, ils n'ont pas fait l'objet d'une revue critique et ont été produits par des organisations qui représentent les industriels qui ont un conflit d'intérêt sur le sujet. En effet, les entreprises ont un intérêt financier à populariser ces solutions numériques, que ce soit pour attirer des investisseurs, augmenter leurs parts de marché, faire des bénéfices ou pour répondre à la prise de conscience environnementale du public (potentiellement en faisant du greenwashing). Plus précisément, la GeSI (2019) est un organisme financé par de grandes entreprises du numérique^V et le GSMA se dit représenter les « intérêts des opérateurs mobiles dans monde entier »^{VI VII}.

III. Même si les formulations principales sont très affirmatives, la méthodologie est nuancée : « Therefore, we encourage caution in reviewing our estimates and emphasize that our estimates reflect just one possible scenario. »

IV. L'auteur note, entre autres, que ces rapports se basent sur des hypothèses très optimistes et une non prise en compte des émissions de GES de l'infrastructure numérique complète.

V. « The GeSI is a strategic partnership of Information and Communication Technology (ICT) companies and organizations committed to creating and promoting technologies and practices to foster economic, environmental and social sustainability. » (<https://systemtransformation-sdg.gesi.org/about>)

VI. <https://www.gsma.com/aboutus/>

VII. Autre exemple : le terme « smarter cities » a été déposé par l'entreprise IBM. Cisco et Siemens ont également participé à la popularisation de ce terme, en voulant même devenir des acteurs essentiels de l'urbanisme (Söderström et al., 2014). Une

Dans la sphère académique, aussi bien l'impact évité actuel que le potentiel du numérique font l'objet de controverses scientifiques. Freitag et al. (2021) résument le débat à propos de l'effet global du numérique à travers six discours, représentés dans le Tableau 2.2. L'impact de l'infrastructure matérielle du numérique (qu'on appelle *impacts directs*) étant nécessairement négatif pour l'environnement, le débat porte principalement sur les trois points suivants :

- l'amélioration de l'efficacité énergétique ou environnementale de cette infrastructure — celle-ci peut continuer ou s'arrêter;
- l'évolution de la demande — celle-ci peut soit augmenter « plus vite » que l'amélioration de l'efficacité (de sorte à annuler les gains environnementaux de l'amélioration de l'efficacité), soit, « moins vite »;
- les gains environnementaux dans d'autres secteurs permis par le numérique, qui peuvent soit compenser les impacts directs du numérique par des gains environnementaux dans d'autres secteurs (« Enablement »), soit, à l'opposé, entraîner une croissance des impacts globaux par des effets adverses malgré l'augmentation de l'efficacité du numérique et les apports du numérique dans d'autres secteurs : c'est ce qu'on appelle le paradoxe de Jevons^{VIII}, plus tard, généralisé et appelé *effet rebond* (Vion-Dury, 2019).

Je reviens sur ces points dans le [Chapitre 3](#), et je me concentre notamment sur le troisième point dans la suite du manuscrit.

2.4 Problématique

Alors même que les stratégies de décarbonation sont en partie fondées sur le numérique, l'existence d'un débat scientifique sur le potentiel environnemental de ces technologies face à l'urgence écologique et climatique soulève un véritable enjeu : si les attentes qui reposent sur le numérique s'avéraient plus élevées que ce qu'on peut raisonnablement en espérer, alors il serait nécessaire de remettre en question ces stratégies. C'est, entre autres, ce qui me motive à m'intéresser à l'évaluation du potentiel des solutions numériques pour l'atténuation des impacts environnementaux.

Dans cette partie, je présente d'abord les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux du numérique ([Chapitre 3](#)). Je mets ensuite évidence les limites des évaluations des impacts évités de

dynamique similaire est mise en avant par Picon (2014), qui évoque un « idéal autoréalisateur » voulu par les acteurs industriels.

VIII. Au XIXe siècle, William Stanley Jevons constate que malgré l'augmentation de l'efficacité de l'extraction du charbon et de l'efficacité énergétique des machines, la quantité de charbon consommée augmente.

TABLE 2.2 – Les principaux discours sur les grandes tendances du numérique vis-à-vis de son rôle dans le changement climatique (Freitag et al., 2021)

IMPACT DU NUMÉRIQUE

	La demande	
L'amélioration de l'efficacité continue	augmente moins ou pareillement à l'efficacité « L'efficacité sauve le numérique » Les émissions du numérique diminuent ou se stabilisent. P. ex., Malmodin et Bergmark (2015), Malmodin et Lundén (2018) et Malmodin et al. (2018)	augmente plus que l'efficacité « Paradoxe de Jevons » Les émissions du numérique augmentent. P. ex., Hilty et Aebischer (2015)
	« Jevons bloqué » Les émissions du numérique se stabilisent.	« Croissance sans efficacité » Les émissions du numérique augmentent rapidement. P. ex., Andrae et Edler (2015) et Belkhir et Elmeligi (2018)

IMPACT DANS LES AUTRES SECTEURS

Enablement	Paradoxe de Jevons global
<p>Le numérique permet l'amélioration de l'efficacité dans d'autres secteurs et par conséquent permet d'éviter plus d'émissions de GES que n'en émet le numérique et malgré les effets rebond.</p> <p>L'effet net du numérique est donc de réduire les émissions mondiales.</p> <p>P. ex. GeSI (2019)</p>	<p>L'amélioration de l'efficacité par le numérique dans d'autres secteurs mène à la croissance du système. Les effets rebond dépassent les gains d'efficacité.</p> <p>L'effet net du numérique est donc d'augmenter les émissions mondiales.</p> <p>P. ex. Brockway et al. (2021)</p>

solutions numérique ([Chapitre 4](#)). Puis, je propose une série de recommandations afin de les améliorer ([Chapitre 5](#)).

La [Partie II](#), quant à elle, se focalise sur l'évaluation du potentiel d'une solution numérique spécifique : les plateformes de covoiturage régulier.

ÉTAT DE L'ART DES MÉTHODES D'ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU NUMÉRIQUE

Structure du chapitre

3.1	Classifications des effets du numérique	30
3.1.1	Effets directs et indirects	30
3.1.2	Modèle LES de Hilty et Aebischer (2015)	30
3.1.3	Classification de Horner et al. (2016)	31
3.2	Évaluer une solution numérique grâce à l' ACV	35
3.2.1	Méthodologie de l' ACV	35
3.2.2	L' ACV comparative	39
3.2.3	Approches attributionnelle et conséquentielle	39
3.3	Autres méthodes d'évaluation	41
3.3.1	Évaluer les impacts liés à l'effet de substitution grâce à la méthode <i>ICT Enablement</i>	41
3.3.2	Autre méthode d'évaluation : cas de l'effet rebond du covoitage régulier	42
3.4	Évaluer les impacts du numérique à l'échelle mondiale	44
3.4.1	Évaluer les impacts directs du numérique à l'échelle mondiale	44
3.4.2	Prendre en compte les effets indirects du numérique à l'échelle mondiale	50
3.5	Conclusion	51

La question du potentiel des solutions numériques face à l'urgence climatique s'inscrit dans celle, plus générale, des impacts environnementaux du numérique. Dans ce chapitre, je présente un panorama des méthodes existantes pour évaluer ces impacts.

Lorsqu'on évoque les impacts environnementaux du numérique, on fait communément référence aux impacts environnementaux du cycle de vie des infrastructures numériques, c.-à-d., l'utilisation de ressources, d'énergie et les pollutions associées à la fabrication, l'usage et la fin de vie des datacentres, des réseaux et des équipements électroniques (Berthoud et al., 2012; F. Flipo et al., 2013). En plus de ces impacts dits *directs*, le numérique peut éventuellement être à l'origine d'impacts indirects, c.-à-d., sur les autres secteurs. Comme mentionné au [Chapitre 2](#), ces derniers peuvent être soit positifs, soit négatifs.

Dans ce chapitre, je présente d'abord différentes classifications des effets du numérique sur l'environnement ([Section 3.1](#)). Puis, je décris successivement les méthodes utilisées pour évaluer les impacts de solutions numériques : je décris dans un premier temps l'[ACV](#) ([Section 3.2](#)), puis, dans un second temps, j'illustre la variété des

autres méthodes utilisées ([Section 3.3](#)). Enfin, je présente les méthodologies d'évaluation du numérique à l'échelle mondiale ([Section 3.4](#)).

3.1 Classifications des effets du numérique

Les types d'effets¹ sont des abstractions de l'origine des impacts, p. ex., de l'infrastructure numérique, de l'usage d'une solution numérique ou des transformations structurelles conséquentes à cet usage. À noter que j'utilise le mot *effet* pour désigner les phénomènes et *impact* pour désigner les conséquences environnementales, potentiellement quantifiables.

Il existe différentes classifications des types d'effets environnementaux du numérique dans la littérature. Je commence par décrire la classification la plus simple — effets directs et indirects — puis je finis par la plus complète, en passant par le modèle [Life-Cycle–Enabling–Structural \(LES\)](#), proposé par Hilty et Aebischer ([2015](#)).

3.1.1 Effets directs et indirects

On pourrait définir les effets directs et indirects en fonction de leur éloignement dans des chaînes de causalité des phénomènes. Cependant, ce n'est pas cette définition qui a été retenue dans la littérature (Grimal et al., [2021](#)).

À la place, j'utilise plutôt la taxonomie de Horner et al. ([2016](#)), pour qui les termes *direct* et *indirect* qualifient précisément le périmètre des effets :

- *direct* pour les effets liés au cycle de vie de l'infrastructure numérique,
- *indirect* pour tous les autres effets, c.-à-d. liés aux usages qui sont faits des technologies numériques ainsi qu'à leurs conséquences.

3.1.2 Modèle LES de Hilty et Aebischer ([2015](#))

Hilty et Aebischer ([2015](#)) classent les effets environnementaux du numérique selon trois niveaux dans le modèle [Life-Cycle–Enabling–Structural \(LES\)](#) (voir [Figure 3.1](#)) que je présente

I. À ne pas confondre avec les catégories d'impact, qui elles sont liées à un indicateur environnemental. P. ex., la consommation d'énergie, les émissions de GES, l'acidification de l'eau... Je présente la notion de catégorie d'impact dans la [Section 3.2](#).

dans la [Définition 2](#). Cette classification permet notamment de distinguer deux sous-classes d'effets indirects.

DÉFINITION 2 : MODÈLE LES

EFFETS DU 1^{ER} ORDRE. (« Life-Cycle Impact ») Il s'agit des effets directs présentés précédemment. Les impacts liés à ces effets correspondent donc au « coût environnemental de la fourniture de services numériques ».

EFFETS DU 2^{ÈME} ORDRE. (« Enabling Impact ») Ce sont les effets de « l'application des services numériques ».

EFFETS DU 3^{ÈME} ORDRE. (« Structural Impact ») Ce sont les effets systémiques, « la réaction [...] de la dynamique du système socio-économique à la disponibilité des services numériques. »

Les trois ordres du modèle [LES](#) sont ceux que j'utilise dans mon manuscrit^{II}, car celui-ci fait office de référence dans la communauté [ICT4S](#).

3.1.3 Classification de Horner et al. (2016)

Horner et al. (2016) proposent une synthèse des classifications des effets environnementaux du numérique de Berkhout et Hertin (2004), Hilty et Aebischer (2015), Rattle (2010) et E. Williams (2011) et proposent leur propre classification à partir de celles-ci. Dans le [Tableau 3.1](#), je reprends la comparaison entre la classification proposée par Horner et al. (2016) et celle de Hilty et Aebischer (2015) présentée dans la [Section 3.1.2](#).

La classification de Horner et al. (2016) distingue différents types d'effets de 1^{er} ordre, en faisant apparaître les impacts de production, d'usage et de fin de vie, et différents types d'effets du 2^{ème} ordre, en faisant apparaître les effets d'augmentation d'efficacité, aussi parfois appelée optimisation (p. ex., le GPS fluidifie le trafic en améliorant les itinéraires), et de substitution (p. ex., le GPS remplace les cartes en papier). Les auteure·s divisent également les effets de 3^{ème} ordre en quatre types qui correspondent aux types d'effets rebond (ER) décrits par F. Flipo et Gossart (2009) : rebond direct (1), rebond indirect (2), rebond à l'échelle de l'économie (3) et les effets de transformation (4)^{III} :

II. D'autres interprétations de ces termes sont faits dans la littérature. Par exemple, pour Arvesen et al. (2011) et Börjesson Rivera et al. (2014), les effets de 1^{er} ordre font référence aux effets d'efficacité et de substitution, tandis que les « effets indirects » ne désignent que les effets rebond.

III. F. Flipo et Gossart (2009) et Häkansson et Finnveden (2015) considèrent que les effets de transformation systémique sont des effets rebond, ce qui n'est pas le cas de Horner et al. (2016).

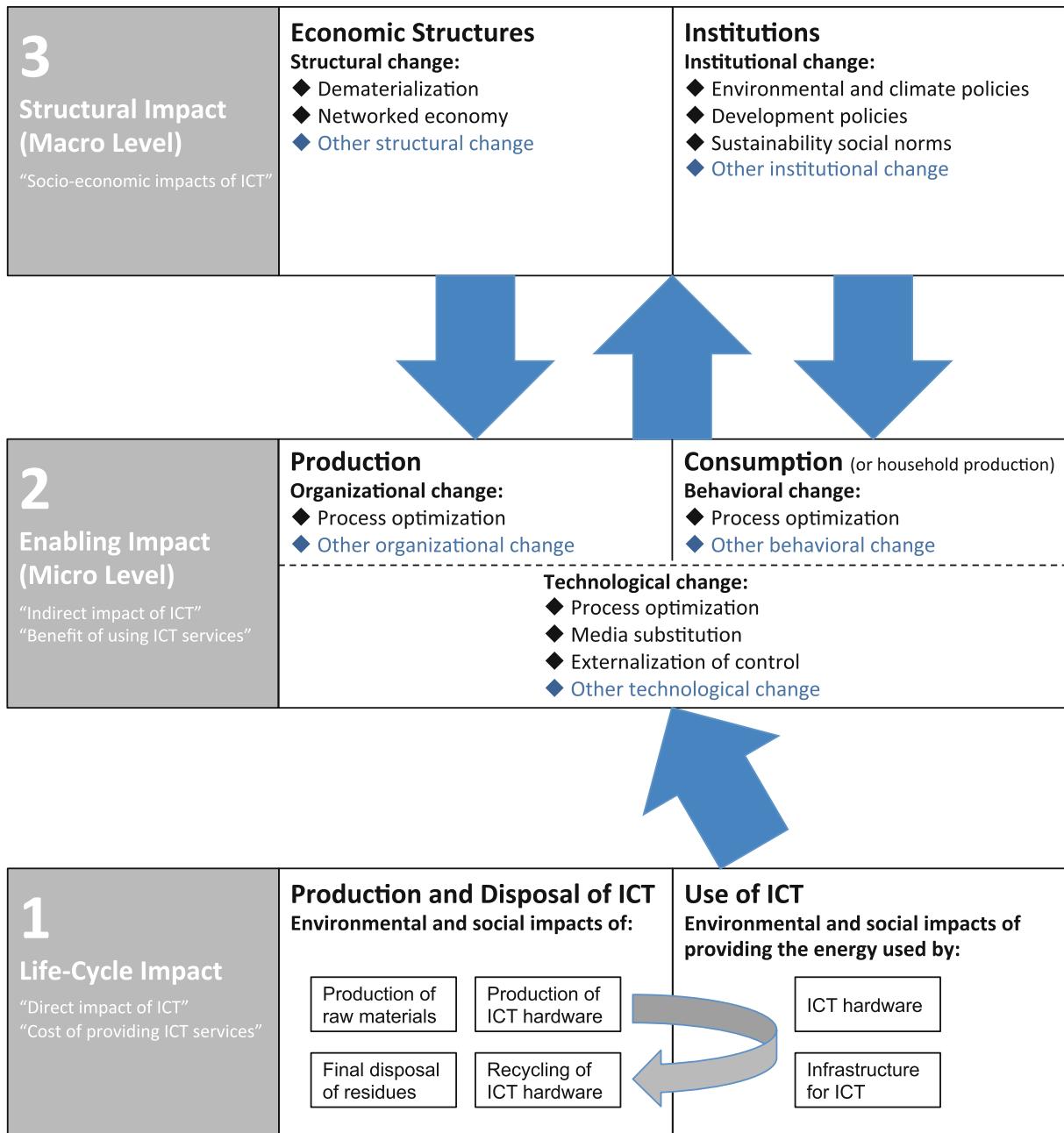


FIGURE 3.1 – Modèle LES (Hilty & Aebischer, 2015)

TABLE 3.1 – Taxonomie des effets du numérique (Horner et al., 2016)

Horner et al. (2016)	Hilty et Aebischer (2015)	Périmètre	Exemples (système GPS)
Énergie grise	1 ^{er} ordre	Direct	Énergie pour produire un système GPS
Énergie opérationnelle			Énergie pour faire fonctionner un système GPS
Énergie de traitement des déchets			Énergie pour traiter un système GPS en fin de vie
Efficacité	2 ^{ème} ordre	Indirect : service seul	Trafic plus fluide grâce aux itinéraires améliorés par le GPS
Substitution			Remplacement des cartes en papier
Rebond direct	3 ^{ème} ordre	Indirect : autres services	Plus de voyages à cause de moins d'embouteillages
Rebond indirect			Énergie consommée ailleurs grâce au temps gagné
Rebond à l'échelle de l'économie (changement structurel)		Indirect : économie	Le GPS permet les véhicules autonomes, donc la croissance de la production de système de transports intelligents
Transformation systémique		Indirect : société	Les véhicules autonomes modifient les schémas de vie : où vivre et où travailler

La troisième colonne correspond au périmètre concerné par le type d'effet, c.-à-d., le système qu'il faudrait prendre en compte pour évaluer les effets correspondants (« direct », pour effets directs, correspondant à l'infrastructure numérique). Les lignes du tableau sont ordonnées dans l'ordre croissant de la taille du périmètre. Les couleurs des cases correspondent au type de périmètre : gris pour l'infrastructure numérique et bleu pour les systèmes extérieurs ou englobant l'infrastructure numérique. Plus le bleu est pâle, plus le système est grand. La quatrième colonne donne des exemples pour chacun des types d'effet d'un système de guidage par satellite (GPS).

Les impacts environnementaux présentés sont restreints à l'utilisation d'énergie dans ce tableau – mais on peut étendre cette classification à toute catégorie d'impact, comme celles relatives aux limites planétaires, et aux émissions de GES.

1. « L'*effet rebond direct* joue au niveau microéconomique d'un service énergétique. Lorsque l'on réduit l'intensité en énergie d'un service énergétique, son prix tend à diminuer et son coût pour le consommateur final à baisser. Dès lors, soit ce dernier utilise l'économie résultante pour consommer plus du service concerné (effet substitution), soit il estime avoir atteint un niveau de consommation de ce service satisfaisant, auquel cas il affecte cette économie à d'autres fins (effet revenu). »
2. « Suite à ce dernier effet, le choix d'une consommation accrue d'autres services ou biens génère un deuxième type d'ER, qui correspond à une consommation induite de matière ou d'énergie. L'individu pourra par exemple décider de voyager plus loin, une entreprise pourra en profiter pour étendre ses activités de production, qui sont rarement énergétiquement neutres. »
3. « Un troisième type d'ER reflète l'impact des ajustements de prix et de quantités consécutifs aux deux ER précédents sur les agrégats de consommation et d'investissement des consommateurs privés et publics. Bien moins avéré que les précédents, il opère notamment à travers les ajustements de prix sur les marchés d'approvisionnement en matière et en énergie. Il peut contribuer à renchérir les biens et services intermédiaires et favoriser l'essor de la croissance économique en général et des secteurs gourmands en énergie en particulier. »
4. « Enfin, le quatrième type d'ER regroupe des effets dits de transformation, qui ont le pouvoir de changer les préférences des consommateurs, d'altérer les institutions sociales, et de modifier l'organisation de la production. »

À noter que les classifications que j'ai présentées sont parfois critiquées. Par exemple, Grimal et al. (2021) soulignent ainsi la difficulté à classifier les impacts sociaux liés aux changements de condition de vie des travailleurs dans les mines, qui sont liés aux « effets indirects » du cycle de vie de l'infrastructure numérique. Dans la Section 3.4.1.2, je montre un autre exemple de type d'effet dont l'intégration dans ces classifications pose problème, car il n'a pas été considéré par leurs auteurs : l'effet rebond des émissions de GES après l'amélioration de l'efficacité énergétique du cycle de vie de l'infrastructure numérique.

Pour simplifier mon propos, j'appelle simplement *impact du 1^{er} ordre* (ou *impact direct*), *2^{ème} ordre* et *3^{ème} ordre* les résultats des

évaluations d'impacts qui ne prennent en compte que les effets, respectivement, du 1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} ordre^{IV}.

3.2 Évaluer une solution numérique grâce à l'ACV

D'après l'Ademe (2018), « [l'**ACV**] est l'outil le plus abouti en matière d'évaluation globale et multicritère des impacts environnementaux. Cette méthode normalisée permet de mesurer les effets quantifiables de produits ou de services sur l'environnement. L'**[ACV]** recense et quantifie, tout au long de la vie des produits, les flux physiques de matière et d'énergie associés aux activités humaines. Elle en évalue les impacts potentiels puis interprète les résultats obtenus en fonction de ses objectifs initiaux. » Celle-ci est spécifiée dans les normes ISO 14040 et 14044 (AFNOR, 2006b, 2006c).

Deux aspects de la méthode la rendent incontournable (Ademe, 2018) :

L'APPROCHE EST MULTICRITÈRE. Une évaluation utilisant la méthode **ACV** quantifie les impacts par rapport à plusieurs indicateurs environnementaux (pollution de l'eau, réchauffement climatique, santé humaine...), qu'on appelle également *catégories d'impact*.

L'APPROCHE EST EN « CYCLE DE VIE ». Les impacts sont quantifiés pour chacune des phases^V du cycle de vie du produit ou du service analysées, c.-à-d., l'extraction des ressources, la production, le transport, la distribution, l'usage et la mise au rebut ou recyclage.

Par son approche multicritère et en « cycle de vie », l'**ACV** permet de prévenir les transferts d'impacts entre catégories d'impacts ou phases du cycle de vie lors de l'écoconception.

J'aborde dans la suite une présentation générale de la méthodologie de l'**ACV** (Section 3.2.1), l'**ACV** comparative qui est une manière courante de l'utiliser pour l'évaluation des impacts évités de solutions numériques (Section 3.2.2), et les approches attributionnelle et conséquentielle d'**ACV** (Section 3.2.3).

3.2.1 Méthodologie de l'**ACV**

L'évaluation environnementale en **ACV** telle que spécifiée par la norme (AFNOR, 2006c) consiste en au moins 4 étapes, expliquées

IV. Attention : cela ne signifie pas que les impacts évités sont égaux à la somme de tous ces impacts. L'évaluation des impacts évités nécessite généralement une méthode prenant en compte d'emblée tous les effets.

V. À noter que j'utilise le terme *phase* pour les phases du cycle de vie et *étapes* pour les étapes de la méthodologie.

brièvement ci-après. L'**ACV** est une méthodologie itérative : chaque étape va pouvoir apporter des précisions quant aux résultats par la découverte ou le calcul de nouvelles données, ce qui peut mener à revoir les objectifs de l'étude et l'inventaire. La [Figure 3.2](#) est l'illustration de ces étapes dans la norme ISO (AFNOR, [2006c](#)).

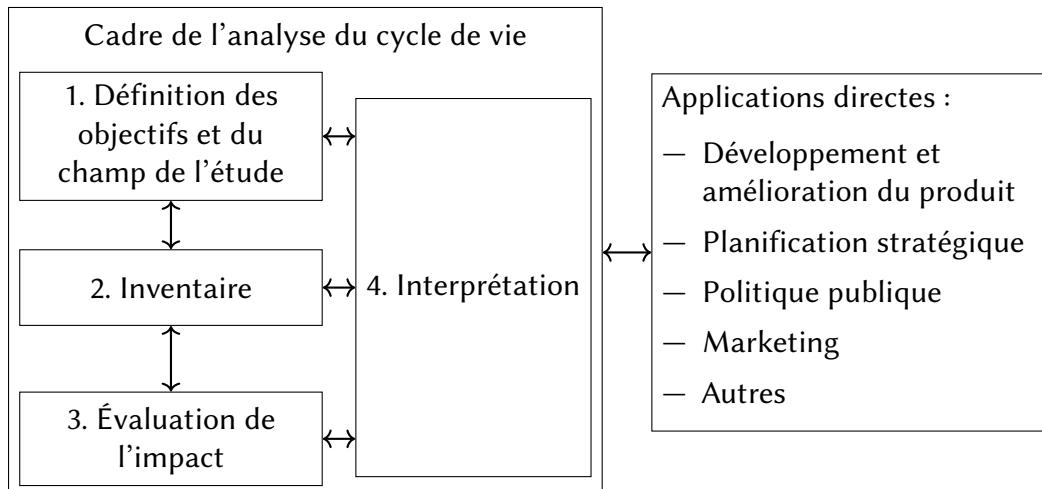


FIGURE 3.2 – Étapes de l'**ACV** (AFNOR, [2006c](#))

Les itérations possibles entre les étapes sont mises en valeur par les doubles flèches

LA DÉFINITION DE L'OBJECTIF ET DU CHAMP DE L'ÉTUDE. Lors de cette étape, y sont définis l'objectif et le champ de l'étude, c.-à-d., les frontières du système, les critères de coupure, les règles d'allocation, le cadre méthodologique, les hypothèses générales... Aussi, on y définit l'**unité fonctionnelle (UF)**. L'**UF** est généralement une phrase décrivant un service quantifié, p. ex., « l'échange d'un octet entre un terminal et une station de base ».

À partir de cette **UF** sont définies les frontières du *système* qui incluent l'ensemble des *processus élémentaires* de l'étude, telles que l'extraction des matières premières, leur transformation, l'usage du produit ou du service, etc. L'objectif de l'étude influe aussi sur le choix des frontières, cet objectif pouvant être de l'ordre de l'aide à la décision ou de la communication.

Quand l'**UF** ne concerne qu'une fonction d'un produit ou d'un service multifonctionnel, ou lorsqu'un processus élémentaire en lien avec l'**UF** satisfait d'autres fonctions que l'**UF**, ce qui est très fréquent en pratique, il est nécessaire d'isoler les impacts attribuables à cette seule **UF**. Ceci pose un certain nombre de problèmes lors de l'**ACV** de solutions numériques, qui incluent systématiquement des processus multifonctionnels (Bull & Kozak, [2014](#)). Par exemple, lors d'une évaluation environnementale de la lecture de documents numériques,

en fonction du terminal utilisé (p. ex., liseuse, ordinateur, smartphone), le matériel impliqué peut avoir une grande variété d'usages autres que la lecture de documents.

La méthode préconisée pour traiter ce problème de multifonctionnalité est de subdiviser le système en amont, c.-à-d. séparer les processus du système de manière à isoler les fonctions. Cependant, le plus souvent, la subdivision n'est pas possible. Il faut dans ce cas utiliser une méthode pour traiter la multifonctionnalité, qui est spécifique à l'approche de modélisation choisie, elle-même définie par l'objectif et le champ de l'étude (Schaubroeck et al., 2021).

L'**INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE**. Lors de cette étape, les flux entre les processus élémentaires sont inventoriés. Ces flux peuvent se faire soit entre l'écosphère (l'environnement naturel) et la technosphère (activités et produits humains), soit au sein de la technosphère. Les flux provenant de l'écosphère sont des ressources, et ceux sortants de la technosphère sont des déchets ou émissions. Ils sont qualifiés de flux élémentaires, par contraste avec les flux échangés au sein de la technosphère, qu'on appelle flux économiques. Pour définir ces flux dans le cadre des frontières du système, « l'inventaire inclut le recueil des données et les modes opératoires de calcul pour quantifier les intrants et les extrants pertinents d'un système de produits. » (AFNOR, 2006b). Ainsi, chaque processus de chaque phase du cycle de vie du système est modélisé. On obtient, à la fin de cette étape, des quantités d'éléments en entrée et sortie de chaque processus.

L'**ÉVALUATION DE L'IMPACT**. Généralement, l'étape d'évaluation des impacts comprend trois sous-étapes : (1) la sélection des catégories d'impact, des indicateurs de catégorie et du modèle de caractérisation, (2) la classification, et, (3) la caractérisation.

La première sous-étape consiste, en pratique, à choisir une méthode d'évaluation. On peut citer, par exemple, les méthodes *ReCiPe*, *Eco-Indicator 99*, *CML 2000*, *Impact 2002+* et le *Product Environmental Footprint*^{VI}. Ces méthodes embarquent des catégories d'impact, c.-à-d., des classes représentant les différents enjeux environnementaux, dans le but de les quantifier par la suite. Les catégories d'impact peuvent soit être orientées problèmes ou dommages. La méthode *ReCiPe* pouvant être orientée-problèmes ou dommages, je la prends comme exemple.

- Une méthode orientée-problèmes, ou *midpoint*, base les indicateurs directement sur les flux élémentaires de l'ACV. Les

VI. Le *Product Environmental Footprint* est la méthodologie recommandée par la Commission Européenne (<https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EnvironmentalFootprint.html>).

résultats ont moins d'incertitude, mais l'interprétation est plus difficile. Dans la méthode *ReCiPe* orientée-problèmes, des exemples de catégories d'impacts sont le changement climatique, l'utilisation d'eau, l'utilisation de ressources minérales ou fossiles.

- Une méthode orientée-dommages ou *endpoint*, caractérise les dommages en fin de chaîne. L'interprétation est plus facile, mais les résultats ont plus d'incertitude. Dans la méthode *ReCiPe* orientée-dommages, les catégories d'impacts sont les dommages sur la santé humaine, les dommages sur les écosystèmes et les dommages sur la disponibilité des ressources.

La deuxième étape, la classification, consiste à classer chaque élément de l'[inventaire du cycle de vie \(ICV\)](#) dans chacune des catégories, un élément pouvant contribuer à plusieurs catégories (p. ex., le SO₂ est à la fois une cause d'acidification et de toxicité humaine).

Enfin, la caractérisation consiste à calculer la contribution de chacun des éléments dans chacune des catégories d'impact, les éléments pouvant avoir des contributions différentes (p. ex., le méthane à un pouvoir de réchauffement climatique plus élevé que le CO₂). Les quantités d'éléments sont alors converties en une unité commune (p. ex., en masse de CO₂ équivalente pour le changement climatique).

Pour pouvoir faciliter la comparaison entre différents systèmes, ou faciliter la communication des résultats, les impacts peuvent être normalisés ou pondérés pour donner un score unique. Si l'intérêt est évident pour la communication au grand public, cette étape optionnelle donne lieu à des résultats subjectifs, qui dépendent des coefficients de pondération donnés à chaque catégorie d'impact.

L'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS. Dans cette étape, les résultats sont interprétés conformément aux objectifs définis. Cette étape consiste à :

- analyser les résultats de l'évaluation,
- valider ou réfuter les hypothèses,
- évaluer la qualité des données (contrôle de cohérence, incertitudes, etc.),
- donner des recommandations.

D'autres vérifications peuvent être effectuées sur les résultats de l'[ACV](#), comme une analyse de sensibilité et la détermination des limites de l'étude. La revue critique de l'étude et la communication des résultats sont des étapes supplémentaires éventuelles en fonction des objectifs de l'[ACV](#).

3.2.2 L'ACV comparative

Pour évaluer les impacts du 1^{er} et 2^{ème} ordre, l'ITU (2015) recommande l'ACV comparative, c.-à-d., la comparaison des résultats des ACV de deux systèmes ayant la même fonction (Figure 3.3).

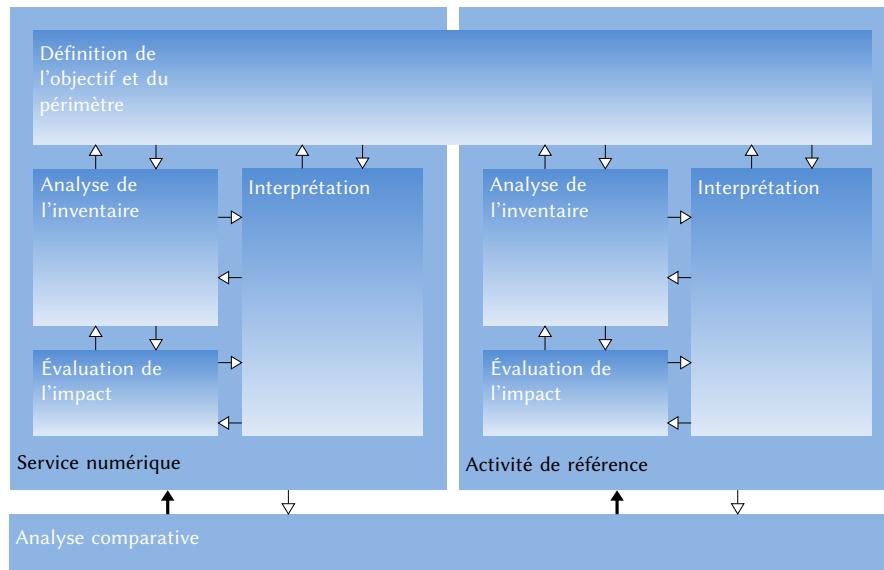


FIGURE 3.3 – ACV comparative pour le calcul des impacts d'une solution numérique liés aux effets du 1^{er} et 2^{ème} ordre (Coroamă et al., 2020)

La comparaison se fait entre un système comprenant la solution numérique et un système comprenant une activité de référence (un système sans la solution numérique analysée), les deux répondant à la même UF.

Par exemple, pour évaluer les impacts évités du courrier électronique, le système avec solution numérique serait composé des processus liés à l'envoi du courrier électronique et un exemple de système de référence serait composé des processus liés à l'envoi d'un courrier non électronique.

3.2.3 Approches attributionnelle et conséquentielle

Les normes ISO 14040 et 14044 laissent de nombreuses libertés aux praticien·nes de l'ACV, notamment sur les approches de modélisation. Cependant, une approche particulière est très largement utilisée en pratique : l'**ACV attributionnelle (ACV)**, qui consiste en l'attribution d'une partie des impacts environnementaux mondiaux au système évalué. Celle-ci n'est pas sans défaut et ne permet pas de répondre à tout type de problématique d'évaluation environnementale, ce pourquoi d'autres approches ont vu le jour. Je m'intéresse dans cette

section plus particulièrement à l'**ACV conséquentielle (ACV)**, née autour de l'année 2000 pour pallier les faiblesses liées à la séparation artificielle d'un produit ou d'un service du reste de l'économie, habituellement faite en **ACV-A** (Bjørn, Owsianik et al., 2018).

Il n'y a pas de consensus à propos des différences précises entre **ACV-A** et **ACV-C** au sein de la communauté **ACV** (Schaubroeck et al., 2021). Néanmoins, je reprends dans la suite les définitions habituelles qui sont données par Bjørn, Owsianik et al. (2018) et Haoues (2013)^{VII}.

« L'objectif d'une **ACV-C** est de modéliser l'ensemble des impacts environnementaux consécutifs à un changement survenant dans le cycle de vie d'un produit » Haoues, 2013. Autrement dit, l'**ACV-C** évalue les impacts de la modification du système étudié sur les flux et les processus potentiellement modifiés par ce changement^{VIII}. Ces processus sont dits *marginaux*.

Bjørn, Owsianik et al. (2018) différencient les questions auxquelles peuvent répondre l'une ou l'autre approche. Alors que l'**ACV-A** peut répondre à « Quel impact environnemental peut-il être attribué à tel produit ou service ? », l'**ACV-C** peut répondre à « Quelles sont les conséquences de la consommation de tel produit ou service ? ». Par exemple, une **ACV-C** d'un smartphone tenterait de modéliser la manière dont le marché répond au changement de demande en smartphones, représenté par l'**UF** de l'étude.

EXEMPLE 1 : EFFET OBSERVABLE LORS D'UNE APPROCHE CONSÉQUENTIELLE
En **ACV-C**, une augmentation de la demande en minerai de cobalt pour la production de smartphones peut induire une réorganisation de la production mondiale. Ceci peut inclure l'ouverture de nouvelles mines, l'utilisation de substituts (par le système analysé ou par d'autres systèmes) lorsque les capacités de production sont dépassées...

Les **ACV-A** sont largement utilisées pour évaluer les impacts liés aux effets du 1^{er} et 2^{ème} ordre d'après J. C. T. Bieser et Hilty (2018c), un fait aussi illustré par la revue de la littérature de Bull et Kozak (2014) à propos des comparaisons environnementales entre le papier et les médias numériques. Quant à l'**ACV-C**, elle pourrait en théorie quantifier l'intégralité des impacts évités liés à la mise en place d'une solution numérique. Cependant, à ma connaissance, aucune étude ne fait cet usage de l'**ACV-C**.

La liberté laissée par les normes aux praticien·nes de l'**ACV** peut influencer grandement le résultat des évaluations. C'est pourquoi certains ouvrages ont été publiés dans l'objectif de préciser et

VII. Pour une étude plus complète sur les différences entre ces deux approches, se référer à Schaubroeck et al. (2021).

VIII. Dans la base de données *Ecoinvent*, la modification des flux dans une **ACV-C** se traduit en répercussions sur les flux économiques mondiaux (ecoinvent, 2020).

d'homogénéiser la pratique de l'[ACV](#). On peut citer par exemple le guide de l'UNEP-SETAC (Sonnemann et al., 2011) et l'[International Reference Life Cycle Data System \(ILCD\)](#) (2010). Ce dernier est le document de référence pour la pratique de l'[ACV](#) dans l'[UE](#). Aussi, les particularités de chaque secteur nécessitent parfois des recommandations spécifiques : par exemple, l'[ITU](#) (2015) propose des recommandations pour l'évaluation de produits et de services numériques.

Dans le reste du manuscrit, j'emploie l'expression *approche ACV* pour désigner les évaluations multicritères quantifiées des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit ou d'un service (sans que l'intégralité de la norme n'ait à être respectée). Ces deux caractéristiques — multicritère et en cycle de vie — sont, entre autres, ce qui fait de l'[ACV](#) une méthode largement reconnue aujourd'hui.

3.3 Autres méthodes d'évaluation

Dans la littérature académique, les impacts environnementaux des solutions numériques sont évalués en utilisant une diversité hétérogène d'approches. Le plus souvent, la prise en compte des effets indirects nécessite d'utiliser des méthodologies issues de disciplines différentes (physique, économie, sociologie, etc.). J. C. T. Bieser et Hilty (2018c) recensent une quinzaine de méthodes de quantification, l'une des plus utilisées étant l'[ACV](#) (décrise dans la [Section 3.2](#)).

Dans cette section, je présente dans un premier temps *ICT Enablement* qui est une autre méthode répandue selon J. C. T. Bieser et Hilty (2018c). Celle-ci permet d'évaluer les impacts liés à un effet de substitution et les effets rebond direct ([Section 3.3.1](#)). Dans un second temps, je présente un cas parmi la variété des autres méthodes. En l'occurrence, la méthode présentée sert à l'évaluation des effets rebond du covoiturage régulier ([Section 3.3.2](#)).

3.3.1 Évaluer les impacts liés à l'effet de substitution grâce à la méthode ICT Enablement

Dans leur revue de la littérature des évaluations des impacts liés aux effets indirects des solutions numériques, J. C. T. Bieser et Hilty (2018c) retrouvent souvent la méthode *ICT Enablement*, en plus de l'[ACV](#). *ICT Enablement* est une méthode de calcul des impacts des effets de substitution d'une solution numérique proposée par la GeSI (2015). La [Figure 3.4](#) illustre l'application de cette méthode pour calculer les émissions de [GES](#) évitées grâce aux technologies numériques pour la santé, dites *e-santé*. Cette solution numérique permettrait, en partie, de réduire l'utilisation de transport en

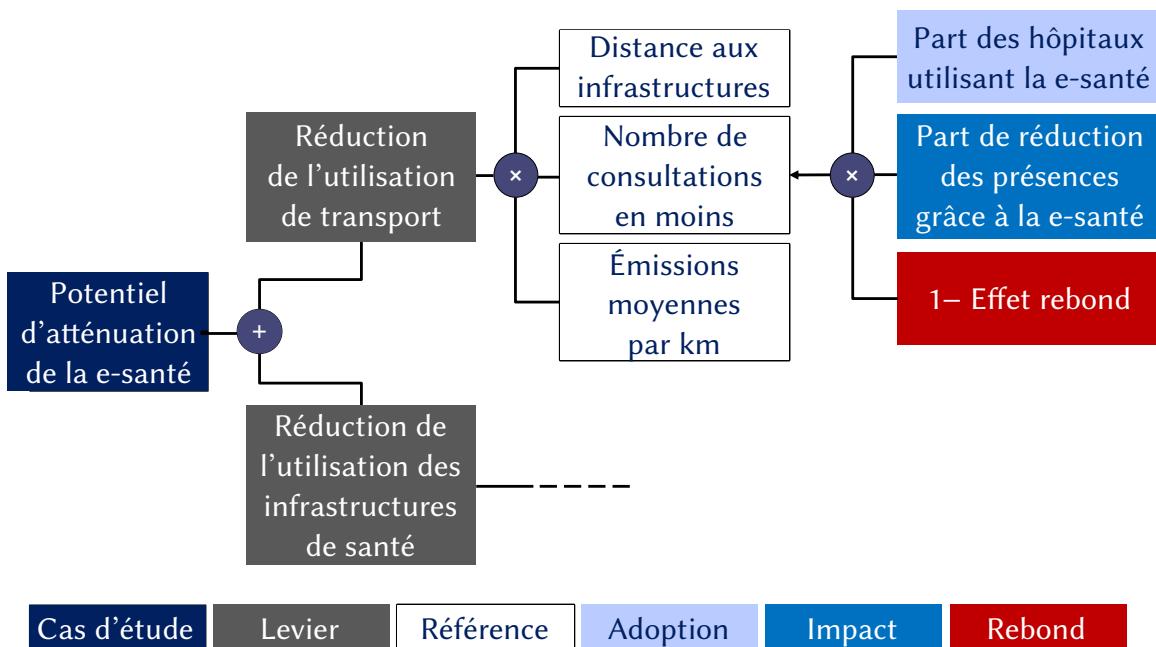


FIGURE 3.4 – Méthode « ICT Enablement » (GeSI, 2015), repris de J. C. T. Bieser et Hilty (2018b)

réduisant le nombre de consultations en présentiel. Selon la méthode *ICT Enablement*, l'impact dû à la réduction de l'utilisation de transport est alors égal aux émissions du transport qui n'a pas été utilisé par les utilisateur·rice·s de la e-santé. Cette méthode peut prendre en compte l'effet rebond direct en appliquant un facteur multiplicatif pour corriger l'usage de la solution numérique effectivement dû à une substitution (en effet, il est possible que les téléconsultations induisent une augmentation du nombre total de consultations).

3.3.2 Autre méthode d'évaluation : cas de l'effet rebond du covoiturage régulier

En général, la prise en compte des impacts dus aux effets de 3^{ème} ordre se fait grâce à des méthodologies spécifiques. Je présente dans la suite une étude récente quantifiant certains effets rebond du covoiturage régulier, ceux-ci étant liés au numérique dans la mesure où l'on mise sur les plateformes numériques de covoiturage pour augmenter l'adoption du covoiturage régulier.

Coulombel et al. (2019) quantifient les effets rebond potentiels du covoiturage pour la mobilité quotidienne en Île-de-France. Le trafic est simulé à l'aide d'un modèle de type **Land Use and Transport Interaction (LUTI)**^{IX}, méthode spécifique au domaine de la

IX. Ce type de modèle présenté dans la Partie II du manuscrit, en Section 7.4.3.

modélisation des transports. Ce type de modèle couple un modèle de la mobilité et un modèle de l'occupation des sols.

Dans ce modèle, le développement du covoiturage est traduit en une augmentation globale du taux de remplissage des véhicules de 0 à +50 %. Le modèle **LUTI** capture les principaux effets du covoiturage sur la mobilité (Coulombel et al., 2019; Delaunay, 2018), à savoir :

EFFET DE CONGESTION. (*Effet d'efficacité.*) L'augmentation du nombre de passager·ère·s par voiture réduit le trafic et donc la congestion routière.

EFFET DE CHOIX D'ITINÉRAIRE. (*Effet d'efficacité.*) Les routes moins congestionnées permettent aux conducteur·rice·s de choisir les itinéraires les plus courts en distance (alors qu'ils auraient dû faire un détour en cas d'embouteillage).

EFFET DE DISTANCE. (*Effet d'efficacité et effet rebond direct.*) Les déplacements en voiture sont plus efficaces en raison de la réduction du temps de transport (en raison des deux effets précédents) et parce que les trajets en covoiturage sont moins chers (les coûts économiques sont partagés dans ce cas); cela facilite les trajets plus longs, notamment en les rendant plus confortables que dans d'autres modes.

REPORT MODAL. (*Rebond direct.*) L'efficacité accrue des trajets en voiture accroît l'attrait de la voiture par rapport aux modes de transport alternatifs (**transport en commun (TC)**, marche, vélo, etc.).

EFFET DE RELOCALISATION (ÉTALEMENT URBAIN). (*Effet de transformation systémique.*) Le report modal permet aux habitant·e·s de vivre plus loin des centres-villes et de leur lieu de travail, ce qui augmente les distances de déplacement.

Les effets de congestion et de choix d'itinéraire (3^{ème} ordre) amplifient les émissions évitées grâce au covoiturage. Cependant, les effets de distance et de relocalisation (3^{ème} ordre) agissent négativement sur ces émissions évitées. En ce qui concerne les effets de report modal (2^{ème} ordre), la situation est moins claire, car elle dépend du taux d'occupation des véhicules et des émissions des modes de transport alternatifs à la voiture.

Coulombel et al. (2019) estiment ainsi que « l'effet rebond global s'avère substantiel, annulant de 68 à 77 % des réductions d'émissions de CO₂ » par rapport à une simple augmentation du taux de remplissage^X.

X. Ces résultats rappellent ceux de travaux antérieurs mettant en évidence d'autres effets rebond dans le monde du transport, selon lesquels la distance parcourue en véhicule augmente proportionnellement à l'augmentation de la longueur totale des routes. Ce phénomène a d'abord été proposé par Downs (1962) qui l'ap-

3.4 Évaluer les impacts du numérique à l'échelle mondiale

Dans cette section, je présente les méthodes d'évaluation du numérique à l'échelle mondiale en commençant par celles évaluant les impacts directs ([Section 3.4.1](#)), puis celles prenant en compte les effets indirects ([Section 3.4.2](#)).

3.4.1 Évaluer les impacts directs du numérique à l'échelle mondiale

Dans la littérature, les évaluations des impacts directs du numérique à l'échelle mondiale se limitent à l'estimation de la quantité d'énergie utilisée et aux émissions de [GES](#) (mis à part Malmodin et al., [2018](#) qui estiment une « empreinte matérielle » du numérique, mais dont les méthodologies d'extrapolation sont similaires à celles que je présente ci-après). Je présente dans la suite les méthodologies utilisées par Andrae et Edler ([2015](#)), qui projettent la consommation d'énergie du numérique jusqu'en 2030, par Malmodin et Lundén ([2018](#)), qui estiment la consommation d'énergie et les émissions de [GES](#) du numérique en 2010 et 2015, et par Belkhir et Elmeliqi ([2018](#)), qui projettent les émissions de [GES](#) du numérique jusqu'en 2040.

Dans un second temps, je présente l'étude de Bol et al. ([2021](#)), qui évaluent, selon une méthode différente, l'évolution des émissions de [GES](#) dues à des sous-secteurs du numérique à l'échelle mondiale. Les auteurs mettent en évidence l'existence probable d'un effet rebond des émissions de [GES](#) liées au cycle de vie des infrastructures étudiées.

3.4.1.1 Estimations de l'impact environnemental du numérique mondial (Andrae & Edler, [2015](#); Belkhir & Elmeliqi, [2018](#); Malmodin & Lundén, [2018](#))

Ces évaluations environnementales du numérique à l'échelle mondiale par Andrae et Edler ([2015](#)), Belkhir et Elmeliqi ([2018](#)) et Malmodin et Lundén ([2018](#)) ont joué un rôle important dans la prise de conscience des impacts directs du numérique en France, en particulier via le rapport *LeanICT* du Shift Project qui a repris certains de ces travaux (Ferreboeuf, [2018](#)). Ces évaluations sont toutes construites autour d'une décomposition du numérique en trois sous-secteurs :

- les terminaux (ordinateurs, smartphones, TV connectées...)
- les réseaux (câbles, antennes...)

pelle « loi fondamentale de la congestion routière ». Il a été observé plus récemment aux États-Unis par Duranton et Turner ([2011](#)).

- les datacentres (centre de données et de calculs, superordinateurs...)

Ces sous-secteurs, même s'ils peuvent varier légèrement en fonction des études, sont proches de la décomposition illustrée par Malmodin et Lundén (2018) dans la Figure 3.5.

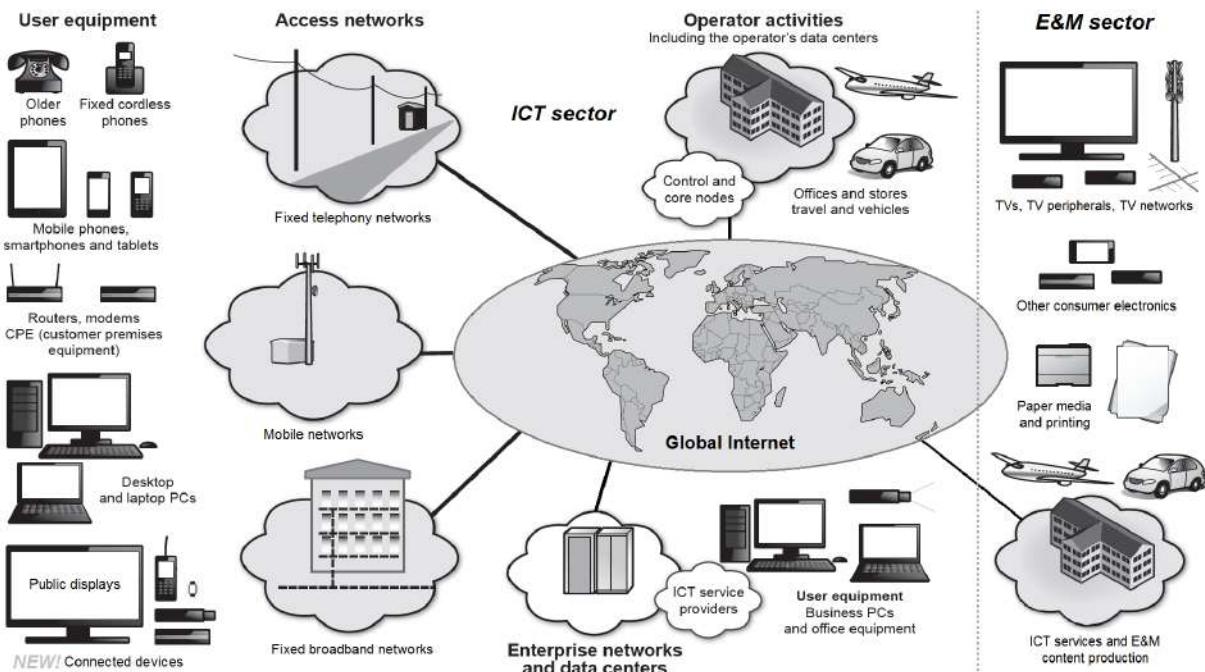


FIGURE 3.5 – Séparation des secteurs du numérique par Malmodin et Lundén (2018)

En plus de se différencier par leur périmètre temporel et les types de grandeurs estimées, ces évaluations environnementales utilisent des méthodologies et des sources de données variées. Je synthétise ces différentes méthodologies et sources de données dans le Tableau 3.2. Ces évaluations se basent sur des données partielles et parfois imprécises. Par exemple, il n'est pas possible de connaître les quantités, les technologies, et la durée de vie de chaque serveur ou smartphone utilisé. Pour pallier ces manques, les auteurs mobilisent différents principes de calcul qu'il est possible de combiner :

AGRÉGATION. Le système est considéré comme un ensemble d'équipements. L'impact global équivaut à l'agrégation des impacts environnementaux de chacun des équipements. Pour ce type de modélisation, un impact moyen de référence, parfois issu d'**ACV**, est utilisé pour chaque type d'équipement.

EXTRAPOLATION À PARTIR D'IMPACTS UNITAIRES. Toutes les études citées ont réalisé une extrapolation pour évaluer l'impact des réseaux ou des datacentres. Elle consiste en l'extrapolation des impacts linéairement

- au trafic de données (l'unité extrapolée est l'impact environnemental du transfert d'un octet) ou
- au nombre d'abonnés (l'unité extrapolée est l'impact environnemental d'un abonné).

PROJECTION DEPUIS UNE ANNÉE DE RÉFÉRENCE. Les impacts futurs sont estimés en projetant les tendances actuelles à partir des impacts globaux connus lors d'une année de référence. L'évolution des impacts suit ensuite

- la croissance économique (Belkhir & Elmeligi, 2018), ou,
- des changements sur le marché (évolution des données transférées ou des ventes) et de l'efficacité énergétique (Andrae & Edler, 2015).

Ces études sont parfois basées sur des estimations faites par les auteurs, sur base de leur propre expérience ou expertise, ou des données confidentielles. Dans ce dernier cas, qui concerne notamment Malmodin et Lundén (2018), il est impossible, à moins d'obtenir une autorisation d'accès à leurs données, de reproduire les résultats.

Ces études permettent de dériver des estimations des émissions de GES dues aux impacts directs du numérique. Elles représentent actuellement entre 1,5 et 4 % des émissions mondiales (Freitag et al., 2021; Malmodin et al., 2023).

3.4.1.2 *Mise en évidence d'effets rebond de l'impact direct dans des sous-secteurs du numérique (Bol et al., 2021)*

Bol et al. (2021) étudient l'évolution des émissions de GES mondiales liées à trois sous-secteurs du numérique : la production de semi-conducteurs, l'accès à l'Internet mobile et l'usage des datacentres. Cette étude repose sur une décomposition suivant l'Identité de Kaya. Cette dernière (Équation (3.1)) quantifie les émissions de GES à partir de la population POP, du PIB mondial PIB et de la consommation d'énergie E (Raupach et al., 2007) :

$$\text{GES} = \text{POP} \times \frac{\text{PIB}}{\text{POP}} \times \frac{\text{E}}{\text{PIB}} \times \frac{\text{CO}_2}{\text{E}} \quad (3.1)$$

avec

$\frac{\text{PIB}}{\text{POP}}$ le PIB par habitant·e,

$\frac{\text{E}}{\text{PIB}}$ l'intensité énergétique du PIB,

$\frac{\text{CO}_2}{\text{E}}$ l'intensité carbone de l'énergie.

TABLE 3.2 – Méthodes d'évaluation utilisées en fonction du secteur du numérique

Secteur	Publication	Méthode	Variables	Sources
terminaux	Andrae et Edler (2015), Belkhir et Elmeliqi (2018) et Malmodin et Lundén (2018)	agrégation	nombre de terminaux impact par terminal	études de marché <i>ACV / estimations</i>
réseaux	Andrae et Edler (2015)	extrapolation linéaire (trafic) tendances	trafic mondial facteur d'évolution	<i>CISCO</i> <i>estimations</i>
Malmodin et Lundén (2018)		extrapolation linéaire (abonné)	nombre d'abonnés	opérateurs
datacenters	Belkhir et Elmeliqi (2018)	tendances	consommation mondiale	opérateurs
	Andrae et Edler (2015)	extrapolation linéaire (trafic) tendances	consommation mondiale facteur d'évolution	<i>inconnu</i> <i>estimations</i>
	Malmodin et Lundén (2018)		trafic mondial	<i>CISCO</i>
	Belkhir et Elmeliqi (2018)	évolution	intensité énergétique	Andrae et Edler (2015) <i>estimations</i>
			nombre de serveurs	Koomey (2007, 2008) fabricants
			impact	
			consommation mondiale	<i>inconnu</i>
			facteur d'évolution	<i>estimations</i>

Bol et al. (2021) décomposent les émissions de GES des sous-secteurs susmentionnés en remplaçant le PIB par « la quantité » ou *affluence* A desdites technologies (Équation (3.2)) :

$$\text{GES} = \text{POP} \times \frac{A}{\text{POP}} \times \frac{E}{A} \times \frac{\text{CO}_2}{E} \quad (3.2)$$

avec cette fois :

$\frac{A}{\text{POP}}$ l'affluence de la technologie considérée par personne, et,

$\frac{E}{A}$ l'intensité énergétique de la technologie considérée.

Le Tableau 3.3 précise pour chaque sous-secteur les types d'affluence et les facteurs. Pour la production de semi-conducteurs, la miniaturisation des transistors permet de placer plus de transistors sur une même surface selon la *loi de Moore*, ce qui réduit ainsi la quantité d'énergie utilisée pour produire chaque transistor. Pour l'accès internet mobile, la quantité d'énergie utilisée par octet transféré (*intensité énergétique du transfert de données*) diminue, notamment grâce à l'augmentation du débit (*loi de Cooper*) et une moindre augmentation de la consommation énergétique absolue de l'infrastructure réseau. Enfin, l'efficacité des datacentres se caractérise, d'une part, par l'efficacité énergétique des calculs, qui augmente d'après la *loi de Koomey*, et d'autre part le **Power Usage Effectiveness (PUE)**, qui diminue et qui se calcule par

$$\text{PUE} = \frac{\text{énergie totale utilisée par le datacentre}}{\text{énergie utilisée par les serveurs}}$$

L'énergie utilisée par le datacentre comprend notamment le refroidissement du datacentre et les autres fonctions vitales d'un bâtiment. Le **PUE** diminue en moyenne, ce qui reflète l'augmentation de l'efficacité énergétique des datacentres.

Malgré une augmentation très importante de l'efficacité dans ces trois secteurs, Bol et al. (2021) montrent que sur les périodes étudiées, leurs émissions de GES correspondantes augmentent. En effet, les gains en efficacité sont largement compensés par l'augmentation de l'affluence associée à ces technologies. Bol et al. (2021) notent aussi que la population, c'est-à-dire le nombre d'utilisateur·ices des technologies correspondantes, augmente également pendant cette même période, mais cette augmentation est beaucoup moins rapide que les gains d'efficacité ou l'augmentation de l'affluence.

Bol et al. (2021) fournissent plusieurs explications possibles à ce qui s'apparente ici à un effet rebond, parmi lesquelles les dynamiques

TABLE 3.3 – Proxys utilisés par Bol et al. (2021) pour l'identité de Kaya

Sous-secteur	Période d'étude	Affluence	Efficacité améliorée
Production de semi-conducteurs	2004–2019	Nombre de transistors	Nombre de transistors par galette de silicium
Accès Internet mobile	2010–2015	Données transférées (en octet)	Intensité énergétique du transfert de données
Utilisation des datacentres	2010–2019	Charge de travail	PUE et efficacité énergétique des calculs

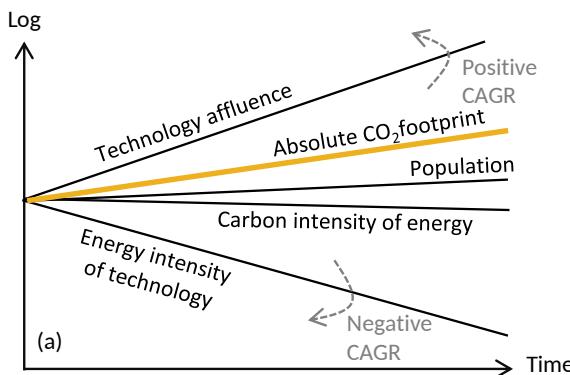


FIGURE 3.6 – Principe de la décomposition de Kaya et illustration de l'augmentation nette des émissions de GES

CAGR : compound annual growth rate, ou en français, taux de croissance annuel composé. C'est la mesure, en pourcentage, de la croissance (ou décroissance, si le CAGR est négatif) annuelle d'une métrique.

d'obsolescence ou encore la création artificielle de besoins par les industriels. On assisterait ici à un *effet rebond* si l'augmentation de l'efficacité était effectivement la cause de l'augmentation de l'affluence. Cet effet rebond expliquerait que les gains espérés par l'augmentation de l'efficacité soient absorbés par l'augmentation des productions ou de l'usage (illustré dans la Figure 3.6). Ces gains étant complètement annulés dans chacun des secteurs étudiés par Bol et al. (2021), on parlerait alors même de *backfire* (Horner et al., 2016).

On observe avec cet exemple une limite aux classifications présentées dans la Section 3.1, qui mettent en avant les effets rebond consécutifs à l'optimisation par le numérique dans d'autres secteurs (grâce à des solutions numériques) au détriment des effets rebond suite à l'optimisation du numérique lui-même.

3.4.2 Prendre en compte les effets indirects du numérique à l'échelle mondiale

Le calcul des impacts évités (comprenant effets directs et indirects) grâce au numérique à l'échelle mondiale repose généralement sur l'extrapolation des impacts évités par différents cas d'études. Notons que la GeSI (2019), pour son évaluation du potentiel du numérique, fait la somme des impacts évités calculés par la méthode *ICT Enablement* pour différents cas d'étude. Comme l'analyse J. C. T. Bieser et al. (2023), cette approche soulève des questions : l'extrapolation linéaire d'un nombre réduit de cas d'étude est-elle suffisante pour évaluer le potentiel global des solutions numériques ? Même si ce questionnement paraît essentiel, il pose d'abord la question de la rigueur méthodologique de l'évaluation de chacune des solutions numériques, que je traite dans les [Chapitres 4 et 5](#).

Dans la littérature académique, peu d'études s'intéressent aux effets indirects du numérique à l'échelle mondiale. Je présente ici l'approche de Lange et al. (2020). Les auteur·e·s commencent par la définition de la consommation d'énergie mondiale suivante :

$$E = Y * a$$

avec E la consommation d'énergie totale, Y le niveau de production de l'économie, a l'intensité énergétique de la production.

Lange et al. (2020) la dérivent en fonction du temps pour calculer l'évolution de la consommation d'énergie mondiale (\hat{E}), puis la décomposent en faisant apparaître la part de la consommation d'énergie du secteur du numérique (π_{ICT}) et la variation d'intensité énergétique des autres secteurs (\hat{a}) :

$$\hat{E} = \hat{E}_{ICT}\pi_{ICT} + \pi_R \hat{Y} + \hat{a}\pi_R + \sum_{i=1}^{n-1} \hat{s}_i\pi_i$$

avec

\hat{E}_{ICT} l'évolution de la consommation d'énergie du secteur du numérique,

π_R, π_i les parts de consommation de l'ensemble des secteurs autre que le numérique et du secteur i respectivement, par rapport à la consommation d'énergie totale,

\hat{Y} la variation du niveau mondial de production,

\hat{s}_i la variation de la part de production du secteur i .

En supposant que la numérisation (c.-à-d., le développement du secteur du numérique) est la cause de l'évolution des termes précédents, les auteurs font l'état des effets suivants (dans l'ordre de l'équation précédente) :

1. la variation de la quantité d'énergie utilisée par le secteur du numérique (l'évolution des impacts directs),
2. l'impact de la numérisation sur la croissance économique,
3. son impact sur l'efficacité énergétique dans les autres secteurs (effet d'efficacité),
4. l'effet sur la composition sectorielle de l'économie.

Les auteur·es évaluent qualitativement chacun de ces termes à partir d'une revue de la littérature. Iels constatent que, d'après les données réelles, les effets 1 et 2 augmentent la consommation d'énergie globale, et les effets 3 et 4 la réduisent, les effets 1 et 2 étant prédominants. Iels concluent que la numérisation augmente globalement la consommation d'énergie.

D'autres évaluations des effets indirects du numérique à l'échelle mondiale s'appuient sur des raisonnements purement qualitatifs (p. ex., Creutzig et al., 2022).

3.5 Conclusion

Pour que l'impact évité d'une solution numérique soit positif, il est nécessaire que les effets de 2^{ème} ordre ne soient pas annulés par les effets de 1^{er} et de 3^{ème} ordre. On a vu dans ce chapitre un exemple où les effets de 3^{ème} ordre sont non négligeables : Par exemple, Coulombel et al. (2019) montrent un bilan net du covoiturage régulier moins optimiste que ce qu'on pourrait en attendre.

Les méthodologies d'évaluation des impacts directs, bien qu'imparfaites, semblent relativement stabilisées. En revanche, en ce qui concerne les effets indirects, il n'existe pas de méthodologie consensuelle pour les prendre en compte, si bien qu'une grande diversité d'approches subsiste dans la littérature. Dans les chapitres suivants, je pointe les limites de cette dernière et propose des recommandations méthodologiques afin de les pallier.

LIMITES MÉTHODOLOGIQUES DES ÉVALUATIONS DES IMPACTS ÉVITÉS PAR UNE SOLUTION NUMÉRIQUE

Structure du chapitre

4.1	Limites liées au périmètre d'évaluation	53
4.1.1	Les effets du 1 ^{er} ordre ne sont pas (complètement) pris en compte	53
4.1.2	Les effets du 3 ^{ème} ordre sont ignorés	55
4.2	Limites liées aux incertitudes	56
4.3	Limites liées aux hypothèses d'évaluation	57
4.3.1	Dans le cas a priori	58
4.3.2	Dans le cas a posteriori	60
4.4	Limites liées à la déconnexion des stratégies globales	61
4.4.1	Les interactions éventuelles entre les leviers sont ignorées	62
4.4.2	Les impacts évités pourraient être négligeables par rapport aux objectifs	63
4.5	Limites déjà relevées par la littérature	63
4.5.1	Horner et al. (2016)	64
4.5.2	J. C. T. Bieser et Hilty (2018b)	64
4.5.3	Bremer et al. (2023)	65
4.6	Conclusion	65

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que les effets du numérique sur l'environnement sont classiquement catégorisés en fonction de leur périmètre : le 1^{er} ordre comprend les effets du cycle de vie de l'infrastructure numérique, le 2^{ème} ordre comprend les effets liés à l'application des solutions numériques (p. ex., effets de substitution de services par une solution numérique, d'optimisation de processus) et le 3^{ème} ordre comprend les effets structurels (c.-à-d., de transformation à l'échelle de la société et de l'économie). Pour être complète, l'évaluation des impacts évités d'une solution numérique devrait considérer l'ensemble de ces effets.

Cependant, les méthodes d'évaluation d'impacts évités qui prennent en compte tous ces types d'effets ne sont pas bien établies (voir [Chapitre 3](#)). Une des méthodes standards pour évaluer les impacts des solutions numériques est l'[ACV](#). Dans la littérature, son utilisation n'est pas généralisée et est restreinte à l'évaluation des effets des 1^{er} et 2^{ème} ordres. Par ailleurs, on observe une grande variété de méthodes pour le calcul des impacts évités. Comme nous allons le voir, les méthodes utilisées dans bon nombre d'évaluations des impacts environnementaux des solutions numériques manquent

de rigueur, soulevant ainsi des doutes quant à la fiabilité de leurs conclusions.

Dans le présent chapitre, j'aborde certaines des limites méthodologiques des évaluations environnementales de solutions numériques. Il ne s'agit pas, tant s'en faut, d'un aperçu exhaustif, ni d'une analyse systématique de la littérature. Néanmoins, ces limites sont suffisamment fréquentes pour mériter une discussion plus approfondie sur la manière de les détecter et de les éviter.

Je décris les limites qui concernent le périmètre d'évaluation ([Section 4.1](#)), les incertitudes ([Section 4.2](#)), les hypothèses sous-jacentes ([Section 4.3](#)) et le lien entre la solution numérique et les stratégies d'atténuation ([Section 4.4](#)). Enfin, je liste les limites déjà pointées dans la littérature ([Section 4.5](#)).

Je constate par ailleurs que les questionnements concernant le périmètre et les incertitudes sont les plus anciens, étant inhérents aux problématiques d'[ACV](#). Les hypothèses d'évaluation font l'objet de discussions de plus en plus fréquentes, par exemple dans la communauté [ICT4S](#). Quant au lien avec les stratégies globales, c'est un aspect plus rarement abordé, mais pourtant essentiel dans le contexte de l'urgence écologique.

4.1 Limites liées au périmètre d'évaluation

Les évaluations environnementales des solutions numériques comprennent souvent uniquement les effets du 2^{ème} ordre. Pourtant, comme vu précédemment, d'autres effets peuvent jouer, ceux-ci pouvant être liés au cycle de vie de l'infrastructure numérique et aux effets de 3^{ème} ordre. En général, le fait d'ignorer une partie des effets pourrait conduire à une estimation trop optimiste des impacts évités grâce à une solution numérique.

4.1.1 Les effets du 1^{er} ordre ne sont pas (complètement) pris en compte

Deux aspects de cette limite sont illustrés ci-après : soit les impacts directs sont parfois tout simplement ignorés, soit ces derniers sont inclus, mais de manière incomplète.

IMPACTS DIRECTS IGNORÉS J'illustre ce premier aspect à l'aide des deux exemples suivants, le premier étant donné par Horner et al. (2016) : aucune évaluation de solutions numériques de surveillance et de contrôle (typiquement, à base d'IoT et de capteurs) comprise dans leur revue de littérature ne prend en compte les impacts directs.

Le second exemple est mis en évidence par Ligozat et al. (2022) dans le domaine de l'[intelligence artificielle \(IA\)](#). Rolnick et al. (2019) compile une liste de solutions numériques basées sur l'apprentissage

automatique dans les secteurs de la production d'énergie, des mobilités, du bâtiment et de la ville, de l'industrie, de l'agriculture et des forêts, de l'élimination du dioxyde de carbone, de la prédition du climat... Parmi ces solutions, Rolnick et al. (2019) en identifient 57 qui ont un intérêt pour limiter le changement climatique. Cependant, aucune n'a fait l'objet d'une évaluation des impacts directs (Ligozat et al., 2022).

IMPACTS DIRECTS INCLUS DE MANIÈRE INCOMPLÈTE Une majeure partie des travaux académiques en informatique s'intéressent à l'optimisation de temps de calcul (réduction de la durée...) ou énergétique (réduction de la consommation énergétique d'exécution d'un programme...). Or, ne considérer qu'un sous-ensemble des impacts directs pose aussi problème : cet intérêt ciblé sur l'optimisation peut parfois détourner l'attention des autres impacts que la consommation d'énergie en phase d'usage du matériel, c.-à-d. les impacts environnementaux de différentes natures du cycle de vie complet, de l'extraction des matériaux, jusqu'à la mise au rebut ou le recyclage du matériel.

En effet, lors de l'évaluation des impacts environnementaux d'une solution numérique en vue de sa conception (on parle alors d'*écoconception*), ne considérer que les impacts en phase d'usage peut cacher une augmentation des impacts d'autres phases (typiquement, en production ou en fin de vie). De même, ne considérer qu'une catégorie d'impact (p. ex., le changement climatique) peut cacher l'augmentation d'autres catégories d'impacts environnementaux. On appelle ces deux phénomènes le *transfert d'impact*, que j'illustre par les trois autres exemples suivants.

Gupta et al. (2022) observent un transfert d'impact de la phase d'usage vers la phase de production au fil des générations de smartphones et montres connectées de la marque Apple : alors que les émissions de GES du cycle de vie des appareils augmentent légèrement, la réduction des émissions relatives en phase d'usage s'est accompagnée d'une augmentation des émissions relatives en phase de production. Les auteure·s ont également mené des expérimentations en utilisant un algorithme de reconnaissance d'image qui est exécuté, d'un côté, sur un processeur classique et, de l'autre, sur une unité de calcul spécialisée. Alors que l'unité de calcul spécialisée réduit de moitié de l'énergie nécessaire pour exécuter l'algorithme par rapport au processeur classique, sa période d'amortissement, c.-à-d. le temps nécessaire pour que les émissions de GES de l'usage soit égale à celle de la production, est trois fois plus longue. Cette augmentation des émissions de GES de la production du smartphone est due principalement à la sophistication

des composants de plus en plus spécialisés, par exemple pour l'IA (Pirson et al., 2023).

Les impacts de production sont aussi parfois ignorés pour l'écoconception des réseaux. Alors qu'un des bénéfices annoncés de la 5G est une amélioration de l'efficacité énergétique, très peu d'études tiennent compte de l'énergie nécessaire à la production et au déploiement de nouvelles stations de base (Tombaz et al., 2016; L. Williams et al., 2022), dite *énergie grise*. Or, l'énergie grise peut représenter une fraction substantielle de l'empreinte carbone des réseaux. On l'observe à travers les rares études qui comparent les différentes étapes de cycle de vie d'une antenne de réseau mobile. Humar et al. (2011)¹ comparent l'énergie grise et l'énergie d'usage des stations de base : l'étude estime que l'énergie grise équivaut à 36 % de l'énergie totale utilisée pour une antenne, pour une durée de vie de 10 ans. En France, l'énergie grise représente environ 47 % des émissions de l'infrastructure réseau (Aiouch et al., 2022).

Enfin, le gain environnemental d'une solution numérique peut même être réduit, voire totalement annulé par le transfert d'impact non seulement entre les phases du cycle de vie, mais également entre les impacts directs et l'impact de l'effet d'efficacité. Ipsen et al. (2019) le constatent en évaluant des solutions pour la Smart-City (« fenêtres intelligentes, collecte pneumatique des déchets, collecte sensorielle des déchets, compteurs d'eau intelligents, recyclage des eaux grises et *Smart Grid* »). Les auteur·e·s utilisent un modèle couplant le *métabolisme urbain* et l'*ACV* pour évaluer des « solutions intelligentes » pour la Smart-City. L'étude montre que lorsque l'on considère les impacts de la conception à la porte de l'usine (*cradle-to-gate*), les solutions sont marginalement bénéfiques pour l'environnement, voire peuvent être préjudiciables (pour le changement climatique en particulier). Cela est principalement dû aux impacts des phases de production qui contrebloquent les avantages attendus des phases d'usage.

4.1.2 *Les effets du 3^{ème} ordre sont ignorés*

Outre le fait que les effets du 1^{er} ordre ne sont souvent pas complètement pris en compte, les effets du 3^{ème} ordre sont aussi bien souvent ignorés.

D'après Horner et al. (2016) une minorité d'évaluations de solutions numériques prennent en compte les effets rebond (aucune ne les quantifie dans leur revue). Au mieux, ils sont seulement discutés. Gossart (2014) constatent que le nombre d'évaluations des

I. L'année de la publication est le début du déploiement de la 4G. Cette étude a donc probablement été faite sur une station 3G. Les résultats ne sont donc pas représentatifs des technologies actuellement installées.

effets rebond augmente dans tous les secteurs, sauf dans le secteur du numérique où il reste limité. Plus récemment encore, J. C. T. Bieser et al. (2023) identifient un manque systématique de prise en compte des effets du 3^{ème} ordre dans toutes les études du potentiel d'émissions de GES évitées grâce au numérique.

Pourtant, ceux-ci pourraient contrebalancer les impacts du 2^{ème} ordre d'une solution numérique. Dans le domaine de la mobilité, les véhicules autonomes sont souvent considérés comme des solutions aux embouteillages et à la pollution (écoconduite, itinéraires optimisés...). Cependant, là aussi, on s'attend à ce que les effets du 3^{ème} ordre aient globalement un impact négatif : p. ex., le déploiement massif des véhicules autonomes peut conduire à l'augmentation de l'usage de la voiture via la possibilité pour les personnes à mobilité réduite, les enfants, voire les objets, de se déplacer en véhicule individuel autonome, ou le fait que, plutôt que de trouver une place de parking, les véhicules pourraient retourner au domicile, ce qui ferait un trajet à vide, voire tourner autour du voisinage en attendant leur utilisateur·rice (Coroamă & Pargman, 2020). Fagnant et Kockelman (2018) évaluent que l'utilisation exclusive de véhicules autonomes en lieu et place de véhicules individuels augmenterait la distance parcourue d'environ 8 % à cause des trajets à vide.

4.2 Limites liées aux incertitudes

Le niveau d'incertitude peut avoir un impact significatif sur les conclusions que l'on peut tirer d'une modélisation. C'est pourquoi une faible précision ou l'absence d'un indicateur de précision des résultats est une limite majeure lorsqu'il s'agit d'évaluer l'intérêt d'une solution numérique.

Dans le pan de littérature exploré dans ce chapitre, le terme incertitude est employé indépendamment pour une variété de notions. Dans le domaine de l'[ACV](#), Finnveden et al. (2009) proposent une définition générique : « l'écart entre une grandeur mesurée ou calculée et la valeur réelle de cette grandeur » (Barahmand & Eikeland, 2022). Pour être plus précis, Bremer et al. (2023) listent trois sources d'incertitudes dans le cadre de l'évaluation environnementale :

- l'incertitude liée à la qualité des données,
- l'incertitude liée à l'exclusion de processus (p. ex., la réduction du périmètre dans une [ACV](#)),
- et l'incertitude liée aux choix de modélisation.

Concernant l'incertitude liée à la qualité des données, celle-ci est un enjeu important y compris pour l'évaluation des impacts directs.

De telles évaluations reposent à la fois sur des estimations du scénario d'usage, par exemple, de l'utilisation, de la durée de vie, de la fin de vie du matériel, et sur des incertitudes liées à la variété des processus en fonction des usines de production aux différents mix énergétiques, méthodes de productions, etc. En général, la qualité et la disponibilité des données est un problème connu dans la discipline de l'évaluation environnementale. Ce problème est exacerbé pour l'évaluation environnementale du numérique, ce secteur faisant l'objet d'évolutions technologiques très rapides.

Dans le domaine de l'évaluation environnementale en général, les incertitudes des sources de données peuvent être très élevées. À titre d'exemple, *Bilans GES* (Ademe, 2010) est une base de données qui permet aux entreprises, aux organisations et aux particuliers d'évaluer leur empreinte carbone. L'accessibilité et l'étendue de cette base de données la rendent polyvalente, y compris pour l'évaluation des solutions numériques. Les données de *Bilans GES* sont donc une référence pour certaines études en interne ou des bilans carbone d'entreprises. Cependant, l'incertitude relative des valeurs fournies par cette base est souvent d'au moins 40 %. Une incertitude aussi élevée pour une évaluation des émissions évitées pourrait notamment rendre incertaine toute conclusion si les impacts évités calculés sont en deçà de cet intervalle d'incertitude.

Malgré ça, dans les évaluations de solutions numériques, l'effet de la propagation des incertitudes issues de données d'entrée sur le résultat final n'est souvent pas du tout évalué. Par exemple, sur les 50 évaluations citées par Horner et al. (2016), 33 d'entre elles ne quantifient pas les incertitudes.

Autre exemple : sur les trois études évaluant l'impact environnemental mondial du numérique présentées dans la [Section 3.4.1](#) (Andrae & Edler, 2015; Belkhir & Elmeliqi, 2018; Malmodin et al., 2018), seul Belkhir et Elmeliqi (2018) fournissent des intervalles d'incertitude pour les estimations calculées, en prenant en compte les variabilités des empreintes carbone unitaires des terminaux et des serveurs de datacentres.

Aux incertitudes précédentes s'ajoutent les incertitudes liées (1) à la restriction du périmètre, par la non prise en compte de certains processus au sens de l'[ACV](#), ou de certains types d'effets (voir [Section 4.1](#)), et (2) aux hypothèses de scénarisation (voir [Section 5.4](#)).

4.3 Limites liées aux hypothèses d'évaluation

Pour rappel, l'évaluation des impacts évités par une solution numérique se fait en comparant les impacts d'un scénario d'utilisation de cette solution numérique et ceux d'un scénario alternatif dans lequel la solution n'est pas utilisée.

Dans la suite, je liste les limites que j'observe dans le cas a priori ([Section 4.3.1](#)) et dans le cas a posteriori ([Section 4.3.2](#)).

Lors d'une évaluation a priori, les deux scénarios sont hypothétiques, tandis que lors d'une évaluation a posteriori, seul le scénario « sans solution numérique » (le *contrefactuel*) est hypothétique, l'autre étant basé sur des observations.

4.3.1 *Dans le cas a priori*

Dans certaines évaluations a priori, on observe différents problèmes en lien avec la scénarisation.

LA SCÉNARISATION EST INCOMPATIBLE AVEC DES ÉVOLUTIONS ANTICIPÉES La scénarisation est incompatible avec des évolutions par ailleurs anticipées, notamment des réglementations. Prenons l'exemple donné par Hilty et al. (2014) d'une évaluation d'un éclairage économique en énergie. Cette évaluation prend notamment pour hypothèse la consommation du mix électrique actuel de l'Europe, qui est encore assez carboné. Or, les stratégies d'atténuation implémentées dans les pays concernés sont soumises aux réglementations liées à la [CDN](#) européenne qui imposent une diminution des émissions de [GES](#) dans tous les secteurs, y compris dans le secteur de l'énergie. De ce fait, les émissions évitées par cet éclairage économique en énergie sont en principe amenées à diminuer assez fortement avec le temps.

Un autre exemple est celui des optimisations dans le secteur des transports : les évaluations des émissions potentiellement évitées grâce à des solutions numériques d'optimisation de l'énergie ou de mobilité partagée devraient tenir compte de l'interdiction de la vente des voitures à moteur thermique neuves à compter de 2035 en Europe (Conseil de l'UE, 2022), à moins que la considération d'autres hypothèses soit justifiée.

DES HYPOTHÈSES OPTIMISTES PAS ASSEZ DISCUÉES Le second problème que je relève apparaît lorsque des hypothèses de changements socioéconomiques optimistes sont considérées, souvent pour maximiser les gains environnementaux, ou simplement pour rendre le déploiement de la solution numérique envisageable. Il ne s'agit pas d'un problème en soi, car il est utile de faire de la recherche exploratoire basée sur des scénario « et si ». Cependant, de telles hypothèses ne sont parfois pas assez mises en avant par les auteur·e·s, ces dernier·ères n'insistant pas assez sur le fait que la mise en place de la solution est conditionnée par des hypothèses très fortes.

P. ex., pour évaluer les impacts évités grâce aux véhicules autonomes, L. M. Martinez et Viegas (2017) supposent un scénario

dans lequel la mobilité en voiture individuelle, en bus et en taxi est entièrement remplacée par une mobilité partagée reposant sur une flotte urbaine de minifourgonnettes et de minibus autonomes. Un tel scénario suggère, a minima, la généralisation de la conduite autonome, l'abandon de tous véhicules existants et le renoncement de tous à la possession d'une voiture au profit du partage de véhicules. Ce sont des hypothèses très fortes sur l'évolution de nos systèmes sociotechniques, qui devraient a minima être discutées avant d'en déduire le potentiel de la solution numérique.

SUREXPOSITION DU VERROU TECHNOLOGIQUE Certaines études laissent entendre aussi que l'obstacle de la technique est le plus difficile à surmonter, sans que cela ne soit étayé par de solides arguments. Or, dans bien des cas, et comme nous allons le voir dans ce chapitre, les verrous peuvent être tout autant, voire plus, socioéconomiques que techniques.

Sur l'exemple des véhicules autonomes et partagés, l'absence de telles discussions, alors que leur acceptation est l'objet d'une littérature académique en pleine construction, est problématique. Entre autres, la recherche académique sur le sujet met en avant l'hétérogénéité de cette acceptation parmi différents groupes sociaux (Bala et al., 2023; Keszey, 2020; K. Miller et al., 2022) et « la plupart des études [sur l'acceptabilité des véhicules autonomes] s'accordent sur les obstacles potentiels à [leur] adoption, tels que la responsabilité juridique et les questions éthiques, les problèmes de confidentialité (c.-à-d., concernant la divulgation des données de voyage) et les problèmes de piratage » (Gkartzonikas & Gkritza, 2019)^{II}.

Pour prendre un autre exemple, on observe aussi des barrières à l'adoption des solutions numériques pour l'agriculture, parmi lesquelles on retrouve : le prix, le manque de fiabilité ressenti, les contraintes réglementaires, le sentiment que le développement de ces solutions se fait sans prise en compte de la réalité de terrain (T. B. Long et al., 2016)...

Cette focalisation sur les verrous techniques du déploiement d'une solution numérique et non sur ses verrous socioéconomiques a aussi un autre effet : elle sous-entend que la solution est en grande partie responsable des impacts évités même dans les cas où sa contribution est mineure. Dans la littérature non académique, l'étude de L. Fulton et al. (2017) illustre bien ce phénomène. Les auteure·s construisent trois scénarios de réduction des émissions de **GES** de la mobilité : un scénario tendanciel (« BAU », pour *Business as usual*), un scénario

II. Les études sur l'acceptabilité elles-mêmes sont sujettes à des critiques : souvent, les méthodologies utilisées ne recontextualisent pas leurs résultats dans les enjeux de soutenabilité. Se référer à Papagiannidis et Marikyan (2022) à ce sujet.

avec la généralisation des véhicules autonomes électriques (« 2R », pour « *2 Revolutions* ») et un scénario où les véhicules autonomes électriques sont généralisés et partagés (« 3R », pour « *3 Revolutions* »). L'étude met en évidence une réduction des émissions de CO₂ de plus de 80 % entre les scénarios 3R et BAU, ce qui rend le scénario 3R compatible avec l'Accord de Paris, et une réduction de plus de moitié entre les scénarios 3R et 2R. Les conclusions suggèrent que l'autonomisation est nécessaire pour atteindre l'objectif de décarbonation en 2050. Pourtant, avec ce choix de scénarios, il est difficile de se prononcer sur l'effet de l'autonomisation des véhicules, par rapport à ceux de la mobilité partagée et de l'électrification.

4.3.2 Dans le cas a posteriori

Lors de l'évaluation a posteriori, les impacts évités peuvent être surestimés en considérant un contrefactuel qui ne tient pas compte des effets de 3^{ème} ordre, par exemple des effets rebond. Pour clarifier cette idée, je reprends l'exemple donné par Coroamă et al. (2020). Les auteur·e·s citent Nagao et al. (2015) qui estiment à 10 MtCO₂e les impacts de substitution des réunions physiques par des visioconférences permises par un opérateur de téléphonie mobile. Selon l'évaluation de Nagao et al. (2015), la plus grande part de ces impacts est due au fait que 5,5 % des appels en 2010 ont remplacé des réunions physiques. Cette part de substitution semble avoir été réutilisée pour évaluer les impacts évités pour l'année 2013. Cependant, il est impossible de savoir si cette part est la même pour les appels effectués entre 2010 et 2013. En particulier, on pourrait très bien s'attendre à ce que cette part soit en réalité plus faible, p. ex. à cause des effets rebond direct. Les impacts du 2^{ème} ordre, et de ce fait les impacts évités, seraient alors surestimés (Figure 4.1c).

Un autre exemple concerne les plateformes de covoiturages : certaines estimations a posteriori des émissions de GES évitées par le covoiturage régulier considèrent que tous les voyageur·euse·s auraient pris leur voiture s'ils n'avaient pas covoituré (comme le faisait auparavant le site du Registre de Preuve de Covoiturage, 2021). En d'autres termes, ces études supposent, parfois implicitement, qu'aucune des personnes qui covoiturent n'aurait utilisé les TC, la mobilité douce ou ne serait restée chez elles si elles n'avaient pas covoituré. Or, la réduction estimée des émissions grâce au covoiturage pourrait être surestimée si les trajets covoiturés remplaçaient des moyens de transport moins émetteurs, ce qui

semble être le cas, p. ex., pour les plateformes de covoiturage longue distance en France (Ademe, 2015b; Mericskay, 2019)^{III}.

Autrement dit, lors de la construction d'un scénario contrefactuel, ignorer les effets du 3^{ème} ordre peut mener à surestimer les impacts évités.

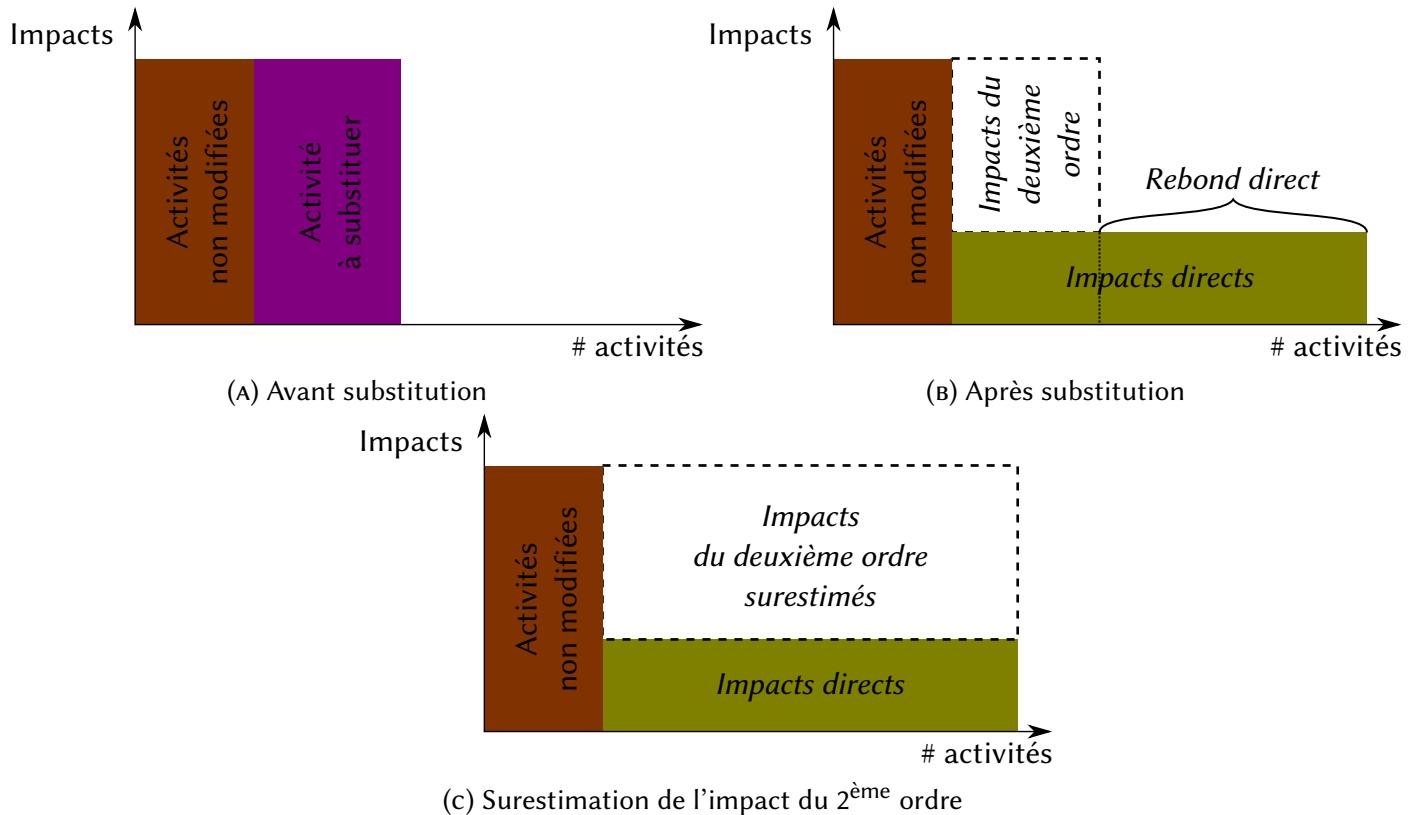


FIGURE 4.1 – Illustration de l'impact du rebond direct, avant et après substitution et surestimation de l'impact du 2^{ème} ordre par omission des effets rebond direct, repris de Coroamă et al. (2020)

En général, suivant l'idée de Hilty et al. (2014), il faut être vigilant quant à la scénarisation, car celle-ci peut être conduite de manière à augmenter artificiellement les gains environnementaux.

4.4 Limites liées à la déconnexion des stratégies globales

Comme déjà évoqué dans le [Chapitre 2](#), des stratégies d'atténuation existent aux échelles internationales et nationales. La quasi-totalité des évaluations de solutions numériques citées dans ce manuscrit sont déconnectées des objectifs et des scénarios mondiaux.

III. J'évalue le report modal induit par le covoiturage régulier dans le [Chapitre 8](#) sur les trajets covoiturés dans un périmètre autour de Grenoble.

C'est d'autant plus regrettable que les incertitudes liées au progrès technique sont clairement identifiées, p. ex., dans les scénarios du **GIEC** : le potentiel des technologies est un des facteurs principaux de différentiation dans les cinq récits des *Trajectoires socio-économiques partagées* (Riahi et al., 2017). Cette déconnexion peut mener à ignorer :

- d'une part, les interactions éventuelles entre les différents leviers d'une même stratégie ([Section 4.4.1](#)),
- d'autre part, le fait qu'une solution numérique ait un impact négligeable ou soit incompatible avec les objectifs des stratégies d'atténuation ([Section 4.4.2](#)).

4.4.1 *Les interactions éventuelles entre les leviers sont ignorées*

Cette limite est soulevée par J. C. T. Bieser et Hilty (2018b) : la plupart du temps, lorsque de multiples solutions sont évaluées simultanément (p. ex., GeSI, 2015 ; GSMA & Carbon Trust, 2019), chacune des solutions est traitée comme un système indépendant. Or, ces systèmes peuvent être interdépendants si bien que les effets des interactions entre plusieurs solutions pourraient être non négligeables, qu'ils soient de nature à augmenter ou diminuer les impacts évités.

P. ex., si la télémédecine et l'optimisation des itinéraires sont deux études de cas prises en compte dans une même étude, ces deux solutions pourraient interférer négativement à l'échelle globale : l'effet de l'optimisation des itinéraires en serait réduit si la télémédecine réduisait effectivement le nombre de trajets en voiture.

Sur le thème de la mobilité, prenons l'exemple de deux politiques qui peuvent être envisagées pour réduire les émissions de **GES** de la mobilité des personnes (sans que toutes les deux soient liées au numérique) : l'amélioration des infrastructures de **TC** et le développement de services de covoiturage régulier.

Quand il s'agit d'estimer le potentiel d'émissions de **GES** évités par les plateformes numériques de covoiturage, certaines évaluations supposent que la seule alternative au covoiturage — qui constitue le scénario « sans solution numérique » — est la mobilité automobile individuelle (Francisco Luciano, 2017 ; Hasiak & Palmier, 2019 ; R. Li et al., 2018 ; Raballand & Laharotte, 2019 ; Zwick et al., 2021).

Or, comme l'ont montré Coulombel et al. (2019), l'application simultanée d'une politique d'incitation au covoiturage et d'intensification des **TC** pourrait être contre-productive, car le développement du covoiturage peut diminuer l'attractivité des **TC**. Une évaluation qui négligerait ces interactions tendrait à surestimer les effets de réductions qu'on peut attendre de ces deux leviers quand ils sont utilisés de façon conjointe.

4.4.2 *Les impacts évités pourraient être négligeables par rapport aux objectifs*

Si les tendances d'augmentation des émissions de GES du secteur du numérique se confirment dans le futur, respecter l'Accord de Paris implique que le numérique permette effectivement de réduire considérablement les émissions des autres secteurs.

Prenons, p. ex., le système de navigation optimisant la consommation de carburant proposé par Ericsson et al. (2006) pour réduire les émissions dues au trafic automobile. Les auteurs montrent qu'il pourrait potentiellement réduire de 4 % la consommation de carburant des véhicules, et qu'une réduction supplémentaire de 0,04 % peut être obtenue si des données sur le trafic en temps réel sont utilisées. Cette étude portant sur le cas de Lund (Suède) affirme que les gains liés à l'utilisation des données en temps réel devraient être plus importants dans les zones les plus denses. Par rapport à l'ampleur des réductions d'émissions nécessaires et compte tenu du fait qu'il repose sur des technologies qui ne sont pas encore massivement déployées, le chiffre de 4 % semble modeste, voire marginal.

Pour ces études qui ne recontextualisent pas leurs résultats au sein des stratégies d'atténuation, une question reste en suspens : à quelle condition une solution numérique peut-elle contribuer de manière significative à une stratégie d'atténuation ?

4.5 *Limites déjà relevées par la littérature*

Dans cette section, je présente les conclusions de trois études existantes qui tentent de lister exhaustivement les limites des évaluations environnementales des solutions numériques.

Horner et al. (2016) est une revue systématique des évaluations des impacts environnementaux d'applications numériques fréquemment prise comme référence dans la littérature. C'est notamment de cette publication qu'est issue la classification des effets que je présente dans la Section 3.1. Elle sert également de base de travail à Bremer et al. (2023), que je présente ci-après.

J. C. T. Bieser et Hilty (2018b) est une évaluation des émissions de GES évitées grâce à des solutions numériques en Suisse revisitant une étude précédente menée par Global Enabling Sustainability Initiative (GeSI)/Accenture. Cette évaluation a pour particularité de discuter chacune des différences méthodologiques avec l'étude d'Accenture, cette dernière étant basée sur la méthodologie de calcul d'émissions évitées de la GeSI.

Bremer et al. (2023) est le compte rendu d'un atelier sur deux jours qui a réuni des experts sur l'évaluation des impacts

environnementaux du numérique. En amont de cet atelier, des limites des évaluations environnementales des solutions numériques ont été identifiées dans la littérature par les auteure·s du document.

4.5.1 Horner et al. (2016)

Horner et al. (2016) met en évidence l'hétérogénéité des méthodes employées et de la rigueur des évaluations. Il résume quatre limites méthodologiques générales :

- le manque de données empiriques,
- la non prise en compte des incertitudes sur les données d'entrée,
- l'incohérence des périmètres, c.-à-d., la différence des périmètres entre des évaluations qui portent sur le même objet, service ou système numérique,
- la restriction du périmètre d'évaluation, p. ex., les effets du 1^{er} ou du 3^{ème} ordre sont ignorés.

Dans ce chapitre, je n'ai pas abordé les limites concernant la disponibilité des données, car cette limite est évoquée en visant plutôt la production des données d'entrée plutôt que leur utilisation. J'ai également omis l'incohérence des périmètres, qui limite surtout la comparaison entre des évaluations de solutions numériques dans le but, p. ex., de fiabiliser des données d'impact environnemental de solutions numériques.

4.5.2 J. C. T. Bieser et Hilty (2018b)

J. C. T. Bieser et Hilty (2018b) estiment les émissions évitées grâce aux solutions numériques en Suisse en utilisant la méthode de la GeSI. Cette dernière consiste en la somme des impacts évités potentiels de différents cas d'études, ceux-ci étant calculés grâce à la méthode *ICT Enablement* (Section 3.3.1). J. C. T. Bieser et Hilty (2018b) listent les raisons qui expliquent les différences entre leur étude et celle de la GeSI/Accenture :

1. la sélection des cas d'étude à extrapoler,
2. l'attribution de l'impact aux solutions numériques,
3. le choix de la référence,
4. des impacts évités différents en fonction du contexte d'application de la solution numérique (p. ex., un système de véhicules partagés ne remplace pas les mêmes usages en ville ou à la campagne),
5. l'estimation du déploiement de la solution numérique,

6. la considération des effets rebonds,
7. l'interaction potentielle entre différents leviers basés sur des solutions numériques.

Toutes ces limites mènent à une quantité d'émissions évitées moindre que celle obtenue par l'évaluation originale.

Je n'ai pas abordé les limites à propos de la sélection des cas d'étude à extrapoler, car je ne m'intéresse pas au potentiel global du numérique, mais à celui de solutions spécifiques.

4.5.3 Bremer et al. (2023)

Les limites identifiées par Bremer et al. (2023) ont été séparées en limites pour les évaluations des impacts directs d'un côté et limites pour les évaluations des impacts indirects de l'autre. Je les liste en [Annexe B](#).

Concernant les impacts directs, les limites méthodologiques qui semblaient les plus importantes pour les participant·e·s à l'atelier étaient la disponibilité et la qualité des données, aussi soulignées par Horner et al. (2016). Concernant les impacts indirects, les limites les plus importantes étaient la prise en compte des effets rebond direct, des effets d'efficacité et de substitution, et le choix de la référence pour l'évaluation des impacts évités. Les autres problématiques soulevées portaient sur les effets rebond et le choix de la référence.

Certaines limites adressant la comptabilité environnementale des entreprises et la communication au grand public des résultats d'évaluations ne font pas l'objet de ce chapitre.

4.6 Conclusion

Je partage la plupart des constats faits par la littérature critique des évaluations environnementales de solutions numériques. Cette littérature fait principalement l'état de limites par rapport à la disponibilité des données, au manque de prise en compte des effets des 1^{er} et 3^{ème} ordres ainsi qu'aux incertitudes. Je constate par ailleurs que la contextualisation des études dans les stratégies d'atténuation est une limite peu ou pas abordée dans la littérature. Pourtant, ce point est essentiel lorsqu'il s'agit d'évaluer l'intérêt des solutions numériques pour les stratégies d'atténuation. Du fait de ces limites méthodologiques, le potentiel du numérique pour nous aider à faire face à l'urgence climatique est aujourd'hui loin d'être démontré. Le [Chapitre 5](#) regroupe des recommandations pour pallier ces limites et pour améliorer la fiabilité et la qualité des évaluations.

RECOMMANDATIONS POUR L'ÉVALUATION DES IMPACTS ÉVITÉS PAR UNE SOLUTION NUMÉRIQUE

Structure du chapitre

5.1	Recommandations existantes pour l'évaluation des solutions numériques	67
5.1.1	Horner et al. (2016)	67
5.1.2	Coroamă et al. (2020)	69
5.2	Recommandations liées au périmètre	69
5.2.1	Utiliser une approche ACV	70
5.2.2	Considérer les effets du 3 ^{ème} ordre	70
5.3	Recommandations liées au incertitudes	71
5.3.1	Lister les sources d'incertitudes	72
5.3.2	Évaluer les incertitudes sur les données d'entrée par analyse de sensibilité	73
5.4	Recommandations liées à la scénarisation	73
5.4.1	Évaluations a priori et a posteriori	73
5.4.2	Expliciter la scénarisation	74
5.4.3	Définir avec soin le scénario « sans solution numérique »	77
5.5	Remettre en perspective les résultats	77
5.5.1	Discuter des obstacles et des verrous à la mise en place de la solution numérique dans le contexte de l'urgence écologique	78
5.5.2	Recontextualiser l'évaluation dans les stratégies d'atténuation	78
5.5.3	Comparer la solution numérique avec des alternatives	79
5.6	Conclusion	79

Dans ce chapitre, je présente un ensemble de lignes directrices destinées à pallier les limitations des évaluations décrites dans le [Chapitre 4](#). Ces recommandations sont, pour la plupart, tirées de la littérature académique. Certaines recommandations sont couvertes par des documents non académiques, tels que les rapports méthodologiques du World Resources Institute (D. Rich et al., 2014) et de la Net Zero Initiative et du World Business Council for Sustainable Development (Valeri et al., 2023).

En premier lieu, je présente les recommandations qui ont déjà été faites dans la littérature académique ([Section 5.1](#)). Ensuite, je détaille les recommandations liées au périmètre ([Section 5.2](#)), aux incertitudes ([Section 5.3](#)), à la scénarisation ([Section 5.4](#)) et à la remise en perspective des résultats ([Section 5.5](#)).

5.1 Recommandations existantes pour l'évaluation des solutions numériques

Dans cette section, je décris les recommandations proposées dans les publications académiques et relatives à l'évaluation des impacts du numérique, à l'exception de celles qui ne relèvent que de l'ordre de la taxonomie. À ma connaissance, les deux publications répondant à ces critères sont Coroamă et al. (2020) et Horner et al. (2016).

Horner et al. (2016) font une revue systématique que j'ai déjà présentée dans les Sections 3.1.3 et 4.5.1. Coroamă et al. (2020) proposent des recommandations méthodologiques pour le calcul des impacts indirects de solutions numériques¹ (« Environmental Effects Induced by ICT Services »).

5.1.1 Horner et al. (2016)

Le Tableau 5.1 liste les recommandations de Horner et al. (2016) en lien avec les limites qu'ils ont identifiées (cf. Section 4.5.1).

Pour rappel du chapitre précédent, j'ai écarté les limites qui concernent le « Manque de données empiriques ». Deux recommandations pour pallier cette limite sont tout de même intéressantes pour l'évaluation :

- « Reconsidérer l'étude lorsque les données sont insuffisantes pour tirer des conclusions solides. »
- « Documenter exhaustivement les limitations et leur impact anticipé sur les conclusions de l'étude. »

Le premier point rejoint une question qui va au-delà du problème du manque de données : que faire si les résultats d'un travail de modélisation ne permettent pas de tirer des conclusions solides ? Je reviens sur le deuxième point dans la Section 5.3.

Par ailleurs, les recommandations suivantes visent la reproductibilité scientifique :

- « lors de la comparaison de nouveaux résultats avec des travaux antérieurs, documenter exhaustivement les différences de données, de méthodes et d'hypothèses »,
- « publier l'ensemble des données, des hypothèses et des résultats afin que d'autres puissent reproduire pleinement l'étude et apporter des ajustements au périmètre et aux hypothèses pour faciliter la comparaison avec d'autres travaux »,

I. Plutôt que de solution ou d'application numérique, Coroamă et al. (2020) parle de service numérique.

TABLE 5.1 – Recommandations de Horner et al. (2016)

Limite	Recommandations
Manque de données empiriques	<ul style="list-style-type: none"> – Réaliser davantage d'études de cas empiriques; passer des calculs d'ordre de grandeur et des études préliminaires à des mesures de gains réalisées plutôt qu'à des estimations de gains potentiels. – Élargir les programmes de collecte de données et d'analyse (p. ex., Lawrence Berkeley National Laboratory, 2016; U.S. Department of Energy, 2015) pour recueillir et publier des données plus complètes sur le déploiement des TIC et l'utilisation de l'énergie. – Dans le travail économétrique, se concentrer sur les expériences naturelles^a pour fournir davantage de preuves que les résultats sont liés aux TIC. – Reconsidérer l'étude lorsque les données sont insuffisantes pour tirer des conclusions solides. – Documenter exhaustivement leurs limitations et leur impact anticipé sur les conclusions de l'étude.
Non prise en compte des incertitudes sur les données d'entrée	<ul style="list-style-type: none"> – Utiliser une méthode de Monte Carlo pour couvrir un éventail plus large de données d'entrée. – Réaliser une analyse de sensibilité et en rendre compte. – Se concentrer sur l'identification des paramètres clés plutôt que sur la quantification de l'impact global.
Périmètres incohérents	<ul style="list-style-type: none"> – Éviter de comparer de manière superficielle des études ayant des périmètres différents. – Lors de la comparaison de nouveaux résultats avec des travaux antérieurs, documenter exhaustivement les différences de données, de méthodes et d'hypothèses. – Publier l'ensemble des données, des hypothèses et des résultats afin que d'autres puissent reproduire pleinement l'étude et apporter des ajustements au périmètre et aux hypothèses pour faciliter la comparaison avec d'autres travaux.
Périmètre trop restreint	<ul style="list-style-type: none"> – Intégrer autant que possible des impacts de niveau supérieur. – Accroître l'inclusion des aspects comportementaux du déploiement des services TIC.

^a Les expériences naturelles sont des expériences dans lesquelles l'environnement n'est pas contrôlé par les expérimentateurs. En conséquence, des paramètres exogènes peuvent plus facilement interférer dans les résultats.

Ces recommandations sont en accord avec les principes de reproductibilité que je suis dans mon travail de recherche comme évoqué dans la [Section 1.5](#), en introduction de mon manuscrit.

5.1.2 Coroamă et al. (2020)

Coroamă et al. (2020) se basent notamment sur les recommandations de l'ITU (2015) et la norme de l'ETSI (2015), qui cadrent l'[ACV](#) des dispositifs et services numériques. Cependant, les auteure·s jugent les recommandations de la *méthodologie ETSI/ITU* trop simplistes.

Les recommandations proposées par Coroamă et al. (2020) précisent certaines étapes de l'[ACV](#) comparative : la définition de l'objectif et du périmètre et le choix des deux systèmes à comparer. Les recommandations de Coroamă et al. (2020) sont :

- clarifier le type de solution numérique évalué, celui-ci pouvant être de substitution ou d'optimisation ;
- définir la temporalité de l'étude, c.-à-d. définir si l'évaluation est *ex-ante* ou *ex-post* ;
- définir et justifier le choix de l'activité de référence ;
- clarifier la modélisation en justifiant l'usage d'un cas d'étude ou d'un modèle.

Deux autres recommandations portent sur l'extrapolation de cas d'études. Les auteure·s incitent notamment à utiliser un coefficient d'extrapolation conservateur si le déploiement à large échelle du cas d'étude est incertain. Cette recommandation n'est pas abordée directement par celles je propose, qui sont plus générales, mais elle est en lien avec la gestion des incertitudes ([Section 5.3](#)) et des hypothèses ([Section 5.4](#)).

Dans la suite, je décris plus en profondeur les recommandations de la littérature (hormis celles que j'ai écartées). J'associe chacune de ces recommandations aux limites décrites dans le [Chapitre 4](#).

5.2 Recommandations liées au périmètre

Pour rappel, Hilty et Aebischer (2015) classent les effets du numérique sur l'environnement selon le modèle [LES](#) en trois ordres ([Section 3.1.2](#)). Les effets du 2^{ème} ordre étant systématiquement pris en compte par les évaluations de solutions numériques, je propose des recommandations, dont des prérequis minimum et pratiques, pour la prise en compte des deux autres types d'effets qui eux sont, en revanche, souvent ignorés ([Section 4.1](#)) : utiliser une approche [ACV](#) pour prendre en compte les effets du 1^{er} ordre ([Section 5.2.1](#)) et

a minima évaluer qualitativement les effets du 3^{ème} ordre ([Section 5.2.2](#)).

5.2.1 Utiliser une approche ACV

Pour rappel, j’utilise le terme *approche ACV* pour faire référence aux évaluations quantitatives multicritères et en « cycle de vie ». Il est essentiel de s’appuyer sur une approche *ACV* afin de suivre les transferts d’impact potentiels entre les phases (p. ex. et comme montré dans la [Section 4.1.1](#), une optimisation peut diminuer les impacts lors de la phase d’utilisation, mais les augmenter lors de la phase de production) et entre les catégories d’impacts (p. ex., moins d’émissions de *GES*, mais plus d’écotoxicité).

Du point de vue du périmètre, les évaluations devraient inclure les équipements des *TIC* (terminaux, serveurs, réseaux, centres de données) et les infrastructures associées (bâtiments, refroidissement, etc.) (Hilty & Aebischer, 2015; ITU, 2015), de manière cohérente avec la solution numérique évaluée. Dans ce contexte, les recommandations ETSI/ITU, qui proposent de se baser sur une *ACV comparative*^{II} en mettant des points de vigilance sur le champ d’application, la qualité des données et les incertitudes, sont appropriées pour quantifier les impacts évités grâce à une solution numérique. L’*ACV* comparative ainsi présentée par les recommandations ETSI/ITU permettrait de prendre en compte au moins les effets des 1^{er} et 2^{ème} ordres.

5.2.2 Considérer les effets du 3^{ème} ordre

La prise en compte des effets du 3^{ème} ordre peut potentiellement changer de manière significative les résultats d’une évaluation. Cependant, il est extrêmement difficile, voire impossible, de prendre en compte tous ces effets de manière exhaustive, de même que quantifier précisément chaque sous-type d’effet du 3^{ème} ordre^{III}. Généralement, ne serait-ce que savoir si ces effets annulent les impacts évités ou provoquent un *backfire*^{IV} est difficile. Cela est, entre autres, lié au fait qu’il n’existe pas de méthodologie complète reconnue par la communauté scientifique pour évaluer les effets du 3^{ème} ordre.

II. Il faut garder à l’esprit que même si l’*ACV* est bien établie, elle n’est pas exempte d’écueils. On peut citer par exemple les problématiques d’*allocation* soulevées dans la [Section 3.2](#).

III. À noter que pour une évaluation *a posteriori*, il est nécessaire d’évaluer en amont l’ensemble des effets du 3^{ème} ordre pour pouvoir construire un contrefactuel ([Section 4.3.1](#)).

IV. Terme introduit dans la [Section 3.4.1.2](#).

Néanmoins, il existe aujourd’hui un corpus de littérature sur le sujet qui permet de fournir au moins une évaluation qualitative de ces effets. Par exemple, Börjesson Rivera et al. (2014) énumèrent onze effets indirects^V des TIC, y compris différents types d’effets rebond, d’induction, de rematérialisation, de changement de pratique, d’apprentissage et d’échelle. Cette taxonomie des effets, complémentaire à celle présentée dans la [Section 3.1.3](#), permet d’anticiper certains effets du 3^{ème} ordre. En outre, dans les domaines d’application où ces effets sont bien cernés, toute évaluation devrait au moins discuter en quoi les résultats risquent d’être remis en cause si ces effets sont été pris en compte.

Ensuite, lorsque cela est possible, quantifier partiellement ces effets du 3^{ème} ordre peut permettre de se faire une idée sur leurs ordres de grandeur. Un moyen d’estimer quantitativement les effets du 3^{ème} ordre des applications numériques est de se baser sur des données macroéconomiques (Horner et al., 2016). L’ITU (2019) suggère d’utiliser des [modèles d’équilibre général calculable \(MEGC\)](#) pour évaluer quantitativement certains d’entre eux.

Théoriquement, le cadre général de l’[ACV-C](#) permet de prendre en compte, dans une même évaluation des impacts évités d’une solution numérique, les effets de 1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} ordre. Rappelons que modéliser l’ensemble de ces effets reste très difficile, voire impossible. L’[ACV-C](#) est rarement utilisée en pratique, les praticien·nes préférant reposer sur une [ACV-A](#) pour les effets de 1^{er}, voire de 2^{ème} ordre et utiliser des modélisations ad-hoc pour les effets qui ne sont pas couverts par l’[ACV-A](#).

Enfin, il convient de rester très prudent quant à l’interprétation des impacts évités lorsque les effets du 3^{ème} ordre impliquent de trop grandes incertitudes.

5.3 Recommandations liées au incertitudes

Les incertitudes peuvent être de natures et d’ampleurs très variées en fonction de leurs origines. Je propose en premier lieu de lister les sources d’incertitudes qui peuvent influer sur le résultat d’une évaluation d’impacts évités ([Section 5.3.1](#)). Ensuite, je propose une recommandation spécifique aux incertitudes liées aux données d’entrées qui, même si elles sont souvent les plus faciles à recueillir, ne sont parfois pas propagées dans les résultats. Cette recommandation consiste à analyser la sensibilité des résultats par rapport à ces incertitudes ([Section 5.3.2](#)).

V. Ceux-ci sont appelés de « second ordre » mais font référence à des effets de 3^{ème} ordre dans la taxonomie que j’utilise.

TABLE 5.2 – Taxonomies d’incertitudes (Barahmand & Eikeland, 2022)

Erreurs systématiques et erreurs aléatoires.

Incertitude liée aux paramètres, incertitude liée au modèle, incertitude due aux choix, variabilité spatiale, variabilité temporelle, et variabilité entre les sources et les objets.

Incertitude liée aux données, incertitude liée au modèle et incertitude liée à l’exhaustivité.

Incertitude aléatoire, incertitude épistémique, incertitude liée aux paramètres, incertitude liée aux données, incertitude liée au modèle, ambiguïté et incertitude intentionnelle.

Variation statistique, jugement subjectif, imprécision linguistique, variabilité, aléas inhérents, désaccord et approximation.

Ignorance des processus non linéaires, manque de données de processus, absence de détails spatiaux sur les émissions, absence de détails temporels sur les émissions, sommation des émissions, aucune information sur les propriétés des substances, aucune interaction avec d’autres polluants, aucune modélisation des métabolites et aucune information sur la sensibilité de l’environnement récepteur.

Chaque ligne représente une taxonomie.

5.3.1 Lister les sources d’incertitudes

Au mieux, les résultats d’une évaluation tiendraient compte quantitativement de l’ensemble des incertitudes, celles-ci pouvant provenir de sources différentes (pour rappel, la classification des sources d’incertitudes proposée par Bremer et al., 2023 liste les incertitudes sur les données, de périmètre et de choix de modélisation, abordées dans la Section 4.2). Cependant, la nature même des incertitudes peut rendre cette quantification particulièrement difficile, voire impossible. On ne peut par exemple pas exclure qu’il existe certains effets indirects dont on ignore l’existence.

Il convient alors d’au moins lister les sources d’incertitudes sur chacun des choix de modélisation et sur les données d’entrée qui pourraient influer sur le résultat de l’évaluation. À titre d’illustration de la variété des sources et natures d’incertitudes, le Tableau 5.2 comprend plusieurs taxonomies d’incertitudes issues d’une revue de la littérature.

5.3.2 Évaluer les incertitudes sur les données d'entrée par analyse de sensibilité

Les incertitudes sur les données d'entrées peuvent avoir un impact considérable sur les résultats finaux d'une estimation des impacts évités. C'est un constat qu'ont fait Bull et Kozak (2014) en comparant différentes ACV entre les médias papier et numériques.

Horner et al. (2016) recommandent par exemple de mener des analyses de sensibilité ou d'utiliser des méthodes de Monte-Carlo pour évaluer la sensibilité des résultats aux incertitudes sur les paramètres d'entrée. Dans le cas des analyses ex-ante, il est recommandé de considérer plusieurs scénarios dans lesquels la solution pourrait s'inscrire afin d'explorer un éventail de futurs possibles (Cucurachi et al., 2018).

5.4 Recommandations liées à la scénarisation

Je propose dans cette section une série de recommandations pour choisir des hypothèses pour la construction des scénarios pour l'évaluation des impacts évités d'une solution numérique. Après avoir donné les types de scénario utilisés en fonction de la temporalité (a priori ou a posteriori) de l'évaluation (Section 5.4.1), je donne les bases génériques de la scénarisation (Section 5.4.2), puis je propose des recommandations à propos de la construction du scénario « sans solution numérique » (Section 5.4.3).

5.4.1 Évaluations a priori et a posteriori

En fonction de l'objectif de l'évaluation, on peut être amené à évaluer les impacts environnementaux dans le passé, actuels (a posteriori) ou estimer un potentiel d'impacts (a priori). Je rappelle ci-après les différents types de scénarios nécessaires en fonction de cette temporalité.

L'évaluation des impacts évités grâce à une solution numérique nécessite la construction d'au moins deux scénarios : un scénario avec la solution numérique et un autre sans. Dans le cas d'une évaluation a posteriori, on a :

- un scénario qui correspond à ce qui s'est passé avec la solution numérique qui se base sur des observations^{VI}, et,
- un autre qui correspond à ce qui se serait passé sans la solution numérique (*contrefactuel*), basé sur une explication contrefactuelle, soit une réalité alternative. Cette explication

VI. Bien que ce scénario soit basé directement sur des observations, celui-ci reste un modèle de la réalité, comme pour toute scénarisation.

décrit une situation causale sous la forme : *si X ne s'était pas produit, Y ne se serait pas produit*. Le raisonnement contrefactuel nécessite d'imaginer une réalité hypothétique qui contredit les faits observés.

Dans le cas d'une évaluation a priori, on a :

- un scénario qui correspond à ce qui se passerait si la nouvelle solution numérique ne voit pas le jour (*référence*), qui peut être basé sur des hypothèses de développement telles que des tendances, auquel cas on l'appelle **business-as-usual (BAU)**, ou un statu-quo,
- un scénario qui correspond à ce qui se passerait avec la solution numérique.

Je propose dans les sous-sections suivantes des recommandations pour l'évaluation a priori uniquement. Pour les évaluations a posteriori, le seul scénario à construire est le contrefactuel « sans solution numérique », c'est-à-dire ce qui se serait passé si la solution numérique n'avait pas été déployée, toutes choses égales par ailleurs. Sa construction n'en reste pas moins difficile, la difficulté portant essentiellement sur l'évaluation a posteriori des effets de 3^{ème} ordre, qui, ignorés, peuvent mener à surestimer les impacts évités comme illustré dans la [Section 4.3.1](#). Notons qu'une évaluation a posteriori pourrait aussi comparer deux scénarios contrefactuels décrivant les impacts que la solution aurait permis d'éviter si d'autres changements avaient eu lieu. Dans cette thèse, je ne m'intéresse pas à ce type de scénarisation puisque dans le cas ex-post je me concentre uniquement sur les émissions *effectivement* évitées par une solution.

Enfin, il n'existe pas nécessairement de lien entre les résultats d'une évaluation ex-post et ex-ante. Par exemple, un effet positif (c.-à-d., la présence d'impacts évités) dans le passé ne garantit pas un effet positif dans l'avenir.

5.4.2 *Expliciter la scénarisation*

En premier lieu, je définis la notion de *scénario* dans la [Définition 3](#), terme tiré de la discipline de la prospective^{VII}.

DÉFINITION 3 : SCÉNARIO

Narration et description d'une trajectoire entre un état passé et un état futur d'un système composé de *variables* et d'*acteurs* (Calay et al., 2022a).

VII. La prospective est une discipline fondée en France par Gaston Berger dans les années 1950 (Berger et al., 2007). Cette discipline « est une démarche de recherche et d'intelligence collective qui vise à éclairer l'action présente à la lumière des futurs possibles » (Calay et al., 2022b). Elle se distingue de la futurologie dans le sens où elle ne tente pas de prédire l'avenir, mais plutôt d'esquisser des futurs possibles.

Par exemple, dans le cadre d'une scénarisation dans le secteur des mobilités, des *variables* peuvent être la distance parcourue par jour par personne, le nombre de véhicules autonomes en circulation... Les variables sont caractérisées par deux notions (Calay et al., 2022c) :

- leur motricité, c.-à-d., leur influence sur leurs autres variables, et,
- leur dépendance, c.-à-d., la manière dont elles sont affectées par les autres variables.

Typiquement, les variables d'entrée d'un système sont très motrices et peu dépendantes, alors que les variables résultats sont très dépendantes, mais peu motrices. D'autres types de variables existent : les variables relais (très motrices et très dépendantes) et exclues (peu motrices et peu dépendantes)

Une première recommandation par rapport à ces variables est d'en définir des pertinentes pour l'exercice de scénarisation. Puis, je décris des recommandations quant au choix d'un ensemble pertinent de scénarios pour l'évaluation des impacts évités.

5.4.2.1 *Définir des variables pertinentes*

Chaque scénario doit être justifié par rapport à l'objectif de l'étude. Cela implique que les variables motrices de chaque scénario soient clairement identifiées et que leur pertinence soit établie par rapport à l'objectif de l'étude.

Par exemple, dans le domaine des transports, les chercheur·e·s ont étudié pendant des décennies l'importance du temps de transport et de son coût monétaire dans les choix de moyens de transport. Mais, selon le contexte, d'autres variables telles que l'environnement social des personnes jouent également un rôle important (Bouscasse et al., 2018; Julagasigorn et al., 2021).

De même, les variables dont la valeur change entre le scénario « avec solution numérique » et le scénario « sans solution numérique » doivent être identifiées. Leur choix doit être motivé, de sorte qu'une évolution du scénario soit effectivement due à la solution numérique, et seulement à celle-ci. Sans cela, il existe un risque d'attribuer à tort les impacts évités à la solution numérique, alors qu'ils sont dus à d'autres facteurs, p. ex., des changements socioéconomiques.

Par exemple, on pourrait s'attendre à ce que l'utilisation d'une flotte de véhicules autonomes partagés dans une ville se traduise par des bénéfices en termes d'émissions de **GES**. Toutefois, il se peut que ces bénéfices ne soient pas liés à la nature autonome des véhicules, mais plutôt à la simple existence de la flotte (qui pourrait être conduite par des humain·e·s). Dans ce cas, pour estimer le bénéfice

environnemental de la solution numérique, il conviendrait de comparer un scénario dans lequel une flotte de véhicules autonomes est déployée, avec un scénario dans lequel une flotte équivalente, mais non autonome, est déployée (et non un scénario sans flotte de véhicule).

5.4.2.2 Justifier l'ensemble des scénarios

Une étude peut introduire un certain biais en sélectionnant des scénarios spécifiques parmi tous les scénarios possibles. Cet exercice de choix des scénarios soulève des défis spécifiques, en particulier dans le cas de la soutenabilité et, plus encore, en présence de technologies en évolution rapide telles que le numérique (Fauré et al., 2017). Certaines méthodes ont été proposées à cette fin, même si aucune n'est standardisée ou ne sert de méthode de référence.

Néanmoins, la littérature académique du domaine de la prospective semble utile dans le contexte des impacts évités. Par exemple, elle distingue généralement trois types de scénarisation, basées sur l'idée de bâtir des scénarios soit « probables », « possibles » ou « préférables » (Börjeson et al., 2006). Börjeson et al. (2006) et Fauré et al. (2017) proposent de classer les types de scénarisation suivant les variantes ci-après :

SCÉNARISATION EXPLORATOIRE « Que peut-il se passer ? »

SCÉNARISATION PRÉDICTIVE « Que se passera-t-il (si...) ? »

SCÉNARISATION NORMATIVE « Comment atteindre un objectif ? »

La scénarisation normative (issue des méthodes de type *backcasting*) consiste à tracer les chemins menant vers un futur souhaitable. En particulier, il est adapté à, et de fait, utilisé pour la construction de scénarios dans le cadre des stratégies d'atténuation multisectorielles (p. ex., la SNBC ou *Transition(s) 2050* de l'Ademe, 2021).

La scénarisation exploratoire (issue des méthodes de type *forecasting*) permet de visualiser un large éventail de possibilités d'évolutions des impacts en fonction d'une large gamme de choix socioéconomiques. Quant à la scénarisation prédictive^{VII}, elle permet notamment d'évaluer les impacts qu'on peut attendre d'une décision, par exemple ceux du déploiement d'une solution numérique.

Il peut être intéressant de combiner des scénarisations de type *backcasting* et *forecasting* (Calay et al., 2022a). C'est d'ailleurs l'objet

VII. Dans la discipline de la prospective francophone, seuls les scénarios exploratoires et normatifs sont habituellement listés (Calay et al., 2022a). En effet, le scénario prédictif peut être considéré comme un cas particulier de scénario exploratoire qui sert à l'évaluation d'une stratégie (p. ex., la mise en place d'une solution numérique).

de la recommandation de la [Section 5.5.2](#) qui suggère de recontextualiser les évaluations d'impacts évités, c.-à-d., basées sur des scénarios de type *forecasting* ou prédictifs, dans les stratégies d'atténuation, c.-à-d., basées sur des scénarios de type *backcasting* ou normatifs.

5.4.3 Définir avec soin le scénario « sans solution numérique »

Coroamă et al. (2020) proposent de construire des scénarios « sans solution » en prolongeant les tendances (autrement dit, de travailler avec un scénario **BAU**). Par exemple, pour évaluer le potentiel d'une solution numérique pour décarboner les mobilités (p. ex., véhicules autonomes, covoitage), il serait préférable selon les auteure·s de prolonger les tendances d'évolution des mobilités pour construire un scénario « sans solution ».

Cependant, le scénario **BAU** doit être défini avec soin et questionné : dans quelle mesure le scénario **BAU** est-il une prévision réaliste de l'avenir ? Bien entendu, les tendances considérées pour ce type de scénario doivent être explicitées et discutées^{VIII}.

Une manière de consolider l'évaluation quant au scénario « sans solution » est d'en considérer plusieurs dont les caractéristiques capturent une large gamme de possibilités d'évolutions de la société. C'est l'approche de J. C. T. Bieser et Hilty (2018b) pour leur évaluation du potentiel du numérique en Suisse. Les auteurs définissent trois types de scénario : « pessimiste », « attendu » (qui correspondrait alors au **BAU**) et « optimiste ».

Ainsi, en fonction de la question de recherche, il est intéressant de concevoir plusieurs scénarios « sans solution », notamment avec des valeurs extrêmes pour les variables motrices qui présentent une incertitude élevée.

5.5 Remettre en perspective les résultats

Dans cette section, les recommandations concernent la remise en perspective des résultats des évaluations par rapport aux stratégies d'atténuation, et plus généralement à l'urgence écologique.

VIII. Certaines entreprises proposent des scénarios « sans solution » favorables aux solutions numériques, ce qui contribue à un idéal autoréalisateur. J'ai déjà évoqué cette notion en note de bas de page dans la [Section 2.3.3](#).

5.5.1 Discuter des obstacles et des verrous à la mise en place de la solution numérique dans le contexte de l'urgence écologique

Dans le chapitre précédent, je constate que certaines études concluant à un grand bénéfice apporté par une solution numérique reposent sur des hypothèses optimistes de mise en place de la solution, qui supposent, explicitement ou implicitement, de lever des verrous socioéconomiques, ce qui peut s'avérer être plus difficile que de lever la barrière technique. Il paraît donc indispensable d'expliquer et de commenter les conditions sous lesquelles l'ensemble de ces verrous pourraient être levés et les difficultés associées. En recontextualisant la solution évaluée dans l'urgence écologique, une interrogation est soulevée : à quel point cette solution relève-t-elle d'un pari technique et/ou socioéconomique ? Une solution pour étudier les conséquences du niveau d'optimisme des hypothèses serait de faire varier les valeurs des paramètres d'entrée liés aux verrous dans les scénarios.

Reprendons le cas de la mobilité autonome et partagée évoqué dans la [Section 4.3.1](#), dont les obstacles à la mise en place sont bien connus dans la littérature. Il s'agirait, par exemple, de paramétriser son évaluation par rapport au taux d'acceptabilité des véhicules autonomes partagés envisageable pour chaque groupe social, ou encore, à la durée maximale qu'un·e voyageur·euse doit marcher pour prendre un moyen de transport tel qu'un covoiturage ou un véhicule autonome^{IX}...

5.5.2 Recontextualiser l'évaluation dans les stratégies d'atténuation

Comme déjà mentionné dans le [Chapitre 2](#), les sociétés humaines doivent réduire de manière drastique et rapide leurs émissions de [GES](#) pour atteindre l'objectif de l'Accord de Paris. Pour ce faire, des stratégies d'atténuation sont proposées à différentes échelles, et elles mentionnent parfois explicitement des solutions numériques. Le cas échéant, une étude sur ces solutions numériques devrait comparer ses résultats aux objectifs fixés.

Dans tous les cas, les interactions (compatibilité, effets contre-productifs, etc.) entre la solution numérique proposée et aux autres leviers devraient être discutées. Autrement dit, l'évaluation devrait montrer dans quelle mesure la proposition peut être efficacement combinée avec d'autres solutions contribuant à une transition rapide vers la soutenabilité : est-elle complémentaire, en réduit-elle les bénéfices, voire empêche-t-elle l'utilisation d'autres solutions ?

IX. C'est un obstacle auquel je suis confronté pour mon étude de cas sur le covoiturage régulier, dans la [Partie II](#).

5.5.3 Comparer la solution numérique avec des alternatives

Dans le contexte de l'urgence écologique, une grande variété d'approches est proposée pour réduire les impacts environnementaux des activités humaines. Ainsi, évaluer uniquement les impacts évités par une solution numérique (c.-à-d., par rapport à une référence « sans solution numérique ») ne permet pas de remettre en perspective le potentiel de cette solution par rapport à des alternatives. Il serait ainsi pertinent de montrer qu'un scénario « avec solution numérique » est la meilleure option parmi plusieurs possibilités, y compris des scénarios ne reposant pas sur une solution numérique.

5.6 Conclusion

Le [Chapitre 4](#) met en évidence des limites récurrentes dans l'évaluation des impacts évités de solutions numériques. Les recommandations présentées dans ce chapitre pour y remédier sont minimales et loin d'être suffisantes pour garantir la fiabilité des résultats. De ce fait, dans bien des cas, il est difficile de conclure sur le potentiel d'une solution numérique avec un haut niveau de confiance. Parfois, le caractère bénéfique de l'introduction d'une solution numérique n'est lui-même pas évident.

Les limites abordées dans le [Chapitre 4](#) et les recommandations que je présente dans ce chapitre sont synthétisées dans le [Tableau 5.3](#). Un point important qui ressort de mon étude de l'état de l'art est que l'intégration des solutions dans les stratégies d'atténuation est particulièrement négligée.

Dans cette première partie, je me suis intéressé à la question générale de l'évaluation des impacts évités des solutions numériques face à l'urgence écologique. Dans la partie suivante, je traite un cas d'étude spécifique : les plateformes numériques de covoiturage régulier. Il s'agit en particulier d'évaluer le potentiel de cette solution numérique dans le contexte de deux stratégies d'atténuation (nationale et locale). Cela permet également de mettre en évidence les difficultés de la mise en pratique de mes recommandations.

TABLE 5.3 – Limites dans la littérature et recommandations pour l'évaluation des impacts environnementaux évités grâce à une solution numérique

	Limites	Recommandations
Périmètre	Effets du 1 ^{er} ordre ignorés (Bremer et al., 2023; Gupta et al., 2022; Ligozat et al., 2022; Tombaz et al., 2016)	Utiliser une approche ACV. (Bremer et al., 2023; ETSI, 2015; ITU, 2015)
	Effets du 3 ^{ème} ordre ignorés (Arvesen et al., 2011; Bremer et al., 2023; Gossart, 2014; Horner et al., 2016)	Discuter les effets du 3 ^{ème} ordre. (Bremer et al., 2023; Håkansson & Finnveden, 2015; Horner et al., 2016)
Hypothèses	Incertitudes ignorées (Bremer et al., 2023; Horner et al., 2016)	<i>Lister les sources d'incertitudes.</i> Estimer les incertitudes des données d'entrée à l'aide d'une analyse de sensibilité. (Bremer et al., 2023; Horner et al., 2016)
	Surestimation des gains de la solution numérique (Bremer et al., 2023; Coroamă et al., 2020)	Définir proprement et justifier la scénarisation. (Coroamă et al., 2020)
Stratégie	Hypothèses de mise en place implicites ou non justifiées	Discuter des obstacles et des verrous à la mise en place de la solution numérique.
	Interactions entre leviers ignorés (J. C. T. Bieser & Hilty, 2018b)	<i>Considérer les autres leviers des stratégies d'atténuation.</i>
	Gains non contextualisés (Bremer et al., 2023; Freitag et al., 2021)	Recontextualiser l'évaluation dans les stratégies d'atténuation. (Coroamă et al., 2020; Freitag et al., 2021)
		<i>Comparer la solution numérique avec des alternatives.</i>

Les limites qui n'ont pas été relevées et les recommandations qui n'ont pas été déjà proposées à ma connaissance par la littérature académique sont en italique.

Deuxième partie

LE CAS PARTICULIER DES PLATEFORMES DE COVOITURAGE RÉGULIER

INTRODUCTION

Structure du chapitre

- 6.1 Définition du covoiturage 83
 - 6.2 Les objectifs de mise en place du covoiturage 85
 - 6.2.1 La SNBC 86
 - 6.2.2 Le PDU de l'aire grenobloise 88
 - 6.3 Problématique 88
-

La première partie du présent manuscrit montrait que les évaluations des solutions numériques étaient souvent incomplètes, voire présentaient des biais méthodologiques importants. J'ai proposé des recommandations méthodologiques pour aider à mieux évaluer l'adéquation d'une solution numérique face à la crise écologique. Dans cette seconde partie, j'évalue un cas particulier d'utilisation d'une solution numérique vis-à-vis de ces enjeux dans le secteur de la mobilité locale, c.-à-d., des déplacements réguliers et de moins de 80 km à vol d'oiseau du domicile^I.

On sait les émissions de GES de ce secteur importantes. En effet, alors que le secteur du transport est celui qui émet le plus de GES en France en 2019, soit 31 % des émissions de GES territoriales (Babet et al., 2021), la distance moyenne parcourue par personne et par an pour les déplacements locaux est d'environ 8 929 km, alors que celle pour les déplacements longue distance^{II} est d'environ 4 198 km (Brahmi et al., 2022). C'est pourquoi des objectifs ambitieux ont été fixés à la fois à l'échelle nationale dans la SNBC, et à l'échelle locale, par exemple dans le Plan de Déplacements Urbains (PDU) de l'aire grenobloise. Je m'intéresse à une solution numérique particulière qui apparaît dans ces stratégies : l'augmentation du taux de remplissage (Définition 4) des véhicules particuliers (VP) grâce au covoiturage permis par des plateformes.

I. Définition de l'Enquête Nationale Transports et Déplacements (ENTD).

II. Voyages en avion exclus.

DÉFINITION 4 : TAUX DE REMPLISSAGE

Le taux de remplissage TR est égal au nombre moyen de passager·ère·s par véhicule. Il se calcule de la manière suivante :

$$TR = \frac{D_{voy}}{D_{véh}}$$

avec :

D_{voy} la distance parcourue par tous·tes les voyageur·euse·s (en voyageurs-kilomètres),

$D_{véh}$ la distance parcourue par tous les véhicules (en véhicules-kilomètres).

6.1 Définition du covoitfrage

Commençons par définir notre objet d'étude. Le covoitfrage est un mode de déplacement dans lequel plusieurs personnes voyagent ensemble en utilisant le véhicule personnel de l'une d'entre elles. Ce terme est défini aussi légalement en France (MTE-MCT, 2023) :

Le covoitfrage consiste en l'utilisation commune d'un véhicule par un conducteur non professionnel avec un (ou plusieurs) passager(s) pour effectuer tout ou partie d'un trajet initialement prévu par le conducteur. La pratique ne doit pas être rémunérée en dehors du partage des frais de déplacement.

Il faut distinguer le covoitfrage du transport public, qu'il s'agisse du transport public collectif (transport en commun) ou du transport public particulier (taxi et VTC).

On parle de covoitfrage courte distance pour les déplacements inférieurs à 80 km et de covoitfrage longue distance pour ceux supérieurs à 80 km.

Je me concentre sur le covoitfrage courte distance en semaine^{III}. Ces déplacements de courte distance et réguliers sont typiquement ceux ciblés par les *Enquête Ménages et Déplacements (EMD)* (voir Section 10.1.1).

Le covoitfrage est une pratique qui s'est révélée utile durant les périodes de crise :

- Pendant la Seconde Guerre mondiale aux États-Unis pendant laquelle le carburant manquait (Figure 6.1) (Wade, 2008);
- Pendant la crise pétrolière de 1973, où les voies réservées aux véhicules à haut taux de remplissage (High-Occupancy Vehicle lanes ou HOV lanes) apparaissent aux États-Unis (« Selective History of Ridesharing », 2009);

III. Conformément à la définition de la mobilité locale dans l'[ENTD](#).



FIGURE 6.1 – Affiche du gouvernement des États-Unis durant la Seconde Guerre mondiale (Pursell, 1943)

- En France en 1995 après la crise des transports collectifs^{IV} où apparaissent les premières formes de covoiturage organisé (INA, 2023).

Alors qu'aux débuts, le covoiturage désignait une pratique *informelle*, cette nouvelle forme de covoiturage où les trajets sont organisés à l'avance (*préorganisés*) entre inconnus est notamment permise par des applications numériques, qu'on appelle des *plateformes de covoiturage*. En 2007, les plateformes de covoiturage sont l'outil de choix pour organiser un covoiturage (Ballet & Clavel, 2007). Ces plateformes permettent des pratiques jusqu'alors impossibles ou laborieuses : prévision du détour, optimisation du trajet, mise en relation du·de la conducteur·rice avec n'importe quel·les passager·ère·s potentiel·les, même inconnu·e·s, partage automatique des frais, etc. Les plateformes sont plus que des réseaux sociaux qui facilitent la communication entre les usagers : elles mettent automatiquement en relation des conducteur·rice·s ayant des places disponibles ou, à l'inverse, des passager·ère·s qui ont indiqué vouloir faire le même trajet.

En résumé, on distingue deux types de covoiturage : le covoiturage informel et le covoiturage aidé par les plateformes, qui s'est développé ces dernières années.

LE COVOITURAGE INFORMEL Le covoiturage informel correspond au covoiturage pour lequel l'organisation entre les passager·ère·s et

IV. Une grève de trois semaines contre la réforme des retraites de 1995.

le·la conducteur·rice, s'il y en a une, a été faite en amont du déplacement dans le cercle personnel (famille, ami·e·s, collègues) des participant·e·s. Il peut aussi se faire de manière spontanée, sans aucune organisation. Par exemple, une forme de covoiturage informel très utilisée est l'autostop. Des dispositifs techniques peuvent faciliter la pratique du covoiturage informel, comme les panneaux d'affichage dont l'utilité est d'afficher la destination d'une personne qui attend.

LE COVOITURAGE AIDÉ PAR LES PLATEFORMES Pour un covoiturage aidé par les plateformes, à l'inverse, les rendez-vous entre passager·ère·s et conducteur·rice sont fixés avant le voyage grâce à une application numérique. Ce covoiturage sert généralement pour les déplacements ponctuels ou occasionnels, en pratique réalisés sur des longues distances (entre villes, régions ou pays) (*covoiturage occasionnel*).

Les plateformes peuvent aussi, dans une moindre mesure, servir pour les déplacements réguliers, soit hebdomadaires, soit quotidiens (*covoiturage régulier*). Celui-ci peut être mis en place entre les membres d'une même organisation (associations ou entreprises) ou entre inconnu·e·s. Les plateformes ou les groupes d'entreprise sont le moyen privilégié pour trouver un covoiturage régulier.

Des plateformes pour de nouveaux types de covoiturage ont vu le jour ces dernières années : les lignes de covoiturage et, dans une certaine mesure, le covoiturage dynamique. Ces nouvelles formes permettent aux passager·ère·s de trouver un·e conducteur·rice alors que le·la conducteur·rice est déjà en route.

Tous ces types de plateformes sont détaillés dans le [Chapitre 7](#). Dans la suite, je vais me concentrer sur le covoiturage permis par les plateformes numériques. En effet, et comme nous allons le voir, ces dernières sont aujourd'hui vues comme des solutions pour réduire les impacts environnementaux du transport des personnes, en particulier dans le cas de la mobilité régulière.

6.2 *Les objectifs de mise en place du covoiturage*

Je retiens deux stratégies de réduction des émissions de **GES** dans le secteur du transport de transport : une stratégie à l'échelle nationale, dans le cadre de la **SNBC**, et une stratégie à l'échelle locale, dans le cadre le **PDU** de l'aire grenobloise.

Je me suis plus particulièrement intéressé au périmètre géographique de l'aire grenobloise car :

- c'est mon lieu d'habitation et de travail pendant cette thèse de doctorat,
- j'ai des contacts privilégiés avec la Métropole de Grenoble,

- la géographie du périmètre est particulière, car montagneuse, avec peu de routes, donc a priori favorable au covoiturage (Molkenthin et al., 2020).

6.2.1 La SNBC

Bigo (2020) décompose les émissions de GES dues au transport des voyageurs en 5 facteurs de manière à caractériser les leviers utilisés par la SNBC dans ce domaine^V :

$$\text{GES} = \boxed{\text{Demande de transport}} \times \boxed{\text{Parts modales}} \times \boxed{\text{Inv. du taux de remplissage}} \times \boxed{\text{Efficacité énergétique}} \times \boxed{\text{Intensité carbone de l'énergie}}$$

avec :

la demande de transport	la distance totale que parcourt la population,
les parts modales	la répartition de la distance parcourue par mode de transport,
l'inverse du taux de remplissage	l'inverse du nombre de passager·ère·s moyen par mode de transport,
la consommation énergétique	la consommation unitaire d'énergie (par unité de distance) par mode de transport,
l'intensité carbone de l'énergie	les émissions de GES par unité d'énergie consommée.

On distingue deux types de facteurs parmi ceux-ci : les facteurs « technologiques » (encadrés en rouge) et les facteurs « sociaux » ou « non technologiques » (encadrés en bleu).

Bigo (2020) décompose la contribution de chacun de ces facteurs dans la réduction des émissions du transport de voyageurs telle que proposée par la SNBC entre 2015 et 2050. La SNBC prend en compte l'augmentation de la demande de transport de 26 %. Les autres facteurs font l'état des leviers sur la stratégie afin de réduire globalement les impacts du secteur. Les évolutions de l'efficacité énergétique et de l'intensité carbone de l'énergie ont les contributions les plus importantes, tandis que celles du report modal et du taux de remplissage ont les contributions les moins importantes (voir Tableau 6.1).

L'objectif d'augmentation du taux de remplissage, de 1,58 à 1,75 pour la mobilité en VP, est spécifié dans un document technique qui

V. La figure d'origine (Bigo, 2020) présente cette décomposition sous forme de « leviers ». On y lit « report modal », soit la modification des parts modales dans le temps, plutôt que *parts modales*, et « efficacité énergétique » plutôt que *consommation énergétique*. J'ai changé ces termes pour rendre les termes cohérents par rapport aux quantités qu'ils représentent, et aussi pour faire remarquer l'équivalence notable avec l'Équation (3.1).

TABLE 6.1 – Évolution de chaque facteur et contributions à la variation absolue des émissions de GES du secteur des transports de voyageurs entre 2015 et 2050 (Bigo, 2020)

Facteur	Évolution	Variation absolue
	(%)	(MtCO ₂)
Demande de transport	+26	+10,7
Parts modales	-8	-4,5
Inverse du taux de remplissage	-11	-5,0
Efficacité énergétique	-68	-47,2
Intensité carbone de l'énergie	-97	-43,5

détaille les stratégies pour le secteur du transport (Figure 6.2). Notons que depuis les années 1960, le taux de remplissage par VP n'a cessé de décroître en passant d'environ 2,4 à 1,6 de nos jours (Bigo, 2020).

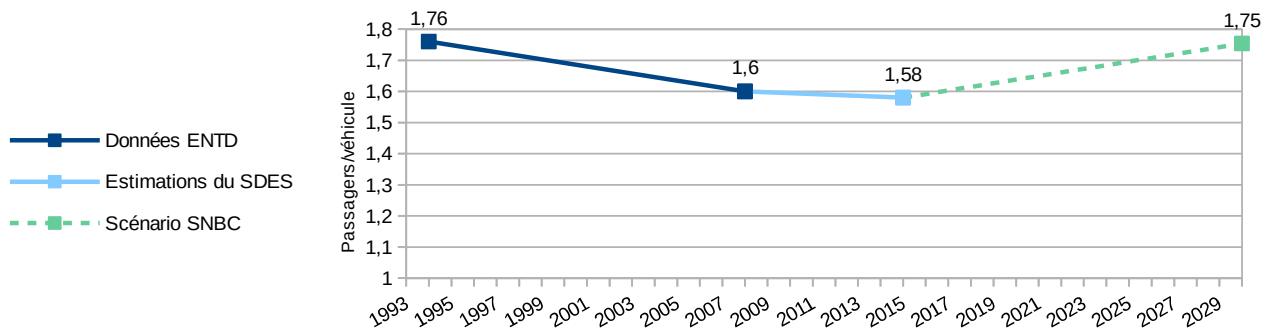


FIGURE 6.2 – Évolution du taux de remplissage des VP en France et le scénario SNBC

Dans la pratique, l'augmentation de l'usage du covoiturage passe essentiellement par l'incitation à covoiturer et le développement des plateformes de covoiturage. De ce fait, contrairement à Bigo (2020), je considère ce facteur au moins comme étant partiellement « technologique ». Par exemple, « depuis le 1er janvier 2023, les conducteurs qui se lancent dans le covoiturage courte distance recevront une prime de 100 €, via les plateformes de covoiturage » (MTE-MCT, 2023). De même, la SNBC (2020) réclame de développer le covoiturage pour atteindre cet objectif, en s'appuyant sur « des outils et infrastructures facilitant [les] mobilités partagées ».

Je propose de me concentrer sur le covoiturage dans la mesure où celui-ci repose, au moins en partie, sur la mise en place de solutions numériques, ce qui rentre pleinement dans la problématique de leur potentiel environnemental.

6.2.2 Le PDU de l'aire grenobloise

Le PDU 2030 définit les orientations en matière de transport dans l'aire grenobloise d'ici à 2030. Il est construit par le Syndicat Mixte des Mobilités de l'Aire Grenobloise (SMMAG) et s'insère dans la SNBC par l'intermédiaire du Schéma de cohérence territoriale de la grande région de Grenoble. Le territoire concerné par ce PDU est illustré sur la carte en Figure 6.3.

Il a été voté en 2019 et une prochaine version sera dévoilée à la fin de l'année 2023, qui donnera des objectifs pour l'année 2035. Les objectifs en matière de covoiturage sont, de la même manière que pour la SNBC, définis en termes de taux de remplissage.

Les objectifs du PDU en matière d'augmentation du taux de remplissage ciblent plus particulièrement les flux de trajets pendulaires (trajets domicile-travail et domicile-études). Pour les flux entrants et sortants du cœur urbain, le PDU définit comme objectif de passer d'un taux de remplissage de 1,06 en 2010 à 1,40 en 2030.

Les actions mises en place pour atteindre cet objectif sont les suivantes (Plan de déplacements urbains de l'agglomération grenobloise, 2019) :

1. Développement des aires de covoiturage.
2. Mise en place de lignes de covoiturage spontanées, pour la desserte des communes périurbaines, rurales ou de montagne ainsi que des secteurs de coteaux.
3. Appui aux employeurs pour organiser le covoiturage entre employés dans le cadre des Plans De Mobilité.
4. *Amélioration des outils de mise en relation des passager·ères et des conducteur·rice·s.*
5. Voies réservées au covoiturage sur autoroute et autres avantages pour les covoitureurs.

Ainsi, le PDU s'appuie sur les plateformes de covoiturage pour atteindre ses objectifs en matière de taux de remplissage.

6.3 Problématique

Les plateformes de covoiturage sont envisagées comme des solutions numériques dans le secteur du transport de voyageurs en réponse à l'urgence climatique. L'instanciation de la question posée en introduction du manuscrit par rapport au potentiel du numérique est : quel est le *potentiel d'émissions évitées* des plateformes de covoiturage régulier face à l'urgence climatique ? J'insère cette question du potentiel dans le cadre de la SNBC, et plus

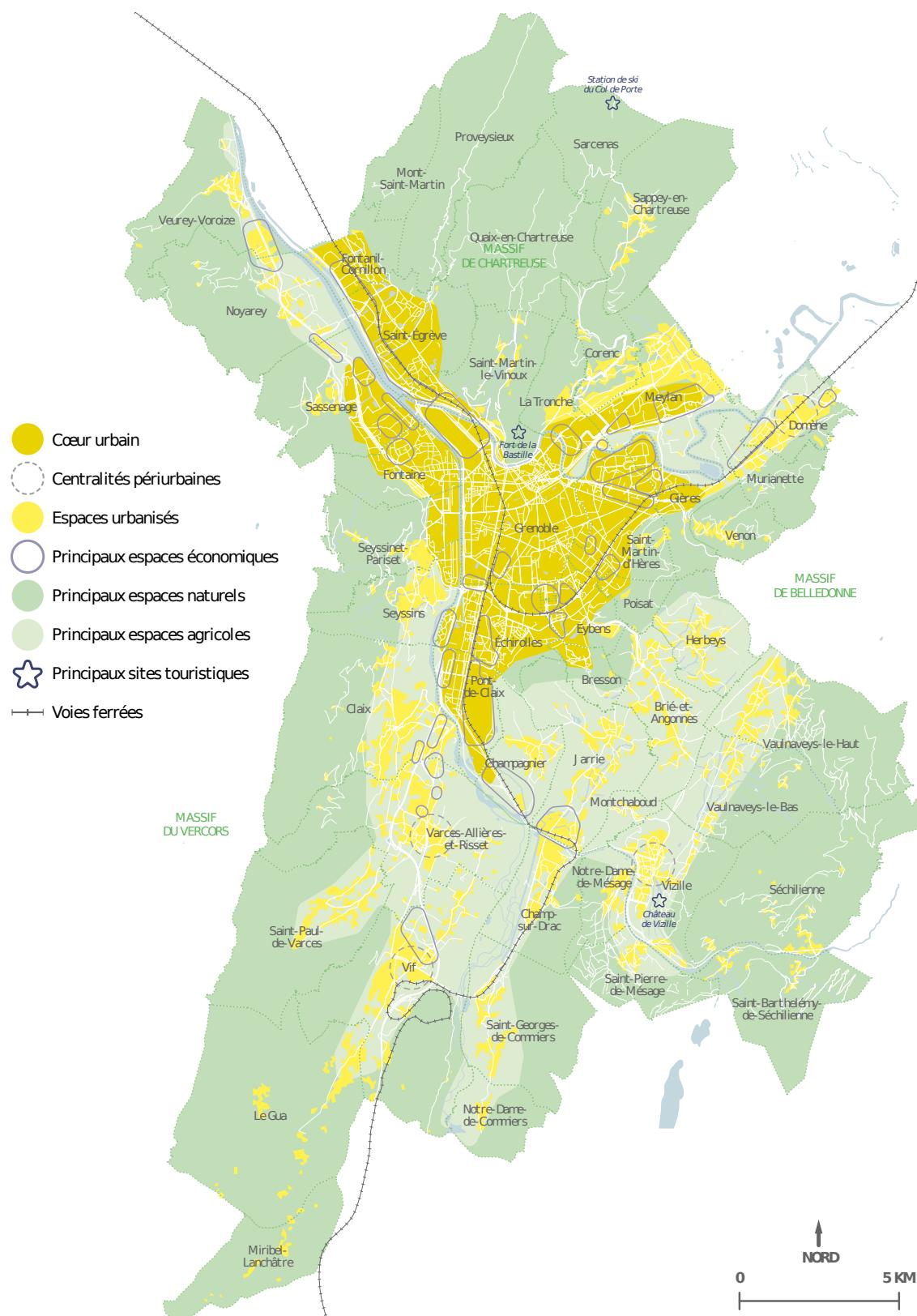


FIGURE 6.3 – Le cœur urbain et les espaces périurbains sur le ressort territorial du [Syndicat Mixte des Transports en Commun \(SMT\)](#) (Plan de déplacements urbains de l'agglomération grenobloise, 2019)

particulièrement du PDU grenoblois. En d'autres termes, je me demande dans cette partie : *à quelles conditions les plateformes de covoiturage régulier peuvent-elles répondre aux objectifs formulés dans ces stratégies ?*

L'évaluation de l'impact de ces plateformes soulève toutes les difficultés méthodologiques décrites dans la Partie I. Pour rappel, une évaluation complète des impacts évités d'une solution numérique consiste en le calcul d'une différence des impacts entre un scénario « avec solution » et « sans solution », en prenant compte les recommandations du Chapitre 5.

Dans le cas des plateformes numériques du covoiturage, les effets du 1^{er} ordre correspondent aux impacts environnementaux liés à la mise en place, à l'usage, à la maintenance et à la fin de vie du service numérique correspondant (usage d'une application Internet, fonctionnement des serveurs, impacts liés au développement de l'application, etc.). Les effets du 2^{ème} ordre correspondent à l'augmentation de la capacité des utilisateur·ice·s de la plateforme à covoiturer avec des inconnu·e·s et l'augmentation du taux de remplissage des véhicules, c.-à-d. que les trajets covoiturés se substituent à des trajets autosolistes. Les effets du 3^{ème} ordre correspondent aux effets rebonds des plateformes de covoiturage. Des exemples d'effets rebond sont évalués par Coulombel et al. (2019). J'illustre le lien entre ces différents effets dans les Figures 6.4 et 6.5.

Du point de vue du périmètre, la présence ou l'absence de ces plateformes peut, directement ou indirectement, affecter toutes les activités humaines et leurs émissions de GES associées. L'analyse proposée ici va cependant se limiter aux effets de 2^{ème} ordre des plateformes de covoiturage. Puisque mon étude ne prend pas en compte les effets du 1^{er} et du 3^{ème} ordre, une discussion sur l'interprétation qui peut être faite de ses résultats est nécessaire. En ce qui concerne les effets du 1^{er} ordre, on peut estimer en première approximation qu'ils sont négligeables par rapport aux effets des plateformes sur le covoiturage. Notons qu'il serait relativement facile de vérifier cette hypothèse, et que, d'un point de vue qualitatif, ces effets sont négatifs. Les effets du 3^{ème} ordre du covoiturage, quant à eux, ont fait l'objet d'études quantitatives et qualitatives de Coulombel et al. (2019) et Delaunay (2018). Les conclusions de leurs travaux indiquent que ces effets sont globalement néfastes et réduisent donc les émissions évitées.

Compte tenu de ces observations sur les effets du 1^{er} et du 3^{ème} ordre, je considère que la restriction de l'étude aux effets de 2^{ème} ordre permet de conclure à la question du potentiel des plateformes à atteindre les objectifs des stratégies dans le cas où le potentiel évalué serait largement en dessous des objectifs fixés. Dans le cas contraire, il ne sera pas possible de conclure. Pour les mêmes

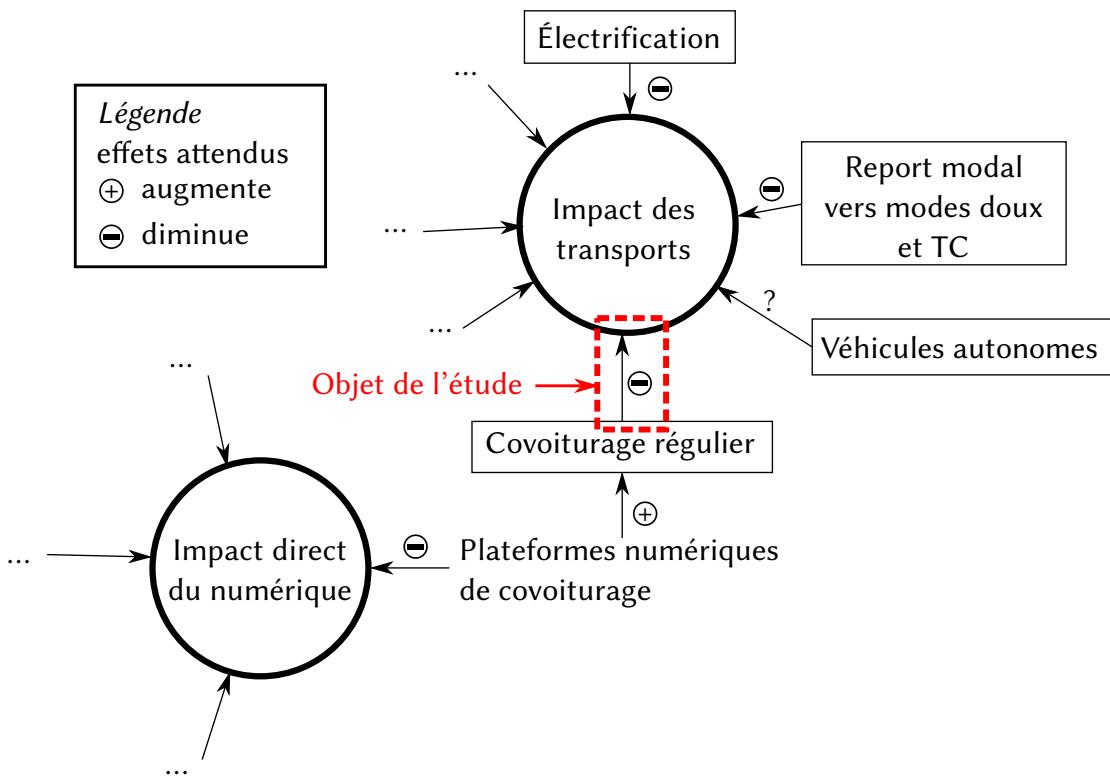


FIGURE 6.4 – Délimitation de mon objet d'étude

Le cadre en pointillé entoure l'objet d'étude lors de l'évaluation de l'impact du 2^{ème} ordre des plateformes, que je détaille dans cette partie du manuscrit. La figure positionne ces effets par rapport à ceux d'autres leviers (report modal, électrification et véhicules autonomes). Les effets du 1^{er} et du 3^{ème} ordre des plateformes de covoiturage ne font pas partie du périmètre de mon étude.

raisons, mon étude ne fera pas la distinction entre le potentiel des plateformes et celui du covoiturage en général, le premier étant nécessairement inférieur au second.

Dans cette partie, je présente tout d'abord un état de l'art des évaluations environnementales du covoiturage régulier ([Chapitre 7](#)). Ensuite, je réponds à une question préliminaire à celle du potentiel du covoiturage, qui est celle de l'évolution récente de l'usage des plateformes ([Chapitre 8](#)). La seconde étude ([Chapitres 9 à 12](#)) s'attache à déterminer des conditions qui permettraient à ce type de covoiturage de remplir les objectifs fixés par le PDU grenoblois : je commence par présenter la méthode de modélisation du covoiturage choisie ([Chapitre 9](#)), puis j'aborde la question des incertitudes associées à cette modélisation ([Chapitre 10](#)), avant de préciser la scénarisation choisie et les résultats obtenus, et enfin de conclure par une remise en perspective de ces résultats ([Chapitre 11](#)).

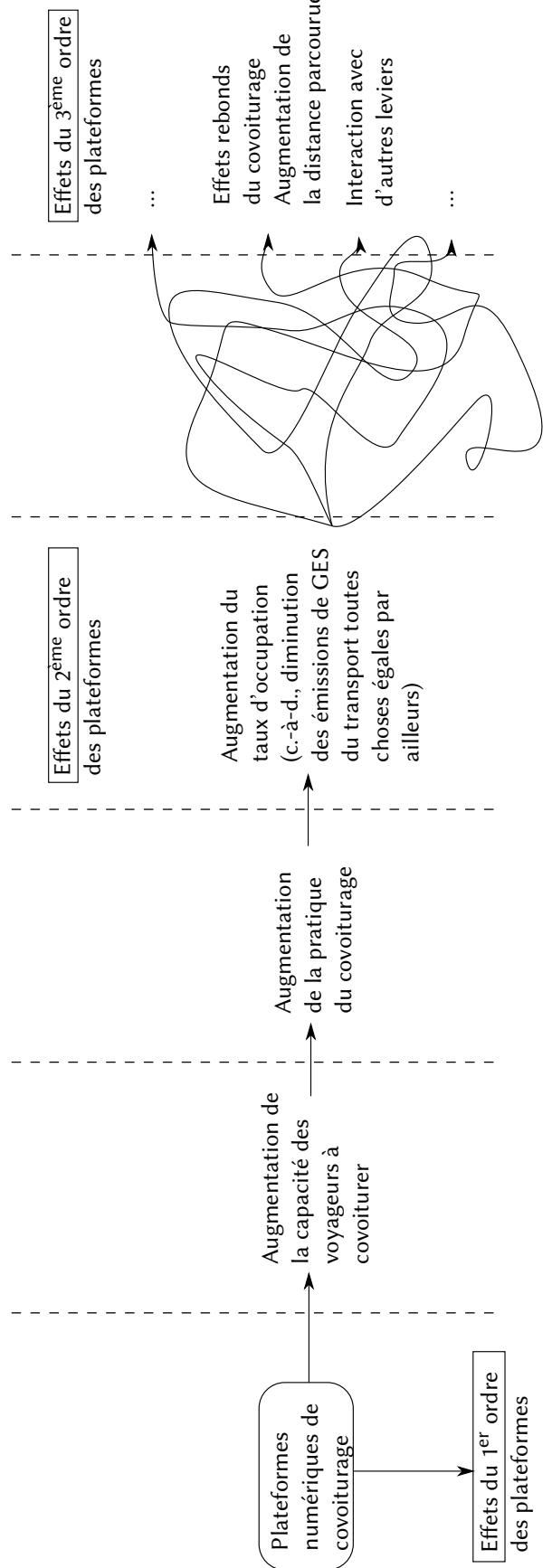


FIGURE 6.5 – Contextualisation des différents niveaux d'impacts des plateformes de covoiturage

ÉTAT DE L'ART DE L'ÉVALUATION DU POTENTIEL DU COVOITURAGE

Structure du chapitre

7.1	Questions de recherche	95
7.2	Modalités d'organisation	95
7.3	Modalités de rencontre et de séparation	100
7.4	Approches de modélisation de la demande en mobilité	101
7.4.1	Modèles à 4 étapes	103
7.4.2	Modèle basé sur les activités	104
7.4.3	Modèles intégrés transport-urbanisme	105
7.5	Méthodes d'appariement	106
7.6	Limites de l'état de l'art et choix méthodologiques	108

Différentes disciplines se sont intéressées à l'évaluation du potentiel de plusieurs types de mobilités partagées et ont chacune leur approche pour caractériser le « covoiturage ». Il convient alors de fixer le vocabulaire dans un premier temps.

Je définis le covoiturage dans le chapitre précédent comme étant un mode de déplacement qui consiste en plusieurs personnes voyageant ensemble en utilisant le véhicule personnel de l'une d'entre elles. Dans la littérature sur la thématique des mobilités partagées, les termes peuvent être proches tout en désignant des pratiques très différentes¹. Il est alors important de distinguer, en particulier, les trois termes courants que je définis ci-dessous :

LE COVOITURAGE (*carpooling* ou *ride-sharing*) Un même trajet est partagé par plusieurs personnes, le véhicule appartenant à l'une d'elles.

LES COURSES PARTAGÉES (*ride-sharing*) Un même trajet est partagé par plusieurs personnes, mais le véhicule appartient à et est conduit par une conducteur·rice professionnel·le, tels que les taxis (S. Ma et al., 2015) ou les entreprises de réseau de transport (Erhardt et al., 2019) (comme *Uber* et *Lyft*). Ces entreprises fournissent un service appelé, en anglais, *ride-hailing* ou *ride-sourcing*. Le véhicule fait alors partie d'une flotte de véhicules, qui peuvent être autonomes ou pas (Vosooghi et al., 2019).

L'AUTOPARTAGE (*car-sharing*) Le partage d'un véhicule entre conducteur·rice·s, dont chacun·e peut l'utiliser pour ses besoins

I. Cela ne signifie pas que toutes les méthodes et tous les résultats des études sur ces autres pratiques ne sont pas pertinentes pour répondre à ma question de recherche.

personnels sur une période où le véhicule lui est réservé (attention, le terme anglais est proche de « ride-sharing », mais désigne une toute autre pratique). Le trajet n'est pas forcément partagé.

La pratique qui est l'objet d'étude dans cette partie du manuscrit est la première : le *covoiturage* entre particuliers, ou tout simplement *covoiturage*.

Même si dans la littérature le terme ride-sharing est utilisé à la fois pour le covoiturage et les courses partagées, la modélisation pour l'évaluation du potentiel des *courses partagées* repose sur des hypothèses socio-économiques très différentes du covoiturage entre particuliers. Cela est dû au fait que le système de courses partagées se base sur une flotte de véhicules autonomes ou conduits par des professionnel·les, contrairement au covoiturage entre particuliers dans lequel conducteur·rice·s comme passager·ère·s souhaitent se déplacer d'un point à un autre pour satisfaire des besoins en mobilité.

En pratique, les plateformes de covoiturage courte distance proposent leurs services pour des déplacements réguliers et fréquents d'au moins deux fois par semaine, alors que les plateformes de covoiturage longue distance proposent des trajets pour des voyages ponctuels. C'est pourquoi je distingue deux types de covoiturage en fonction de la distance et de leur fréquence d'usage par les voyageur·euse·s :

- le covoiturage longue distance, pour les trajets ponctuels et de longue distance comme celui via *BlaBlaCar*,
- le covoiturage courte distance, pour les trajets réguliers et de courte distance, permis par des plateformes plus récentes (p. ex., *Klaxit*, *Karos*).

Par la suite, j'emploie dès lors sans distinction les termes covoiturage régulier et covoiturage courte distance de même que covoiturage ponctuel et covoiturage longue distance.

Le covoiturage longue distance est déjà bien en place, contrairement au covoiturage courte distance sur lequel comptent également les stratégies de décarbonation. En ce qui concerne l'étude des effets du covoiturage longue distance, il a entre autre déjà été mis en évidence que celui-ci se substitue aux voyages en train, ce dernier étant systématiquement plus cher (Mericzkay, 2019), mais en général moins émetteurs de GES.

Je m'intéresse désormais uniquement au covoiturage régulier. Il existe une littérature abondante sur des problématiques connexes à l'évaluation de son potentiel. Les études diffèrent notamment sur plusieurs aspects :

- les questions de recherche abordées,

- les formes de covoiturage, c.-à-d. les modalités d’organisation et de rencontre du covoiturage, étudiées,
- les approches de modélisation de la demande en mobilité,
- les méthodes de calcul de l’appariement des voyageur·euse·s pour former les équipages de covoiturage.

L’état de l’art qui va suivre tente de donner une vue d’ensemble des différentes approches de la littérature académique — majoritairement au sein des communautés proches de l’informatique — sur le covoiturage.

7.1 Questions de recherche

Dans la littérature, l’accent est souvent mis sur la mise en œuvre efficace d’une forme de covoiturage donnée, en particulier pour le covoiturage dynamique (p. ex., Agatz et al., 2012; Alisoltani et al., 2021; Yao & Bekhor, 2021), c.-à-d. que les articles tentent de répondre à la question « *Étant donné des demandes de covoiturage (en tant que passager et/ou conducteur), comment maximiser l’appariement des voyageurs ?* » En revanche, en ce qui concerne son évaluation *a priori* ou *a posteriori*, où il s’agit de répondre à la question « *Le covoiturage peut-il répondre à certains enjeux (p. ex. climatiques ou sociaux) ?* », la littérature est moins abondante.

Parmi les articles qui évaluent le potentiel (ou l’effet actuel) du covoiturage, l’évaluation peut concerner la réduction de la distance parcourue en véhicule, mais aussi

- l’amélioration des conditions de circulation globales (Alisoltani et al., 2021; R. Li et al., 2018 évaluent la congestion évitable), ou,
- la maximisation de la satisfaction des utilisateur·ices (Berlingero et al., 2017; Bruglieri et al., 2011 évaluent un potentiel du covoiturage en maximisant la satisfaction des usager·ère·s en se basant sur leurs affinités).

Parmi les paramètres utilisés dans les évaluations du potentiel du covoiturage, je note en particulier

- la masse critique, c.-à-d. le nombre de participants minimal nécessaire, pour atteindre une certaine efficacité (J.-B. Ray, 2014; Rodier et al., 2016), et,
- les flexibilités spatiale et temporelle des passager·ère·s et des conducteur·rice·s (Hasiak & Palmier, 2019; Jalali et al., 2017; Rodier et al., 2016).

7.2 Modalités d’organisation

Furuhashi et al. (2013) donnent une classification des modes de mise en correspondance de voyageur·euse·s, appelés « systèmes de

covoiturage », existants au moment de sa publication. Les critères de classification concernent les caractéristiques des systèmes de covoiturage, et plus particulièrement les modalités ou formes d'organisation des passager·ère·s et des conducteur·rice·s en amont du trajet. Les critères et leurs valeurs possibles sont

- le type de trajet visé : « à la demande », « longue distance » ou « trajet pendulaire » ;
- le(s) service(s) fourni(s) : « mise en relation des usager·ère·s », « fixation du prix du trajet » ou « paiement du trajet » ;
- le(s) critères de recherche : « couple origine-destination (OD) », « itinéraire », « heures de départ ou d'arrivée », ou « mots-clés » ;
- la proposition automatique d'un·e conducteur·rice ou d'un·e passager·ère : « appariement actif » ou « appariement passif » ;
- la méthode de fixation du prix : « coût calculé par la plateforme », « fixé par le·la conducteur·rice » ou « négocié » ;
- la plateforme de paiement : « paiement directement au conducteur·rice » ou « via plateforme tierce » comme *PayPal*.

Les auteur·es regroupent également les systèmes de covoiturage qui ont des caractéristiques semblables en six types :

CVOUITURAGE DYNAMIQUE (*Dynamic real-time ridesharing*) La plateforme trouve automatiquement un·e conducteur·rice ou un·e passager·ère (« appariement actif ») en fonction de l'itinéraire suivi par le·la conducteur·rice. Une plateforme de covoiturage dynamique est adaptée aux trajets pendulaires ou « à la demande », c.-à-d. pour des trajets courts et ponctuels et nécessitant des temps de réponse courts.

CVOUITURAGE (*Carpooling*) C'est le type de plateforme le plus courant pour le covoiturage régulier. Il met en relation automatiquement des passager·ère·s et des conducteur·rice·s en fonction de leurs OD et de leurs heures de départ et d'arrivée. Il est utilisé notamment pour les trajets pendulaires, ce qui fait du lieu de travail un critère important pour trouver un·e autre voyageur·euse. La différence avec le *covoiturage dynamique* réside dans le fait qu'il repose sur une organisation entre les covoitureur·euse·s sur le long terme.

CVOUITURAGE LONGUE DISTANCE (*Long-distance ride-match*) Similaire au type précédent, mais adapté aux trajets longue distance (trajets entre villes, régions ou pays). Cela implique une plus grande flexibilité pour les rendez-vous de covoiturage. La proposition d'un·e conducteur·rice ou de passager·ère·s peut être « active » ou « passive ». Dans le deuxième cas l'utilisateur·ice doit filtrer les propositions lui-même.

CVOUITURAGE PONCTUEL (*One-shot ride-match*) Plateforme hybride entre les types *covoiturage* et *covoiturage longue distance*, le type d'appariement est choisi en fonction du type de trajet (court ou long). Le prix n'est pas fixé automatiquement^{II}.

PETITES ANNONCES (*Bulletin board*) L'utilisateur·ice de la plateforme est responsable de tout le processus de recherche d'un covoiturage, la plateforme ne proposant qu'une liste des passager·ère·s ou conducteur·rice·s en recherche d'un covoiturage.

CVOUITURAGE FLEXIBLE (*Flexible carpooling*) Ce type de covoiturage n'est pas basé sur une plateforme numérique et n'est pas non plus préorganisé : les passager·ère·s se rencontrent à un lieu et sont servi·s sur une base de « premier·ère arrivé, premier·ère servi·e ». Les conducteur·rice·s ne font qu'annoncer leur lieu de destination. Ce type de covoiturage est présent proche des « voies pour véhicules à haut taux de remplissage » aux États-Unis. Le système le plus important de ce type est à Washington City (États-Unis) et s'appelle *Slugging*.

Tous les systèmes référencés, sauf ceux appartenant à la catégorie *covoiturage flexible*, reposent sur une plateforme numérique.

Remarquons qu'au jour de l'écriture de ce manuscrit, parmi les 39 systèmes référencés par Furuhata et al. (2013), seuls 10 sont encore actifs, dont un ayant changé de mode de covoiturage, et *BlaBlaCar*, autrefois *Comuto*, ayant racheté deux des autres plateformes référencées. Les autres plateformes sont pour la plupart fermées, inaccessibles ou introuvables avec les informations fournies par Furuhata et al. (2013). Les plateformes restantes ont changé de domaine d'activité dans le secteur du conseil aux administrations ou aux entreprises dans le domaine du transport.

La classification de Furuhata et al. (2013) reste intéressante pour rendre compte de la variété des possibilités de mise en relation des passager·ère·s et des conducteur·rice·s par une plateforme numérique, qui n'est pas forcément automatisée à tous les niveaux. Je note en particulier que certains groupes sur les réseaux sociaux (p. ex., les groupes *Facebook*), de discussion sur les messageries instantanées ou sur des sites de petites annonces généralistes peuvent être considérées de facto comme des systèmes de covoiturage de type *petites annonces*. Je choisis de restreindre mon périmètre d'état de l'art et d'étude aux plateformes numériques de covoiturage plus automatisées que ces dernières, parce qu'un mécanisme de petites annonces peut exister sans numérique (p. ex., sous forme d'un tableau sur un place publique), ce qui est en dehors de mon sujet d'étude.

II. Il est difficile de décrire cette forme plus précisément, sachant qu'il n'existe plus de plateforme de ce type aujourd'hui.

Je propose une nouvelle classification des formes d'organisation. Celle-ci met à jour celle de Furuhata et al. (2013) en se basant sur des formes de covoiturage mises en avant en France pour lesquelles les différents acteurs des mobilités quotidiennes estiment le plus grand potentiel. Étant dans l'optique d'évaluer le potentiel du covoiturage régulier vis-à-vis des objectifs des stratégies de décarbonation, indépendamment des contraintes financières des voyageur·euse·s, j'ignore les critères liés au prix du trajet. Je caractérise ces formes dans le [Tableau 7.1](#) par :

- le moment de l'organisation, étant au choix
 - avant le trajet (*préorganisé*),
 - aucune préorganisation (*spontané*),
 - possible après le début du trajet du·de la conducteur·rice (*quasi spontané*);
- le besoin d'arrêt matérialisé ou non, à la manière d'arrêt de bus,
- la possibilité de correspondances avec d'autres modes de transport (indifféremment, en début, milieu ou fin de trajet).

Je liste également des travaux ayant modélisé chacune des formes, s'il en existe. En France, on peut ainsi distinguer trois types de formes d'organisation de covoiturage régulier existants ([Tableau 7.1](#)) :

LE COVOITURAGE PORTE À PORTE mis en place par *Karos*, *Klaxit*, *BlaBlaCar Daily* et *Mobicoop*, où les passager·ère·s et le conducteur·rice s'organisent via la plateforme sur une base de trajets réguliers, et où iels se rencontrent à un point proche de leur départ et sont déposé·e·s proches de leur arrivées (typiquement proche de chez elleux et proche de leur lieu de travail, d'où le nom « porte à porte »),

L'AUTOSTOP ORGANISÉ mis en place par *Rezo pouce*, où les passager·ère·s peuvent se faire ramasser par des conducteur·rice·s à des arrêts de covoiturage pour se rendre à un point qui peut éventuellement être affiché sur un panneau mis en évidence sur le bord de la route, sans que celleux-ci ne soient spécifiquement sur une ligne de covoiturage. Cette forme d'organisation ne nécessite pas de plateforme numérique,

LES LIGNES DE COVOITURAGE mises en place par *Ecov* et *Mobicoop*, où les passager·ère·s peuvent attendre à un arrêt préinstallé le long d'un itinéraire prédéfini, appelé *ligne de covoiturage*, pour être pris·e·s en charge par un·e conducteur·rice utilisateur·rice de la plateforme.

Deux autres types de plateformes n'ont pas d'implémentation existante à ce jour :

TABLE 7.1 – Formes de covoiturage

Forme Exemples	Organisation	Arrêts matérialisés	Correspondance(s) prévue(s)	Évaluation du potentiel dans la littérature académique
Porte à porte <i>Karos, Klaxit, BlaBlaCar</i> <i>Daily, Mobicoop</i>	Préorganisé	X		Hartman et al. (2014) et Hasiak et Palmier (2019)
Autostop organisé <i>Rezo pouce</i>	Spontané	✓	? ^a	
Ligne de covoiturage <i>Ecov, Mobicoop</i>	Spontané	✓ ^b	TC, ligne	Papoutsis et al. (2021) et Raballand et Laharotte (2020a)
Covoiturage préorganisé avec correspondances <i>Pas d'implémentation connue</i>	Préorganisé	?	Covoit.	Y. Guo et al. (2013), Avec conducteur·rices inflexibles : de Palma, Javaudin et al. (2022) Avec arrêts matérialisés : Stiglic et al. (2015)
Covoiturage dynamique <i>Abandonnés : Green Monkeys, Corivo, Avego</i>	Quasi spontané	X	TC, covoit.	Agatz et al. (2012) et Alisoltani et al. (2021), R. Li et al. (2018), À Lyon : J.-B. Ray (2014)

^a Les arrêts du *Rezo pouce* sont proches d'arrêts de **TC**, mais la correspondance n'est pas garantie par rapport aux horaires des **TC**.

^b Les arrêts sont présents le long d'itinéraires prédefinis et doivent être desservis dans l'ordre sur leur itinéraire.

LE COVOITURAGE PRÉORGANISÉ AVEC CORRESPONDANCES, pour lequel la plateforme peut proposer des correspondances entre trajets covoiturés, qui pourrait en principe exister, mais qui semble difficile à mettre en pratique pour les utilisateur·rices compte tenu de la multiplication des contraintes que ce type de covoitage induit,

LES PLATEFORMES DE COVOITURAGE DYNAMIQUE, qui permettent de trouver sous un délai très court un·e conducteur·rice pour se rendre à destination, mais qui n'ont à ce jour existé qu'au stade expérimental.

Toutes ces formes de covoitage se différencient notamment par les infrastructures et le matériel, numérique ou non, dont a besoin un·e voyageur·euse pour pouvoir se déplacer (typiquement, un réseau informatique, des centres de données, un smartphone ou un GPS qui permet de suivre son véhicule en temps réel) et qui rendent le covoitage possible (typiquement un arrêt de covoitage ou un panneau lumineux) ([Tableau 7.2](#)). Les impacts environnementaux directs d'une forme de covoitage sont directement tributaires de cette matérialité.

TABLE 7.2 – Matériel nécessaire par type de plateforme de covoitage

Type de plateforme <i>Implémentations</i>	Infrastructure et matériels nécessaires
Covoitage porte-à-porte <i>Karos, Klaxit, BlaBlaCar Daily et Mobicoop</i>	smartphone, réseaux, datacentres
Ligne de covoitage <i>Ecov et Mobicoop</i>	smartphone, dispositif de localisation du véhicule, arrêt de covoitage ^a , réseaux, datacentres
Autostop organisé <i>Rezo pouce</i>	panneaux lumineux ^a
Covoitage dynamique Abandonnés : <i>Green Monkeys, Covivo, Avego</i>	smartphone, dispositif de localisation du véhicule, réseaux, datacentres

^a installé par la ville

7.3 Modalités de rencontre et de séparation

Contrairement aux classifications présentées dans la [Section 7.2](#) qui décrivent les modalités générales d'organisation proposées par les plateformes existantes, la seconde classification de Furuhata et al.

(2013) que je présente ci-après se concentre spécifiquement sur la modalité de rencontre et de séparation d'un·e conducteur·rice avec saon ou ses passager·ère·s. Furuhata et al. (2013) distingue quatre modalités (voir les illustrations dans la Figure 7.1) :

IDENTICAL RIDESHARING Les passager·ère·s et le·la conducteur·rice démarrent et finissent leur trajet exactement au même endroit.

INCLUSIVE RIDESHARING Le·la conducteur·rice peut prendre et déposer des passager·ère·s sur son chemin, sans que le·la conducteur·rice ait à faire un détour, ou que les passager·ère·s aient à marcher.

PARTIAL RIDESHARING Le·la conducteur·rice fait son trajet sans détour, tandis que les passager·ère·s doivent rejoindre le·la conducteur·rice sur son chemin pour qu'iel les prenne ou les dépose.

DETOUR RIDESHARING Le·la conducteur·rice fait son trajet avec détour pour se rapprocher des passager·ère·s, qui peuvent rejoindre le·la conducteur·rice sur son chemin pour qu'iel les prenne ou les dépose.

Ces modalités mettent en évidence les questions auxquelles on est confronté lors de la modélisation des rencontres entre covoitureur·euse·s : Quand considère-t-on que deux voyageur·euse·s peuvent covoiturer ? Quel détour le·la conducteur·rice s'autorise-t-iel pour récupérer un·e passag·ère (ou l'inverse) ?

Pour les quatre modalités, la possibilité ou non pour un couple de voyageur·euse·s de covoiturer dépend des distances entre les points d'origine et de destination, des horaires de départ et d'arrivée et enfin de l'itinéraire suivi par le·la conducteur·ice.

7.4 Approches de modélisation de la demande en mobilité

Pour évaluer toute mobilité, qu'elle soit actuelle, future, envisagée, passée ou potentielle, il faut d'abord évaluer la demande en mobilité. Cette demande en mobilité peut être bâtie à partir de différents types de sources données :

- des données d'enquête comme c'est le cas dans les travaux de Coulombel et al. (2019) et Raballand et Laharotte (2019);
- des observations directes, par exemple issues de traces GPS ou de caméras de surveillance (Alexander et al., 2015; R. Li et al., 2018).

L'utilisation de données issues d'observations directes pour l'évaluation du covoiturage n'est pas fréquente. De plus, leur collecte à une échelle assez fine pour ma question de recherche soulève des questions de confidentialité. Je m'intéresse par conséquent

	Single Passenger	Multiple Passengers		
Pattern 1 (Identical Ridesharing)	$o_a = o_b = u_b \quad d_a = d_b = v_b$ 	$o_a = o_b = o_{b'} \quad d_a = d_b = d_{b'}$ 		
Pattern 2 (Inclusive Ridesharing)	$o_b, d_b \in R(a)$ 	$o_b, d_b, o_{b'}, d_{b'} \in R(a)$ 		
Pattern 3 (Partial Ridesharing)	$u_b, v_b \in R(a)$ $\neg(o_a = u_b \& d_a = v_b)$ 	$u_b, v_b, u_{b'}, v_{b'} \in R(a)$ $\neg(o_a = u_b \& d_a = v_b)$ $\neg(o_a = u_{b'} \& d_a = v_{b'})$ 		
Pattern 4 (Detour Ridesharing)	(1) $\neg(u_b \in R(a) \& v_b \in R(a))$ $u_b, v_b \in R(a, b)$ $o_a = u_b \& d_a = v_b$ (2) $\neg(u_b \in R(a) \& v_b \in R(a))$ $u_b, v_b \in R(a, b)$ $\neg(o_a = u_b \& d_a = v_b)$	(1) $\neg(u_b \in R(a) \& v_b \in R(a))$ $\neg(u_{b'} \in R(a) \& v_{b'} \in R(a))$ $u_b, v_b, u_{b'}, v_{b'} \in R(a, B)$ (2) $u_b, v_b \in R(a)$ $\neg(u_{b'} \in R(a) \& v_{b'} \in R(a))$ $u_b, v_b, u_{b'}, v_{b'} \in R(a, B)$		
Legend				
Origin o Destination d Pick-up u Drop-off v Route				
Original Ridesharing				
Driver a	○	●	→	→
Passenger b	○	●	△	▼
Passenger b'	○	●	△	▼

FIGURE 7.1 – Les différentes modalités de rencontre et de séparation vues dans Furuhata et al. (2013)

uniquement aux approches reposant sur des données d'enquête. Dans la suite, je présente les différentes méthodologies de modélisation de la demande en transport.

Ces méthodologies sont développées et améliorées depuis des décennies et il en existe de multiples. Nous détaillons ici les modèles à 4 étapes ([Section 7.4.1](#)), les modèles basés sur les activités ou **activity-based model (ABM)**^{III} ([Section 7.4.2](#)) et les modèles de type **LUTI** ([Section 7.4.3](#)).

7.4.1 Modèles à 4 étapes

Historiquement, et encore maintenant le plus fréquemment, la planification des transports se sert de modèles basés sur les trajets des voyageur·euse·s (*Trip-based model*), aussi appelés modèles à 4 étapes (Bhat & Koppelman, 1999; McNally & Rindt, 2007)^{IV}. Ce type de modèle est utilisé notamment pour analyser la demande en transport et pour décider, par exemple, la construction de nouvelles routes.

Le modèle à 4 étapes (McNally, 2007) part du principe que ce sont les trajets qui définissent la mobilité globale. C'est-à-dire que ce sont les trajets qui sont les déterminants principaux de la demande en mobilité synthétisée par ce type de modèle. En général, il consiste en l'exécution successive de 4 étapes :

1. *Génération* : le territoire d'étude étant découpé en zones ([Traffic Analysis Zone \(TAZ\)](#) en anglais), chaque zone se voit attribuer un nombre d'origines et de destinations de trajets. Cette étape prend en entrée le volume et la géographie de la population et des infrastructures.
2. *Distribution* : en fonction du nombre d'origines et de destinations dans chaque zone, des flux entre les zones sont créés (ces flux sont parfois appelés *lignes du désir*). Cette étape fait appel à un modèle production-attraction : plus une zone contient de destinations, plus elle est *attractive*.
3. *Choix modal* : c'est l'étape où le mode de transport ([marche à pied \(MAP\)](#), à vélo, en [TC...](#)) est choisi pour chaque trajet. Le mode est choisi grâce à un modèle de choix modal qui prend en paramètre les attributs du trajet (distance, temps de trajet...) et des caractéristiques moyennes de la population (préférences des voyageur·euse·s...).

III. En anglais, agent-based model (pour [système multi-agents](#)) et activity-based model (pour modèle basé sur les activités) ont le même acronyme, mais le premier désigne le type de modèle numérique alors que le second désigne le type de modélisation de la demande de transport.

IV. En particulier, c'est le type de modèle utilisé par le [SMMAG](#).

4. *Affectation* : pour chaque trajet, l'itinéraire le plus efficace, est choisi. La notion d'efficacité est définie par le·la modélisateur·rice.

Les modèles à 4 étapes présentent des limitations dues à la résolution spatiale et à la résolution temporelle. La limitation spatiale vient du faire que les flux de trajets sont projetés sur le zonage spatial des **TAZ**. La limitation temporelle vient du fait qu'il n'est possible de calculer que le flux moyen pour une période donnée (p. ex., toute une journée ou moins). Il est possible d'« extrapoler » les flux à plusieurs périodes de la journée, typiquement les pics horaires du matin et de l'après-midi, à l'aide d'une *analyse du temps de la journée* (time-of-day factoring), c.-à-d. une estimation du flux global ou des flux locaux entre zones pour différentes périodes de la journée.

7.4.2 Modèle basé sur les activités

Plus récemment, les modèles basés sur les chaînes d'activités des voyageur·euse·s (**ABM**), plus précis et flexibles se sont développés. Les **ABM** répondent aux limites posées par les modèles basés sur les trajets en termes de résolution spatiale et temporelle, mais aussi en termes de réalisme du comportement des individus (Rasouli & Timmermans, 2014). McNally (2000) définit les approches basées sur les activités comme reflétant au moins une de ces thématiques :

1. Les trajets découlent de la demande de participation à des activités.
2. Les séquences ou schémas de comportement, et non les trajets individuels, sont l'unité d'analyse pertinente.
3. Les structures familiales et sociales influencent les trajets et les comportements en matière d'activités.
4. Les interdépendances spatiales, temporelles, de transport et interpersonnelles restreignent les comportements en matière d'activités et de trajets.
5. Les approches basées sur les activités reflètent la planification des activités dans le temps et l'espace.

Ces modèles se basent donc sur les activités quotidiennes à l'échelle de l'individu. L'approche est donc dite *désaggrégée*. De fait, ce type d'approche peut nécessiter, en fonction des hypothèses de modélisation (Travel Forecasting Resource, 2023) :

- une synthèse de population, soit la création d'une population complète à partir d'un échantillon et des distributions marginales (exemple de d'outil de synthèse de population : Doyle et al., 2017, février 14/2023, faisant partie du projet *ActivitySim*),

- une formulation des chaînes d'activités ou de circuits, un circuit (*tour*) étant une suite de déplacements commençant et finissant sur le même lieu (typiquement, le domicile, c.-à-d. des circuits domicile-domicile ou « *HH* » pour *Home-Home*),
- une *analyse du temps de la journée* ou *time-of-day factoring*, décrite précédemment pour les modèles à 4 étapes,
- un modèle de choix modal, défini comme un modèle de choix multinomial permettant, à partir des caractéristiques d'un individu et d'un trajet, de définir un mode de transport pour le trajet (*Larch* (2016) est un exemple d'implémentation d'un modèle de choix modal).

ActivitySim est un exemple de logiciel permettant de synthétiser les activités d'une population à partir de données d'enquête. Il est extensible (il peut utiliser des modules externes tels que *Larch*) et intègre une simulation Monte-Carlo pour créer une demande synthétique à partir de circuits.

Dans un **ABM**, le choix de l'itinéraire et du mode de transport peut être fait grâce à une modélisation de type **systèmes multi-agents (SMA)**. Par exemple, *MATSim* est un logiciel libre pouvant simuler numériquement une approche basée sur les activités à l'aide d'un **SMA**.

Parmi les exemples d'utilisation d'**ABM**, on peut citer les travaux de Labee et al. (2022) dans lesquels le modèle *Albatross* (avec des données provenant de l'enquête nationale néerlandaise sur les déplacements) sert à évaluer le potentiel du **Mobility-as-a-Service (MaaS)** ou *Mobilité comme service*, qui consiste en la possibilité pour tout·e voyageur·euse de planifier tout trajet à partir d'une unique plateforme numérique qui proposerait n'importe quel mode de transport. On peut aussi citer les travaux de Rodier et al. (2016) qui se basent sur une implémentation spécifique d'**ABM** de la *Metropolitan Transportation Commission* pour la région de la baie de San Francisco.

Les **ABM** restent rares pour l'aide à la décision. E. Miller (2023) explique cette lente adoption par la difficile mise en place d'une expertise technique qui puisse gérer et comprendre ce type de modèle et la difficulté du transfert de savoir entre le monde de la recherche et le monde des praticiens.

7.4.3 Modèles intégrés transport-urbanisme

Il existe aussi des approches de modélisation permettant de représenter les interactions entre la mobilité et l'urbanisme (ou occupation du sol) au sein d'un même modèle intégré, appelé **Land Use and Transport Interaction (LUTI)**. Cette prise en compte se fait généralement à partir d'une boucle d'interaction entre le modèle de transport et celui de l'occupation des sols (Wegener & Fuerst, 2004).

Coulombel et al. (2019), cité dans la Section 3.3.2, utilisent un LUTI qui couple un modèle 4 étapes et un modèle d'occupation des sols pour quantifier les effets rebond du covoiturage. Les quatre premiers types d'effet rebond (*effet de congestion, de choix d'itinéraire, de distance et report modal*) correspondent à chacune des étapes du modèle 4 étapes, tandis que l'*effet de relocation* est mis en évidence grâce au couplage avec le modèle d'usage des sols.

7.5 Méthodes d'appariement

La constitution d'équipages de covoiturage en fonction des contraintes des covoitureurs potentiels appartient à la classe des problèmes d'appariement. Tafreshian et al. (2020) fait la classification du point de vue de la difficulté du problème mathématique sous-jacent pour optimiser un critère (distance parcourue, émissions de GES, nombre d'équipages...) par le covoiturage. Il distingue notamment les problèmes en fonction du nombre de conducteur·rice·s (ou, plus précisément, en fonction du nombre de trajets uniques parcourus par les véhicules) et du nombre de passager·ère·s servi·es par ces conducteur·rice·s (ou plus précisément, du nombre de couples OD à servir). En résumé, cela donne 4 types de problème :

ONE-TO-ONE un·e conducteur·rice conduit un·e passager·ère (ou plusieurs passager·ère·s ayant exactement le même trajet),

ONE-TO-MANY au cours de son trajet, un·e conducteur·rice peut prendre en charge plusieurs passager·ère·s ayant potentiellement des trajets différents.

MANY-TO-ONE un·e passager·ère peut être prise en charge par plusieurs véhicules, en faisant donc des correspondances, mais un·e conducteur·rice ne peut pas prendre en charge plusieurs passager·ère·s pour des trajets différents.

MANY-TO-MANY c'est la forme la plus générale, dans laquelle un·e conducteur·rice peut prendre en charge plusieurs passager·ère·s pour des trajets différents et chaque passager·ère peut changer de véhicule pour effectuer son trajet.

Les problèmes sont aussi caractérisés par les rôles des voyageur·euse·s : soit les voyageur·euse·s ont un rôle *flexible*, c.-à-d. qu'un·e voyageur·euse peut soit être conducteur·rice ou passager·ère, c.-à-d., que l'algorithme d'optimisation est responsable de choisir son rôle, soit *fixés* d'emblée, c.-à-d. qu'un·e voyageureuse est soit un·e passager·ère potentiel d'un équipage de covoiturage, soit un·e conducteur·rice, cette information étant connue à l'avance.

L'appariement peut tenir compte des circuits : le mode de transport doit rester cohérent sur chacun des circuits, p. ex. il n'est pas possible qu'un·e voyageur·euse utilise sa voiture pour partir de

son lieu de travail alors qu’iel l’a laissée à son domicile. Cette prise en compte des circuits peut être faite pour un·e passager·ère soit en proposant des conducteur·rice·s différent·e·s ou d’autres modes de transport pour effectuer les différents trajets d’un circuit, soit en fixant la·le même conducteur·rice pour un·e passager·ère au cours de la journée. Hasiak et Palmier (2019) comparent les deux approches pour évaluer le potentiel du covoiturage. Ils en concluent qu’à partir des données d’enquête des déplacements à Lille, le potentiel est faible dans le cas où on exige qu’un·e passager·ère et son conducteur·rice aient des chaînes d’activités identiques (à un zonage spatiotemporel près) au cours de la journée.

L’appariement peut également prendre en compte le fait que les requêtes correspondant à des demandes de covoiturage « arrivent progressivement » au cours du temps, comme c’est le cas avec le covoiturage dynamique. L’appariement est dans ce cas souvent fait selon une approche de *rolling horizon* : les requêtes sont regroupées pendant une période « tampon » à la fin de laquelle elles sont traitées (Tafreshian et al., 2020).

Les méthodes d’appariement peuvent être soit exactes, soit basées sur des heuristiques (gloutonnes). Généralement, les méthodes gloutonnes sont utilisées quand le problème à résoudre est *NP-difficile*, c.-à-d. quand on ne connaît pas d’algorithme de résolution qui peut trouver la solution en temps polynomial. Les problèmes que l’on sait résoudre en temps polynomial sont ceux qui consistent en la résolution d’un appariement maximal où les rôles de tous·tes les voyageur·euse·s sont connus et où les véhicules ne peuvent prendre qu’un·e seul·e passager·ère en plus du·de la conducteur·rice. La complexité augmente avec le nombre de voyageur·euse·s dont le rôle n’est pas connu. Hartman et al. (2014) démontrent, par exemple, que le problème de l’appariement maximal pour une forme de covoiturage *one-to-many* avec rôle libre est un problème NP-difficile.

Les méthodes d'estimation du potentiel du covoiturage dépendent bien entendu de la méthode de modélisation de la demande en mobilité. Dans la littérature, certain·e·s auteur·e·s utilisent directement les fonctionnalités d'un **SMA**. Par exemple, l'appariement pourrait se dérouler à travers plusieurs étapes de négociation entre agents au cours desquelles ceux-ci visent à maximiser une métrique globale (satisfaction des agents...) (Galland et al., 2014).

Remarquons que l’usage d’un **SMA** ou d’une méthode exacte, par exemple en s’appuyant sur des techniques de programmation linéaire en nombres entiers (Tafreshian et al., 2020), nécessite dans les deux cas (**SMA** ou méthode exacte) trop de puissance de calcul ou de temps pour pouvoir être mis en œuvre à l’échelle d’une agglomération de la taille de la métropole de Grenoble. Pour s’en convaincre prenons l’exemple de Dubernet et al. (2013), qui estiment

un potentiel du covoiturage à partir d'un **SMA** construit par *MATSim* pour 10 % de la population de Zurich (196 947 voyageur·euse·s et 318 855 trajets) : la durée de calcul est de plus de 37 heures sans même obtenir un résultat optimal.

7.6 Limites de l'état de l'art et choix méthodologiques

Pour rappel, la question qui m'amène à évaluer le potentiel du covoiturage est : « *à quelles conditions les plateformes de covoiturage régulier peuvent-elles répondre aux objectifs formulés dans le PDU grenoblois ?* »

Dans ce chapitre, nous avons exploré un état de l'art qui s'intéresse à une variété de problèmes qui se distinguent par leur question de recherche, les modalités d'organisation, de rencontre et de séparation considérées, les approches de modélisation de la demande en mobilité utilisées et la méthode d'appariement choisie. Toutes ces spécificités entraînent, de la même manière que pour l'évaluation des impacts évités d'une solution numérique en général, une variété de méthodologies d'évaluation du potentiel du covoiturage.

Ci-dessous, je replace mon travail d'évaluation du potentiel du covoiturage par rapport au **PDU** grenoblois ([Chapitres 9 à 11](#)) dans cet état de l'art, en décrivant les modalités d'organisation, de rencontre et de séparation que je considère, l'approche de modélisation de la mobilité sur laquelle je base mon étude, ainsi que la méthode d'appariement que j'utilise.

MODALITÉS D'ORGANISATION Dans mon analyse du potentiel du covoiturage, j'étudie spécifiquement la forme d'organisation préorganisée et sans correspondance. Si le covoiturage *multiétape* (ou *Many-to-many*), c.-à-d., laissant la possibilité pour tout·e passager·ère de changer de véhicule au cours de son trajet, est la forme de covoiturage la plus générale et qui aurait le plus de potentiel, on peut juger peu réaliste sa mise en place prochaine compte tenu des difficultés pratiques associées. Par exemple, les conditions de circulation, qui peuvent être fluctuantes, rendent difficilement prévisibles les horaires de rencontre des conducteurs et des passager. De plus, la multiplication des interdépendances entre les covoitureur·euse·s multiplie le risque qu'un trajet ne soit finalement plus covoiturable suite à changement de dernière minute.

MODALITÉS DE RENCONTRE ET DE SÉPARATION Dans le but d'évaluer le potentiel du covoiturage pour répondre aux objectifs du **PDU** grenoblois, je modélise les modalités de rencontre et de séparation qui correspondent aux services mis en place dans le cadre de la stratégie. Par conséquent, je m'intéresse à deux modalités de

rencontre et de séparation, que je formalise en [Définitions 5 et 6](#) en reprenant partiellement la nomenclature de la [Figure 7.1](#) : la *covoiturage partiel* correspond précisément au *partial ridesharing* de Furuhata et al. (2013) ; en revanche, le *covoiturage à l'identique* correspond à une version modifiée du *identical ridesharing* où l'origine (resp. la destination) des covoitureur·euse·s peut ne pas être identique.

DÉFINITION 5 : COVOITURAGE À L'IDENTIQUE

Les conducteur·rice·s et les passager·ère·s peuvent covoiturer uniquement si leurs origines (et destinations) sont *proches*.

Cette modalité est également appelée *End-points* dans Cici et al. (2014) et Jalali et al. (2017).

DÉFINITION 6 : COVOITURAGE PARTIEL

Les passager·ère·s peuvent être pris·e·s en charge et déposé·e·s en cours de route par le·la conducteur·rice si l'origine et la destination du·de la passager·ère sont *proches* de l'itinéraire du·de la conducteur·rice.

Cette modalité est également appelée *En-route* dans Cici et al. (2014) et Jalali et al. (2017).

APPROCHE DE MODÉLISATION DE LA MOBILITÉ De manière à pouvoir prendre en compte les emplois du temps de chacun des voyageur·euse·s, je choisis un modèle de type [ABM](#), qui permet de synthétiser une demande en mobilité désagrégée. Le logiciel de Hörl et Balac (2021a) (disponible en tant que logiciel libre) semble tout à fait adapté à cette fin. De plus, cet outil permet notamment l'utilisation de données ouvertes librement disponibles pour le territoire français. Les itinéraires sont calculés par le logiciel libre GraphHopper (2022). Les limites liées à ces choix de modélisation de la mobilité sont décrites dans le [Chapitre 10](#).

MÉTHODE D'APPARIEMENT Souhaitant travailler sur une demande en mobilité exhaustive, c.-à-d. comprenant tous les trajets effectués en une journée et non une sous-partie, mon choix d'une méthode d'appariement est non seulement contraint par les formes de covoiturage que j'étudie, mais aussi par sa capacité à passer à l'échelle. C'est pourquoi j'ai choisi l'algorithme d'appariement de Hartman et al. (2014), qui est basé sur une heuristique gloutonne, pour calculer le potentiel du covoiturage. L'erreur introduite par l'utilisation d'un algorithme non exact est discutée dans la [Section 9.6.1](#).

À ma connaissance, il n'existe aucun résultat dans la littérature correspondant à ma question de recherche et aux formes de covoiturage que je considère. J'ajoute que la plupart des études existantes plus ou moins similaires se basent sur des données non ouvertes ou des logiciels propriétaires et portent sur un sous-ensemble restreint de voyageur·euse·s.

IMPACT ACTUEL DU COVOITURAGE RÉGULIER

Structure du chapitre

8.1	Données d'entrée et logiciels utilisés	112
8.1.1	Parts modales par distance parcourue	113
8.1.2	Registre de Preuves de Covoitage	114
8.1.3	Données pour les calculs d'itinéraire	115
8.1.4	Logiciels pour le calcul d'itinéraires	115
8.2	Étude du report modal vers le covoitage régulier	118
8.2.1	Évaluation basée sur un modèle de choix fonction de la distance parcourue	118
8.2.2	Étude basée sur la comparaison des durées d'itinéraire entre VP et modes alternatifs	119
8.3	Potentiel actuel des modes alternatifs pour les trajets covoiturés	121
8.4	Conclusion	123

Avant d'évaluer le potentiel des plateformes de covoitage dans le cadre du PDU grenoblois, je m'intéresse dans ce chapitre à l'impact actuel de ces plateformes.

Lorsque j'ai commencé à travailler sur ce sujet, le site officiel du Registre de Preuve de Covoitage (2021) proposait déjà une estimation des émissions évitées grâce aux plateformes de covoitage régulier pour l'année 2021^I. L'estimation supposait que le report modal vers les plateformes de covoitage venait uniquement de l'autosolisme : tou·tes les covoitureur·euse·s auraient conduit seul·e·s s'iels n'avaient pas partagé le trajet. Pourtant, ce contrefactuel mérite d'être discuté compte tenu des réalités possibles^{II} : les utilisateur·rice·s actuel·les des plateformes de covoitage pourraient avoir utilisé d'autres modes de transport tels que les TC, le vélo ou auraient pu être covoitureur·euse, de manière régulière et informelle (c.-à-d., sans passer par une plateforme).

Or, le phénomène de report modal depuis d'autres modes que le VP vers le covoitage a déjà été étudié, par exemple par Coulombel et al. (2019). En particulier, ils anticipent que l'augmentation de la participation au covoitage régulier pourrait réduire l'utilisation des TC en Île-de-France. Ce phénomène est déjà observé pour le covoitage longue distance, où l'offre de covoitage interrégional de Blablacar est parfois en compétition avec l'offre ferroviaire : « Pour un passager au départ de Rennes et désirant se rendre à Nantes par

I. Le site a depuis été mis à jour et les estimations ne sont plus affichées.

II. Voir la discussion sur le scénario de référence dans la [Section 4.3.1](#).

exemple, il existe certes une offre en train, mais celle-ci apparaît peu compétitive en termes de temps, de coût et de fréquence par rapport aux trajets proposés sur BlaBlaCar. [L]e covoiturage organisé se positionne pour certaines catégories [...] comme une alternative aux transports collectifs (train, bus) » (Mericskay, 2019).

On sait d'autre part que les émissions de **GES** évitées par le covoiturage dépendent fortement de la nature du report modal^{III}. D'où la question que je me pose dans un premier temps : *le report modal vers le covoiturage régulier vient-il principalement de l'autosolisme ?*

Dans un second temps, j'évalue le potentiel actuel des **TC** et modes doux (**MAP** et vélo), c'est-à-dire leur potentiel compte tenu de l'infrastructure actuelle, en tant qu'alternatives aux plateformes de covoiturage. Je réponds alors à la question suivante : *quelle part des trajets actuellement covoiturés pourrait être faite dans un mode alternatif ?*

Tout au long de ce chapitre, je fais l'hypothèse que les voyageur·euses auraient effectué le même trajet s'ils n'avaient pas covoituré. Je ne prends donc pas en compte les effets rebond possibles.

Pour commencer, je décris les données et les logiciels utilisés ([Section 8.1](#)). Puis, je présente les résultats à ma première question de recherche ([Section 8.2](#)) puis à la deuxième ([Section 8.3](#)). J'applique notamment mes évaluations au périmètre géographique du **SMMAG**.

8.1 Données d'entrée et logiciels utilisés

Mon étude repose essentiellement sur le calcul des itinéraires des trajets covoiturés d'une base de donnée ouverte. Pour chaque tuple composé d'une origine, une destination et une heure d'arrivée, que j'appelle simplement *trajet*, je calcule les itinéraires possibles en **VP**, en **TC** et à vélo. Pour le calcul d'itinéraire en **TC**, celui-ci étant dépendant des horaires des **TC**, je cherche un itinéraire qui arrive le plus tard possible avant l'heure d'arrivée souhaitée.

Je présente ci-dessous les données sur lesquelles je base mes évaluations :

- les parts modales par distance parcourue pour les trajets pendulaires, issues d'une étude de l'**INSEE** (Brutel & Pages, 2021),

III. Des émissions de **GES** sont évitées principalement dans le cas d'un report modal de l'autosolisme vers le covoiturage, p. ex., dans le cas des transports à la demande, sur le long terme ou si les taux de remplissage sont faibles et que les motorisations sont thermiques.

- les enregistrements des trajets déjà covoiturés grâce à des plateformes de covoiturage, à savoir, le Registre de Preuve de Covoiturage (2021),
- les données servant à calculer les itinéraires, à savoir, les données d'[OpenStreetMap \(OSM\)](#) (Contributeurs OpenStreetMap, 2021) et le [Point d'Accès National \(PAN\)](#) (DINSIC, 2020).

Puis, je présente les logiciels utilisés pour le calcul d'itinéraires. Ces données et logiciels sont tous ouverts et disponibles sous licence libre.

8.1.1 *Parts modales par distance parcourue*

Les parts modales par distance parcourue pour les trajets pendulaires (c.-à-d., entre le domicile et le lieu de travail) sont données pour l'année 2017 par Brutel et Pages (2021). Elles sont construites à partir des résultats des enquêtes complémentaires du recensement. Si les données d'entrée et les logiciels utilisés pour calculer ces parts modales ne sont pas tous en libre accès, les valeurs des parts modales relatives sont ouvertes. Dans la [Figure 8.1](#) qui illustre ces parts modales, on constate que les trajets en VP sont prédominants quelle que soit la distance à parcourir.

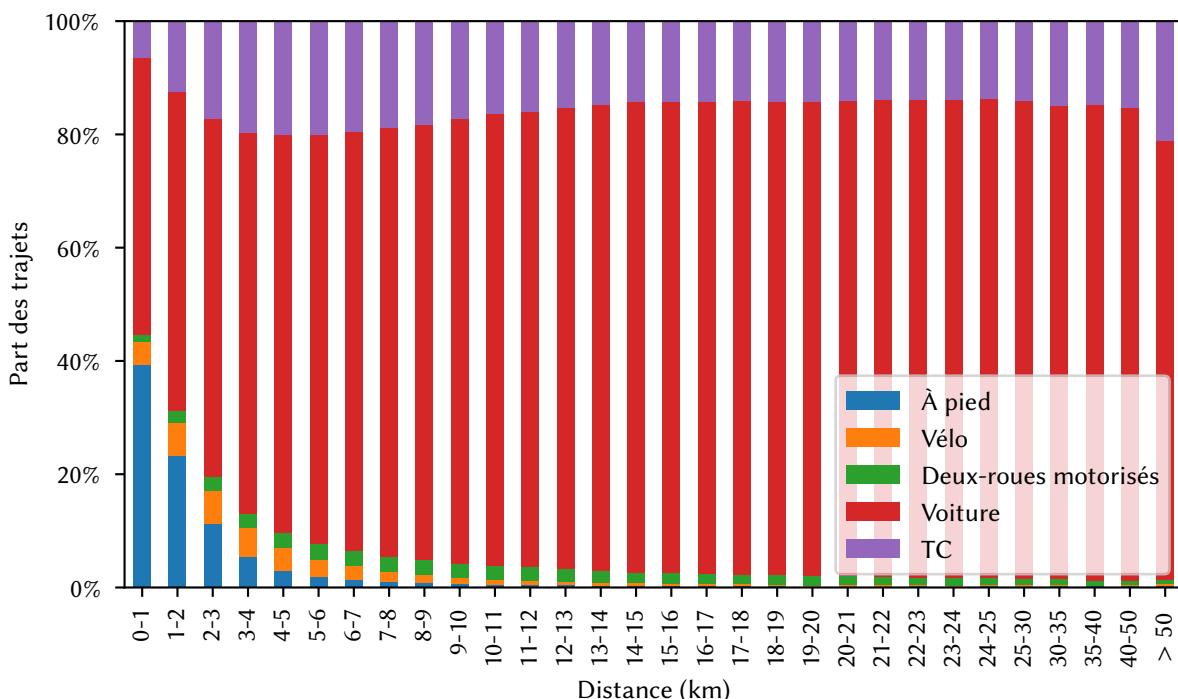


FIGURE 8.1 – Parts modales en fonction de la distance parcourue (Brutel & Pages, 2021)

8.1.2 *Registre de Preuves de Covoiturage*

Le **RPC** est une base de données ouverte^{IV} qui recense tous les déplacements effectués grâce aux plateformes partenaires, appelées *opérateurs*. Le **RPC** ne couvre pas la totalité des trajets covoiturés grâce aux plateformes numériques, puisqu'il se limite aux trajets réalisés par le biais des opérateurs partenaires. Cependant, ces derniers incluent les plateformes les plus importantes, notamment *Blablacar Daily*. Ainsi, seule une partie négligeable des trajets effectués (moins 5 %) ne fait pas partie du **RPC**^V. Les données sont publiées chaque mois, le premier mois disponible étant février 2019.

Les données consistent en un tableau, chaque ligne ou enregistrement correspondant à un trajet en tant que passagerère (il n'y a donc pas d'enregistrement pour les conducteur·rice·s). Pour chaque enregistrement, je me sers des colonnes suivantes :

- les dates et les heures de départ et d'arrivée,
- les coordonnées en latitude–longitude de l'origine et de la destination, et,
- la distance parcourue par la·le passagerère^{VI}, que j'appelle *distance covoiturée*.

Ces enregistrements sont anonymisés : les coordonnées géographiques sont arrondies et les trajets uniques dans leur commune d'origine ou de destination sont supprimés. L'incertitude géographique pose notamment des problèmes de précision pour le calcul d'itinéraire.

Malgré le fait que la majorité des trajets faits grâce à une plateforme de covoiturage y soient enregistrés, les trajets du **RPC** correspondent à une pratique de mobilité minoritaire. Par exemple, en 2019–2020, les habitants de Grenoble réalisaient environ 537 000 déplacements quotidiens (SMAG, 2022), alors que le **RPC** n'a répertorié au maximum que 2 410 enregistrements en un mois sur cette période dans la totalité du périmètre du **SMAG**, atteint en janvier 2020^{VII}, c.-à-d. environ 80 déplacements par jour.

Les nombres d'enregistrements mensuels du **RPC** et les totaux mensuels des distances covoiturées sont illustrés par la [Figure 8.2](#) (en

IV. Les données du **RPC** sont disponibles à <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/trajets-realises-en-covoiturage-registre-de-preuve-de-covoiturage/>.

V. D'après discussion avec des experts et un responsable d'un opérateur de covoiturage.

VI. Chaque enregistrement contient la distance parcourue et la durée de l'itinéraire calculé par *Open Source Routing Machine*. J'utilise cette distance uniquement dans la [Figure 8.2](#). Autrement, j'utilise les itinéraires que je fais calculer par *Graph-Hopper*.

VII. Entre février 2019 et septembre 2023, le maximum du nombre d'enregistrements en un mois est de 9 650, atteint en mars 2023.

haut). Au total, le **RPC** comprend 16 212 427 enregistrements entre février 2019 et septembre 2023 inclus. Les distributions des distances des trajets du **RPC** sont illustrées dans la [Figure 8.2](#) (en bas).

Globalement, le nombre de trajets et la distance covoiturée augmente avec le temps. Cette augmentation peut se justifier par l'ajout de nouveaux opérateurs partenaires et par les différentes politiques d'encouragement au covoiturage en cours. Les distances covoiturées des enregistrements ont une distribution stable, de médiane d'environ 20 km, à l'exception de la période entre août 2020 et janvier 2021 où la médiane de la distance covoiturée par enregistrement avait presque doublée.

Pour les expériences qui nécessitent le calcul d'itinéraires, pour des raisons de temps de calcul, je me restreins au périmètre géographique du **SMMAG** en conservant uniquement les trajets dont l'origine et la destination se trouvent dans ce périmètre. Celui-ci comprend les communes des **établissements publics de coopération intercommunale (EPCI)** de Grenoble Alpes Métropole, du Grésivaudan et de la Communauté d'Agglomération Pays Voironnais, soit 120 communes d'Isère. Les premiers enregistrements du **RPC** dans ce périmètre sont datés de mai 2019. Jusqu'en septembre 2023 inclus, 94 645 trajets y ont été enregistrés. Pour illustration, la [Figure 8.3](#) est une carte des origines–destinations des trajets du **RPC** en Isère en octobre 2021.

8.1.3 Données pour les calculs d'itinéraire

Pour calculer des itinéraires en mode alternatif, j'utilise des données d'**OSM** pour le réseau routier (Contributeurs OpenStreetMap, 2021)^{VIII}. Pour les itinéraires en **TC**, j'utilise le **PAN**, une API publique^{IX} donnant accès à tous les horaires et tracés des **TC**^X en France (DINSIC, 2020). Je me sers notamment des données au format GTFS, que je donne en entrée à un planificateur d'itinéraire.

8.1.4 Logiciels pour le calcul d'itinéraires

Pour calculer les itinéraires en mode de transport alternatif, ainsi que pour les trajets en **VP**^{XI}, j'utilise un *planificateur d'itinéraire*. Parmi les planificateurs d'itinéraire en **VP** les plus connus, on trouve :

VIII. Je récupère les données **OSM** depuis les serveurs <https://www.geofabrik.de>.

IX. Le **PAN** est accessible à <https://transport.data.gouv.fr>.

X. Des horaires théoriques des lignes de covoiturage sont recensés par le **PAN**. Pour des raisons évidentes de cohérence, celles-ci ont été omises pour le calcul d'itinéraire en **TC**.

XI. Je n'utilise pas les valeurs présentes dans le **RPC** pour que les itinéraires soient cohérents avec ceux nouvellement calculés.

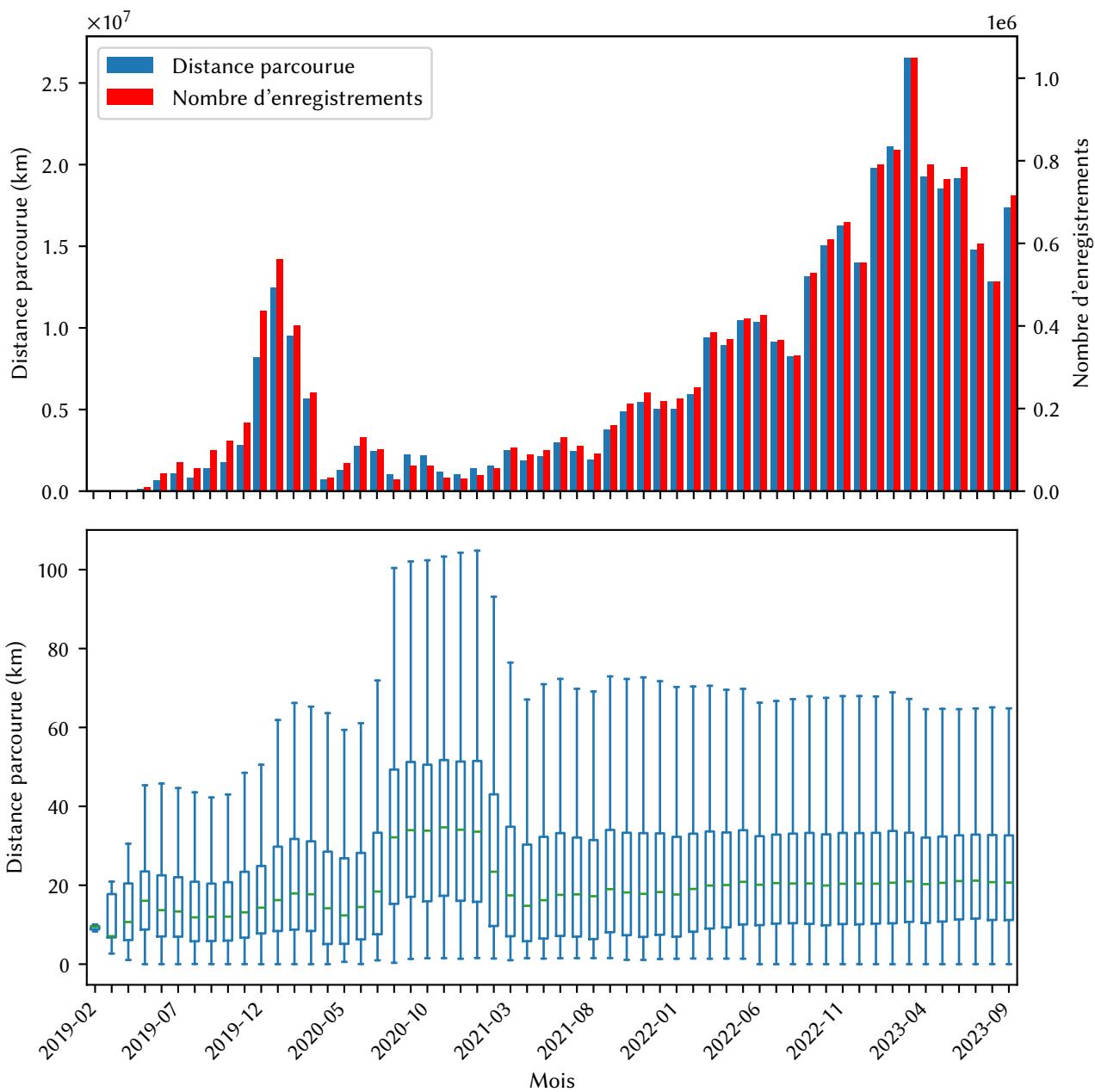


FIGURE 8.2 – Distance covoiturée totale et nombre d'enregistrements par mois (en haut); distances covoiturées pour chaque enregistrement du [RPC](#) (en bas)

Pour chaque mois, en bas : le trait vert est la médiane ; le haut et le bas de chaque boîte sont les premiers et troisièmes quartiles (Q1 et Q3) ; les longueurs des moustaches sont à $1,5 \times (Q3 - Q1)$ au-dessus de Q3 et en dessous de Q1. Pour des raisons de lisibilité, les valeurs extrêmes au-delà des moustaches sont omises.

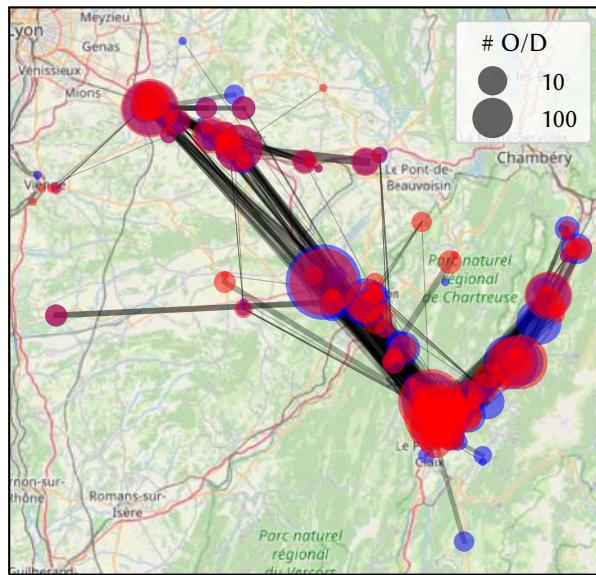


FIGURE 8.3 – Trajets du RPC en Isère en octobre 2021
La surface des cercles est proportionnelle au nombre de trajets partant de (bleu) et arrivant à (rouge) son centre.

- *Google Maps*, au code source fermé, sous forme d'API payante ;
- *Graphhopper, Open Source Routing Machine (OSRM)* et *Valhalla*, des logiciels libres axés sur la performance ;
- *OSMNx* et *Pandana*, des outils d'analyse, aussi sous licence libre, disponibles en tant que module Python.

Pour des raisons de praticité d'utilisation, de passage à l'échelle et de disponibilité sous une licence libre, j'utilise GraphHopper (2022). Un des avantages de *GraphHopper* est aussi sa fonctionnalité de calcul d'itinéraires en **TC** et sa compatibilité avec les données au format GTFS.

En revanche, un désavantage par rapport à *Google Maps* est que, contrairement à ce dernier, *GraphHopper* ne prend pas en compte par défaut le trafic en fonction des heures de pointe de la journée^{XII}. J'aborde brièvement cette limite dans la [Section 8.4](#).

Le code que j'ai produit pour traiter les données et générer les visualisations, écrit en Python 3, est disponible ici : <https://purl.archive.org/rasoldier.limits2022>.

XII. Il est possible de faire prendre en compte le trafic par *Graphhopper*, mais cela nécessite l'accès à des données confidentielles.

8.2 Étude du report modal vers le covoiturage régulier

Dans cette section, j'étudie sous deux angles différents la question : *le report modal vers le covoiturage régulier vient-il principalement de l'autosolisme ?*

La première évaluation s'appuie sur un modèle de choix basé sur la distance parcourue pour chaque trajet ([Section 8.2.1](#)). La seconde étude, que je restreins au périmètre du **SMMAG**, compare les durées des itinéraires en **VP** d'un côté, et en **TC** et en mode doux de l'autre ([Section 8.2.2](#)).

Avant d'être utilisateur·ice d'une plateforme de covoiturage, une voyageur·euse aurait pu être covoitureur·euse de manière informelle. Je n'ai pas tenu compte de ce report possible, mais on peut raisonnablement penser que cette formalisation d'un covoiturage informel concerne une minorité négligeable de trajets covoiturés aujourd'hui, car les plateformes de covoiturage mettent en relation des personnes qui ne se connaissent généralement pas. Dès lors, je fais l'hypothèse simplificatrice^{XIII} que les trajets en **VP** alternatifs aux trajets en covoiturage sont de l'autosolisme.

8.2.1 Évaluation basée sur un modèle de choix fonction de la distance parcourue

Ma méthode d'évaluation du report modal actuel induit par le covoiturage régulier est basée sur un modèle de choix modal simpliste qui ne prend en considération que la distance parcourue en **VP** pour un trajet : j'applique aux trajets covoiturés du **RPC** les parts modales calculées à l'échelle nationale sur l'ensemble des trajets pendulaires en fonction de leurs distances parcourues (cf. [Figure 8.1](#)).

La part modale ainsi obtenue sur les trajets du **RPC** (resp. sur l'ensemble des trajets pendulaires à l'échelle nationale) est présentée en [Figure 8.4](#) en bas (resp. en haut).

La [Figure 8.5](#) détaille cette répartition en montrant le nombre de trajets du **RPC** par mode et par distance parcourue. Les parts modales relatives sur l'ensemble des trajets pendulaires à l'échelle nationale sont présentées en [Figure 8.4](#) (en haut).

La [Figure 8.4](#) montre que si on applique ce modèle de choix, environ 80 % des trajets du **RPC** auraient été effectués en voiture, 16,3 % en **TC**, 1,7 % en deux-roues motorisés, 1,2 % en **MAP**, et 1,1 % à vélo, ce qui soutient l'hypothèse d'un report modal principalement depuis l'autosolisme. Ce sont des parts modales différentes et plus favorables à la voiture que celles calculées à l'échelle nationale pour les trajets pendulaires (cf. [Figure 8.4](#), en bas). Cette différence indique

XIII. Le cas où 2 personnes se connaissant transportent une troisième personne est aussi invisibilisé.

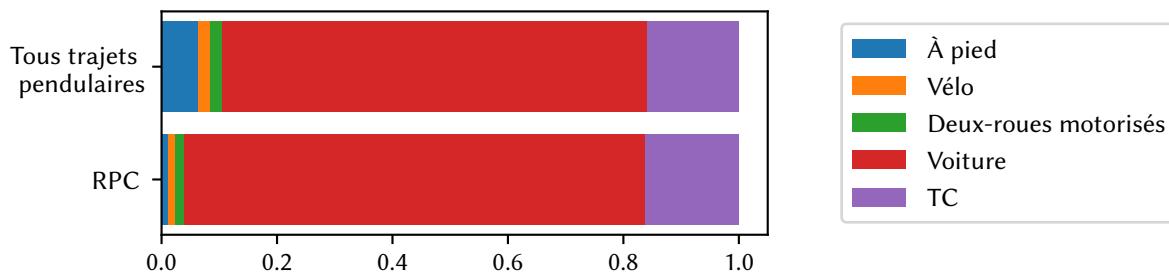


FIGURE 8.4 – Parts modales des trajets pendulaires (en haut, issues de Brutel & Pages, 2021) et parts modales résultant de l’application du modèle de choix simpliste (en bas)

que les trajets du [RPC](#) correspondent à des distances plus « favorables » à la voiture que les trajets pendulaires à l’échelle nationale, c’est-à-dire probablement plus grandes. La distribution des distances n’est malheureusement pas mise à disposition par Brutel et Pages (2021).

Quoiqu’il en soit, cette estimation du report modal dû aux plateformes de covoiturage doit être prise avec précaution. Premièrement, les parts modales issues de Brutel et Pages (2021) calibrant le modèle de choix représentent l’ensemble des trajets pendulaires en France, tandis que le [RPC](#) ne représente que les trajets covoiturés. La distance n’étant pas l’unique déterminant du choix modal, l’effet des autres spécificités des trajets du [RPC](#) par rapport aux trajets pendulaires nationaux n’a donc pas été prise en compte.

Deuxièmement, dans ces parts modales de l’INSEE, on ne sait pas quelle part des trajets en « voiture » est covoiturée (de manière informelle ou non).

8.2.2 Étude basée sur la comparaison des durées d’itinéraire entre [VP](#) et modes alternatifs

Après ces premiers résultats obtenus à partir de l’ensemble des données du [RPC](#), dans la suite, je me focalise sur le périmètre géographique du [SMMAG](#). Pour ce périmètre, je complète l’estimation précédente du report vers le covoiturage en considérant la durée des itinéraires, celle-ci étant un autre déterminant habituellement considéré comme important pour le choix modal (Kaufmann, 2002).

En comparant les durées des trajets sur les 94 645 enregistrements du [RPC](#) des trajets dans le périmètre du [SMMAG](#) entre mai 2019 et septembre 2023, on observe que seuls 9 ont un itinéraire de durée plus courte à vélo qu’en [VP](#) et aucun itinéraire en [TC](#) n’est de plus courte durée qu’en [VP](#).

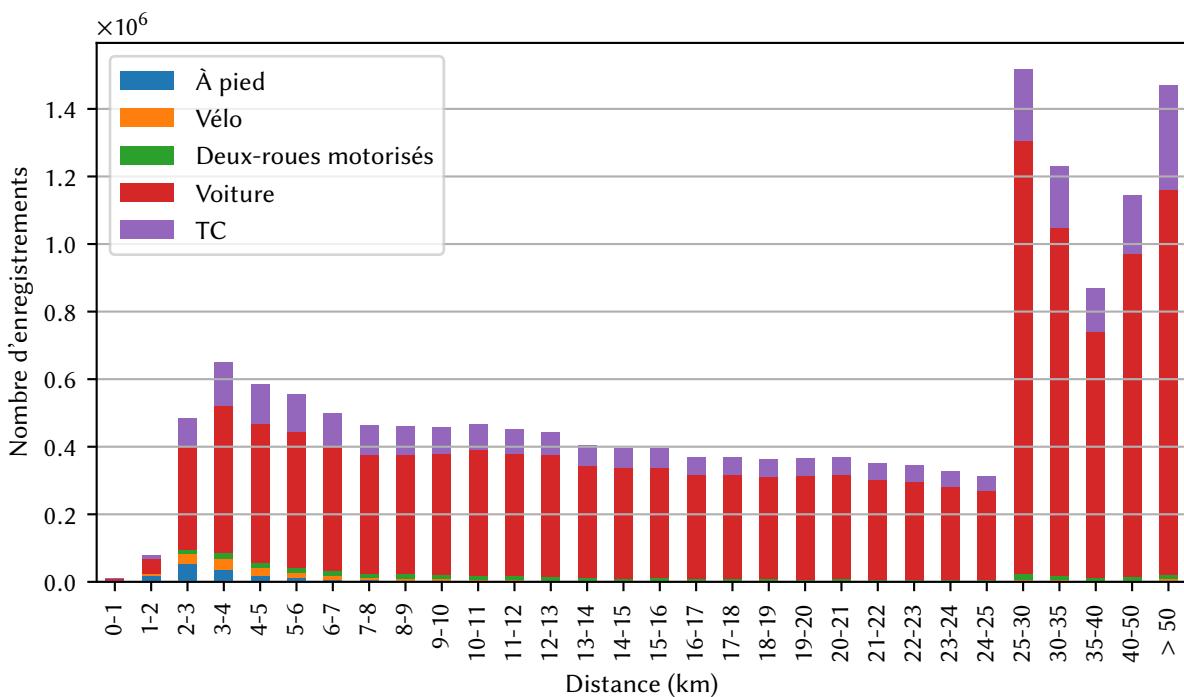


FIGURE 8.5 – Pondération des parts modales de l’INSEE (Figure 8.1) par rapport aux nombres d’enregistrements mensuels du RPC

Ce résultat est illustré sur la Figure 8.6, qui compare les durées d’itinéraire en TC, à vélo et en VP. Tout point bleu ou orange au-dessus de la ligne rouge représente un trajet (pour rappel, origine, destination et heure d’arrivée) qui est de plus longue durée en TC ou vélo (respectivement) qu’en VP : ici, le différentiel de durée des itinéraires est de loin à l’avantage du VP.

Je représente d’une autre manière ces différences entre les durées d’itinéraires dans la Figure 8.7 (à gauche). Plus de la moitié de la distance covoiturée correspond à des trajets qui prennent une heure de plus à vélo qu’en VP. Pour les alternatives en TC, la différence est plus faible, mais reste conséquente : plus de la moitié de la distance covoiturée correspond à des trajets qui prennent 30 min de plus en TC qu’en VP. Si au lieu de considérer une différence de durées exprimée en heures on s’intéresse maintenant à une pénalité temporelle relative à la durée du trajet covoituré, on observe sur la Figure 8.7 (à droite) que plus de la moitié de la distance covoiturée prend 3 fois plus de temps en TC qu’en VP et que plus de la moitié de la distance covoiturée prend plus de 5 fois plus de temps à vélo qu’en VP.

On s’attend donc à ce que cette différence de durée de trajet soit très en défaveur du TC et du vélo, d’autant plus que la perception du temps passé est différente en TC et en VP : le temps passé en TC

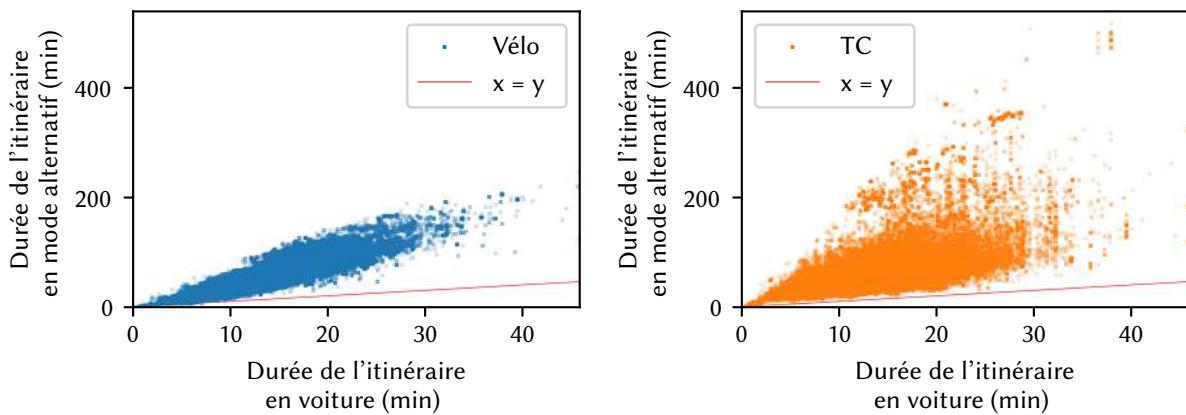


FIGURE 8.6 – Comparaison des durées à vélo (à gauche), en TC (à droite) et en VP pour les trajets RPC dans le périmètre du SMMAG

semble généralement plus long qu'en VP (Kaufmann, 2002). En conclusion, au vu de ces comparaisons sur les durées de trajet, un report modal venant essentiellement du VP (conducteur, passager ou covoiturage) vers le covoiturage est très probable.

8.3 Potentiel actuel des modes alternatifs pour les trajets covoiturés

Dans cette section, je m'intéresse à la question : *quelle part des trajets actuellement covoiturés pourrait être faite dans un mode alternatif?*

Il ne s'agit plus ici de comparer les durées des trajets en voiture, TC ou modes doux, mais de définir des seuils de durée d'itinéraires sous lesquels on considère qu'un trajet est « faisable » en TC ou à vélo, et de calculer la distance covoiturée qui pourrait alors être parcourue dans ces modes.

La Figure 8.8 permet d'évaluer différents seuils. Si, par exemple, j'estime qu'un trajet est faisable

- à vélo ou en marchant (*modes doux*), s'il existe un itinéraire à vélo dont la durée est inférieure à 30 minutes,
- en TC, s'il existe un itinéraire en TC dont la durée est inférieure à 1 heure,

alors la Figure 8.8 indique qu'environ 20 % de la distance covoiturée peut être parcourue en TC et qu'environ 3,4 % de la distance covoiturée peut être parcourue à vélo.

La Figure 8.9 représente, par mois, la faisabilité des trajets en mode doux et en TC pour différents seuils de faisabilité. S'agissant des modes doux, les seuils retenus sont 15, 25 et 30 min. Pour les TC, j'ai utilisé les seuils de 30, 45 et 60 min. On observe notamment une forte

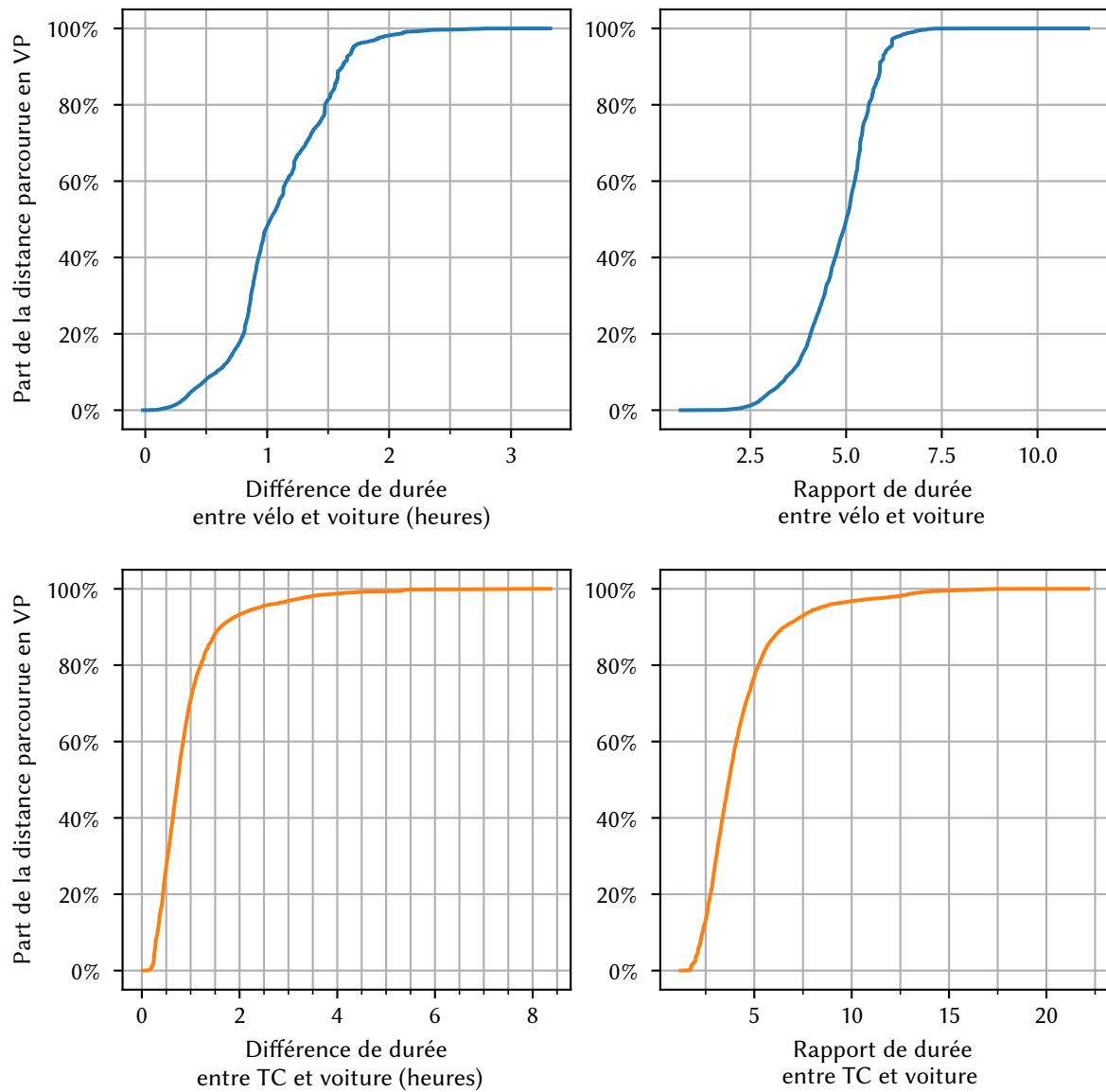


FIGURE 8.7 – Distributions cumulées des différences (à gauche) et rapports (à droite) entre les durées à vélo (en haut), en **TC** (en bas) et en **VP** pour les trajets **RPC** dans le périmètre du **SMMAG**

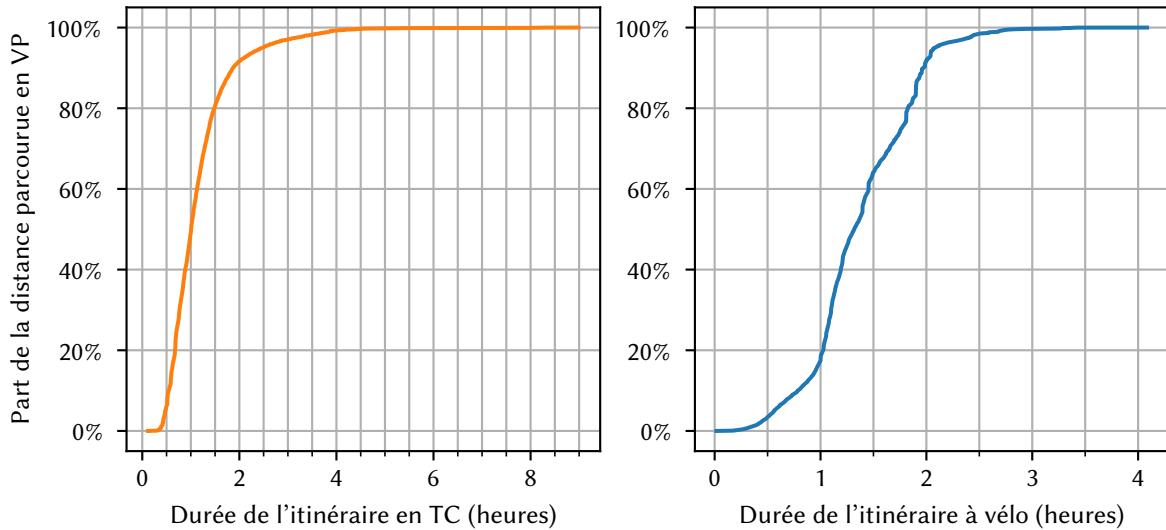


FIGURE 8.8 – Distributions cumulatives de la distance covoiturée en fonction de la durée d’itinéraire à vélo (à gauche) et en TC (à droite)

augmentation de la part faisable en **TC** entre mai et juin 2022, part qui se stabilise ensuite (1^{er} graphique). De même, la part de la distance covoiturée faisable à vélo passe de 2 % à plus de 5 % entre janvier et septembre 2023 (2^{ème} graphique). Ceci peut s’expliquer par une augmentation de l’utilisation des plateformes pour des trajets en moyenne de plus en plus courts (3^{ème} et 4^{ème} graphiques).

8.4 Conclusion

Je conclus du modèle de choix basé sur la distance parcourue et des durées d’itinéraires de chacun modes de transport considérés que le **VP** est vraisemblablement le mode qu’aurait utilisé une grande partie des covoitureur·euse·s. En ce qui concerne le potentiel actuel des alternatives, plus de la moitié de la distance covoiturée du **RPC** pourrait être faite en **TC** si tous les voyageur·euse·s s’autorisaient une heure de transport.

De plus, l’évolution des pratiques enregistrées par le **RPC** montre que de plus en plus de trajets peuvent être faits par des modes doux et en **TC**. Cette tendance est corroborée par la stratégie de certains opérateurs qui voient un potentiel de développement sur les flux de mobilité les plus denses alors qu’ils sont potentiellement déjà bien desservis par les infrastructures cyclables et de **TC**^{XIV}. À l’avenir, suivant le niveau de saturation de ces infrastructures, les plateformes

XIV. Discussion avec un expert.

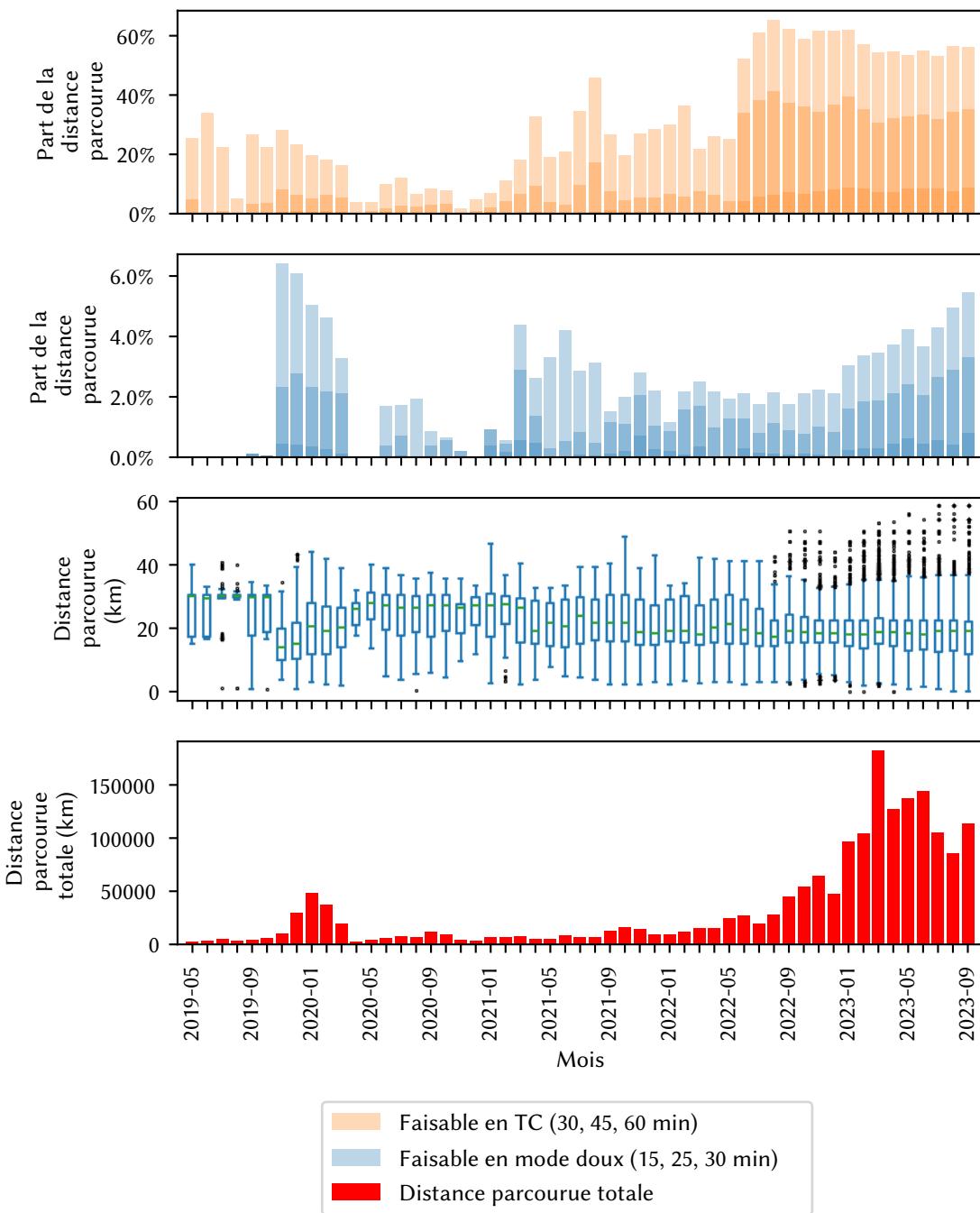


FIGURE 8.9 – Dans le périmètre du [SMMAG](#), évolutions en distances covoiturées

de la faisabilité des trajets en **TC** (1^e graphique) et de la faisabilité des trajets à vélo (2^e graphique); de la distribution des distances (3^e graphique) et de la distance totale covoiturée (4^e graphique)

Pour le troisième graphique, pour chaque mois : le trait vert est la médiane; le haut et le bas de chaque boîte sont les premiers et troisièmes quartiles (Q1 et Q3); les longueurs des moustaches sont à $1,5 \times (Q3 - Q1)$ au-dessus de Q3 et en dessous de Q1.

de covoitage permettront de compléter l'offre de transport préexistante, ou, au contraire, entreront en compétition avec celle-ci.

Une des limites à cette étude est la non prise en compte du trafic. En effet, il est possible que les embouteillages observés aux heures de pointe du matin et de l'après-midi rallongent la durée des itinéraires en **VP**, ce qui rendrait les **TC** et le vélo plus compétitifs par rapport au **VP**. En guise d'estimation préliminaire de l'incertitude liée à la non-prise en compte du trafic, j'ai calculé la variation de la durée des trajets sur un échantillon du **RPC** (Isère, octobre 2021) avec et sans prise en compte du trafic : la variation maximale entre les durées de trajet calculées par *GraphHopper* (sans trafic) et par *Google Maps* (avec trafic) est de +16 minutes. En moyenne, la variation de la durée d'un itinéraire avec et sans prise en compte du trafic est de 20 % de sa durée.

Une étude plus poussée du report modal induit par les plateformes de covoitage s'appuierait sur un modèle de choix prenant en compte d'autres caractéristiques que la durée du trajet, tels que les préférences des voyageur·euse·s, les coûts associés aux différents modes de transport... Ce modèle de choix pourrait s'appuyer sur une enquête auprès des usager·ère·s de ces plateformes. L'enquête pourrait également permettre d'estimer les effets rebond direct, c.-à-d., de quantifier les trajets supplémentaires induits par l'utilisation des plateformes.

MÉTHODE DE MODÉLISATION DU COVOITURAGE

Structure du chapitre

- 9.1 Présentation générale 127
 - 9.2 Formalisation de la demande en mobilité 128
 - 9.3 Filtrage de la demande en mobilité 130
 - 9.4 Construction du graphe d'appairabilité 130
 - 9.4.1 Covoiturage à l'identique 131
 - 9.4.2 Covoiturage partiel 132
 - 9.5 Appariement des trajets 134
 - 9.5.1 Algorithme d'appariement ne tenant pas compte des circuits 135
 - 9.5.2 Algorithme d'appariement tenant compte des circuits 136
 - 9.6 Erreurs potentiellement introduites par la méthode 138
 - 9.6.1 Appariement à heuristique gloutonne 138
 - 9.6.2 Non prise en compte des détours 139
 - 9.6.3 Non prise en compte des réorganisations possibles des emploi du temps pour le covoiturage 140
-

Pour rappel, je me pose la question de recherche suivante : *à quelles conditions les plateformes de covoiturage régulier peuvent-elles répondre aux objectifs formulés dans le PDU grenoblois ?*

D'après l'exploration des données du RPC ([Chapitre 8](#)), l'utilisation des plateformes de covoiturage régulier est une pratique qui reste très minoritaire et qui concerne principalement des trajets qui auraient été probablement autosolistes. Les émissions évitées grâce à ces plateformes pourraient s'accroître à condition que le covoiturage se développe et qu'il continue à se substituer à des modes de déplacement carbonés. C'est ce qui est promis par les opérateurs et ce qui est envisagé par les objectifs du [PDU](#) grenoblois.

Afin de répondre à ma problématique, je propose une évaluation de la distance potentiellement évitable grâce au covoiturage. Cette évaluation fournit des éléments de réflexion sur l'importance du covoiturage comme levier de décarbonation du secteur des transports de personnes.

Dans ce chapitre, je commence par faire une présentation générale de ma méthode d'évaluation du potentiel du covoiturage, que j'appelle [Méthode d'évaluation du potentiel du covoiturage à l'échelle locale \(MEPCEL\)](#) ([Section 9.1](#)). Ensuite, je pose des définitions permettant de caractériser la demande en mobilité ([Section 9.2](#)). Puis, je détaille chacune des trois grandes étapes de [MEPCEL](#), à savoir : le filtrage des trajets ([Section 9.3](#)), la

création d'un graphe d'appairabilité ([Section 9.4](#)), ainsi que l'appariement ([Section 9.5](#)). Enfin, j'explicite quelques approximations faites par cette méthode ([Section 9.6](#)).

9.1 Présentation générale

MEPCEL permet de calculer un ensemble d'équipages de covoiturage qui tend à maximiser la distance parcourue en **VP** passager (c.-à-d., en tant que passager·ère) et repose sur la combinaison et l'adaptation de plusieurs méthodes de la littérature. Elle peut prendre en compte les effets de certains freins au covoiturage régulier, à savoir :

- un faible taux de participation,
- les dispersions spatiales et temporelles des activités des voyageur·euse·s (travail, domicile, loisirs...),
- les disponibilités des **VP** des voyageur·euse·s (c.-à-d., l'impossibilité d'être conducteur·rice sans avoir son **VP** à disposition ou d'être passager·ère alors qu'on est censé conduire son **VP**),
- les emplois du temps des voyageur·euse·s (p. ex., le fait qu'un individu prévoit d'aller faire ses courses entre son lieu de travail et son domicile peut l'empêcher de covoiturer sur l'un ou plusieurs de ses trajets).

Cependant, **MEPCEL** ne prétend pas être une méthode complète pour évaluer les impacts évités potentiels du covoiturage. En effet, cette méthode ignore certains effets (dont certains sont par ailleurs évalués par Coulombel et al., [2019](#)) :

- les interactions entre les différents leviers envisagés pour réduire les émissions de **GES** du transport de personnes, comme le télétravail ou le report modal vers les modes doux et les **TC**,
- la possibilité que les individus réorganisent leur emploi du temps pour covoiturer.

Les interactions entre le covoiturage, les **TC** et les modes doux font l'objet d'une étude préliminaire dans le [Chapitre 11](#). Quant à la non prise en compte du dernier effet mentionné, que j'appelle hypothèse de travail à *demande constante*, elle est discutée en [Section 9.6.3](#). Je m'attends à ce qu'ignorer ces effets mène globalement à surestimer la distance parcourue en **VP** passager grâce au covoiturage.

MEPCEL nécessite en entrée une demande en mobilité désagrégée¹. Sa sortie principale est un ensemble d'*équipages* de

I. Cette notion est introduite dans la [Section 7.4.2](#).

covoiturage, où chaque équipage associe un trajet dit *conducteur* à un ou plusieurs trajets dits *passagers*. De ces équipages, on peut par exemple calculer la distance parcourue en VP passager ou repérer les zones géographiques où le covoiturage aurait le plus ou le moins de potentiel.

MEPCEL consiste en un enchaînement d'étapes de transformations de données qui comprend les trois grandes étapes suivantes, illustrées dans la [Figure 9.1](#) :

1. le *filtrage des trajets* sélectionne le sous-ensemble des trajets pouvant être covoiturés (en tant que passager·ère et/ou conducteur·rice) en fonction des attributs de la population, des ménages et des trajets ([Section 9.3](#));
2. la *construction du graphe d'appairabilité*, ce dernier représentant tous les couples potentiels de trajets passager-conducteur en tenant compte des contraintes de covoiturage qui définissent la compatibilité des trajets ([Section 9.4](#));
3. l'*appariement* forme les équipages de covoiturage à partir du graphe précédent : il produit des sous-ensembles disjoints de trajets tels que, dans chaque sous-ensemble, un trajet est *conducteur*, et les autres sont *passagers*, le but étant de maximiser la distance totale parcourue par les trajets passagers ([Section 9.5](#)).

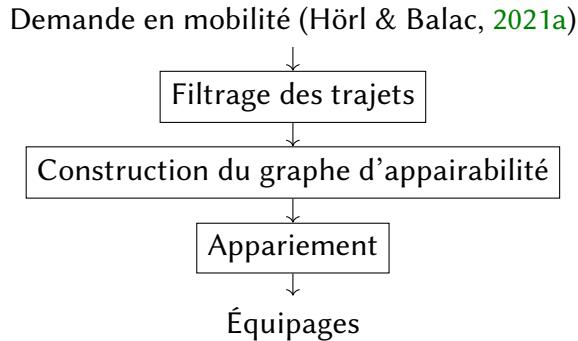


FIGURE 9.1 – Enchaînement des grandes étapes pour calculer le potentiel du covoiturage avec **MEPCEL**

9.2 Formalisation de la demande en mobilité

Une *demande en mobilité* est un ensemble de trajets d'une population. Ces notions de trajets et population sont formalisées respectivement en [Définitions 7 et 8](#). Je donne un exemple de trajet dans l'[Exemple 2](#).

DÉFINITION 7 : TRAJET

Un *trajet* τ est un tuple $\tau = (p, o, d, t^o, t^d, m, \text{motif}^o, \text{motif}^d)$ avec

- p l'identifiant de la personne voyageant (voyageur·euse),
- o la position de l'origine du trajet,
- d la position de sa destination,
- t^o l'heure de départ,
- t^d l'heure d'arrivée,
- m le mode de transport,
- motif^o le motif de l'activité à l'origine,
- motif^d le motif de l'activité à la destination.

Dans la suite, j'omets en général le mode de transport et les motifs pour simplifier la présentation. Après omission de ces deux éléments, le trajet devient : $\tau = (p, o, d, t^o, t^d)$

EXEMPLE 2 : TRAJET

Bob part de chez lui, la Résidence Maison des Étudiants à Grenoble, à 8 h 30, et arrive à son lieu de travail, l'IMAG à Saint-Martin-d'Hères à 9 h.

On a décrit un trajet $\tau = (\text{Bob}, \text{Résidence MDE}, \text{IMAG}, 8 \text{ h } 30, 9 \text{ h})$

DÉFINITION 8 : POPULATION

Une population \mathcal{P} est un ensemble de personnes avec leurs attributs sociodémographiques (p. ex., l'âge, l'activité professionnelle, le genre, la classe socioprofessionnelle, le fait d'avoir un permis de conduire, le fait d'avoir un abonnement de transport en commun).

Chaque personne de la population est associée à un ménage qui a lui-même ses propres attributs (p. ex., le nombre de véhicules disponibles, le revenu du ménage).

À partir des [Définitions 7](#) et [8](#), je formalise la demande en mobilité ([Définition 9](#)).

DÉFINITION 9 : DEMANDE EN MOBILITÉ

Une *demande en mobilité* est un ensemble de trajets \mathcal{T} de la population \mathcal{P} . Les trajets $\tau \in \mathcal{T}$ n'impliquent que des personnes $p \in \mathcal{P}$.

On note $\mathcal{T}(p) = \tau_1 \rightarrow \tau_2 \rightarrow \dots \rightarrow \tau_n$ la séquence des trajets d'une personne p lors d'une journée. Les trajets $\tau_i = (p, o_i, d_i, t_i^o, t_i^d)$ satisfont $d_i = o_{i+1}$ et $t_i^o \leq t_i^d \leq t_{i+1}^o \leq t_{i+1}^d$ pour tout $1 \leq i < n$.

En pratique, je fais générer cette demande par le logiciel de Hörl et Balac (2021a)^{II}. Les limites liées à l'utilisation de ce logiciel sont discutées dans le [Chapitre 10](#).

II. Ce logiciel libre peut fonctionner en utilisant exclusivement des données publiques. Ceci correspond avec ma volonté de faire de la science ouverte et reproductive et rend [MEPCEL](#) facilement exécutable sur n'importe quel autre périmètre géographique en France.

Je détaille chaque étape du calcul du potentiel du covoiturage dans les sous-sections suivantes.

Dans la suite, si une personne p_1 parcourant son trajet τ_1 est passager·ère d'un covoiturage avec une autre personne p_2 qui parcourt son trajet τ_2 , je dis simplement que τ_1 est passager de τ_2 et que τ_2 est conducteur de τ_1 .

9.3 Filtrage de la demande en mobilité

Cette étape définit les trajets pouvant être covoiturés à partir de la demande en mobilité. On peut y sélectionner des trajets en fonction de leur mode de transport, leur origine, leur destination, les motifs du trajet et les attributs des personnes. Par exemple, il est possible de restreindre les trajets covoitables aux trajets domicile-travail en filtrant les trajets dont le motif au départ ou celui à l'arrivée n'est pas le domicile ou le travail.

C'est aussi lors de cette étape qu'on peut sous-échantillonner les trajets pour restreindre l'analyse à un sous-ensemble de la population et/ou des trajets. Un tel sous-échantillonnage permet de modéliser une adoption partielle du covoiturage, c.-à-d., le fait qu'une fraction des trajets ne puisse pas être covoiturée pour diverses raisons. Ces raisons peuvent être encodées à partir des attributs des trajets ou des personnes ou par une loi aléatoire dépendante ou non de ces attributs.

Étant donné une demande en mobilité \mathcal{T} , le filtrage des trajets est mis en œuvre par les deux prédictats unaires Π et Δ sur \mathcal{T} tels que $\Pi(\tau)$ est vrai si τ est covoiturable en tant que passager et $\Delta(\tau)$ est vrai si τ est covoiturable en tant que conducteur.

9.4 Construction du graphe d'appairabilité

Deux trajets peuvent potentiellement s'appairer s'ils satisfont un ensemble de contraintes représentant la ou les modalités de rencontre et de séparation considérées. Étant donné une demande en mobilité \mathcal{T} , les contraintes de covoiturage sont implémentées par le prédictat binaire Γ sur $\mathcal{T} \times \mathcal{T}$ spécifiant si un trajet τ_{pa} peut être réalisé ou non en covoiturant en tant que passager d'un trajet τ_{co} . Lorsque $\Gamma(\tau_{pa}, \tau_{co})$ est vrai, on dit que τ_{pa} est un passager potentiel de τ_{co} et que τ_{co} est un conducteur potentiel pour τ_{pa} . Le graphe d'appairabilité est alors donné par le graphe dirigé $G = (V, E)$ tel que $V = \mathcal{T}$ et

$$E = \{(\tau_{pa}, \tau_{co}) \in \mathcal{T} \times \mathcal{T} : \Pi(\tau_{pa}) \wedge \Delta(\tau_{co}) \wedge \Gamma(\tau_{pa}, \tau_{co})\}$$

Un exemple de graphe d'appairabilité est donné dans la [Figure 9.2](#).

Dans la suite, je définis des contraintes pour les deux modalités de rencontre et de séparation que j'ai définies dans le [Chapitre 7](#)

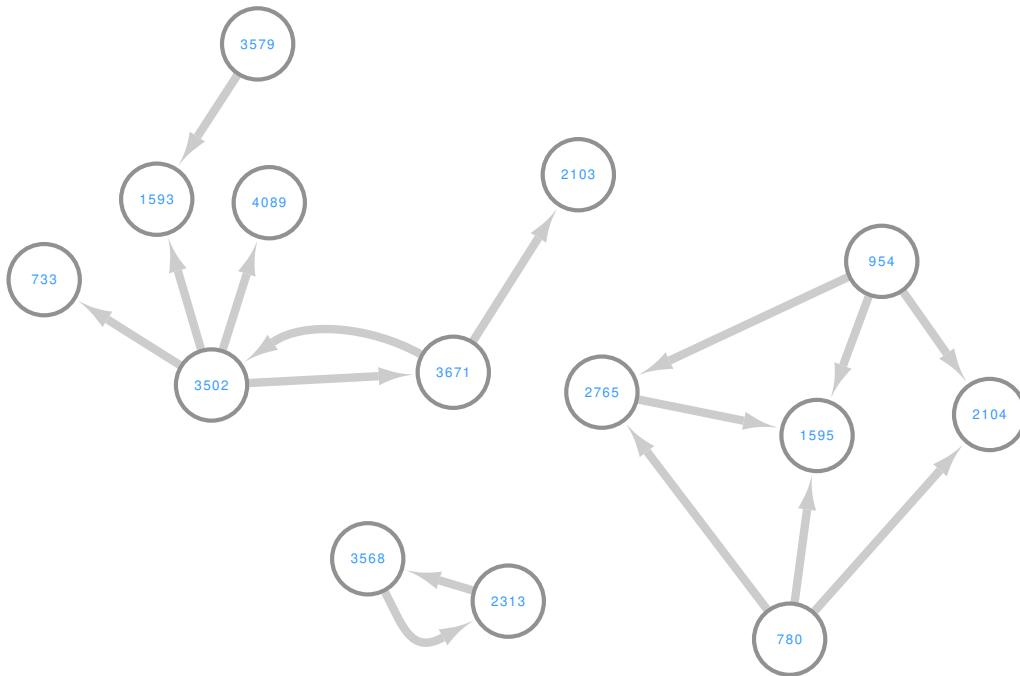


FIGURE 9.2 – Graphe d'appairabilité

Chaque nœud représente un trajet. Le nombre sur chaque nœud est l'identifiant du trajet. Ce sous-graphe a été extrait d'un graphe d'appairabilité généré par mon implémentation de MEPCEL.

(Définitions 5 et 6) et que j'ai implémentées dans le cadre de mon travail :

1. le covoiturage à l'identique (Section 9.4.1) et
2. le covoiturage partiel (Section 9.4.2).

Toutefois, MEPCEL n'est pas limitée à ces modalités : il serait possible d'évaluer le potentiel d'autres modalités à condition de les formaliser et de les implémenter.

9.4.1 Covoiturage à l'identique

Dans le cas du covoiturage à l'identique (Figure 9.3), les trajets sont compatibles si leurs origines, leurs destinations et leurs heures de départ (ou d'arrivée, selon les motifs du trajet) sont suffisamment proches.

Afin de le formaliser, je pose deux trajets τ_{pa} et τ_{co} définis comme il suit :

$$\tau_{pa} = (p_{pa}, o_{pa}, d_{pa}, t_{pa}^o, t_{pa}^d) \quad \text{et} \quad \tau_{co} = (p_{co}, o_{co}, d_{co}, t_{co}^o, t_{co}^d)$$

Le prédicat $\Gamma_{id}(\tau_{pa}, \tau_{co})$ représente les contraintes pour le covoiturage à l'identique. Il est donné par la conjonction des

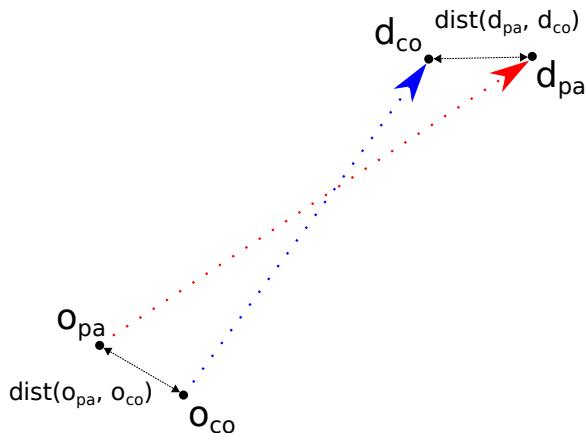


FIGURE 9.3 – Illustration des contraintes spatiales pour le covoiturage à l'identique

$dist(o_{pa}, o_{co})$ et $dist(d_{pa}, d_{co})$ doivent être inférieurs à δ^{dist} .

L'itinéraire exact de chaque trajet n'importe pas ici, car les contraintes spatiales portent uniquement sur o_{pa} , o_{co} , d_{pa} et d_{co} .

conditions ci-dessous, qui dépendent de paramètres de flexibilité spatiale δ^{dist} et de flexibilité temporelle δ_{min}^t et δ_{max}^t .

- $p_{pa} \neq p_{co}$
les personnes des deux trajets sont différentes (on ne peut pas covoiturer avec soi-même),
- $dist(o_{pa}, o_{co}) \leq \delta^{dist}$
la distance entre les origines des deux trajets est inférieure à la flexibilité spatiale,
- $dist(d_{pa}, d_{co}) \leq \delta^{dist}$
la distance entre les destinations des deux trajets est inférieure à la flexibilité spatiale,
- $t_{pa}^o - t_{co}^o \in [\delta_{min}^t, \delta_{max}^t]$ ou $t_{pa}^d - t_{co}^d \in [\delta_{min}^t, \delta_{max}^t]$
la différence entre les heures de départ (ou d'arrivée, en fonction des motifs du trajet^{III}) est dans les limites de la flexibilité temporelle.

9.4.2 Covoiturage partiel

Dans le cas du covoiturage partiel (Figure 9.4), les origines et les destinations des passagers potentiels doivent être suffisamment proches de l'itinéraire du conducteur. De même, les heures de départ

III. Par exemple, je considère que la contrainte porte sur l'heure d'arrivée plutôt que sur l'heure de départ lorsqu'il s'agit de se rendre au travail.

et d'arrivée du passager potentiel doivent être suffisamment proches des heures auxquelles le conducteur potentiel pourrait prendre et déposer le passager.

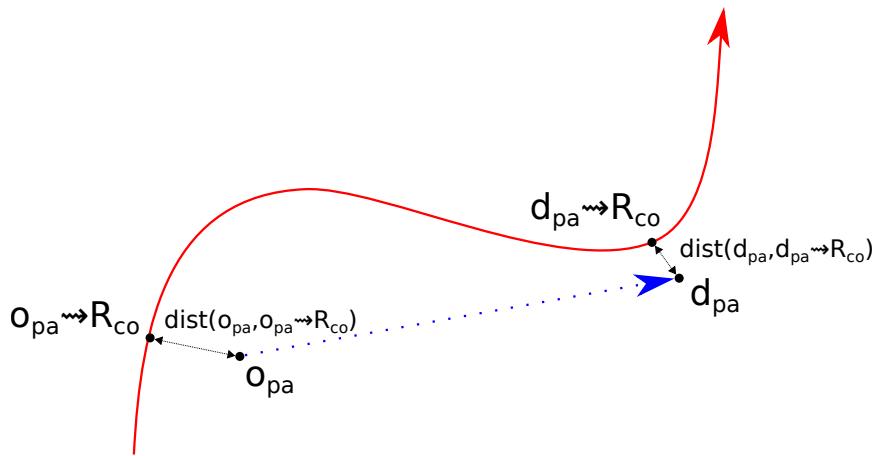


FIGURE 9.4 – Illustration des contraintes spatiales pour le covoiturage partiel

$\text{dist}(o_{\text{pa}}, o_{\text{pa}} \rightsquigarrow R_{\text{co}})$ et $\text{dist}(d_{\text{pa}}, d_{\text{pa}} \rightsquigarrow R_{\text{co}})$ doivent être inférieurs à δ^{dist} .

Contrairement au covoiturage identique, pour le trajet co, il faut connaître l'itinéraire exact R_{co} .

De manière à formaliser ces contraintes, je pose les trajets $\tau_{\text{pa}} = (p_{\text{pa}}, o_{\text{pa}}, d_{\text{pa}}, t_{\text{pa}}^o, t_{\text{pa}}^d)$ et τ_{co} . De plus, je pose R_{co} l'itinéraire de τ_{co} , c.-à-d. l'ensemble de positions horodatées reflétant le chemin choisi et la dynamique de τ_{co} .

Je désigne par

$o \rightsquigarrow R_{\text{co}}$ (resp. $d \rightsquigarrow R_{\text{co}}$) le point le plus proche de o (resp. d) dans R_{co}

$t^{o \rightsquigarrow R_{\text{co}}}$ (resp. $t^{d \rightsquigarrow R_{\text{co}}}$) le moment où l'itinéraire R_{co} atteint le point $o \rightsquigarrow R_{\text{co}}$ (resp. $d \rightsquigarrow R_{\text{co}}$).

Le prédicat $\Gamma_{\text{inc}}(\tau_{\text{pa}}, \tau_{\text{co}})$ correspondant aux contraintes de covoiturage partiel est donné par la conjonction des conditions suivantes :

- $p_{\text{pa}} \neq p_{\text{co}}$
les personnes des deux trajets sont différentes (on ne peut pas covoiturer avec soi-même),
- $\text{dist}(o_{\text{pa}}, o_{\text{pa}} \rightsquigarrow R_{\text{co}}) \leq \delta^{\text{dist}}$
la distance entre l'origine du passager et le chemin du conducteur est inférieure à la flexibilité spatiale,
- $\text{dist}(d_{\text{pa}}, d_{\text{pa}} \rightsquigarrow R_{\text{co}}) \leq \delta^{\text{dist}}$

la distance entre la destination du passager et le chemin du conducteur est inférieure à la flexibilité spatiale,

- $t_{pa}^o - t_{pa}^{o \rightarrow R_{co}} \in [\delta_{\min}^t, \delta_{\max}^t]$ ou
 $t_{pa}^d - t_{pa}^{d \rightarrow R_{co}} \in [\delta_{\min}^t, \delta_{\max}^t]$

la différence entre l'heure de départ (ou d'arrivée, en fonction des motifs du trajet) du passager et l'heure de passage le plus proche du conducteur est dans les limites de la flexibilité temporelle.

Dans le cas *partiel* ou *à l'identique* ([Section 9.4.1](#)), je définis des contraintes de proximité sous forme de seuil sur les caractéristiques spatiotemporelles des couples des trajets sous lesquelles le covoiturage est possible. Les valeurs des paramètres choisies pour mon évaluation sont décrites dans le [Chapitre 11](#).

Ces conditions ne sont pas propres à **MEPCEL** : on pourrait aussi remplacer les conditions booléennes par des lois de probabilité.

9.5 Appariement des trajets

L'appariement est l'étape de **MEPCEL** où sont sélectionnés les équipages à partir du graphe d'appairabilité. Le résultat d'un algorithme d'appariement qui a pour entrée le graphe d'appairabilité G est un ensemble d'appariements H comprenant les couples (τ_{pa}, τ_{co}) qui satisfont les conditions suivantes :

- les trajets ont au plus un successeur (un trajet ne peut pas être le passager de deux conducteurs différents)
 $(\forall (\tau_{pa}, \tau_{co}) \in H, d^+(\tau_{pa}) = 1)$,
- les trajets avec un successeur n'ont pas de prédécesseur (les trajets ne peuvent pas être à la fois passager et conducteur)
 $(\forall (\tau_{pa}, \tau_{co}) \in H, d^+(\tau_{co}) = 0)$.

Notons que (V, H) est un sous-graphe de G dont les composantes faiblement connectées correspondent aux équipages de covoiturage. Un exemple de sélection d'arêtes sur le graphe est montré en [Figure 9.5](#).

De nombreuses méthodes d'appariement existent dans l'état de l'art (voir [Section 7.5](#)). Pour des raisons de performances, j'ai choisi d'implémenter des algorithmes gloutons. Le premier est l'implémentation de la proposition de Hartman et al. (2014) ([Section 9.5.1](#)). Le second a la particularité de pouvoir prendre en compte l'emploi du temps des personnes à travers des localisations des véhicules dues aux chaînes d'activités ([Section 9.5.2](#)).

Dans les [Algorithmes 9.1](#) et [9.2](#), j'utilise les notations suivantes :

- $\tilde{co}(\tau)$ est l'ensemble des conducteurs potentiels pour τ , c.-à-d. les successeurs de τ dans le graphe d'appairabilité $G = (V, E)$

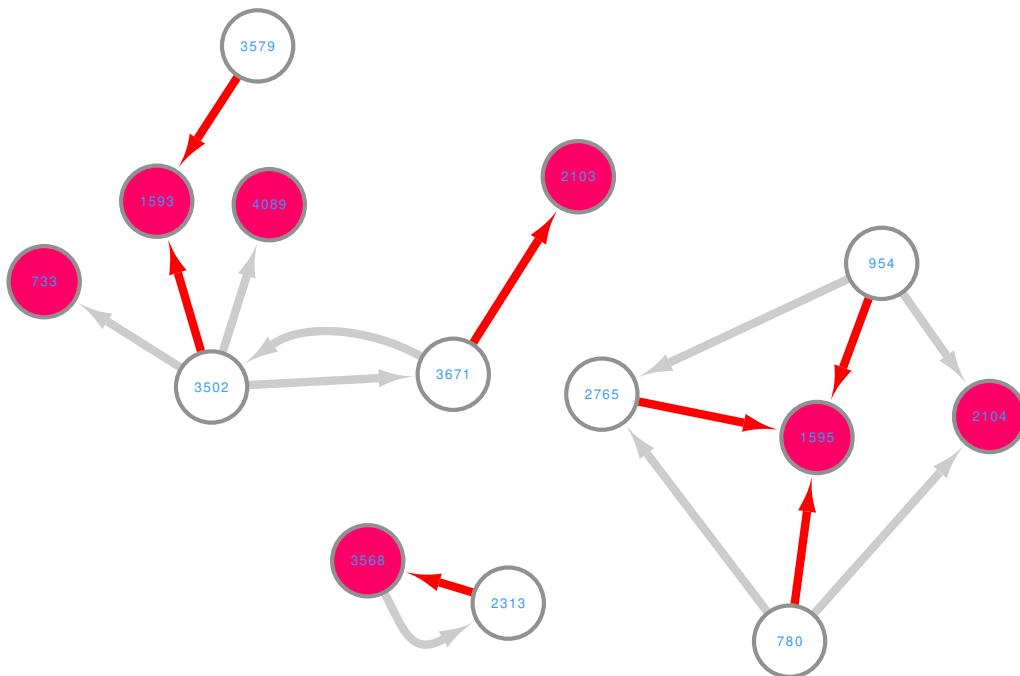


FIGURE 9.5 – Graphe d'appairabilité appairé

Les nœuds rouges représentent les trajets conducteurs. Les autres représentent les trajets passagers. Les arêtes rouges sont les relations entre passager et conducteur dans H.

- $\#co(\tau)$ est le nombre de conducteurs pour le passager τ , c.-à-d. le degré sortant de τ dans le graphe (V, H)
- $\#pa(\tau)$ est le nombre de passagers du conducteur τ , c.-à-d. le degré de τ dans le graphe (V, H) .

Je présente dans un premier temps l'algorithme d'appariement de Hartman et al. (2014) ([Section 9.5.1](#)). Puis, je détaille le problème de la prise en compte de l'emploi du temps des individus et présente la variante de l'algorithme d'appariement précédent les prenant en compte ([Section 9.5.2](#)).

9.5.1 Algorithme d'appariement ne tenant pas compte des circuits

L'algorithme d'appariement proposé par Hartman et al. (2014) ([Algorithme 9.1](#)) forme des équipages de covoiturage en maximisant le poids de l'ensemble des appariements, ce poids étant ici la distance parcourue par les passagers. L'idée principale de cet algorithme est de traiter d'abord les arcs entre trajets possiblement appairables qui sont les plus longs. Pour chaque trajet, l'algorithme appaire en

ALGORITHME 9.1 – Algorithme glouton basique de Hartman et al. (2014)

ENTRÉE un graphe d'appairabilité $G = (V, E)$
les capacités des véhicules $c : V \rightarrow \mathbb{N}$

SORTIE l'ensemble des couples passager-conducteur H

```

1:  $H \leftarrow \emptyset$ 
2: POUR TOUT  $\tau_{pa} \in V$  par ordre inverse de distance parcourue FAIRE
3:   SI  $\#pa(\tau_{pa}) = 0$  ALORS
4:      $\triangleright \tau_{pa}$  n'est pas déjà un conducteur
5:     CHOISIR  $\tau_{co} \in \tilde{co}(\tau_{pa})$  tel que  $\#pa(\tau_{co}) + 1 < c(\tau_{co})$  ET
         $\#co(\tau_{co}) = 0$  selon l'ordre décroissant des
        priorités  $\pi(\tau_{co})$ ,  $\forall \tau_{co} \in \tilde{co}(\tau_{pa})$ 
6:     SI un tel  $\tau_{co}$  existe ALORS
7:        $H \leftarrow H \cup \{(\tau_{pa}, \tau_{co})\}$ 
8:        $E \leftarrow E \cap (V \times V \setminus \{\tau_{pa}\})$ 
9: RETOURNE  $H$ 
```

priorité les conducteurs qui ont déjà des passagers, en tenant compte de l'ordre de priorité défini comme il suit :

$$\begin{aligned} \mathcal{T} &\longrightarrow \mathbb{N} \\ \pi : \tau_{co} &\longmapsto \min(\#pa(\tau_{co}), 1) \end{aligned}$$

9.5.2 Algorithme d'appariement tenant compte des circuits

Dans un premier temps, je définis la notion de circuit. Ensuite, je présente l'algorithme de Hartman et al. (2014) modifié.

Considérons la séquence de trajets suivante, issue de la demande en mobilité d'un individu pour une journée :

$$\tau_1 \rightarrow \tau_2 \rightarrow \dots \tau_n \quad \text{où} \quad \forall i \in [\![1, n]\!], \tau_i = (p, o_i, d_i, t_i^o, t_i^d)$$

Si τ_1 est réalisé en tant que passager d'un covoiturage, alors τ_2 ne peut pas être réalisé en tant que conducteur, car le véhicule de la personne concernée n'est pas disponible à o_2 (elle est restée à o_1). Cela signifie que si τ_1 est passager, alors τ_2 doit l'être également ou être réalisé dans un autre mode de transport. De retour à o_1 , plus loin dans la séquence des trajets, la personne peut éventuellement de nouveau prendre son propre véhicule. Je modélise ces restrictions sur la disponibilité des véhicules à partir des sous-séquences de trajets qui commencent et se terminent au même endroit, qu'on appelle *circuits*, définis formellement en [Définition 10](#). Un exemple d'utilisation de cette définition est donné en [Exemple 3](#).

DÉFINITION 10 : CIRCUIT

Une sous-séquence de trajets $\tau_i \rightarrow \dots \rightarrow \tau_j$ d'une personne p est un *circuit* si $o_i = d_j$, où $\tau_i = (p, o_i, d_i, t_i^o, t_i^d)$ et $\tau_j = (p, o_j, d_j, t_j^o, t_j^d)$. Le circuit est dit *minimal* si, en outre, pour tout $i \leq k < j$, on a $o_i \neq d_k$, où $\tau_k = (p, o_k, d_k, t_k^o, t_k^d)$. La distance parcourue sur un circuit est la somme des distances de ses trajets.

Appairer en tenant compte des circuits, c'est autoriser qu'un trajet soit covoituré en tant que passager si et seulement s'il appartient à un circuit dont tous les trajets sont covoiturés en tant que passager ou réalisés dans un autre mode de transport.

EXEMPLE 3 : CIRCUIT

Voici les activités journalières de Bob : Bob commence sa journée en étant chez lui. Il se rend à son travail le matin. À la fin de l'après-midi, il fait ses courses avant de rentrer chez lui. Le soir, il va à la piscine puis rentre chez lui se coucher.

La séquence de trajets de Bob, en ne conservant que les origines et les destinations des trajets, est la suivante :

$$(H, W) \rightarrow (W, S) \rightarrow (S, H) \rightarrow (H, L) \rightarrow (L, H)$$

avec H le lieu de résidence de Bob, W son lieu de travail, S le lieu où Bob fait ses courses, et L l'emplacement de la piscine. Les circuits minimaux pour cette séquence sont $(H, W) \rightarrow (W, S) \rightarrow (S, H)$ et $(H, L) \rightarrow (L, H)$ ^a.

a. On note que dans ce cas précis, les circuits minimaux forment une partition de la séquence de trajets alors qu'en général, les circuits minimaux peuvent se chevaucher et/ou ne pas couvrir entièrement la séquence de trajets.

J'ai modifié l'algorithme d'appariement de la [Section 9.5.1](#) pour tenir compte des circuits. Ainsi, plutôt que d'itérer sur les trajets, mon algorithme itère sur les circuits, dans l'ordre inverse de distance parcourue. Pour chaque circuit, l'algorithme essaie d'appairer chacun de ses trajets afin de constituer un ensemble temporaire d'arcs passager-conducteur. Les arcs temporaires sont ajoutés au graphe de sortie si l'ensemble des trajets du circuit sont passagers.

De même que dans l'algorithme de base, mon algorithme donne la priorité aux conducteurs potentiels qui ont déjà des passagers.

Ensuite, parmi les conducteurs qui n'ont pas de passagers, il donne la priorité à ceux qui n'appartiennent pas à un circuit. L'ordre de priorité devient :

$$\pi_T(\tau_{co}) = \begin{cases} 2 & \text{si } \#pa(\tau_{co}) > 0, \\ 1 & \text{si } \#pa(\tau_{co}) = 0 \wedge \tau_{co} \text{ n'est pas dans un circuit,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (9.1)$$

ALGORITHME 9.2 – Algorithme glouton en tenant compte des circuits

ENTRÉE un graphe d'appairabilité $G = (V, E)$
les capacités des véhicules $c : V \rightarrow \mathbb{N}$
l'ensemble des circuits minimaux \mathbb{T}

SORTIE l'ensemble des couples passager-conducteur H

```

1:  $H \leftarrow \emptyset$ 
2: POUR TOUT  $C \in \mathbb{T}$  par ordre inverse de distance parcourue FAIRE
3:    $H_{\text{temp}} \leftarrow \emptyset$ 
4:   POUR TOUT  $\tau_{\text{pa}} \in C$  FAIRE
5:     SI  $\#\text{pa}(\tau_{\text{pa}}) = 0$  ET  $\#\text{co}(\tau_{\text{pa}}) = 0$  ALORS
6:       ▷  $\tau_{\text{pa}}$  n'est pas déjà dans un équipage de covoiturage ◁
7:       CHOISIR  $\tau_{\text{co}} \in \tilde{\text{co}}(\tau_{\text{pa}})$  tel que  $\#\text{pa}(\tau_{\text{co}}) + 1 < c(\tau_{\text{co}})$  ET
         $\#\text{co}(\tau_{\text{co}}) = 0$  dans l'ordre décroissant des
        priorités  $\pi_{\mathbb{T}}(\tau_{\text{co}})$ ,  $\forall \tau_{\text{co}} \in \tilde{\text{co}}(\tau_{\text{pa}})$ 
8:       SI un tel  $\tau_{\text{co}}$  existe ALORS
9:         ▷ appairer temporairement  $\tau_{\text{pa}}$  comme un passager
           de  $\tau_{\text{co}}$  ◁
10:       $H_{\text{temp}} \leftarrow H_{\text{temp}} \cup \{(\tau_{\text{pa}}, \tau_{\text{co}})\}$ 
11:      SI  $\forall \tau_{\text{pa}} \in C, \exists \tau_{\text{co}} : (\tau_{\text{pa}}, \tau_{\text{co}}) \in H_{\text{temp}}$  ALORS
12:        ▷ tous les trajets du circuit sont appairés ◁
13:         $H \leftarrow H \cup H_{\text{temp}}$ 
14:         $E \leftarrow E \cap (V \times V \setminus C)$ 
15: RETOURNE  $H$ 
```

L'algorithme ne conserve les couples temporaires dans le résultat final que si *tous* les trajets du circuit sont appairés.

9.6 Erreurs potentiellement introduites par la méthode

MEPCEL repose sur des simplifications dans la modélisation du covoiturage, à la fois pour des raisons d'optimisation du temps de calcul et pour la cohérence avec la question de recherche. Ces simplifications peuvent potentiellement introduire des erreurs dans le résultat de l'application de la méthode. Dans la suite, je décris les limites liées à un l'utilisation d'un appariement à heuristique gloutonne ([Section 9.6.1](#)), la non prise en compte des détours possibles par le conducteur·rice ([Section 9.6.2](#)) et la non prise en compte de la réorganisation possible des emplois du temps pour le covoiturage ([Section 9.6.3](#)).

9.6.1 Appariement à heuristique gloutonne

Hartman et al. ([2014](#)) ont évalué la qualité de l'heuristique proposée par l'[Algorithme 9.1](#) pour une instance spécifique du

problème dont la solution optimale est calculable dans un temps polynomial. Cette instance est équivalente à celle où il ne peut y avoir qu'un passager par conducteur, et où les rôles ne sont pas fixés, autrement dit un problème d'appariement où :

- la capacité fixée à 1 ($\forall \tau, c(\tau) = 1$),
- on ne considère que le covoiturage à l'identique.

La solution optimale de cette instance est celle du *couplage pondéré maximum*, soit, l'ensemble d'arêtes disjointes dont la somme des poids est maximum (dans **MEPCEL**, le poids est la distance de l'itinéraire d'un trajet). L'évaluation consiste en la comparaison des résultats de l'algorithme avec la solution optimale. On définit ensuite la qualité q d'une solution :

$$q = \frac{\text{résultat de l'algorithme glouton}}{\text{solution optimale}}$$

J'ai réévalué l'algorithme de la même manière que Hartman et al. (2014) pour des graphes d'appairabilité construits à partir de demandes en mobilité synthétiques dans un périmètre autour de Grenoble, pour différentes instances de demande en mobilité. Ensuite, j'ai comparé le résultat avec l'algorithme exact de couplage pondéré maximum implémenté dans *SciPy* (Galil, 1986). La métrique utilisée pour évaluer la qualité est la distance parcourue en tant que passager·ère. Les résultats sont similaires à ceux de Hartman et al. (2014), c.-à-d. une qualité diminuant puis se stabilisant autour de 95 % avec l'augmentation du nombre de nœuds.

Cependant, ces résultats ne reflètent ni la qualité de l'[Algorithme 9.2](#) (avec prise en compte des circuits), ni celle de l'[Algorithme 9.1](#) dans le cas du covoiturage partiel ou avec une capacité strictement supérieure à 1. La qualité de ces implémentations n'a donc pas été évaluée, ce qui constitue une limite à mon étude.

9.6.2 Non prise en compte des détours

Le fait de considérer le même itinéraire que le trajet soit covoituré ou non implique que les détours éventuels pour récupérer ou déposer un passager ne sont pas pris en compte par la modélisation. Dans mon cas, la non prise en compte des détours va plutôt dans le sens de la minimisation de la distance parcourue par les conducteur·rice·s. Cela signifie, dans le cas où on ne prend que la mobilité autosoliste en entrée de **MEPCEL**, la surestimation de la distance parcourue évitée. Cela ne pose donc pas de problème lorsqu'il s'agit de produire une évaluation optimiste du potentiel du covoiturage.

9.6.3 *Non prise en compte des réorganisations possibles des emplois du temps pour le covoiturage*

Considérer une demande constante ne permet pas de prendre en compte certains effets de 3^{ème} ordre induits par le covoiturage tels que les effets de distance et de report modal étudiés par Coulombel et al. (2019). Je détaille ci-dessous un autre aspect qui est ignoré par [MEPCEL](#), à savoir les réorganisations possibles des emplois du temps pour le covoiturage.

On peut imaginer que certains voyageur·euse·s motivés par le covoiturage adaptent leur emploi du temps pour faciliter la formation des équipages. Les paramètres spatiotemporels des contraintes de covoiturage proposées dans ce chapitre permettent de représenter une certaine flexibilité dans les emplois du temps, mais uniquement par rapport aux heures de départ et d'arrivée, les activités des voyageurs n'étant pas remises en cause.

Naturellement, une réorganisation des emplois du temps en faveur du covoiturage augmenterait le potentiel du covoiturage. C'est une limite importante et dont l'évaluation, qui pourrait par exemple se faire grâce à un [SMA](#), n'a pas fait l'objet de cette thèse.

VÉRIFICATION DE LA SYNTHÈSE DE DEMANDE EN MOBILITÉ

Structure du chapitre

10.1	Synthèse de la demande en mobilité	142
10.1.1	Données d'entrée	143
10.1.2	Étape 1 : synthèse de la population	145
10.1.3	Étape 2 : affectation des chaînes d'activités	146
10.1.4	Étape 3 : localisation des activités	148
10.1.5	Itinéraires des trajets	152
10.2	Propriétés attendues de la demande pour l'évaluation de la distance évitée grâce au covoiturage	152
10.3	Biais de la demande en mobilité	154
10.3.1	Corrélations entre les chaînes d'activités et les caractéristiques socioéconomiques	155
10.3.2	Distribution spatiale des logements et des activités primaires	155
10.3.3	Utilisation des itinéraires les plus courts	156
10.4	Conclusion	157

Dans le [Chapitre 9](#), j'ai présenté la méthode de calcul du potentiel du covoiturage, [MEPCEL](#), que j'utilise pour évaluer le potentiel du covoiturage régulier. Cette méthode prend en entrée une demande en mobilité désagrégée.

Je fais générer cette dernière par le logiciel de synthèse de Hörl et Balac ([2021a](#), [2021b](#)). Son principal avantage est qu'il peut fonctionner avec des données exclusivement (1) ouvertes, ce qui permet la reproductibilité de mes expérimentations, et, (2) à caractère officiel, c.-à-d. publiées par des instances de l'État (INSEE, IGN, Ministères...), donc reconnues comme fiables.

L'objectif principal d'un tel logiciel est de générer une *demande en mobilité synthétique* qui soit la plus fidèle possible à l'ensemble des données de départ. À cette fin, certaines validations de caractéristiques statistiques sont déjà faites par Hörl et Balac ([2021a](#)) et les corrélations prises en compte par leur logiciel y sont explicitées. En particulier, les auteurs comparent la demande synthétique et les données d'entrée pour les caractéristiques suivantes :

- les fréquences des chaînes d'activités,
- les flux de trajets pendulaires entre départements,
- la densité cumulée des distances des trajets pendulaires, et,
- la densité cumulée des distances des trajets par mode de transport.

En pratique, la synthèse a été utilisée par les auteurs, entre autres, pour la quantification de l'impact environnemental du transport pour le dernier kilomètre des livraisons à l'échelle de la métropole de Lyon (Hörl & Puchinger, 2023).

Cependant, les validations déjà entreprises pourraient ne pas être suffisantes dans le cas où la demande synthétique est utilisée pour l'analyse du potentiel du covoiturage. Ce chapitre est l'occasion de mener une discussion à propos de certains aspects de la validation de la synthèse qui n'ont pas été déjà abordés par Hörl et Balac (2021a) et qui sont déterminants pour cerner les limites de mon évaluation.

Les écarts potentiels entre la demande synthétique et les données d'entrée, par rapport à certaines caractéristiques essentielles dans l'analyse du covoiturage et qui restent à définir, sont à considérer avant même d'interpréter les résultats qu'on peut tirer de **MEPCEL**, car ils peuvent conditionner ces derniers. C'est pourquoi, dans ce chapitre, je vérifie la cohérence entre les transformations que la **MEPCEL** opère, les données d'entrée que j'utilise effectivement et les résultats attendus. Autrement dit, je me demande : dans quelle mesure l'utilisation de la synthèse de demande en mobilité pourrait introduire des erreurs dans la distance **VP** passager calculée par **MEPCEL** ?

En premier lieu, je décris le fonctionnement de la synthèse de la demande ([Section 10.1](#)), prérequis pour comprendre les étapes qui pourraient biaiser les résultats. Ensuite, je formalise les propriétés attendues de la demande en mobilité pour que l'évaluation de la distance parcourue évitée grâce au covoiturage ne soit pas biaisée ([Section 10.2](#)). Enfin, j'explique en quoi une demande en mobilité synthétisée par le logiciel de Hörl et Balac (2021a) pourrait ne pas respecter ces propriétés ([Section 10.3](#)).

10.1 Synthèse de la demande en mobilité

La synthèse de la demande en mobilité consiste à croiser différentes sources de données relatives à une population réelle pour synthétiser une population fictive et ses trajets, de manière à respecter certaines caractéristiques statistiques de la population réelle et à ce que la demande en mobilité totale soit représentative d'une journée moyenne de semaine ouvrée.

Dans un premier temps, je décris les données utilisées par le logiciel de Hörl et Balac (2021a) ([Section 10.1.1](#)). Ensuite, je décris chacune des trois grandes étapes de la synthèse de la demande, à savoir :

1. la synthèse de la population, c.-à-d. la synthèse des individus et de leurs ménages respectifs à proprement parler ([Section 10.1.2](#));

2. l'affectation d'une chaîne d'activités à chacun des individus, caractérisant son emploi du temps ([Section 10.1.3](#));
3. l'affectation de l'origine et de la destination de chacun des trajets des chaînes d'activités ([Section 10.1.4](#)).

Enfin, je décris la manière dont je calcule les itinéraires des trajets ([Section 10.1.5](#)), ce qui est nécessaire pour calculer la distance parcourue par les passagers ou la distance parcourue évitée^I, ainsi que pour construire le graphe d'appariement dans le cas du covoiturage partiel.

10.1.1 *Données d'entrée*

La synthèse de demande en mobilité repose sur l'usage de différentes sources de données, toutes ouvertes. Il s'agit notamment du recensement de la population à l'échelle nationale et des **EMD** aux échelles nationales et régionales qui quantifient et caractérisent la population et sa demande en mobilité en France. D'autres données publiques qui ne sont pas issues d'enquêtes sont utilisées : le répertoire des entreprises françaises et des bases de données géographiques. Toutes ces différentes données sont décrites ci-après.

ENQUÊTE MÉNAGES ET DÉPLACEMENTS Les **EMD** sont des enquêtes qui font l'état des habitudes des déplacements de la population en fonction des caractéristiques des ménages. Elles existent à l'échelle nationale, auquel cas les résultats sont généralement publics, et à l'échelle locale, auquel cas les résultats sont généralement confidentiels. Le logiciel de Hörl et Balac ([2021a](#)) permet d'utiliser les résultats de l'un ou l'autre type d'enquête.

À l'échelle nationale, l'**EMD** est l'**ENTD** en 2008 (dénommée **Enquête sur la mobilité des personnes (EMP)** pour le millésime 2018-2019) et comprend deux parties : une partie qui concerne la mobilité locale, et une autre qui concerne la mobilité longue distance.

Les résultats utilisés pour la synthèse de demande en mobilité sont ceux qui concernent la mobilité locale (à moins de 80 km du domicile) en semaine^{II}.

Les **EMD**, comme les résultats du recensement sont anonymisés. De même, dans les résultats des deux types d'enquête, chaque échantillon (personne ou ménage) est accompagné d'un ou plusieurs coefficients de redressement. Ceux-ci sont calculés par les autorités produisant les enquêtes et permettent d'extrapoler ces données tout en respectant certaines propriétés statistiques des populations.

I. Ces quantités diffèrent lorsque le covoiturage ne cible pas que la mobilité autosoliste.

II. Les données sont disponibles sur <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/enquete-sur-la-mobilite-des-personnes-2018-2019>.

LE RECENSEMENT DE LA POPULATION Le recensement de la population est séparé en une exploitation principale des données obtenues et une exploitation complémentaire^{III}. L'exploitation principale contient des informations sur (Insee, 2022) :

- l'évolution et la structure de la population (âge, sexe...);
- les couples-familles-ménages (état matrimonial, vie en couple, taille du ménage...);
- les logements-migrations résidentielles (catégorie et type de logement, période d'achèvement, statut d'occupation, nombre de pièces, ancienneté d'emménagement, lieu de résidence cinq ans ou un an plus tôt...);
- les diplômes-formation-mobilités scolaires (scolarisation et lieu d'études, diplôme le plus élevé...);
- la population active-emploi-chômage (taux d'activité par sexe et âge, actifs en emploi, chômage au sens du recensement...);
- les caractéristiques de l'emploi-mobilités professionnelles (statut professionnel, condition d'emploi, temps partiel, lieu de travail, mode de transport pour aller travailler...);
- les étrangers-immigrés (distinction Français / étranger et immigré / non immigré par sexe et âge...).

L'exploitation complémentaire, comme l'indique son nom, vient compléter ou préciser ces informations avec :

- la structure familiale des ménages : détermination précise de la personne de référence du ménage, identification, le cas échéant, de familles au sein du ménage et composition de ces familles;
- les secteurs d'activité dans lesquels les emplois sont exercés;
- la profession et la catégorie socioprofessionnelle des personnes, qu'elles occupent un emploi ou en recherchent un.

La synthèse de Hörl et Balac (2021a) utilise les données suivantes :

III. À noter que depuis 2002, le recensement n'est plus exhaustif : ce sont uniquement les communes de moins de 10 000 habitant·e·s qui font l'objet d'un recensement exhaustif tous les 5 ans. Pour les autres communes, environ 8 % de leurs ménages sont comptabilisés sur une base annuelle. Cela fait qu'en 5 ans, on a la connaissance précise de 100 % de la population des communes de moins de 10 000 habitant·e·s, et de 40 % du reste de la population.

- la localisation des individus,
- le nombre d'individus dans chaque zone géographique prédefinie (les **Ilots Regroupés pour l'Information Statistique (IRIS)**, définis ci-après),
- les flux origine-destination pour les trajets domicile-travail et domicile-études.

LE RÉPERTOIRE DES ENTREPRISES La base de données du **Système national d'identification et du répertoire des entreprises et de leurs établissements (Sirene)**, ou **Base Sirene**, est une base de données des entreprises françaises^{IV}. Cette base comprend, entre autres, les localisations et les effectifs de ces entreprises. Ce sont ces localisations et ces effectifs qui sont utilisés pour la synthèse de population.

DES BASES DE DONNÉES GÉOGRAPHIQUES Les **IRIS** font partie d'un système de découpage du territoire français qui « doit respecter des critères géographiques et démographiques et avoir des contours identifiables sans ambiguïté et stables dans le temps » (Insee, 2016b)^V. Ceux-ci sont utilisés dans la synthèse pour localiser géographiquement les individus du recensement. En plus de cette base de données des **IRIS**, la synthèse se sert également de la table de correspondance entre les **IRIS** d'une part et les communes, les départements et les régions d'autre part^{VI}.

DISTRIBUTION DES REVENUS Les distributions des revenus par commune sont tirés du dispositif **Fichier Localisé Social et Fiscal (Filosofi)**^{VII}. Ces données comprennent à différentes échelles (communes et départements) les quartiles et déciles des revenus.

10.1.2 *Étape 1 : synthèse de la population*

La première étape de la synthèse de la demande est la synthèse de la population. Elle se divise elle-même en trois étapes successives :

1. la synthèse des ménages et des personnes,
2. la localisation des logements où habitent les ménages puis
3. l'affectation des propriétés des ménages.

IV. La Base **Sirene** est disponible sur <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-sirene-des-entreprises-et-de-leurs-établissements-siren-siret/>

V. Les **IRIS** sont disponibles sur <https://geoservices.ign.fr/contoursiris>.

VI. La table de correspondance entre les **IRIS** et communes est disponible sur <https://www.insee.fr/fr/information/2017499>

VII. Le registre **Filosofi** est disponible sur <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6036907>.

SYNTHÈSE DES MÉNAGES ET DES PERSONNES La première étape consiste en la génération des personnes et des groupes de personnes vivant dans un même logement, appelé *ménage*.

Chacun des ménages est obtenu par copie directe d'un ménage du recensement, puis répliqué à l'identique en fonction de la pondération de chaque ménage (pour rappel, les pondérations ou coefficients de redressement sont donnés dans les résultats d'enquête). Une copie directe est possible, car le nombre d'échantillons du recensement est relativement grand par rapport aux nombres de valeurs possibles des attributs sociodémographiques de chaque ménage.

LOCALISATION DES LOGEMENTS Un logement est le lieu d'habitation d'un ménage. Dans le recensement, les localisations des logements sont données à la précision de la zone **IRIS**, qui subdivisent les communes de plus de 10 000 habitant·es. En raison de l'anonymisation des résultats d'enquête, lorsque les zones **IRIS** sont peu peuplées, les logements sont localisés à l'échelle de zones plus vastes (c.-à-d. des départements ou des communes). Dans ce cas, la synthèse choisit aléatoirement une zone **IRIS** à l'intérieur de la zone plus large.

Ensuite, les logements sont localisés précisément à une adresse, tirée aléatoirement dans son **IRIS** à partir de la **Base Adresse Nationale (BAN)**. Le tirage d'une adresse est pondéré par le nombre d'habitant·es à cette adresse.

ATTRIBUTION DU REVENU DE CHAQUE MÉNAGE Les revenus pour chaque ménage sont associés aléatoirement en respectant les distributions par décile de revenus pour chaque commune. Ces distributions sont obtenues à partir des données de **Filosofi**.

Pour chaque commune, chaque ménage est associé uniformément aléatoirement à un décile. Le décile donne des bornes inférieure et supérieure de revenu du ménage, entre lesquelles est choisi une valeur de manière aléatoire et uniforme.

10.1.3 Étape 2 : affectation des chaînes d'activités

Une chaîne d'activités est, pour une personne donnée, une séquence d'activités pour chacun desquels sont connus

- le type d'activité (domicile, travail, études, courses, loisir ou autre),
- le lieu de l'activité,
- l'heure de début et de fin,

De plus, le mode de transport entre chaque activité est aussi connu. Toutes ces informations sont données par les résultats des **EMD**.

Pour attribuer une chaîne d'activités à chaque personne, on fait correspondre les chaînes d'activités présentes dans l'**EMD** d'une part avec les attributs sociodémographiques de la population synthétisée d'autre part.

Cette attribution se fait avec un algorithme dit d'« appariement statistique » (Hörl & Balac, 2021a). Celui-ci considère en priorité et dans cet ordre les attributs suivants :

1. le genre de la personne,
2. la possession d'un véhicule dans le ménage,
3. la classe d'âge,
4. la classe socioprofessionnelle,
5. la classe de revenus (si présent dans les données sources),
6. le département.

Cet algorithme a pour objectif, pour chaque personne synthétique t , d'associer une chaîne d'activités appartenant à une personne réelle (c.-à-d., présente dans l'enquête) s , sachant que s et t partagent k_{\max} attributs tels que

$$k_{\max} = \max \left\{ k \mid |S_t^k| > M \right\}$$

Avec S_t^k l'ensemble des personnes réelles partageant les mêmes k premiers attributs (pris dans l'ordre ci-dessus) que t et M un paramètre. Prenons pour exemple une personne t dont les valeurs des attributs sont les suivantes (dans l'ordre spécifié ci-dessus) :

(masculin ; oui ; 20–24 ; artisan ; 1500–2700 ; 38)

L'ensemble S_t^3 comprend alors toutes les personnes réelles qui partagent les 3 premiers mêmes attributs, c.-à-d.
(masculin ; oui ; 20–24).

De cette manière, les chaînes respectent dans une certaine mesure les corrélations avec les attributs sociodémographiques, tout en évitant le sur-ajustement, le compromis entre ces deux aspects étant contrôlé par le paramètre M .

Concrètement, une manière d'exécuter cet appariement statistique est la suivante.

Pour chaque personne synthétique :

1. Sélectionner tous les attributs de la personne synthétique,
2. Compter le nombre de personnes réelles qui partagent les mêmes valeurs pour tous ces attributs.

S'il y a moins de M personnes, revenir à l'étape 1 en désélectionnant le dernier attribut (p. ex., le *département* si on est à la première itération).

Sinon, passer à l'étape suivante.

3. Attribuer à la personne synthétique une des chaînes des personnes réelles en suivant la loi de probabilité sachant la personne synthétique s :

$$\rho(s) = w_s / \sum_{s' \in S} w_{s'}$$

Avec w_s le coefficient de redressement de s dans l'enquête.

10.1.4 Étape 3 : localisation des activités

L'affectation des adresses précises pour les activités se fait en fonction du type d'activité. La synthèse distingue trois types de d'activités :

- le domicile,
- les lieux de travail et d'étude ou activités primaires,
- les lieux des autres motifs ou activités secondaires.

Les logements étant définis lors de la synthèse de la population ([Section 10.1.2](#)), je décris ci-après l'affectation des lieux d'activités primaires et d'activités secondaires.

ACTIVITÉS PRIMAIRES Le principe général d'association des lieux d'activités primaires (travail ou étude) à chaque habitant·e est de reconstruire les flux pendulaires à l'échelle des communes, observés dans les données du recensement, le flux pendulaire d'une commune x vers une commune y étant le nombre de personnes vivant à x et travaillant ou étudiant à y .

L'association est faite en plusieurs étapes indépendantes :

1. Une matrice **OD** des flux pendulaires à l'échelle des communes est construite ou reconstituée.
2. Les flux sortants de chaque commune sont reconstitués.
3. Les candidats pour les lieux des activités primaires sont choisis de manière exacte dans les bases de données des entreprises et des établissements d'enseignement.
4. Un lieu de travail est associé à chaque personne en fonction du nombre d'employé·e·s et de la distance à parcourir connue dans la chaîne d'activités.

Récupération ou construction de la matrice OD La matrice **OD** est construite à partir du résultat d'une enquête complémentaire du recensement, qui contient pour chaque individu sondé le lieu d'habitation et le lieu de travail. Pour ce faire il suffit, pour chaque couple (x, y) de communes, de sommer les coefficients de redressement des individus qui habitent dans la commune x et travaillent dans la commune y . On obtient ainsi le flux pendulaire de x à y , pour tout couple (x, y) de communes. Les flux pendulaires sont ensuite normalisés par rapport au total du flux sortant de chaque commune. Le résultat est une matrice **OD** « relative » telle que le [Tableau 10.1](#).

TABLE 10.1 – Exemple de matrice **OD** des trajets pendulaires

	A	B	C	D
A	23 %	23 %	38 %	16 %
B	...			
C	...			
D	...			

23 % des habitant·e·s de la commune A travaillent dans la commune A, 23 % dans la commune B, 38 % dans la commune C et 16 % dans la commune D.

Ces flux sont illustrés graphiquement dans la [Figure 10.1](#).

Construction des flux pendulaires sortants de chaque commune Les flux pendulaires absolu·s sont calculés à partir du nombre d'habitant·e·s de chaque commune de départ allant au travail ou sur un lieu d'éducation. Les personnes qui vont au travail ou sur un lieu d'éducation sont déduites à partir des chaînes d'activités : si une personne contient une activité primaire, elle fait partie des personnes qui seront affectées à l'un des flux pendulaires sortants de sa commune d'habitation.

Je donne une illustration de cette étape dans la [Figure 10.1](#) : il y a 13 habitants dans la commune A. En distribuant les flux du [Tableau 10.1](#) vers les communes A B, C et D, cela nous donne des valeurs absolues de flux pendulaires de 3, 3, 5, et 2.

Sélection des lieux candidats pour les activités primaires N lieux d'activité sont tirés aléatoirement, avec remise, selon une loi de

probabilité pondérée en fonction du nombre de salariés/d'inscrits^{VIII}, N correspondant au total des flux entrants. Ceux-ci sont alors dits *lieux candidats*.

Affectation des lieux candidats aux personnes L'affectation des lieux candidats à chacun·e des habitant·e·s est faite en fonction de la distance à vol d'oiseau entre le logement de l'habitant·e et le lieu de l'activité, appelée *distance cible* : s'il existe un trajet direct entre ces deux activités dans la chaîne d'activités de l'habitant·e, la *distance cible* en est directement issue, sinon, une *distance cible* est tirée aléatoirement en suivant une loi de probabilité dont la répartition est celle des distances logement–lieu d'activité primaire connues. L'affectation en fonction des distances est faite par un algorithme glouton : pour chacun des habitant·e·s, un·e par un·e, le lieu d'activité primaire dont la distance à son logement est la plus proche de la distance cible est attribué.

L'affectation peut donc introduire des incohérences entre la distance issue de la chaîne d'activités d'un individu et la distance du lieu choisi pour son d'activité primaire.

La [Figure 10.2](#) illustre un exemple d'affectation qui fait suite à l'exemple précédent.

LIEUX DE LOISIR, COURSES ET AUTRES Les lieux de loisirs, courses et autres, qui correspondent à ce qui est appelé *activités secondaires*, sont choisis parmi les bases de données de services et d'installations.

L'affectation des lieux d'activités secondaires est faite en respectant au mieux les distances des chaînes d'activités, sachant les lieux d'activités primaires préalablement sélectionnés.

La méthode d'affectation utilisée est décrite dans Hörl et Axhausen (2021). Je ne détaille ici pas la méthode utilisée ici, en supposant que celle-ci respecte suffisamment les distances des chaînes d'activités.

REMARQUE. Les activités primaires ont des lieux fixés pour chaque personne, c.-à-d. que si une personne a plusieurs fois le motif travail ou études dans sa chaîne d'activités, cette activité primaire se déroulera toujours au même endroit. De ce fait, les personnes se rendant à différents lieux de travail (ou d'étude) au cours d'une même journée ne sont pas représentées, ce qui constitue une limite au logiciel de Hörl et Balac (2021a). Dans mon cas, cette limite peut conduire à surestimer le potentiel du covoiturage que je calcule, le nombre de lieux d'activités primaires étant réduit. Toutefois, ce cas ne concerne qu'une faible part de la population. En revanche, une

VIII. Les lieux des activités primaires, qu'il s'agisse d'éducation ou de travail, sont accompagnés dans les données d'entrée d'un nombre de salariés de l'entreprise ou d'inscrits dans l'établissement d'éducation.

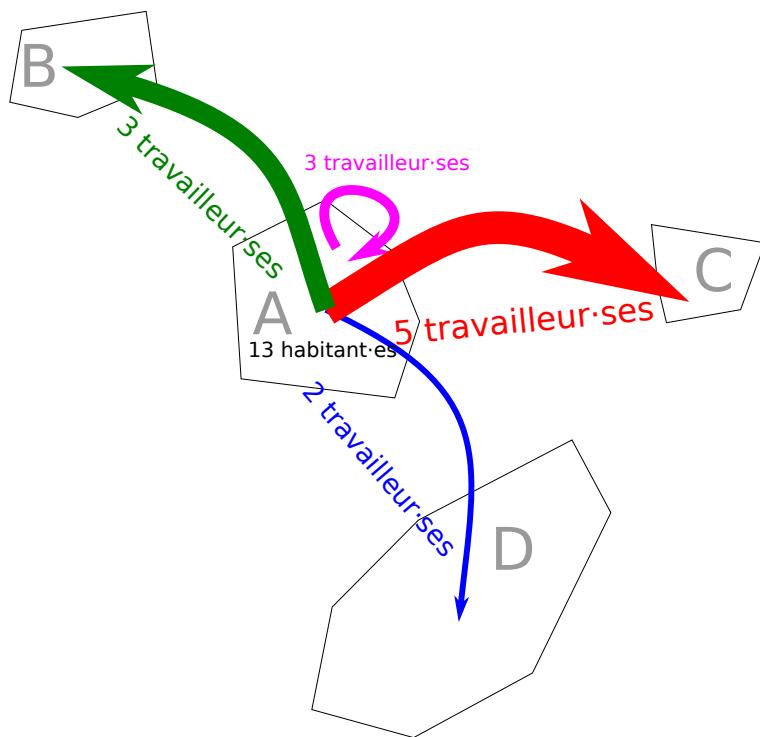


FIGURE 10.1 – Flux synthétiques recalculés à partir de la matrice OD au départ de A vers les communes B, C et D

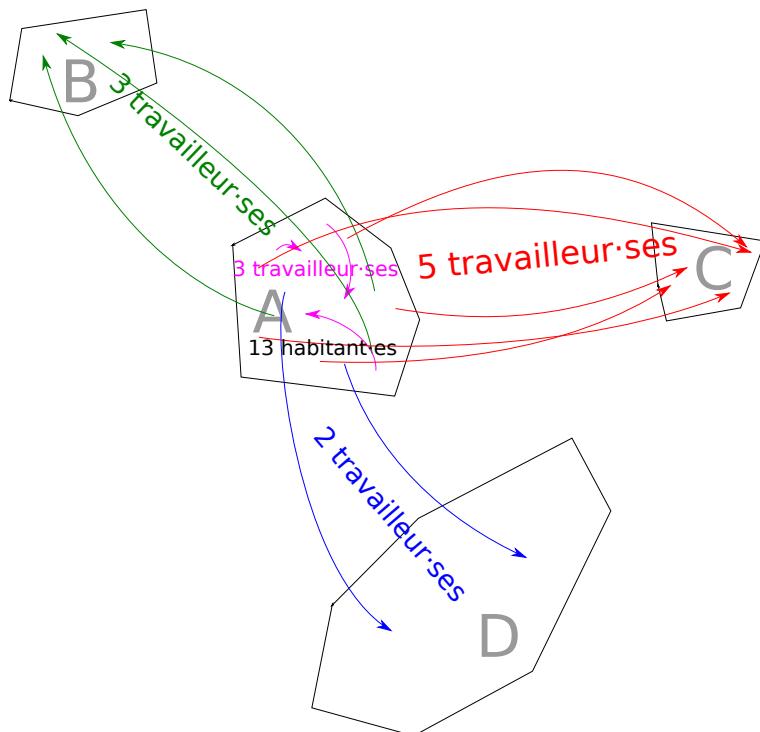


FIGURE 10.2 – Exemple d'affectation des lieux de travail aux habitant·es de A

personne peut avoir, au cours de sa chaîne d'activités, plusieurs lieux différents pour un même motif d'activité secondaire.

10.1.5 Itinéraires des trajets

Pour connaître la distance parcourue pour un trajet et pour pouvoir évaluer le *covoiturage partiel* (Section 9.4.2), il est nécessaire d'avoir l'itinéraire précis^{IX} d'un véhicule entre deux activités.

Hörl et Balac (2021a) ont conçu leur logiciel de manière que celui-ci produise une entrée au logiciel de **SMA MATSim**. Ce dernier calcule des itinéraires en considérant notamment le trafic. Il peut également modifier marginalement les chaînes d'activités en fonction d'un modèle de choix pour assurer leur cohérence par rapport aux modes de transports utilisés (p. ex., en interdisant à un agent d'utiliser sa voiture alors qu'il n'en est pas proche), aux distances parcourues (p. ex., en ne faisant pas marcher les agents sur de grandes distances), aux horaires des activités (p. ex., en s'assurant que l'activité suivante commence après l'activité précédente)...

Pour des raisons de temps de calcul et afin d'éviter d'utiliser une **SMA**^X, je calcule les itinéraires les plus courts entre les origines et les destinations à l'aide de GraphHopper (2022).

Les durées des itinéraires ainsi calculés ne correspondent généralement pas aux durées des trajets des chaînes d'activités^{XI}. Pour rendre une chaîne d'activités cohérente avec les itinéraires, il est nécessaire de modifier au moins l'heure de début ou de fin des activités. L'implémentation permet, au choix, de modifier soit l'heure de début, soit de fin d'activité, éventuellement en fonction des motifs à l'origine et à la destination.

10.2 Propriétés attendues de la demande pour l'évaluation de la distance évitée grâce au covoiturage

Je propose ici des conditions suffisantes sur la synthèse de population pour que **MEPCEL** estime correctement la distance potentiellement évitée par le covoiturage. Dans la suite, je vais traiter plus particulièrement le cas du covoiturage *à l'identique*. En effet, la vérification des propriétés statistiques quant à la distance évitée considérant d'autres modalités de rencontre et de séparation est beaucoup plus difficile.

IX. Défini dans la Section 9.4.2 comme « un ensemble de positions horodatées reflétant le chemin choisi et la dynamique d'[un trajet]. »

X. Se passer de la **SMA** permet également de conserver la propagation de certaines propriétés statistiques des données d'entrée.

XI. On observe que les durées des activités peuvent être soit trop longues, soit trop courtes, dans des proportions similaires.

Pour rappel, la métrique que j'évalue est la distance parcourue évitée grâce au covoiturage. Je commence par développer celle-ci. À partir de l'ensemble des trajets \mathcal{T} ciblés par le covoiturage, c.-à-d., issus du filtrage par **MEPCEL** (voir la [Section 9.3](#)), la distance parcourue évitée grâce au covoiturage $D_{\text{évitée}}$ est définie par [Équation \(10.1\)](#).

$$D_{\text{évitée}} = \sum_{t \in \mathcal{T}} l(t) \cdot \rho(t) \quad (10.1)$$

où $l(t)$ désigne la longueur d'un trajet t , et $\rho(t)$ vaut 1 s'il s'agit d'un trajet passager dans un covoiturage, 0 sinon.

Une partie de mon étude consistant en l'estimation de la distance parcourue évitée sur des flux cibles, un flux étant l'ensemble des trajets allant d'une zone à une autre^{XII}, je formalise la distance évitée spécifique à un flux entre deux zones z_o et z_d . La distance évitée entre z_o et z_d , notée $D_{\text{évitée}}(z_o, z_d)$, a une formulation similaire à celle de $D_{\text{évitée}}$:

$$D_{\text{évitée}}(z_o, z_d) = \sum_{t \in \mathcal{T}_{z_o, z_d}} l(t) \cdot \rho(t) \quad (10.2)$$

où \mathcal{T}_{z_o, z_d} désigne l'ensemble des trajets de z_o à z_d .

Notons qu'on peut faire apparaître la distance évitée sur chacun des flux à partir de l'[Équation \(10.1\)](#) :

$$D_{\text{évitée}} = \sum_{(z_o, z_d) \in C^2} D_{\text{évitée}}(z_o, z_d) = \sum_{(z_o, z_d) \in C^2} \sum_{t \in \mathcal{T}_{z_o, z_d}} l(t) \cdot \rho(t) \quad (10.3)$$

avec C le partitionnement du périmètre d'étude en zones.

Je développe la formule de l'[Équation \(10.2\)](#) en groupant les trajets par leur longueur. Soit $\mathcal{L}_{z_o, z_d} = \{l(t) : t \in \mathcal{T}_{z_o, z_d}\}$, l'ensemble des distances qui peuvent être parcourues par les trajets de \mathcal{T}_{z_o, z_d} .

$$D_{\text{évitée}}(z_o, z_d) = \sum_{\ell \in \mathcal{L}_{z_o, z_d}} \left(\ell \sum_{t \in \mathcal{T}_{z_o, z_d} : l(t)=\ell} \rho(t) \right) \quad (10.4)$$

On remarque dans l'[Équation \(10.4\)](#) que la somme de droite représente le nombre total de trajets passagers de z_o vers z_d de longueur ℓ .

Ainsi, en posant

$D_{z_o, z_d}(\ell)$ la part des trajets de z_o vers z_d de longueur ℓ ,
 $P_{z_o, z_d}(\ell)$ la part de ces derniers qui sont passagers,
on a $\forall \ell \in \mathcal{L}_{z_o, z_d}$:

$$\sum_{t \in \mathcal{T}_{z_o, z_d} : l(t)=\ell} \rho(t) = |\mathcal{T}_{z_o, z_d}| \cdot D_{z_o, z_d}(\ell) \cdot P_{z_o, z_d}(\ell)$$

XII. Pour rappel, le **PDU** définit des objectifs pour les flux entrant et sortant du cœur urbain.

où $|\mathcal{T}_{z_0, z_d}|$ est le nombre total de trajets ciblés par le covoiturage de z_0 vers z_d . On a donc :

$$\begin{aligned} D_{\text{évitée}}(z_0, z_d) &= \sum_{\ell \in \mathcal{L}_{z_0, z_d}} \ell \cdot |\mathcal{T}_{z_0, z_d}| \cdot D_{z_0, z_d}(\ell) \cdot P_{z_0, z_d}(\ell) \\ &= |\mathcal{T}_{z_0, z_d}| \sum_{\ell \in \mathcal{L}_{z_0, z_d}} \ell \cdot D_{z_0, z_d}(\ell) \cdot P_{z_0, z_d}(\ell) \end{aligned}$$

De cette décomposition, on note trois quantités déterminantes pour le calcul de la distance évitée grâce au covoiturage :

- $|\mathcal{T}_{z_0, z_d}|$, le nombre de trajets ciblés par le covoiturage de z_0 vers z_d ,
- D_{z_0, z_d} , la distribution des distances des trajets de z_0 vers z_d ,
- P_{z_0, z_d} , le taux de trajets passagers en fonction de leur longueur ^{XIII}.

Ainsi, si $|\mathcal{T}_{z_0, z_d}|$, D_{z_0, z_d} et P_{z_0, z_d} , calculés à partir de la demande en mobilité synthétique, sont de bons estimateurs des caractéristiques statistiques des données d'entrée de la synthèse, alors [MEPCEL](#) estime correctement la distance potentiellement évitée par le covoiturage. Dans la suite, nous allons restreindre l'évaluation de la qualité de ces estimateurs à l'étude de leurs biais potentiels.

10.3 Biais de la demande en mobilité

Parmi les étapes de la synthèse de la demande en mobilité décrites au début de ce chapitre, celles qui pourraient biaiser les valeurs $|\mathcal{T}_{z_0, z_d}|$, D_{z_0, z_d} et P_{z_0, z_d} , et donc la distance évitée grâce au covoiturage sont :

- l'affectation des chaînes d'activités, par une (quasi-)non prise en compte des localisations géographiques des logements des individus ([Section 10.3.1](#)),
- l'affectation des lieux des activités primaires, qui manque de précision sur les flux à l'échelle infracommunale ([Section 10.3.2](#)),
- le calcul des itinéraires les plus courts, qui sous-estime les distances parcourues ([Section 10.3.3](#)).

À l'heure où j'écris ce manuscrit, les deux premiers points font l'objet de discussions et de développements par la communauté qui s'est construite autour de Hörl et Balac ([2021a](#)). Dans la suite, je

XIII. Ce taux dépend de la présence de conducteurs potentiels (en covoiturage identique uniquement), de l'appariement et des contraintes liées aux chaînes de déplacement si celles-ci sont prises en compte.

propose une analyse qualitative des biais possiblement introduits par chacune des étapes listées ci-dessus. Une étude quantitative complémentaire des propriétés statistiques des valeurs de $|\mathcal{T}_{z_0, z_d}|$, D_{z_0, z_d} et P_{z_0, z_d} dépasse le cadre de cette thèse, mais serait intéressante à conduire^{XIV}.

10.3.1 Corrélations entre les chaînes d'activités et les caractéristiques socioéconomiques

Pour rappel, les chaînes d'activités sont associées aux individus selon un appariement statistique. Cet appariement prend, dans l'ordre de priorité, les caractéristiques socioéconomiques suivantes :

1. le genre de la personne,
2. la possession d'un véhicule dans le ménage,
3. la classe d'âge,
4. la classe socioprofessionnelle,
5. la classe de revenus (si présent dans les données sources),
6. le département.

Sachant cet ordre de priorité, la localisation est souvent ignorée lors de l'affectation des chaînes d'activités aux individus.

La distribution des trajets peut être biaisée si les attributs sociodémographiques sélectionnés ou leur ordre de priorité ne sont pas de bons prédicteurs des chaînes d'activités par rapport à la réalité. L'impact du biais peut être particulièrement élevé si l'attribut le moins prioritaire, en l'occurrence les localisations des logements, est indispensable pour obtenir une bonne prédiction.

Par exemple, on pourrait s'attendre à ce que les distances parcourues et les modes de transport soient corrélates avec la localisation du logement en raison des variations des densités de population et de lieu de travail, ainsi que de l'accessibilité des TC. Une telle dépendance ne serait pas correctement prise en compte dans la synthèse de la population en raison de l'ordre de priorité ci-dessus.

10.3.2 Distribution spatiale des logements et des activités primaires

Pour les trajets pendulaires (entre le logement, le travail et les lieux d'études), les corrélations entre les origines et les destinations des trajets sont respectées à la granularité des communes en utilisant des

XIV. L'étude des propriétés statistiques de la proportion de passagers P_{z_0, z_d} va bien au-delà d'une simple analyse de la conformité de la synthèse aux données réelles. Elle nécessiterait en effet d'étudier analytiquement le covoiturage à l'échelle des zones.

matrices origine-destination issues du recensement, donc qu'on peut considérer comme fiables.

Toutefois, des erreurs potentiellement importantes sont à souligner à propos des trajets pendulaires sortants de chaque commune, car la cohérence de certaines caractéristiques statistiques n'a pas été vérifiée :

- le volume total de trajets pendulaires,
- les parts modales.

Ces deux caractéristiques influencent le nombre de trajets entre deux communes et qui sont ciblés par le covoiturage (c.-à-d., issus du filtrage par **MEPCEL**, voir la [Section 9.3](#)), noté précédemment $|\mathcal{T}_{z_0, z_d}|$.

Une des vérifications faites par Hörl et Balac ([2021a](#)) pour s'assurer de la cohérence de ces flux est la comparaison des flux pendulaires de la synthèse avec ceux du recensement. Ils montrent que l'erreur est faible, mais leur vérification n'a été faite qu'à la maille des départements, si bien que les flux intercommunaux ne sont pas garantis.

Les matrices **OD** utilisées étant calculées tous modes de transport confondus, il n'y a donc pas de garantie de respect des parts modales, que ce soit pour chacun des flux pendulaires entre les communes, ou même pour l'ensemble des flux pendulaires sortants d'une commune. Les parts modales ne sont respectées qu'au moment de l'affectation des chaînes d'activités, et ce, à la précision de l'**EMD** utilisée (p. ex., pour l'**ENTD**, à l'échelle du département).

Pour les activités secondaires, seules les distances parcourues et les adresses des services et des installations sont prises en compte. Cette fois, il n'y a aucune garantie sur le respect d'une quelconque matrice **OD**. Je note tout de même que les distances parcourues des trajets des activités secondaires respectent la distribution globale des distances. Enfin, l'erreur sur les activités secondaires n'affecte pas mon étude du covoiturage lorsqu'elle cible les flux pendulaires.

10.3.3 Utilisation des itinéraires les plus courts

De manière générale, les voyageur·euse·s peuvent s'écartier de l'itinéraire le plus court pour diverses raisons : embouteillages, préférences personnelles, voyage pour plusieurs motifs (invisibles dans la synthèse, par nature des données d'entrées), etc. Par conséquent, la longueur des trajets de la demande en mobilité que j'utilise est généralement sous-estimée par rapport à des itinéraires plus réalistes pour ces mêmes trajets. Le choix d'utiliser les itinéraires les plus courts a des implications différentes en fonction de la modalité de rencontre et de séparation considérée.

Dans le cas du covoiturage *à l'identique*, utiliser les chemins les plus courts m'amènerait à sous-estimer la distance parcourue en **VP**

passager grâce au covoiturage. En ce qui concerne le covoiturage *partiel*, l'effet de l'utilisation des chemins les plus courts est plus incertaine : si un trajet emprunte un chemin qui n'est pas le plus court, alors le nombre de passagers potentiels peut augmenter si le chemin emprunté se trouve dans une zone plus densément peuplée ou diminuer dans le cas contraire.

Il est possible d'améliorer le réalisme des itinéraires à l'aide d'un modèle de trafic. Dans le cas du covoiturage partiel, l'utilisation d'un modèle de trafic pousserait probablement les trajets à passer là où le trafic est moins dense, ce qui réduit la probabilité d'un appairage en cours de route dans le cas du covoiturage *partiel*.

10.4 Conclusion

Le logiciel de synthèse de demande en mobilité de Hörl et Balac (2021a), que j'utilise pour mon évaluation du potentiel du covoiturage a des atouts indéniables : il est sous licence libre et ne repose que sur des données ouvertes. Je complète la demande générée par ce logiciel en calculant les itinéraires les plus courts, dont l'utilisation sous-estime la distance parcourue par les trajets, ce qui est une limite à mon étude. L'évaluation des effets de l'utilisation d'un modèle de trafic sur les résultats de [MEPCEL](#) pourra faire l'objet de travaux futurs.

Les biais potentiellement introduits par le logiciel de Hörl et Balac (2021a) qui pourraient impacter mes résultats concernent surtout les trajets non pendulaires et le *covoiturage partiel*. Les estimations de la distance potentiellement évitable grâce au covoiturage régulier calculées par [MEPCEL](#) à partir de la synthèse de Hörl et Balac (2021a) sont donc probablement plus fiables lorsqu'on se limite aux trajets pendulaires et au covoiturage *à l'identique*. C'est en partie le cas dans l'étude des objectifs en termes de covoiturage du [PDU](#) grenoblois (voir le [Chapitre 11](#)). Les conclusions sur la distance évitée dans les autres scénarios sont à considérer avec plus de précaution.

Il serait intéressant de compléter l'étude qualitative des propriétés de la demande en mobilité synthétique par une étude quantitative. L'ébauche de formalisation proposée dans ce chapitre donne quelques pistes de réflexions pour décomposer cette analyse et fait apparaître les difficultés principales qu'il faudrait surmonter pour faire une étude quantitative complète.

Pour finir, il pourrait également être intéressant d'améliorer certains aspects de la demande synthétique discutés dans ce chapitre (l'appariement des chaînes d'activités, le calcul des flux intercommunaux et des parts modales correspondantes, etc.) afin d'améliorer l'estimation du potentiel du covoiturage calculée par [MEPCEL](#) à partir de cette demande. Des modifications de la synthèse

allant dans ce sens sont actuellement en cours ou planifiée par la communauté de chercheurs travaillant sur le logiciel de Hörl et Balac (2021a).

EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS

Structure du chapitre

11.1	Présentation des objectifs relatifs au covoiturage dans le PDU	160
11.2	Plan d'expériences	161
11.2.1	Scénarios	161
11.2.2	Plan d'expérience en étoile	162
11.3	Résultats	163
11.4	Interaction avec d'autres leviers de la stratégie	165
11.5	Interprétation des résultats	167
11.6	Conclusion	168

Pour rappel, la problématique de cette partie du manuscrit est posée dans le [Chapitre 6](#) : *à quelles conditions les plateformes de covoiturage régulier peuvent-elles répondre aux objectifs formulés dans le PDU grenoblois ?*

Dans le [Chapitre 9](#), j'ai décrit une nouvelle méthode qui permet d'évaluer le potentiel du covoiturage pour répondre à cette question de recherche, [MEPCEL](#). Pour rappel, cette méthode permet de prendre en compte certains freins au covoiturage :

- un faible taux de participation,
- les dispersions spatiales et temporelles des activités des voyageur·euse·s,
- les disponibilités des [VP](#) des voyageur·euse·s,
- les emplois du temps des voyageur·euse·s.

En premier lieu, je traite des attentes concernant le covoiturage dans le [PDU](#) ([Section 11.1](#)). Ensuite, je présente le plan d'expériences que j'applique, c.-à-d., le jeu de données d'entrée et les valeurs de paramètres avec lesquels j'utilise la méthode présentée dans le [Chapitre 9](#) ([Section 11.2](#)). Puis, je présente les résultats et je les compare à l'objectif donné par le [PDU](#) ([Section 11.3](#)). J'aborde également la problématique de la compatibilité avec d'autres leviers de la stratégie ([Section 11.4](#)). Pour finir, je remets en perspective l'ensemble des résultats ([Section 11.5](#)).

Toutes les expériences ont été effectuées sur un serveur HPC serveur HPE DL380 avec la configuration suivante :

CPU	2 × Xeon Gold 6330 (56 cœurs à 2 GHz chacun),
RAM	512 Go,
STOCKAGE	SSD 5 To.

11.1 Présentation des objectifs relatifs au covoitfrage dans le PDU

Je restreins la question du potentiel du covoitfrage régulier dans le périmètre du **SMMAG**, et considère donc les différents objectifs de covoitages donnés par le **PDU** d'ici à 2030^I. Étant dans une hypothèse de « maximisation » du potentiel du covoitfrage (je cherche une borne supérieure du potentiel de covoitfrage), je restreins le covoitfrage aux actuels autosolistes.

Pour rappel, le **PDU** 2030 a pour objectif de passer d'un taux de remplissage de 1,06 en 2010^{II} à 1,4 en 2030 entre le cœur urbain et la périphérie.

L'expérimentation à mettre en œuvre pour évaluer le potentiel du covoitfrage pour atteindre cet objectif consiste à explorer les valeurs des paramètres (contraintes spatiotemporelles et taux de participation au covoitfrage) de manière à trouver les conditions sous lesquelles l'objectif de taux de remplissage est atteint.

En pratique, la demande en mobilité produite par la synthèse de population (voir [Chapitre 10](#)) ne permet pas de reproduire le taux de remplissage actuel, ni même celui de 1,06 en utilisant les données de 2010. Je reformule donc l'objectif absolu du **PDU** en objectif relatif dans cette section. C'est-à-dire, que plutôt que de considérer le passage d'un taux de remplissage absolu de 1,06 à 1,4, je considère une augmentation relative équivalente du taux de remplissage.

À partir de cet objectif d'augmentation du taux de remplissage, je calcule un équivalent en termes de distance parcourue évitée relative ($D_{\text{évitée}}^{\%}$) pour pouvoir directement utiliser les résultats de [MEPCEL](#).

En reprenant la formule du taux de remplissage de la [Définition 4](#), on a :

$$D_{\text{véh}} = \frac{D_{\text{voy}}}{TR}$$

La proportion de distance parcourue évitée est la différence relative entre la distance parcourue cible et la distance parcourue actuelle.

$$D_{\text{évitée}}^{\%} = 1 - \frac{[D_{\text{véh}}]_{\text{cible}}}{[D_{\text{véh}}]_{\text{actuel}}} \quad (11.1)$$

$$\Leftrightarrow D_{\text{évitée}}^{\%} = 1 - \frac{\frac{[D_{\text{voy}}]_{\text{cible}}}{[TR]_{\text{cible}}}}{\frac{[D_{\text{voy}}]_{\text{actuel}}}{[TR]_{\text{actuel}}}} \quad (11.2)$$

I. La restriction pour ce périmètre géographique est justifiée dans l'introduction de cette partie ([Section 6.2](#)).

II. D'après des discussions avec le **SMMAG**, le taux de remplissage actuel est de 1,1. Ce nombre n'étant pas documenté par ailleurs, je m'en tiens à celui donné dans le **PDU**, qui est très proche et qui ne change pas radicalement les résultats.

En faisant l'hypothèse d'une demande en mobilité constante^{III}, on a $D_{voy} = [D_{voy}]_{actuel} = [D_{voy}]_{cible}$, et donc :

$$D_{\text{évitée}} \% = 1 - \frac{\frac{D_{voy}}{[TR]_{cible}}}{\frac{D_{voy}}{[TR]_{actuel}}} \quad (11.3)$$

$$\Leftrightarrow D_{\text{évitée}} \% = 1 - \frac{[TR]_{actuel}}{[TR]_{cible}} \quad (11.4)$$

En appliquant les données de la stratégie, on trouve :

$$D_{\text{évitée}} \% = 1 - \frac{[TR]_{actuel}}{[TR]_{cible}} = 1 - \frac{1,06}{1,4} \approx 0,243$$

Autrement dit, en faisant l'hypothèse d'une demande en mobilité constante, environ 24,3 % de la distance parcourue en 2010 doit être évitée grâce au covoiturage sur les flux entre le cœur urbain et son extérieur d'ici à 2030 pour pouvoir atteindre l'objectif du taux de remplissage du PDU.

11.2 Plan d'expériences

MEPCEL est paramétré de manière à prendre en compte les incertitudes sur la capacité des politiques publiques à lever les obstacles socioéconomiques du covoiturage. Cela permet notamment d'explorer différents niveaux d'optimisme dans la scénarisation. Pour ce faire, j'utilise différentes combinaisons de paramètres pour tester la sensibilité de chacun d'entre eux, et ne pas conditionner l'étude à un seul jeu de valeurs de paramètres.

J'ai mis en place plusieurs plans d'expériences de type plan en étoile. Un plan en étoile consiste, à partir d'un jeu central de valeurs de paramètres, à faire varier chacun des paramètres individuellement, toutes choses égales par ailleurs. Je définis donc autant de jeux centraux que de plans en étoile. Chaque jeu central correspond à un *scénario*.

Dans la suite, je présente les scénarios et les paramètres dont les valeurs varient dans le cadre du plan en étoile.

11.2.1 Scénarios

Je construis 4 scénarios en combinant les deux modalités de rencontre et de séparation définies dans la [Section 9.5](#) (le *covoiturage*

III. On ignore aussi les changements possibles d'itinéraire.

à l'identique et le covoiturage partiel), et un filtrage des trajets (participation au covoiturage de la totalité de la demande de déplacement ou participation des trajets domicile-travail uniquement).

Pour chaque modalité de rencontre et de séparation, j'ajoute un scénario supplémentaire où les circuits que nous avons décrits dans [Section 9.5.2](#) ne sont pas pris en compte (scénarios *sans circuit*). Ces scénarios calculent une surestimation du potentiel des services de covoiturage avec des véhicules partagés en nombre illimité et omniprésents (à condition que le conducteur·rice ne change pas pendant le trajet). La distance évitée pour chacun des scénarios *sans circuit* est censée^{IV} majorer la distance évitée par son scénario « avec circuit » équivalent.

En résumé, j'ai défini les scénarios « covoiturage à l'identique », « covoiturage à l'identique et covoiturage partiel » et « covoiturage à l'identique et covoiturage partiel sans prise en compte des circuits ». Puis j'ai appliqué ces scénarios sur les trajets domicile-travail d'une part et sur tous les trajets d'autre part. Cela me donne au total 6 scénarios, listés dans le [Tableau 11.1](#).

TABLE 11.1 – Scénarios

Scénario	Modalité		prise en compte des circuits	Motifs des trajets
	à l'identique	partiel		
IdCP	oui	non	avec	pendulaires
PaCP	oui	oui	avec	pendulaires
PaSP	oui	oui	sans	pendulaires
IdCT	oui	non	avec	tous
PaCT	oui	oui	avec	tous
PaST	oui	oui	sans	tous

Nomenclature des noms des scénarios : « *Id* » : covoiturage à l'identique, « *Pa* » : covoiturage à l'identique et partiel, « *C* » : circuits pris en compte, « *S* » : sans prise en compte des circuits, « *P* » : trajets pendulaires, « *T* » : tous les trajets.

11.2.2 Plan d'expérience en étoile

En reprenant les notations utilisées en [Section 9.4](#) :

IV. Ce serait le cas si les algorithmes d'appariement étaient exacts.

- δ^{dist} la flexibilité spatiale,
- δ^t la flexibilité temporelle, avec $\delta^t = \delta_{\min}^t = -\delta_{\max}^t$,
- c la capacité en passagers par véhicule,
- s le taux de sous-échantillonnage de la population ou taux d'adoption du covoiturage (voir [Section 9.3](#)).

L'exécution du plan en étoile consiste en la variation de la valeur de chacun de ces paramètres un à un, pour chacun des scénarios. Les valeurs des *jeux centraux* de δ^{dist} , δ^t , c et s sont 1000 m, 900 s, 4 et 100 % respectivement. Ce sont des valeurs maximales de δ^{dist} , δ^t et c, qui par ailleurs correspondent à des valeurs maximales communes dans la littérature pour l'estimation du potentiel du covoiturage (p. ex., Hasiak & Palmier, [2019](#); Raballand & Laharotte, [2020b](#)).

Les valeurs que prennent chaque paramètre pour le plan en étoile sont listées dans le [Tableau 11.2](#).

TABLE 11.2 – Valeur des paramètres pour les plans en étoile

δ^{dist} (mètres)	[100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000]
δ^t (secondes)	[0, 60, 180, 300, 420, 540, 660, 780, 900]
c	[1, 2, 3, 4]
s (pourcentages)	[0, 20, 40, 60, 80, 100]

Je considère que le nombre de points entre les valeurs extrêmes suffit pour reconnaître le type de courbe que suit l'évolution de la distance évitée en fonction de chaque paramètre et pour interpoler des valeurs intermédiaires avec une précision suffisante. Pour exécuter l'ensemble des jeux de paramètres pour les six scénarios, la durée est d'environ une journée.

11.3 Résultats

La [Figure 11.1](#) présente l'évolution de la distance parcourue évitée en fonction de chacun des paramètres définis ci-dessus. Elle a été produite en considérant l'ensemble des trajets en [VP](#) du périmètre du [SMAG](#). Chaque graphique correspond à la variation d'un paramètre, avec les autres paramètres fixés aux valeurs du jeu central (donc à leur valeur « maximale »), conformément au plan en étoile. Dans chaque graphique, chaque courbe correspond à un scénario parmi ceux présentés dans le [Tableau 11.1](#). Dans le graphique de l'évolution de la distance évitée en fonction de la capacité des véhicules, est également tracée la courbe du *Maximum théorique de km évités*. Celle-ci suit l'intuition que si deux voyageur·euse·s covoiturent ensemble, au plus 50 % de la distance qui aurait

initialement été parcourue par les deux voyageur·euse·s serait évitée. Dans le cas où ce sont 4 voyageur·euse·s qui covoitent, au maximum 80 % de la distance initiale serait évitée. Cette intuition n'est valable que si la distance parcourue par les passager·ère·s est inférieure à celle parcourue par le·la conducteur·rice, ce qui est le cas pour les formes de covoiturage que j'étudie. Cette distance évitée théorique maximale est donnée par la formule suivante :

$$\frac{c}{c+1} D_{\text{appairable}}$$

avec $D_{\text{appairable}}$ la distance totale parcourue par les trajets qui peuvent être passagers, c.-à-d., dont le degré sortant est non nul dans le graphe d'appairabilité. Cette courbe est très proche de celle du scénario *Tous les trajets, covoiturage à l'identique et partiel (circuits ignorés)* (PaST) avec une capacité de 1 et s'en éloigne pour des capacités supérieures. La différence entre la courbe théorique et celle du scénario PaST atteint environ 14 % de la distance parcourue en voiture pour une capacité de 4. Cette différence peut s'expliquer en partie par la qualité de l'algorithme d'appairage, qu'il reste cependant à vérifier.

Je peux évaluer la proportion de participant·e·s au covoiturage tiré·e·s aléatoirement nécessaire pour atteindre l'objectif du PDU. Je trace la distance parcourue évitée en fonction de ce taux de participation au covoiturage en [Figure 11.2](#). Les trajets ciblés sont cette fois uniquement les trajets pendulaires sortant ou entrant du cœur urbain^V, puisque les objectifs du PDU en termes de taux de remplissage concernent uniquement ces trajets. Dans cette figure, les paramètres c , δ^{dist} et δ^t sont définis à, respectivement, 4 passagers, 1 km et 15 min, soit le maximum de chacune des valeurs conformément au plan en étoile.

Sur cette figure, on peut lire que pour éviter 24 % de la distance parcourue en VP sur les flux pendulaires, il faudrait qu'au moins 55 % de la population participe au service de covoiturage^{VI}.

Considérant que les autres paramètres sont fixés à des valeurs maximales, autrement dit qui correspondent à des scénarios de développement du covoiturage très optimistes, je conclus que les objectifs fixés par le PDU sont très ambitieux.

V. Pour rappel, j'ai utilisé l'ensemble de la mobilité VP pour tracer la [Figure 11.1](#). La courbe de la [Figure 11.2](#) ne suit donc pas exactement la distance évitée en fonction taux d'adoption pour *Tous les trajets, covoiturage à l'identique et partiel* dans la [Figure 11.1](#).

VI. En partant de l'estimation de taux de remplissage actuel de 1,1 donnée par le SMMAG, le résultat serait d'environ 48 %.

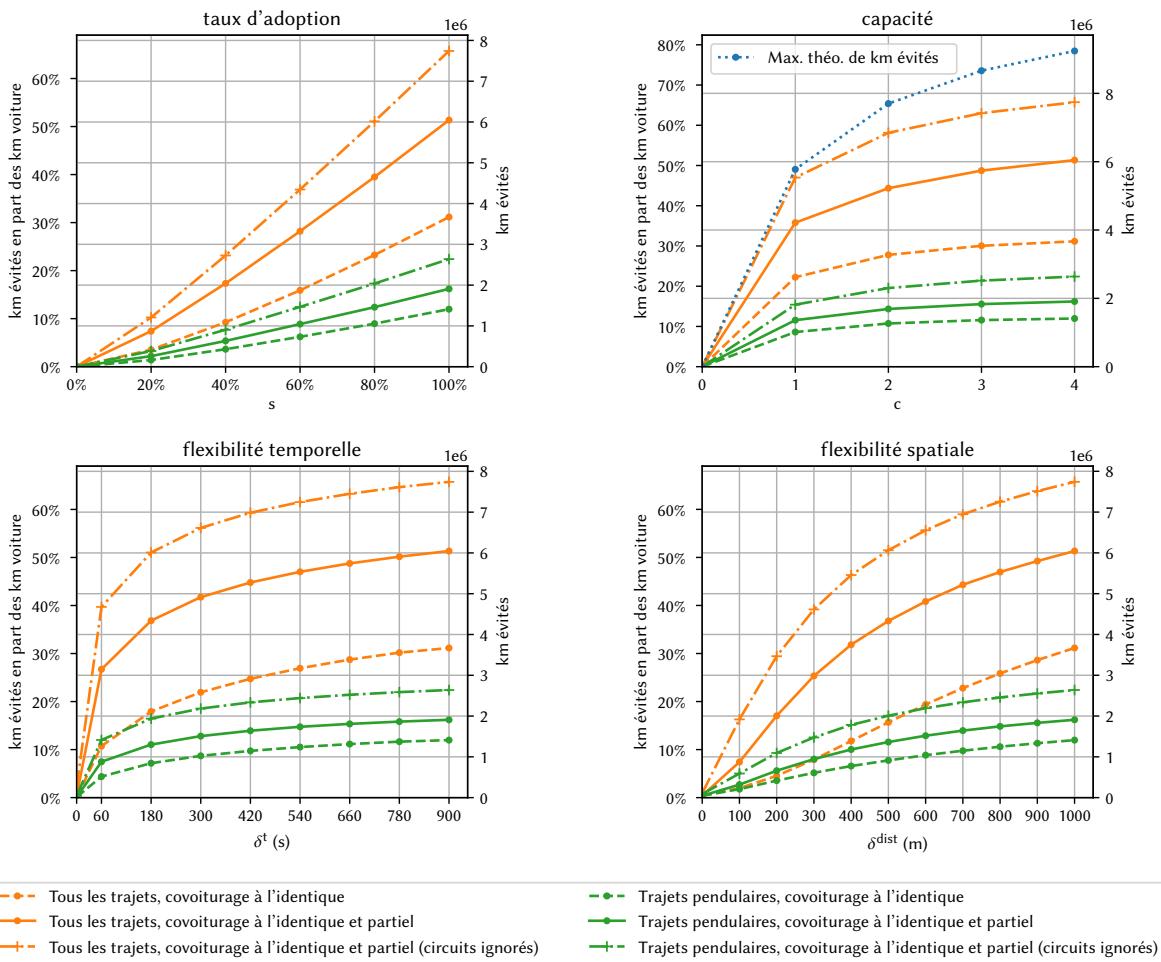


FIGURE 11.1 – Distance parcourue évitée en fonction de la variation de différents paramètres et pour plusieurs scénarios

11.4 Interaction avec d'autres leviers de la stratégie

Un autre levier envisagé dans les stratégies d'atténuation, dont le **PDU**, consiste en la diminution de la part modale du **VP** grâce à un report modal vers les modes doux (vélo et **MAP**) et les **TC**. Pour étudier la compatibilité avec ces leviers qui seraient mis en place en même temps que le développement du covoiturage, je propose de comparer les trajets qui sont faisables en covoiturage et ceux qui sont faisables dans ces autres modes. Si l'ensemble des trajets covoiturables et l'ensemble des trajets faisables dans des modes doux ont beaucoup de trajets en commun, alors il existe un risque élevé de concurrence potentielle entre ces différents modes de déplacement. C'est un phénomène que j'ai déjà étudié sur le **RPC** ([Chapitre 8](#)). J'ai notamment montré que les trajets actuellement covoiturés ont tendance à être de plus en plus courts, et à se faire sur des trajets qui sont de plus en plus faisables en **TC**.

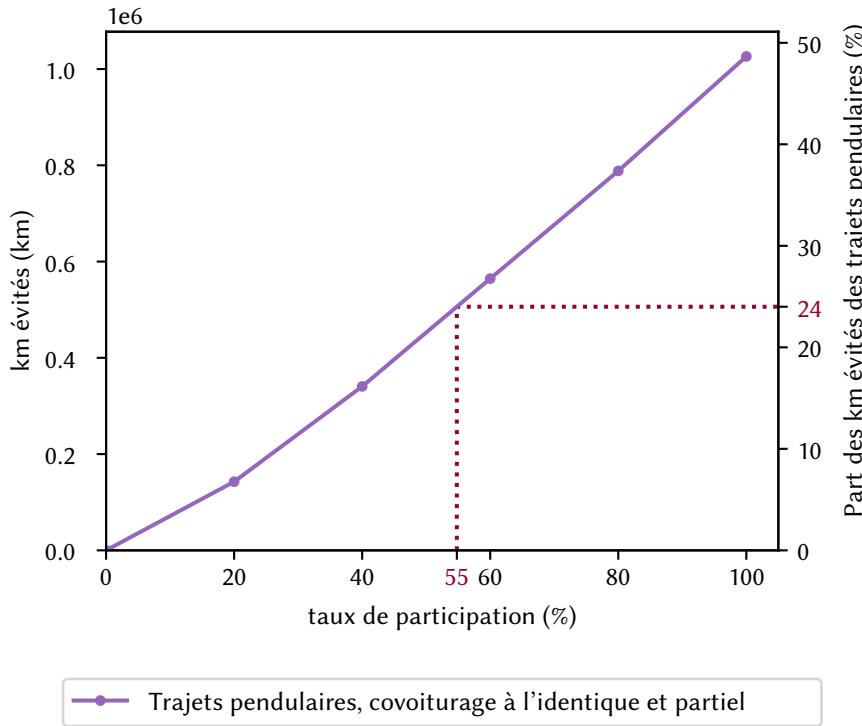


FIGURE 11.2 – Distance évitée en VP grâce au covoiturage en fonction de la part de la population participant au covoiturage (calcul restreint aux trajets sortant ou entrant du cœur urbain)

Pour cette étude, je fais calculer les trajets à vélo et en TC par *GraphHopper*, en utilisant les données du PAN de la même manière que dans le Chapitre 8, c.-à-d., avec les lignes de TC actuelles. Ensuite, je fais varier des conditions c_t et c_d pour lesquelles j'estime qu'un trajet est « faisable » en TC ou en mode doux :

- un trajet est faisable en TC si la durée du trajet en TC est plus grande de c_t que le trajet en VP,
- un trajet est faisable en mode doux si la durée du trajet à vélo est plus grande de c_d que le trajet en VP (j'estime que les trajets faisables en MAP sont inclus dans les trajets faisables à vélo).

Je trace la distance parcourue faisable dans chacun de ces modes en fonction de la distance covoiturée (à partir de tous les trajets VP), la distance en covoiturage étant calculée par MEPCEL avec les paramètres les plus optimistes décrits dans la Section 11.2.2. On observe que presque 30 % de la distance covoiturée pourrait être faite à vélo en s'autorisant 10 min de plus de trajet par rapport au trajet en voiture. En ce qui concerne les TC, ceux-ci pourraient répondre à 20 %

de la demande en mobilité VP (en termes de distance parcourue) avec en s'autorisant 30 min de plus par trajet.

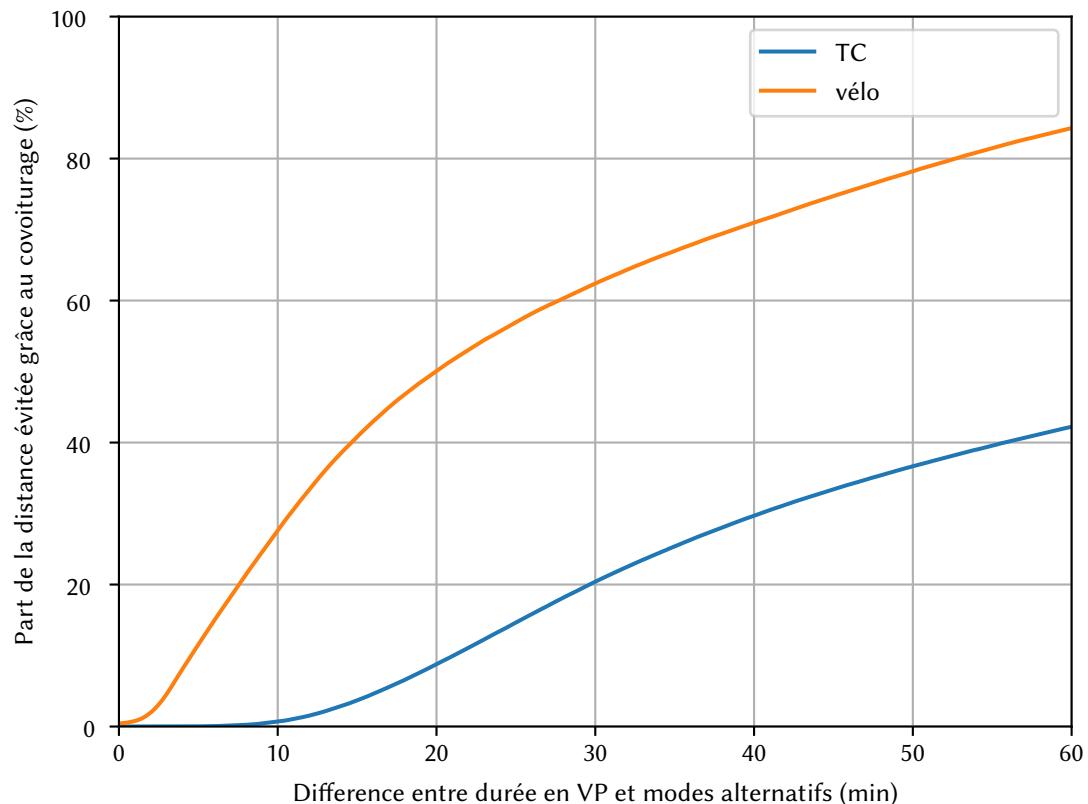


FIGURE 11.3 – Comparaison du potentiel du covoiturage par rapport aux potentiels des TC et des modes doux

11.5 Interprétation des résultats

Les résultats précédents sont à prendre avec précaution compte tenu des limites dont la plupart ont déjà été évoquées dans les Chapitres 9 et 10 :

- les interactions entre les différents leviers envisagés pour réduire les émissions de GES du transport de personnes, comme le télétravail ou le report modal vers les modes doux et les TC ne sont pas directement prises en compte (mais font l'objet d'une étude préliminaire dans la Section 11.4),
- MEPCEL ne considère pas la possibilité que les individus réorganisent leur emploi du temps pour covoiturer,
- je n'évalue le potentiel que de deux modalités de rencontre et de séparation, à l'identique et partiel, mais celles-ci couvrent

une grande partie des leviers concernant le covoiturage mis en place par le **SMMAG** (cela suscite des interrogations par rapport au potentiel d'autres formes de covoiturage, notamment en ce qui concerne la multimodalité, qui feraient potentiellement face à d'autres types de verrous),

- la synthèse de demande en mobilité introduit certains biais à certaines de ses étapes de modélisation, qui impactent surtout la mobilité non pendulaire et l'appariement du *covoiturage partiel*.

Malgré ces limites, je pense tout de même être en mesure de conclure, par mes hypothèses qui rendent globalement le potentiel que j'évalue optimiste, que :

- l'objectif du **PDU** concernant le covoiturage régulier entre le cœur urbain et son extérieur dans le périmètre du **SMMAG** semble difficile à atteindre compte tenu des délais et étant donné la demande en mobilité actuelle.
- Il y a potentiellement une interférence entre les leviers d'augmentation des parts modales du covoiturage, des modes doux et des **TC**. Cette interférence pourrait réduire les potentiels de chacun de ces leviers notamment dans le cas où le covoiturage se développe très fortement. Ce point pourrait être traité dans des travaux ultérieurs.

11.6 Conclusion

Les choix méthodologiques, limites et erreurs auxquels mon étude est confrontée illustrent la difficulté à pallier les limites observées dans la littérature des évaluations d'impacts évités des solutions numériques ([Chapitre 4](#)). Néanmoins, j'ai appliqué dans une certaine mesure les recommandations du [Chapitre 5](#) :

1. En ce qui concerne le périmètre ([Section 5.2](#)), je n'ai pas pris en compte les effets des 1^{er} et 3^{ème} ordres dans mon évaluation, mais j'ai mené une discussion qualitative à propos de ceux-ci ([Chapitre 6](#)).
2. Conformément à la recommandation sur les incertitudes ([Section 5.3](#)), j'ai listé leurs sources possibles ([Chapitres 9 et 10](#)).
3. Ma scénarisation a été explicitée ([Section 5.4](#)), ayant volontairement construit des scénarios globalement optimistes ([Chapitres 9 et 11](#)).
4. Par rapport aux obstacles et aux verrous de la mise en place de la solution numérique ([Section 5.5.1](#)), j'ai paramétré les conditions de mise en place du covoiturage, plutôt que supposé des hypothèses qui pourraient remettre en cause l'ensemble de mes résultats ([Chapitres 9 et 11](#)).

5. J'ai recontextualisé l'évaluation et ses résultats par rapport à une stratégie locale ([Section 5.5.2](#)), le **PDU**. Je remets également en perspective mes résultats avec les autres leviers envisagés dans cette stratégie, à savoir l'augmentation de la part modale des modes doux et des **TC** ([Chapitre 11](#)).

L'étude de potentielles alternatives aux plateformes numériques de covoiturage ([Section 5.5.3](#)) n'a pas été menée dans cette thèse. Cependant, la remise en perspective du covoiturage régulier par rapport aux autres leviers des stratégies peut laisser penser que d'autres leviers (p. ex., les **TC** et les modes doux) pourraient probablement se substituer aux plateformes de covoiturage de manière à répondre, peut-être au moins aussi efficacement, aux enjeux environnementaux de la mobilité.

Structure du chapitre

12.1	Architecture du code	170
12.1.1	Présentation du concept de pipeline	171
12.1.2	Pipeline de calcul de la distance parcourue en VP passager	172
12.2	Détails d'implémentation des graphes d'appairabilité	173
12.2.1	Graphe d'appairabilité pour le covoiturage à l'identique	173
12.2.2	Graphe d'appairabilité pour le covoiturage partiel	176
12.3	Conclusion	178

Dans ce chapitre, je détaille quelques points intéressants de l'implémentation de **MEPCEL**^I. Pour rappel, j'utilise cette implémentation dans l'objectif d'évaluer le potentiel du covoiturage à l'échelle de l'agglomération grenobloise, c'est-à-dire sur centaines de milliers, voire des millions de trajets. Il est donc essentiel que les opérations détaillées dans le [Chapitre 9](#) puissent passer à l'échelle, et dans des temps raisonnables pour pouvoir tester différents scénarios.

En premier lieu, je présente l'architecture générale du code ([Section 12.1](#)). Puis, je présente l'implémentation de la création des graphes d'appairabilité, qui est l'étape de **MEPCEL** qui demande le plus de ressources ([Section 12.2](#)).

En complément, l'[Annexe A](#) est une documentation de développement qui présente quelques prérequis nécessaires pour reproduire les résultats du [Chapitre 11](#), intégrer des fonctionnalités supplémentaires ou tester des scénarios dont les résultats n'ont pas été présentés dans ce manuscrit.

12.1 Architecture du code

Je présente d'abord le concept de pipeline de données, prérequis essentiel pour appréhender le fonctionnement général de l'implémentation de **MEPCEL**^{II} ([Section 12.1.1](#)). Plus particulièrement, je présente ce concept tel qu'implémenté par le module *Synpp*. Ce dernier est un framework développé à l'origine pour le logiciel de synthèse de demande en mobilité de Hörl et Balac

I. Disponible en ligne sous licence libre CeCILL à <https://gitlab.inria.fr/carpooling-potential/carpooling-potential-analyzer>

II. Ce concept est également essentiel à la compréhension de l'implémentation de la synthèse de demande en mobilité de Hörl et Balac ([2021a](#)).

(2021a). Puis, je présente succinctement le pipeline spécifique à l'implémentation de [MEPCEL](#) ([Section 12.1.2](#)).

12.1.1 Présentation du concept de pipeline

Un pipeline de données est une succession d'*étapes* de transformations de données. Chacune de ces *étapes* peut prendre en entrée la sortie d'une ou plusieurs autres étapes. Par exemple, une étape B peut utiliser la sortie d'une étape A comme sa propre entrée. On dit que A est une dépendance directe de B. Il est aussi possible spécifier des *paramètres* pour chaque étape. Par exemple, dans mon implémentation de [MEPCEL](#), j'utilise ces paramètres pour définir les flexibilités spatiales et temporelle, la capacité des véhicules, etc.

Il est bien entendu possible de faire un pipeline avec plusieurs d'*étapes*, et qu'une étape ait plusieurs dépendances. Dans le cas où plusieurs étapes s'enchaînent, on a des dépendances *indirectes*. Par exemple, si C est une dépendance directe de B, C est une dépendance indirecte de A. De ce fait, lors de l'exécution, les étapes d'un pipeline de données doivent être exécutées dans un ordre topologique du graphe de dépendance. On peut représenter le pipeline décrit jusque-là sous forme d'un graphe de dépendance, illustré par la [Figure 12.1](#).

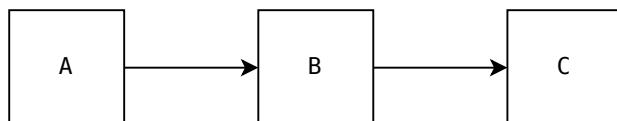


FIGURE 12.1 – Exemple de pipeline

Cette exécution se base sur un système de cache sur disque où chaque résultat d'étape est stocké. Ainsi, les étapes du pipeline qui ont déjà été exécutées avec la même valeur de paramètre que précédemment ne sont pas de nouveau exécutées lors de l'exécution suivante.

Pour donner un exemple, reprenons le pipeline de la [Figure 12.1](#), en spécifiant des paramètres : A a comme paramètre requis `param_A`, B a comme paramètre requis `param_B` et C a comme paramètre requis `param_C`.

Je souhaite exécuter C : dès lors, A, B et C sont *invalidées*, car toutes ces étapes doivent s'exécuter. A, puis B, les dépendances, s'exécutent en premier, puis C s'exécute.

Plus tard, je change la valeur du paramètre `param_B` puis je demande de nouveau le résultat de C : seules B et C sont *invalidées*, car le résultat de A généré à l'exécution précédente reste valable. Par conséquent, seules B puis C s'exécutent.

12.1.2 Pipeline de calcul de la distance parcourue en VP passager

Les grandes étapes du pipeline de **MEPCEL**, à savoir les étapes de calcul du graphe d'appairabilité, du filtrage des trajets, et d'appariement, sont illustrées par la [Figure 12.2](#). Notons que, cette fois, la construction du graphe d'appairabilité se fait indépendamment du filtrage : le graphe est alors généré une fois pour toutes, avec des valeurs de paramètres élevées, de manière que chaque étape de filtrage ne nécessite pas de générer un nouveau graphe.

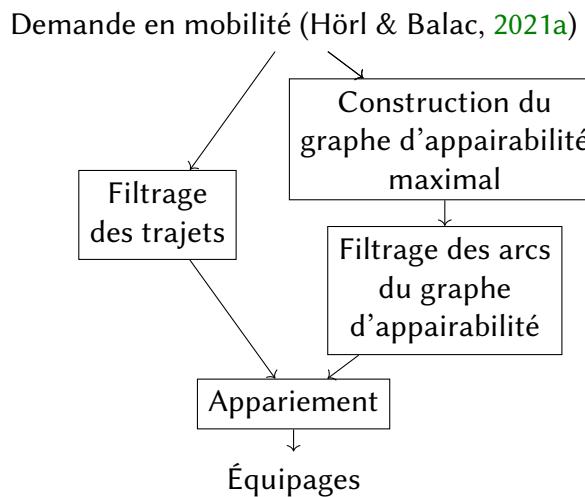


FIGURE 12.2 – Pipeline de données de **MEPCEL (gros grain)**

Pour calculer la distance parcourue en VP passager par l'implémentation de **MEPCEL**, on demande le résultat de l'étape `stats.avoided`^{III}. La [Figure 12.3](#) est une vue détaillée de la [Figure 12.2](#), qui représente le graphe de dépendance de `stats.avoided`, c'est-à-dire toutes les étapes qui ont des dépendances directes ou indirectes de `stats.avoided`.

Le pipeline est construit de manière à réduire le nombre d'étapes à exécuter dans le cas du plan d'expérimentation en étoile décrit en [Section 11.2.2](#). Par exemple, si je souhaite exécuter l'étape `stats.avoided` avec des nouvelles valeurs de paramètres pour `space_constraint`, requis par l'étape `shareability.forms.identical.mask`, seules les étapes suivantes seront invalidées si les résultats des étapes précédentes sont déjà en cache, à savoir, dans l'ordre topologique de dépendance :

- `shareability.forms.identical.pairs`
- `shareability.merged`

III. Cette étape renvoie la distance évitée grâce au covoiturage dans le cas où les trajets ciblés sont uniquement les trajets autosolistes.

- *shareability.subsample_mask*
- *shareability.carpoolable_mask*
- *shareability.graph*
- *matching.methods.greedy_tours*
- *matching.selected*
- *stats.avoided*

12.2 Détails d'implémentation des graphes d'appairabilité

L'étape de construction du graphe d'appairabilité est l'étape qui est la plus gourmande en ressources. Dans l'implémentation, un graphe d'appairabilité est construit en fonction d'une modalité de rencontre et de séparation de covoiturage. Les graphes d'appairabilité pour le *covoiturage à l'identique* et le *covoiturage partiel* sont distincts.

Les graphes d'appairabilité sont construits pour des valeurs de paramètres spatiotemporels assez grandes ($[\delta^{\text{dist}}]_g$ et $[\delta^t]_g$), de sorte que toutes les valeurs pour lesquelles on souhaite avoir un résultat soient inférieures. De cette manière, afin d'avoir un résultat pour des valeurs inférieures, il suffit de filtrer des arcs des graphes d'appairabilité plutôt que de reconstruire un graphe. Cela évite d'avoir à reconstruire des graphes d'appairabilité pour chaque valeur des paramètres $[\delta^{\text{dist}}]_g$ et $[\delta^t]_g$.

Il est possible de mettre au point un autre pipeline de données dans lequel tous les couples de trajets compatibles seraient calculés sans étape intermédiaire, ce qui force à tout recalculer à chaque nouvelle valeur des paramètres $[\delta^{\text{dist}}]_g$ et $[\delta^t]_g$. Cependant, cela nécessite un long temps de calcul et/ou beaucoup de ressources. J'utilise alors des structures de données spatiales qui permettent d'accélérer la recherche de paires de trajets appairables.

Dans cette section, je présente les implémentations des construction du graphe d'appairabilité pour le covoiturage à l'identique (Section 12.2.1) et le covoiturage partiel (Section 12.2.2).

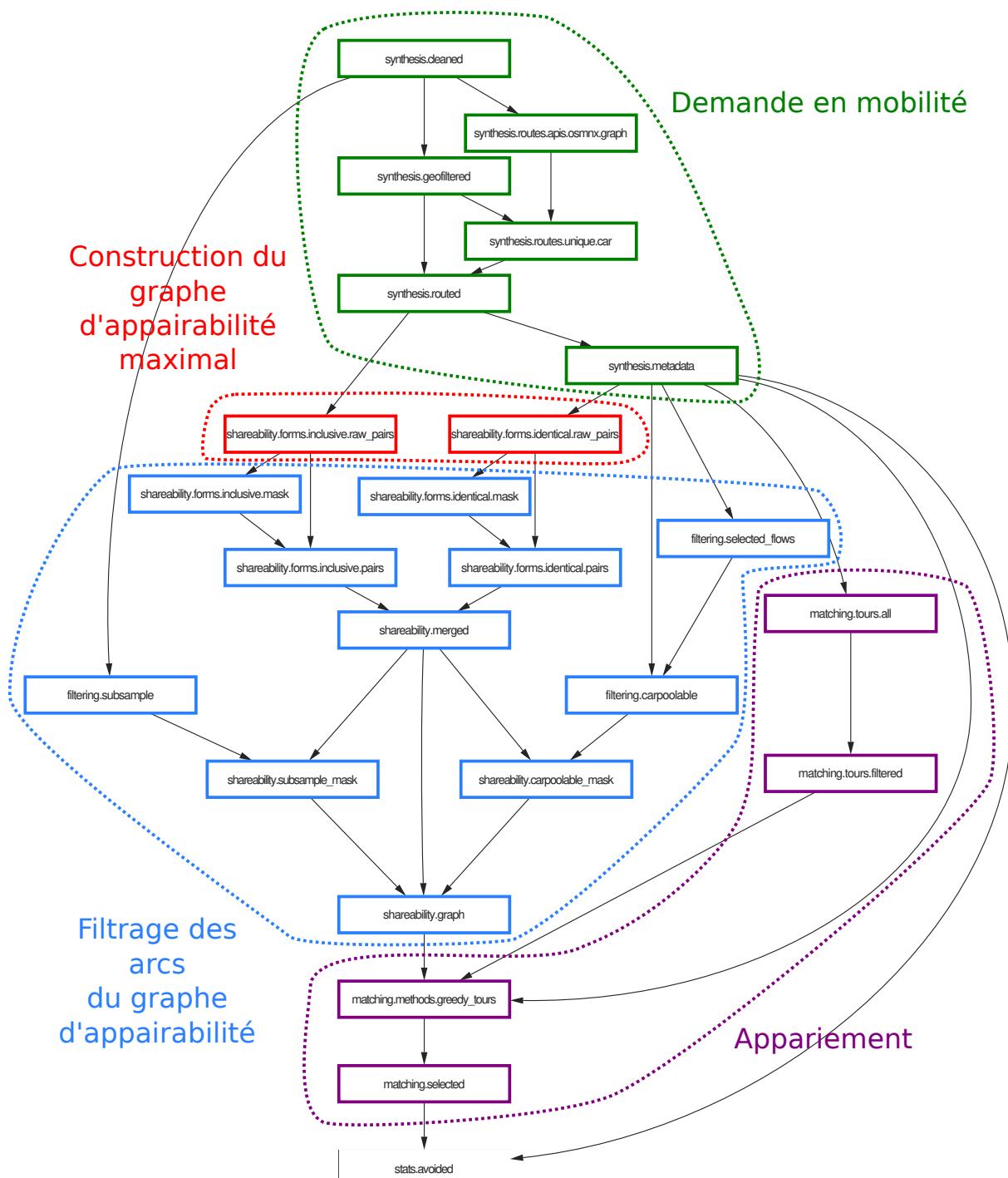
12.2.1 Graphe d'appairabilité pour le covoiturage à l'identique

Rappelons le format des trajets d'un·e passager·e et d'un·e conducteur·rice :

$$\tau_{\text{pa}} = (p_{\text{pa}}, o_{\text{pa}}, d_{\text{pa}}, t_{\text{pa}}^o, t_{\text{pa}}^d)$$

$$\tau_{\text{co}} = (p_{\text{co}}, o_{\text{co}}, d_{\text{co}}, t_{\text{co}}^o, t_{\text{co}}^d)$$

Le *covoiturage à l'identique* est donné par la conjonction des conditions ci-dessous, qui dépendent de paramètres de flexibilité spatiale δ^{dist} et de flexibilité temporelle δ^t_{\min} et δ^t_{\max} .

FIGURE 12.3 – Pipeline de données de [MEPCEL](#) (grain fin)

- $p_{pa} \neq p_{co}$
les personnes des deux trajets sont différentes (on ne peut pas covoiturer avec soi-même),
- $\text{dist}(o_{pa}, o_{co}) \leq \delta^{\text{dist}}$
la distance entre les origines des deux trajets est inférieure à la flexibilité spatiale,
- $\text{dist}(d_{pa}, d_{co}) \leq \delta^{\text{dist}}$
la distance entre les destinations des deux trajets est inférieure à la flexibilité spatiale,
- $t_{pa}^o - t_{co}^o \in [\delta_{\min}^t, \delta_{\max}^t]$ ou $t_{pa}^d - t_{co}^d \in [\delta_{\min}^t, \delta_{\max}^t]$
la différence entre les heures de départ (ou d'arrivée, en fonction des motifs du trajet^{IV}) est dans les limites de la flexibilité temporelle.

Voulant construire un graphe d'appairabilité « maximal », je sélectionne une valeur de $[\delta^{\text{dist}}]_g$ et de $[\delta^t]_g$ telle que

$$\forall \delta^{\text{dist}} \in \Delta^{\text{dist}}, \delta^{\text{dist}} \leq [\delta^{\text{dist}}]_g \text{ et } \forall \delta^t \in \Delta^t, \delta^t \leq [\delta^t]_g$$

avec Δ^{dist} et Δ^t les ensembles des valeurs de paramètre de distance et de temps utilisés dans tous mes plans en étoile (voir [Section 11.2.2](#)).

Comme indiqué dans la [Figure 12.2](#), j'ai implémenté la construction du graphe d'appairabilité pour le covoiturage à l'identique de sorte qu'elle s'exécute en deux temps :

1. La construction d'un graphe dont les arcs représentent les paires de trajets dont les origines sont éloignées au plus de $[\delta^{\text{dist}}]_g$; il s'agit de l'étape *Construction du graphe d'appairabilité maximal*.
2. La suppression des arcs dont les paires représentées ne respectent pas la contrainte spatiale δ^{dist} entre les destinations et la contrainte temporelle au départ ou à l'arrivée δ^t ; il s'agit de l'étape *Filtrage des trajets*.

Pour la première étape, j'utilise un arbre kd, une structure de donnée partitionnant l'espace en regroupant les points les plus proches. Plus précisément, pour filtrer les paires d'origines qui sont proches, j'utilise la méthode `query_pairs` du module Python SciPy `KDTree`^V, pour trouver toutes les paires de points de l'arbre kd qui sont éloignés d'une distance d'au plus $[\delta^{\text{dist}}]_g$.

IV. Par exemple, je considère que la contrainte porte sur l'heure d'arrivée plutôt que sur l'heure de départ lorsqu'il s'agit de se rendre au travail.

V. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.spatial.KDTree.html>

Dans un second temps, je conserve uniquement les paires de trajets dont les contraintes de flexibilité spatiales sur la destination et temporelles sont respectées. Pour ce faire, les calculs sont faits de sorte à tirer avantage des opérations vectorielles : d'abord le calcul des distances à la destination sur l'ensemble des paires, puis le calcul des différences temporelles à l'origine ou à l'arrivée sur l'ensemble des paires.

Les premières étapes de création de graphe et de filtrage pour les contraintes spatiales sont illustrées dans la [Figure 12.4](#).

12.2.2 Graphe d'appairabilité pour le covoiturage partiel

Pour rappel, les conditions liées au covoiturage partiel pour deux trajets $\tau_{pa} = (p_{pa}, o_{pa}, d_{pa}, t_{pa}^o, t_{pa}^d)$ et τ_{co} et R_{co} l'itinéraire de τ_{co} , sont les suivantes :

- $p_{pa} \neq p_{co}$
les personnes des deux trajets sont différentes (on ne peut pas covoiturer avec soi-même),
- $\text{dist}(o_{pa}, o_{pa} \leadsto R_{co}) \leq \delta^{\text{dist}}$
la distance entre l'origine du passager et le chemin du conducteur est inférieure à la flexibilité spatiale,
- $\text{dist}(d_{pa}, d_{pa} \leadsto R_{co}) \leq \delta^{\text{dist}}$
la distance entre la destination du passager et le chemin du conducteur est inférieure à la flexibilité spatiale,
- $t_{pa}^o - t_{pa}^o \leadsto R_{co} \in [\delta_{\min}^t, \delta_{\max}^t]$ ou
 $t_{pa}^d - t_{pa}^d \leadsto R_{co} \in [\delta_{\min}^t, \delta_{\max}^t]$
la différence entre l'heure de départ (ou d'arrivée, en fonction des motifs du trajet) du passager et l'heure de passage le plus proche du conducteur est dans les limites de la flexibilité temporelle.

De la même manière que pour le covoiturage à l'identique, le graphe d'appairabilité pour le covoiturage partiel se construit en deux temps :

1. la construction du graphe où chaque arc représente une paire de trajet dont l'origine d'un trajet est « assez proche » de la route de l'autre trajet,
2. la suppression des arcs ne respectant pas les autres conditions.

Cette fois, la distance contrainte se trouvant entre une ligne et point, et non entre deux points, on ne peut pas utiliser l'arbre kd. J'utilise alors un arbre quaternaire ou quadtree : le quadtree permet

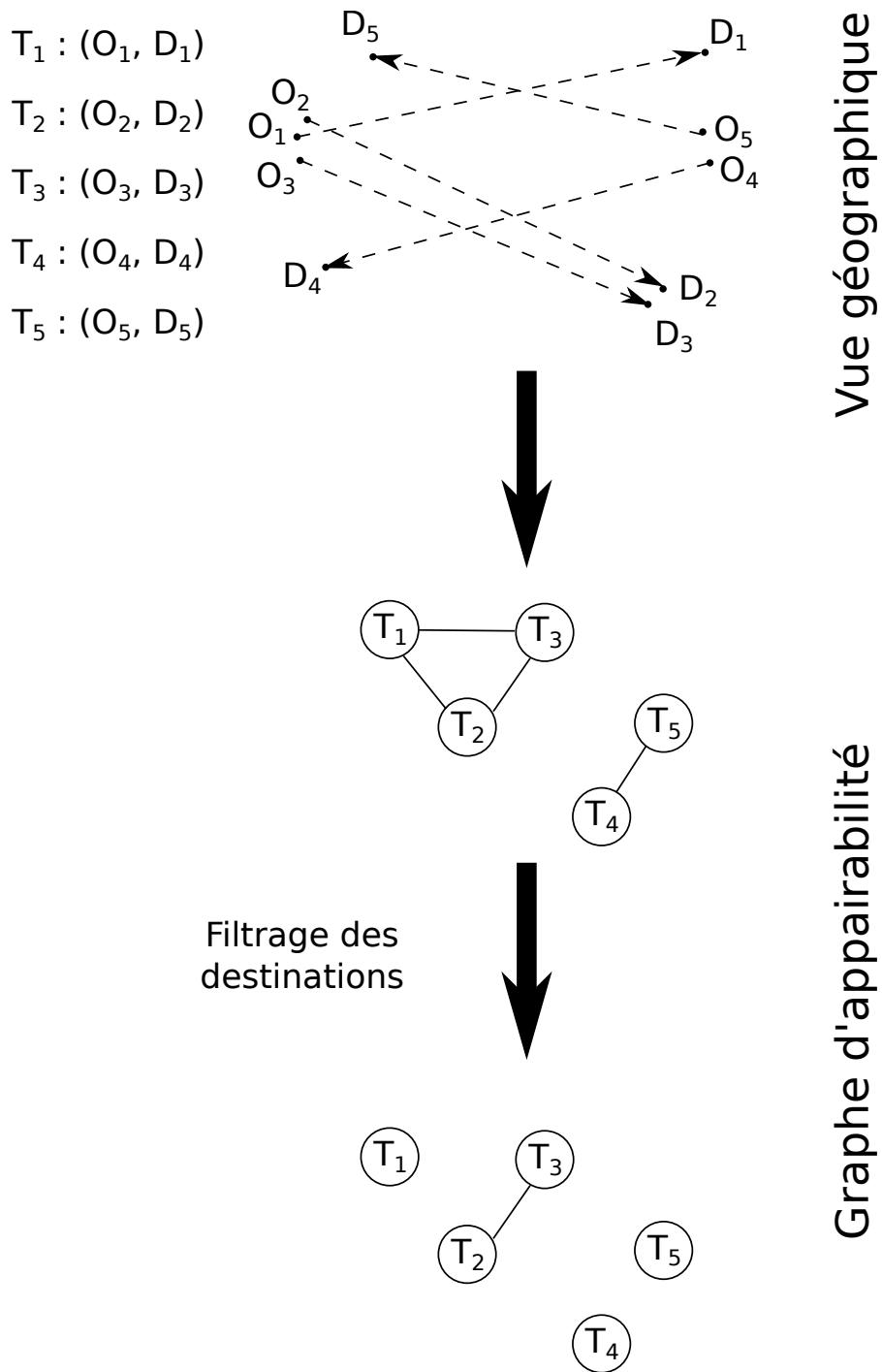


FIGURE 12.4 – Illustration de la construction du graphe d'appairabilité pour le covoiturage à l'identique sur un petit nombre de trajets

de stocker des rectangles et de trouver facilement les intersections entre eux.

Je fais correspondre à chaque type de géométrie un rectangle :

- une route est représentée par son rectangle englobant,
- un point d'origine ou de destination est représenté par un carré de côté $2[\delta^{\text{dist}}]_g$.

Ensuite, je fais construire une première version du graphe d'appairabilité à partir des intersections des rectangles : les arcs correspondent aux couples de trajets dont les carrés de l'origine et de la destination de l'un ont une intersection non vide avec le rectangle englobant de l'autre trajet. Le premier est alors considéré comme passager potentiel du second. Enfin, à partir de cette première version de graphe, les arcs sont filtrés en fonction des autres contraintes temporelles et de personnes différentes, de la même manière que pour la construction du graphe d'appairabilité pour le *covoiturage à l'identique*.

Un exemple de calcul d'appairabilité est illustré en [Figure 12.5](#). Le graphe d'appairabilité pour le *covoiturage partiel* est ainsi dirigé, contrairement au graphe pour le covoiturage à l'identique.

12.3 Conclusion

Ce court chapitre a donné un aperçu de quelques optimisations faites du point de vue de l'architecture de l'implémentation de [MEPCEL](#), ainsi que du calcul des graphes d'appairabilité. Pour rappel, le code complet est disponible sous licence libre de manière à pouvoir être étudié, modifié et réutilisé.

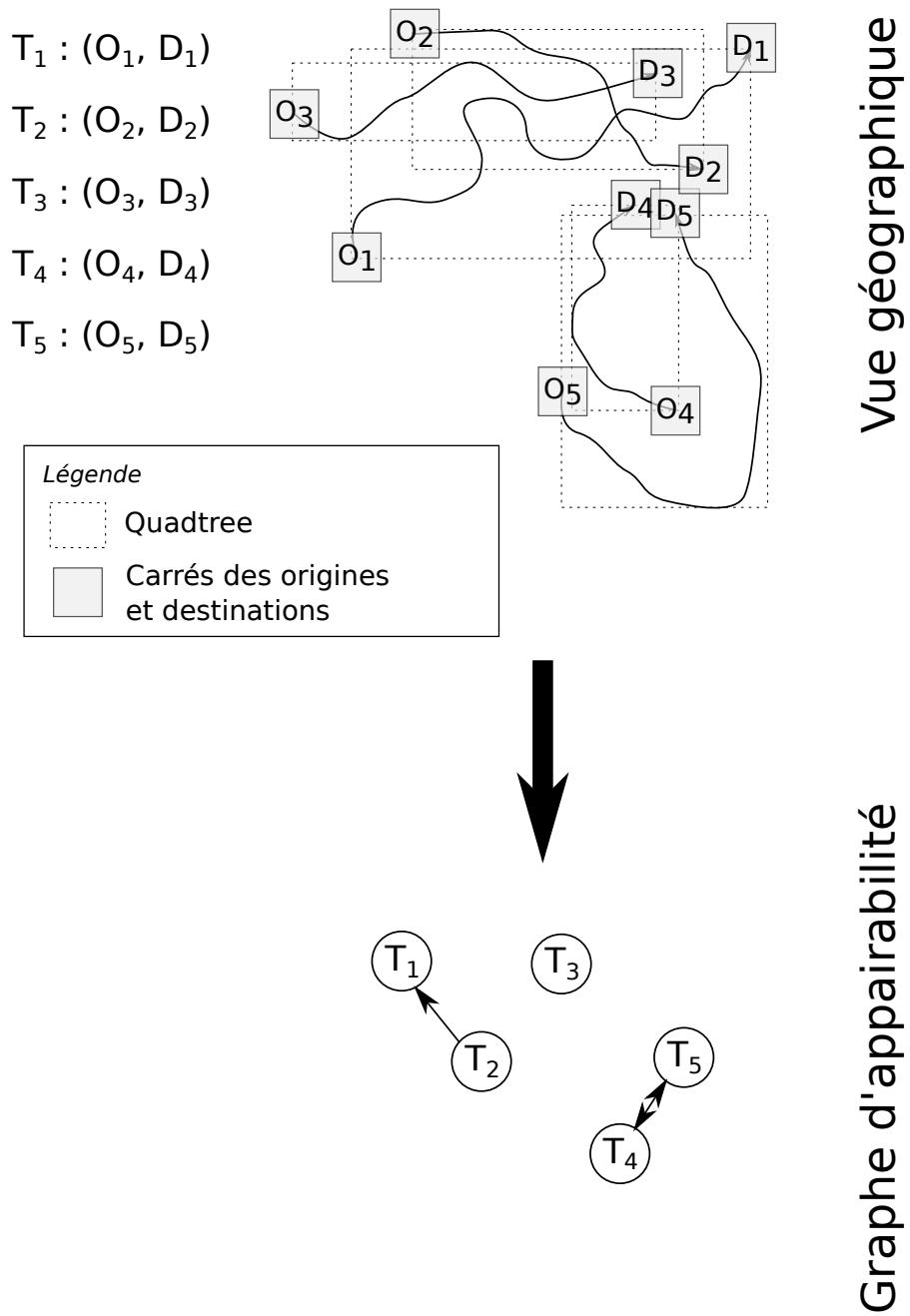


FIGURE 12.5 – Exemple de création de graphe d'appairabilité pour le covoiturage partiel

Les points d'origine et de destination sont aux centres des carrés opaques (buffers). Ces carrés sont de côté $2[\delta^{\text{dist}}]_g$.

Les rectangles en pointillés sont les rectangles englobants des routes.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les stratégies de décarbonation face à l'urgence climatique sont en partie fondées sur le numérique. L'existence d'un débat scientifique sur le potentiel environnemental de ces technologies face à l'urgence écologique et climatique soulève un véritable enjeu : si les attentes qui reposent sur le numérique s'avéraient plus élevées que ce qu'on peut raisonnablement espérer, alors il serait nécessaire de remettre en question ces stratégies ([Chapitre 1](#)). Parmi les acteurs poussant à la mise en place des solutions numériques face à l'urgence écologique, on peut citer les gouvernements, les industriels (GeSI, 2015, 2019 ; GSMA & Carbon Trust, 2019), les ONG (WWF & HP, 2008)... L'ambivalence du numérique, qui serait « à la fois problème et solution », est visible également dans le monde académique, comme illustrée par la controverse sur l'impact net du numérique (Freitag et al., 2021) ([Chapitre 2](#)). C'est, entre autres, ce qui m'a motivé à m'intéresser à l'évaluation du potentiel des solutions numériques pour l'atténuation des impacts environnementaux. Dans cette thèse, j'ai traité principalement la question suivante : comment évaluer les impacts évités par une solution numérique face à l'urgence écologique ?

CONTRIBUTIONS À L'ÉVALUATION DES IMPACTS ÉVITÉS DE SOLUTIONS NUMÉRIQUE Pour traiter ma question de recherche, j'ai d'abord réalisé un état de l'art qui met notamment en évidence que les méthodologies d'évaluation des impacts directs, bien qu'imparfaites, semblent relativement stabilisées ([Chapitre 3](#)). En revanche, en ce qui concerne les effets indirects des solutions numériques, il n'existe pas de méthodologie consensuelle pour les prendre en compte, si bien qu'une grande diversité d'approches existe dans la littérature. Cette dernière présente par ailleurs des limites récurrentes concernant le périmètre des évaluations, les incertitudes et les hypothèses sous-jacentes ([Chapitre 4](#)). J'ai constaté que la contextualisation des études dans les stratégies d'atténuation est largement ignorée par la communauté. Pourtant, ce point est essentiel lorsqu'il s'agit d'évaluer l'intérêt des solutions numériques pour les stratégies d'atténuation.

Suite à ces constats, j'ai proposé une série de recommandations visant à améliorer les évaluations des impacts environnementaux de solutions numériques ([Chapitre 5](#)) : prendre en compte les effets des 1^{er} (liés à l'infrastructure matérielle) et 3^{ème} ordres (les effets systémiques, dont les effets rebond) en plus des effets de 2^{ème} ordre (de l'application de la solution numérique, notamment les effets d'optimisation ou de substitution), lister les sources d'incertitudes,

analyser la sensibilité des résultats aux données d'entrée, expliciter la scénarisation et définir proprement le scénario « sans solution numérique », recontextualiser l'évaluation et les résultats dans les stratégies d'atténuation en les comparant aux objectifs, en discutant des obstacles et des verrous à la mise en place des solutions numériques et en discutant des potentielles alternatives, notamment non numériques. Ces recommandations, qui ne sont pour la plupart pas nouvelles, sont minimales et loin d'être suffisantes pour garantir la fiabilité des résultats. De ce fait, dans bien des cas, il est difficile de conclure sur le potentiel d'une solution numérique avec un haut niveau de confiance. Dans certains cas, le caractère bénéfique de l'introduction d'une solution numérique n'est même pas évident.

LE CAS PARTICULIER DES PLATEFORMES DE COVOITURAGE

RÉGULIER Dans la deuxième partie, j'ai traité un cas d'étude spécifique : les plateformes numériques de covoiturage régulier, envisagées comme des solutions numériques dans les stratégies de décarbonation dans le secteur du transport de voyageurs ([Chapitre 6](#)). Je me suis spécifiquement intéressé à la question suivante : *sous quelles conditions les plateformes de covoiturage régulier peuvent-elles répondre aux objectifs formulés dans le Plan de Déplacements Urbains (PDU) grenoblois*? L'évaluation de l'impact de ces plateformes, ainsi que celui du covoiturage en général, soulève toutes les difficultés de la mise en pratique des recommandations décrites dans la première partie.

L'état de l'art en lien avec le potentiel du covoiturage s'intéresse à une variété de problèmes qui nécessitent, de la même manière que pour l'évaluation des impacts évités d'une solution numérique en général, une variété de méthodologies ([Chapitre 7](#)). Je me suis intéressé au covoiturage préorganisé et sans multimodalité, selon deux formes d'organisation : le *covoiturage à l'identique*, où les covoitureur·euse·s ne peuvent se rejoindre qu'à leur origine et se séparer qu'à leur destination, et le *covoiturage partiel*, où le·la conductrice peut prendre des passager·ère·s et les déposer en route. À ma connaissance, il n'existe aucun résultat dans la littérature correspondant à ma question de recherche et aux formes de covoiturage que je considère.

La première étude que je présente est un préliminaire dans lequel je m'intéresse aux évolutions récentes de l'utilisation des plateformes de covoiturage régulier ([Chapitre 8](#)). À première vue, une modélisation simple à partir des données du [Registre de Preuves de Covoiturage \(RPC\)](#) permet de rendre compte que la plupart des trajets covoiturés actuellement réalisés via des plateformes auraient probablement été autosolistes. Toutefois, les évolutions enregistrées par le [RPC](#) montrent des trajets de plus en plus courts, et qui

pourraient davantage être faits en mode doux (en [marche à pied](#) et à vélo) et en [transport en commun \(TC\)](#). Cette tendance est corroborée par la stratégie de certains opérateurs qui voient un potentiel de développement sur les flux de mobilité les plus denses alors qu'ils sont potentiellement déjà bien desservis par les infrastructures cyclables et de [TC](#). Suivant le niveau de saturation de ces infrastructures, à l'avenir, les plateformes de covoiturage seront amenées à compléter l'offre de transport préexistante, ou, au contraire, à entrer en compétition avec celle-ci.

La seconde étude consiste en l'évaluation du potentiel du covoiturage dans le cadre de la problématique que j'ai posée précédemment. J'ai conçu une méthode que j'ai dénommée [Méthode d'évaluation du potentiel du covoiturage à l'échelle locale \(MEPCEL\)](#) et qui permet d'étudier les effets de certains freins au covoiturage régulier ([Chapitre 9](#)) : un faible taux de participation, les dispersions spatiales et temporelles des activités des voyageur·euse·s (travail, domicile, loisirs...), les disponibilités des [véhicule particulier \(VP\)](#) des voyageur·euse·s (c.-à-d., l'impossibilité d'être conducteur·rice sans avoir son [VP](#) à disposition ou d'être passager·ère alors qu'on est censé conduire son [VP](#)), et les emplois du temps des voyageur·euse·s (p. ex., le fait qu'un individu prévoit d'aller faire ses courses entre son lieu de travail et son logement peut l'empêcher de covoiturer sur l'un ou plusieurs de ses trajets).

[MEPCEL](#) ignore certains effets du covoiturage ([Chapitre 9](#)) :

- les interactions entre les différents leviers envisagés pour réduire les émissions de [GES](#) du transport de personnes, comme le télétravail ou le report modal vers les modes doux et les [TC](#) ne sont pas directement prises en compte (mais font l'objet d'une étude préliminaire dans la [Section 11.4](#)),
- [MEPCEL](#) ne considère pas la possibilité que les individus réorganisent leur emploi du temps pour covoiturer,
- je n'évalue le potentiel que de deux modalités de rencontre et de séparation (*à l'identique* et *partiel*), mais celles-ci couvrent une grande partie des leviers concernant le covoiturage mis en place par le [Syndicat Mixte des Mobilités de l'Aire Grenobloise \(SMMAG\)](#).

De même, l'utilisation conjointe de [MEPCEL](#) avec le logiciel de synthèse de demande en mobilité de Hörl et Balac ([2021a](#)) est susceptible d'introduire des biais qui pourraient impacter les résultats, surtout dans le cas de la mobilité non pendulaire et du *covoiturage partiel* ([Chapitre 10](#)).

Malgré ces limites, je pense tout de même être en mesure de conclure, du fait d'hypothèses globalement optimistes, que l'objectif du [PDU](#) concernant le covoiturage régulier dans le périmètre du

[SMMAG](#), entre le cœur urbain et sa périphérie, semble difficile à atteindre d'ici à 2030, compte tenu de la demande en mobilité actuelle. Par ailleurs, il y a potentiellement une interférence entre les leviers d'augmentation des parts modales du covoiturage, des modes doux et des [TC](#). Si cela est confirmé, l'activation d'un de ces leviers tendrait à diminuer les potentiels des autres leviers. Par exemple, il se pourrait qu'en cas d'un développement très important du covoiturage, le potentiel des [TC](#) et des modes doux soit fortement réduit ([Chapitre 11](#)).

Tous les logiciels utilisés et tous les fichiers sources produits dans le cadre de cette thèse sont disponibles sous licence libre, les liens pour ces derniers étant donnés en introduction du manuscrit ([Section 1.5](#)). Quelques spécificités de l'implémentation sont décrites dans le [Chapitre 12](#) et une documentation de développement est donnée en [Annexe A](#).

13.1 Discussion

Ma thèse a permis de fournir quelques éléments de réponse à ma question de départ : *Quel est le potentiel des solutions numériques face à l'urgence écologique ?*

Pour rappel, en employant le terme *urgence*, j'insiste sur la nécessité d'une action massive et rapide, qui n'est plus à démontrer ([Calvin et al., 2023](#); [Richardson et al., 2023](#)).

Les limites méthodologiques des évaluations que j'ai rencontrées dans la littérature, dont une large part laisse à penser que le numérique aide à la réduction des impacts dans d'autres secteurs, rendent le potentiel des solutions numériques en réalité très incertain. Cela est dû au fait que, dans bien des cas, le déploiement des solutions numériques étudiées est conditionné à un double pari : d'un côté, des changements socioéconomiques massifs, et de l'autre, de forts progrès technologiques.

Par exemple, mon évaluation des plateformes de covoiturage régulier met en évidence le premier pari : je montre en effet que pour respecter les objectifs du [PDU](#), il faudrait une évolution rapide et massive des comportements permettant de passer d'un taux d'adoption de ces plateformes quasi nul, à plus de la moitié des voyageurs autosolistes. Pour certaines solutions numériques, le rôle de la technologie face à de tels verrous est même parfois minimal. Face à ces constats, je me demande légitimement s'il est raisonnable de miser autant sur des solutions numériques, dont l'effet actuel net n'est pas consensuel et le potentiel reste très hypothétique.

Ces premières conclusions étant posées, je suis inquiet de l'avenir de notre planète face à l'urgence écologique. En effet, je relève trois problèmes majeurs qui me font douter que les stratégies

d'atténuation parviendront à contenir le réchauffement à des niveaux acceptables.

Premièrement, et nous l'avons vu dans mon travail en ce qui concerne les solutions numériques, il n'est pas du tout évident qu'il soit réellement possible d'atteindre les objectifs formulés par ces stratégies.

Deuxièmement, de nombreuses décisions qui ont été ou sont prises aujourd'hui ne respectent pas, voire vont exactement à l'encontre de ces stratégies. On peut citer l'exemple des « bombes climatiques », qui ont le pouvoir d'anéantir tout espoir de respecter les objectifs posés à l'échelle internationale (K. Kühne et al., 2022).

Ces deux premiers points peuvent être illustrés dans le secteur de la mobilité. Mon étude sur l'augmentation du taux de remplissage des véhicules grâce au covoiturage montre en effet la difficulté à atteindre l'objectif posé par la SNBC et le PDU grenoblois. En parallèle du développement des politiques d'atténuation, le poids moyen des VP est en augmentation (Bourgeois, 2023; Gaillard, 2023; Keil & Steinberger, 2023). On pourrait rétorquer qu'il s'agit d'une demande des consommateurs, mais ce serait oublier le fait que la publicité pour les SUV représente entre 3 h 20 et 3 h 50 de temps d'antenne par jour (comme l'ont montré Cannet et al., 2021 pour 2019), et que la proposition de la Convention Citoyenne pour le Climat visant à les interdire n'a pas été retenue par le Plan Climat et résilience (« Les SUV, néfastes pour l'environnement, à l'honneur dans la pub », 2021). De même, de nouvelles autoroutes continuent à être construites alors même que leur intérêt social et environnemental est contesté (Bénos & François, 2023). Pire encore, ces infrastructures risquent de faire un « appel d'air » de trajets supplémentaires, aussi appelé trafic induit (Héran, 2019).

Pour finir, le dernier rapport du GIEC le montre lui-même : les contributions déterminées au niveau national issues de l'Accord de Paris, qui rappelons-le ne sont de toute façon pas respectées, ne sont pas suffisantes pour rester sous les 2 °C de réchauffement global, et limiteraient plutôt la hausse à 2,5 °C, *si elles étaient mises en œuvre intégralement* (UNEP, 2023).

Ces constats laissent entrevoir des perspectives désastreuses. Il est légitime de se demander si l'attachement profond à une croissance économique sans limites n'est pas ce qui nous rend aveugles à ses conséquences environnementales et sociales. Il existe des chercheur·e·s explorant des voies alternatives, mais ils restent peu nombreux.

Parmi ces alternatives et dans la même lignée que le rapport du Club de Rome (cité en Chapitre 1), la théorie de la décroissance émerge comme une proposition radicale. En réorientant nos objectifs vers la satisfaction des besoins humains fondamentaux plutôt que

vers une croissance infinie, la décroissance offre une vision différente, axée sur la durabilité, la justice sociale et la préservation de notre environnement. Parmi les chercheurs qui travaillent sur la notion de décroissance, notamment en économie, on peut citer Hickel et al. (2022) et Parrique (2019), Julia Steinberger, Giorgio Kallis...

13.2 Travaux futurs

J'ai déjà évoqué quelques suites possibles à mon travail de thèse au cours de ce manuscrit :

- une revue de littérature systématique des limites identifiées dans le [Chapitre 4](#), pour, entre autres, évaluer quantitativement leur récurrence et les comparer,
- une évaluation du report modal vers le covoiturage actuel à l'aide d'un modèle de choix complet en prenant en compte le trafic ([Chapitre 8](#)),
- une évaluation de l'erreur introduite par l'implémentation actuelle de l'appariement dans [MEPCEL](#), ou l'implémentation d'un appariement plus optimal ([Chapitre 9](#)),
- une évaluation de l'effet de l'utilisation d'un modèle de trafic de type [système multi-agents \(SMA\)](#) sur le résultat du potentiel du covoiturage ([Chapitre 10](#)),
- une évaluation quantitative des propriétés de la synthèse de population et son amélioration, qui fait déjà l'objet de développements au moment de l'écriture de ce manuscrit ([Chapitre 10](#)).

De manière générale, cette thèse montre la difficulté à quantifier des impacts environnementaux. Par exemple, des études ressort régulièrement la problématique du manque de données de qualité. Systématiquement, la réponse à ce manque de données est qu'« il nous faut plus de données ». De façon similaire, les incertitudes inhérentes à l'évaluation environnementale appellent généralement à dire qu'« il faut faire plus de recherche ».

Gardons d'abord à l'esprit que cet élan vers plus de données et de quantification implique de nouveaux moyens techniques et des législations favorables, ce qui soulève de nouvelles problématiques à la fois environnementales (p. ex., *Quelle nouvelle empreinte ajoutée au numérique pour des nouveaux capteurs ?*) et sociales (p. ex., *Ces nouveaux outils pourraient-ils servir à une surveillance de masse ?*).

Toutefois, une tendance que j'observe de plus en plus, en particulier dans l'industrie à travers les différents rapports et publications que j'ai explorés, et même dans les communautés scientifiques que j'ai cotoyées, est que l'évaluation devienne une finalité en soi, se substituant souvent à la mise en place d'actions concrètes.

En guise de conclusion à ce manuscrit, je souhaite alors souligner l'importance de la problématisation dans nos travaux académiques : la capacité à poser les bonnes questions, à remettre en question les normes établies et à explorer de nouvelles perspectives est une part essentielle du processus de recherche. Par ailleurs, cela a été une dimension centrale de mon propre travail de thèse. D'autre part, la nature même des questions environnementales appelle à des approches interdisciplinaires, voire transdisciplinaires. Allant à l'encontre du silotage habituel des formations et de la recherche, ces approches permettent la compréhension des problèmes complexes qui caractérisent notre monde dans le contexte de l'urgence écologique.

ANNEXES

Structure du chapitre

- A.1 Structures de données 189
 - A.2 Données d'entrée 190
 - A.3 Implémentation d'une étape 190
 - A.4 Organisation du répertoire 192
-

Cette annexe détaille les concepts qu'il est essentiel de comprendre pour contribuer à l'implémentation de **MEPCEL**¹. De cette manière, j'espère faciliter suffisamment la reproductibilité de mes résultats et toute contribution technique pour toute personne ayant des bases en Python. Le code de l'analyse du covoiturage représente près de 4000 lignes de code en Python, hors commentaires, réparties dans 82 fichiers. Ce nombre de lignes de codes comprend, en plus de ce qui est détaillé dans ce manuscrit, plusieurs versions de certaines fonctions (avec des fonctionnalités et des performances variables) et aux tests unitaires.

L'implémentation de **MEPCEL**, comme celle du logiciel de synthèse de population de Hörl et Balac (2021a), sont développées à partir d'un framework de pipeline de données sous licence Open-Source (MIT), *Synpp*. Je présente son usage dans la suite.

A.1 Structures de données

Pour l'implémentation, je fais usage de modules Python externes pour alléger le code et réutiliser des implémentations existantes relativement fiables et efficaces. J'utilise notamment les structures de données suivantes :

- Les objets géométriques du module *Shapely*,
- Les tableaux ou GeoDataFrames du module *Pandas*,
- Le graphe du module *NetworkX*.

OBJETS GÉOMÉTRIQUES DE SHAPELY Trois types de géométrie de base sont utilisées dans l'analyse du potentiel de covoiturage : *Point*, *LineString* et *Polygon*.

Il est possible de

- calculer les intersections entre ces différentes géométries (qui sera un autre type de géométrie, en fonction des deux géométries dont on veut l'intersection),

I. Pour rappel, le code est disponible en ligne sous licence libre CeCILL à cette adresse : <https://gitlab.inria.fr/carpooling-potential/carpooling-potential-analyzer>

- calculer la projection d'un Point sur n'importe quelle autre type de géométrie qui n'est pas un point, c.-à-d. calculer le Point faisant partie d'une autre géométrie et qui est le plus proche d'un autre Point,
- trouver la distance la plus courte entre deux géométries.

(GÉO)DATAFRAME DE PANDAS Un DataFrame est un tableau à double entrée pouvant contenir des données hétérogènes. Dans un DataFrame, l'axe horizontal est l'axe des *colonnes* et l'axe vertical est l'axe des *index*.

EXEMPLE 4 : DATAFRAME

Considérons le DataFrame suivant :

	person	departure	arrival	origin	destination
0	0	8 : 00	8 : 10	(45,1935 ; 5,7319)	(45,1908 ; 5,7673)
1	2	10 : 00	10 : 10	(45,3940 ; 5,7331)	(45,1920 ; 5,7030)

person, departure, arrival, origin et *destination* sont les noms des colonnes de la DataFrame. 0 et 1, dans la première colonne, sont les *index*.

Les index étant censés être uniques dans une DataFrame, je les utilise comme clés d'identification pour les trajets et les personnes^{II}.

GRAPHE DE NETWORKX Un graphe NetworkX Graph est la représentation d'un graphe mathématique. Un objet nommé graph possède des nœuds (graph.nodes) et des arcs (graph.edges). Ce graphe peut être orienté, dans lequel cas la classe d'instanciation est DiGraph.

A.2 Données d'entrée

Les données d'entrée de l'analyse du potentiel du covoiturage sont les trajets de la demande en mobilité, en général générées par la synthèse de population. Dans cette section, je détaille leur format.

A.3 Implémentation d'une étape

Dans les implémentations de la synthèse de population et de demande en mobilité, chaque étape correspond à un fichier de code Python, où les dépendances et les paramètres d'entrée sont indiquées dans le code. Il est aussi possible de mettre plusieurs étapes dans un seul fichier, mais ce n'est pas abordé ici, car cette manière

II. Il est possible d'avoir des index en double dans une DataFrame, mais cela engendra des messages d'alerte lors de l'utilisation de certaines méthodes ou fonction Pandas.

d'implémenter des étapes n'est pas utilisée dans le cadre de cette thèse^{III}.

Par exemple, dans le cas où une étape correspond à un fichier, les fichiers des étapes A, B et C du pipeline de la [Figure 12.1](#) sont organisés comme l'illustre l'arborescence en [Figure A.1](#).

Dans l'arborescence, le nom du fichier d'une étape est simplement *nom_de_l'étape.py*, « .py » étant l'extension pour les fichiers de code source Python. Dans le cas où un nom d'étape contient des points « . », le nom de l'étape correspond au chemin vers le fichier du code source de l'étape où les répertoires sont séparés par des points. Par exemple, l'étape nommée *mon_repertoire.mon_etape* a son code source dans le fichier dont le chemin est */mon_repertoire/mon_etape.py*. Cela donne davantage de possibilités d'organisation du code d'un pipeline dans le répertoire de travail.

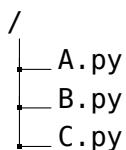


FIGURE A.1 – Arborescence d'un exemple de pipeline

Une étape dans le framework *Synpp* consiste, dans un fichier de code source Python, en la définition de deux fonctions :

- la fonction *configure* ou *fonction de configuration* contient la liste des paramètres requis par l'étape ainsi que ses dépendances ;
- la fonction *execute* ou *fonction d'exécution* contient le code à exécuter pendant l'étape et retourne le résultat de l'étape.

Les deux fonctions prennent un paramètre *context* qui possède deux méthodes principales : *context.stage* et *context.config*.

Dans la fonction de configuration,

- *context.stage(étape)* appelle l'étape nommée *étape* comme dépendance ;
- *context.config(paramètre)* rends le paramètre dont le nom est *paramètre* comme requis. Ce paramètre doit être défini au lancement du pipeline.

Dans la fonction d'exécution,

- *context.stage(etape)* retourne le résultat de l'étape nommée *étape*, cette dernière devant être appelée comme dépendance dans la fonction de configuration ;

III. Pour en savoir plus, se référer à la documentation de *Synpp*.

LISTING A.1 – A.py

```
def configure(context):
    context.config("mon_parametre")
    # demander le paramètre de nom "mon_parametre"

def execute(context):
    print("Execution de script1...")
    return context.config("mon_parametre")
```

LISTING A.2 – B.py

```
def configure(context):
    context.stage("script1")
    # extension du fichier non nécessaire

def execute(context):
    print("Execution de script2...")
    print(context.stage("script1"))
    # Affiche la valeur de "mon_parametre"
```

- `context.config(paramètre)` retourne la valeur de *paramètre*, ce dernier devant être défini comme requis dans la fonction de configuration.

Les [Listes A.1](#) et [A.2](#) sont des exemples de code source pour les étapes A et B. Ces exemples illustrent les concept de fonction de configuration, d'exécution et l'usage des méthodes `stage` et `config`.

A.4 Organisation du répertoire

De manière à simplifier et à structurer les éventuelles modifications nécessaires, les fichiers sont rangés en fonction des grandes étapes décrites dans le [Chapitre 9](#) (voir [Figure A.2](#)). Les répertoires :

- *filtering* contient les étapes de filtrage,
- *shareability* contient les algorithmes de création du graphe d'appairabilité et
- *matching* contient les algorithmes d'appariement.

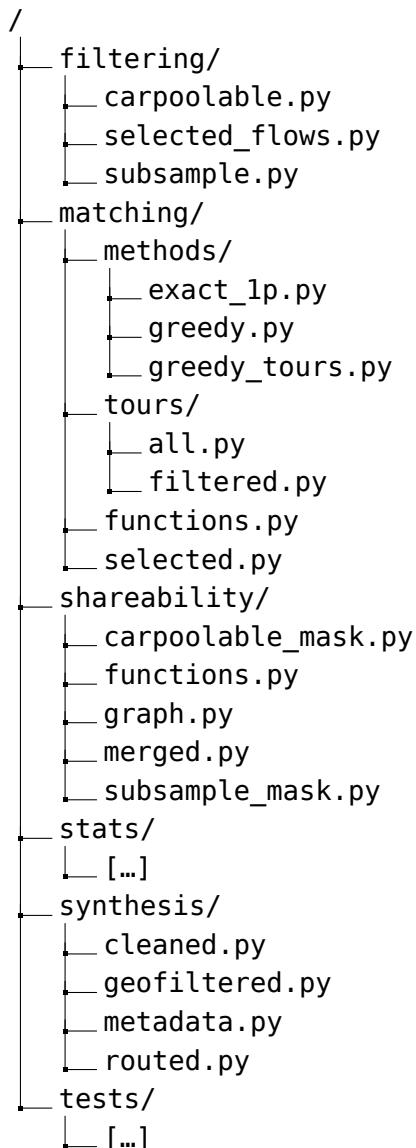


FIGURE A.2 – Structure du répertoire du code pour l’analyse du potentiel du covoiturage

LIMITES IDENTIFIÉES PAR BREMER ET AL (2023)

TABLE B.1 – Limites identifiées pour l'évaluation des impacts directs
(Bremer et al., 2023)

Sujet (limite)	Défis
1A. Définir les limites du système et utiliser des méthodologies normalisées	Les différences dans les limites du système entraînent des études incomplètes et empêchent la comparaison des résultats entre les études.
1B. Identifier les lacunes dans les données et les défis liés à la qualité des données	Les lacunes et les limites de qualité des données peuvent empêcher une compréhension complète des impacts énergétiques et climatiques du cycle de vie des technologies numériques et conduire à de grandes incertitudes dans les résultats des études.
1C. Améliorer l'accessibilité, la transparence et le traitement des données	Les données de haute qualité sont souvent propriétaires, ce qui pose des obstacles en termes de coûts, de transparence et de reproductibilité pour la communauté d'analyse.
1D. Gérer l'ancienneté des données, les dynamiques et la modélisation prospective	Les technologies numériques et leurs applications évoluent rapidement, ce qui signifie que les données disponibles sur leurs impacts énergétiques et climatiques peuvent rapidement devenir obsolètes, rendant difficile l'évitement de grandes incertitudes dans les projections futures.
2A. Meilleures pratiques pour traiter les incertitudes afin de guider la prise de décision	Les incertitudes des impacts énergétiques et climatiques directs des technologies numériques sont intrinsèquement grandes, mais elles ne sont pas souvent abordées dans les études et, lorsqu'elles le sont, elles ne sont pas facilement interprétées/utilisées correctement par les décideurs politiques et le public.
2B. Approches de validation et d'amélioration des modèles	Vérifier que les estimations et prédictions du modèle estiment raisonnablement les impacts des systèmes informatiques du monde réel peut être difficile. Sans validation du modèle, il peut être difficile d'améliorer avec confiance la précision du modèle.
2C. Élaboration d'estimations robustes pour des applications spécifiques	Les estimations variées de l'empreinte énergétique et carbone du secteur dans son ensemble et des applications numériques « individuelles » (p. ex., le streaming) rendent difficile pour le public la compréhension des importances relatives des différentes applications et comportements, et de leur empreinte numérique par rapport à leur empreinte globale.
2D. Comptabilisation des GES et évaluation des autres impacts environnementaux	Tant les études que les méthodes se concentrent souvent uniquement sur les empreintes énergétiques et carbone, en ignorant des aspects tels que l'épuisement des ressources, la toxicité et l'acidification des océans.

TABLE B.2 – Limites identifiées pour l'évaluation des impacts indirects
(Bremer et al., 2023)

Sujet (limite)	Défis
3A. Le scénario de référence hypothétique — meilleures façons de traiter les conditions contrefactuelles	Pour estimer l'impact d'un service numérique, le scénario avec le service numérique est comparé à un scénario de référence, une situation qui se serait produite sans le service numérique. Si les impacts évalués sont futurs, les alternatives sont hypothétiques. Comment faire des évaluations et des comparaisons pertinentes des estimations du présent et du futur ?
3B. Comprendre et quantifier les effets rebond direct	Les services numériques améliorent l'efficacité, font gagner du temps et réduisent les coûts, autant de causes d'augmentation de la demande. P. ex., la commodité des achats en ligne peut entraîner davantage d'achats. Les évaluations d'impact ignorent souvent de tels effets rebond. Pire encore, en supposant que tous les achats en ligne se substituent à des déplacements vers les magasins, les évaluations surestiment également les économies.
3C. Utilisation et limites des études de cas — comment peuvent-elles être généralisées ?	Les premières études de cas sur la numérisation ont souvent donné des résultats excessivement optimistes quant à la réduction des émissions. Certaines études extrapolent une étude de cas d'application ou d'entreprise et l'appliquent à l'ensemble du secteur. Certaines sont sujettes à des biais tels que le <i>biais de volontariat</i> (les volontaires sont plus susceptibles d'avoir un comportement écoresponsable) ou l' <i>effet Hawthorne</i> (les utilisateur·ices modifient leur comportement lorsqu'ils savent qu'ils sont observés).
3D. Évaluer les avantages énergétiques et d'émissions de la numérisation	Plusieurs technologies et services numériques et non numériques peuvent réduire les émissions d'une même activité. P. ex., les émissions du transport peuvent être réduites par l'électrification, l'optimisation des itinéraires, le report modal et le covoiturage, etc. La plupart des solutions impliquent la combinaison de technologies numériques et non numériques.
4A. Comptabilisation des émissions évitées — à qui allouer les atténuations dans un paysage complexe d'acteurs ?	Une entreprise contribue rarement seule à un service; plusieurs entreprises et autres parties prenantes sont généralement impliquées dans son développement, son installation, sa maintenance et son adoption. À mesure que de plus en plus d'entreprises commencent à prendre crédit pour les réductions des émissions de GES, il est nécessaire d'étudier cette toile complexe d'acteurs pour déterminer <i>qui</i> pourrait revendiquer et <i>dans quelle mesure</i> .
4B. Appréhender la complexité des effets rebond indirects - parviendrons-nous à comprendre leurs impacts ?	Les effets rebond indirects se manifestent lorsque la ressource initialement économisée (p. ex., l'énergie, le temps et les coûts) suscite des changements dans la demande pour d'autres biens et services dans l'économie. Analyser ces effets complexes est extrêmement difficile et sujet à une grande incertitude.
4C. Comment l'évolution des systèmes numériques peut-il être capturés ?	Les effets nets de la numérisation sur l'énergie et le climat peuvent évoluer avec le temps en raison de l'évolution des TIC et des technologies du secteur d'utilisation finale, ce qui pose un défi complexe de modélisation des systèmes.
4D. Comment politiques et entreprises peuvent-elles soutenir une numérisation bénéfique environnementalement et dissuader tout usage néfaste ?	Les effets nets de la numérisation dépendront largement de la cohérence des politiques et des actions des entreprises avec la réduction des consommations d'énergie et des émissions. Nous devons promouvoir des politiques et des actions ayant des effets favorables au climat, tout en concevant des analyses/évaluations afin de comprendre dans quelle mesure les technologies numériques ont des effets positifs ou négatifs.

BIBLIOGRAPHIE

- Ademe. (2010). *Site Bilans GES*. <https://bilans-ges.ademe.fr/>
- Ademe. (2015b, septembre). *Enquête auprès des utilisateurs du covoiturage longue distance*. ADEME. <https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/2713-enquete-aupres-des-utilisateurs-du-covoiturage-longue-distance.html>
- Ademe. (2018, juin 18). *Qu'est-ce que l'ACV?* Agence de la transition écologique. <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv>
- Ademe. (2021, novembre). *ADEME - Transition(s) 2050*. ADEME. <https://transitions2050.ademe.fr/>
- AFNOR. (2006b). NF EN ISO 14044.
- AFNOR. (2006c). NF FR ISO 14040.
- Agatz, N., Erera, A., Savelsbergh, M., & Wang, X. (2012). Optimization for dynamic ride-sharing: A review. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 295-303. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.05.028>
- Aiouch, Y., Chanoine, A., Corbet, L., Drapeau, P., Ollion, L., Vigneron, V., Vateau, a. I. c. d. C., Lees Perasso, E., Orgelet, J., Bordage, F., & Esquerre, P. (2022). *Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective*. Ademe. <https://librairie.ademe.fr/consommer-autrement/5226-evaluation-de-l-impact-environnemental-du-numerique-en-france-et-analyse-prospective.html>
- Alexander, L., Jiang, S., Murga, M., & González, M. C. (2015). Origin–destination trips by purpose and time of day inferred from mobile phone data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58, 240-250. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.02.018>
- Alisoltani, N., Leclercq, L., & Zargayouna, M. (2021). Can dynamic ride-sharing reduce traffic congestion? *Transportation Research Part B: Methodological*, 145, 212-246. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.01.004>
- Andrae, A. S. G., & Edler, T. (2015). On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Challenges*, 6(1), 117-157. <https://doi.org/10.3390/challe6010117>
- Arquin, C., Parc, J., Daunay, J., & Tazi, A. (2020, janvier). *Neutralité et logements : à quelles conditions le secteur résidentiel peut-il atteindre la neutralité carbone telle que définie dans la SNBC?* Pouget Consultants, Carbone 4. <https://www.carbone4.com/files/wp-content/uploads/2020/01/Publication-Carbone-4-Pouget-Neutralite-et-Logements.pdf>
- Arvesen, A., Bright, R. M., & Hertwich, E. G. (2011). Considering only first-order effects? How simplifications lead to unrealistic technology optimism in climate change mitigation. *Energy Policy*, 39(11), 7448-7454. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.013>
- Babet, C., Bouvry, L., Brasseur, M.-F., Colussi, C., Jlassi, M., Lambrey, S., Marigot, S., & Rizk, C. (2021, mai). *Chiffres clés du transport*. Service des données et études statistiques. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-transport-2021/pdf/chiffres-cles-transport-2021.pdf>
- Bala, H., Anowar, S., Chng, S., & Cheah, L. (2023). Review of studies on public acceptability and acceptance of shared autonomous mobility services : past, present and future. *Transport Reviews*, 43(5), 970-996. <https://doi.org/10.1080/01441647.2023.2188619>
- Ballet, J.-C., & Clavel, R. (2007). *Le covoiturage en France et en Europe : état des lieux et perspectives*. Certu.
- Barahmand, Z., & Eikeland, M. S. (2022). Life Cycle Assessment under Uncertainty: A Scoping Review. *World*, 3(3), 692-717. <https://doi.org/10.3390/world3030039>
- Barrière, O. (2022). L'urgence écologique, un impératif juridique. *Revue juridique de l'environnement, spécial*, 35-69. <https://www.cairn.info/revue-juridique-de-l-environnement-2022-HS21-page-35.htm>
- Belkhir, L., & Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177, 448-463. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.239>
- Bénos, R., & François, T. (2023, juin 15). Note sur les « effets structurants » de l'A69, le « projet de territoire » et le « désenclavement » de Castres-Mazamet. <https://shs.hal.science/halshs-04133304>
- Berger, G., Busset, J. d. B., & Massé, P. (2007). *De la prospective : textes fondamentaux de la prospective française, 1955-1966*. Harmattan.
- Berkhout, F., & Hertin, J. (2004). De-materialising and re-materialising: Digital technologies and the environment. *Futures*, 36(8), 903-920. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2004.01.003>
- Berlingerio, M., Ghaddar, B., Guidotti, R., Pascale, A., & Sassi, A. (2017). The GRAAL of carpooling: GReen And sociAL optimization from crowd-sourced data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 80, 20-36. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.02.025>

- Berthoud, F., Balin, P., Bohas, A., CHARBUILLET, C., Drezet, E., Dubois, J.-D., Gossart, C., & Parry, M. (2012). *Impacts écologiques des technologies de l'information et de la communication : les faces cachées de l'immatérialité* (G. EcolInfo, Éd.). EDP Sciences. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02408990>
- Bhat, C. R., & Koppelman, F. S. (1999). Activity-Based Modeling of Travel Demand. In R. W. Hall (Ed.), *Handbook of Transportation Science* (p. 35-61). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5203-1_3
- Bieser, J. C. T., & Hilty, L. M. (2018b). Indirect Effects of the Digital Transformation on Environmental Sustainability: Methodological Challenges in Assessing the Greenhouse Gas Abatement Potential of ICT, 68-53. <https://doi.org/10.29007/lx7q>
- Bieser, J. C. T., & Hilty, L. M. (2018c). Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/su10082662>
- Bieser, J. C. T., Hintemann, R., Hilty, L. M., & Beucker, S. (2023). A review of assessments of the greenhouse gas footprint and abatement potential of information and communication technology. *Environmental Impact Assessment Review*, 99, 107033. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.107033>
- Bigo, A. (2020, novembre 23). *Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement.* [thèse de doct., Institut Polytechnique de Paris]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03082127>
- Bjørn, A., Owsianniak, M., Laurent, A., Olsen, S. I., Corona, A., & Hauschild, M. Z. (2018). Scope Definition. In *Life Cycle Assessment: Theory and Practice* (p. 75-116). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Bol, D., Pirson, T., & Dekimpe, R. (2021). Moore's Law and ICT Innovation in the Anthropocene. *2021 Design, Automation Test in Europe Conference Exhibition (DATE)*, 19-24. <https://doi.org/10.23919/DATEx2021.9474110>
- Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekwall, T., & Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, 38(7), 723-739. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002>
- Börjesson Rivera, M., Håkansson, C., Svenfelt, Å., & Finnveden, G. (2014). Including second order effects in environmental assessments of ICT. *Environmental Modelling & Software*, 56, 105-115. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.02.005>
- Bourgeois, C. (2023). La taille et le poids des voitures ont explosé en vingt ans [newspaper]. *Journal Auto*. <https://journalauto.com/constructeurs/la-taille-et-le-poids-des-voitures-ont-explose-en-vingt-ans/>
- Bouscasse, H., Joly, I., & Bonnel, P. (2018). How does environmental concern influence mode choice habits? A mediation analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59, 205-222. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.01.007>
- Brahmi, L., Fumat, V., & Trevien, C. (2022, juillet). *Se déplacer en voiture : seul, à plusieurs ou en covoiturage ?* https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2022-07/datalab_essentiel_281_se_deplacer_en_voiture_juillet2022.pdf
- Bremer, C., Kamiya, G., Bergmark, P., Coroama, V. C., Masanet, E., & Lifset, R. (2023, mai 25). *Assessing Energy and Climate Effects of Digitalization: Methodological Challenges and Key Recommendations.* <https://doi.org/10.2139/ssrn.4459526>
- Brockway, P. E., Sorrell, S., Semeniuk, G., Heun, M. K., & Court, V. (2021). Energy efficiency and economy-wide rebound effects: A review of the evidence and its implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110781. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110781>
- Bruglieri, M., Ciccarelli, D., Colorni, A., & Luè, A. (2011). PoliUniPool: A carpooling system for universities. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 558-567. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.062>
- Brutel, C., & Pages, J. (2021, janvier 19). *La voiture reste majoritaire pour les déplacements domicile-travail, même pour de courtes distances - Insee Première - 1835 (N° 1835).* INSEE. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5013868>
- Bull, J. G., & Kozak, R. A. (2014). Comparative life cycle assessments: The case of paper and digital media. *Environmental Impact Assessment Review*, 45, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.10.001>
- Calay, V., Claisse, F., Guyot, J.-L., & Ritondo, R. (2022a). *Qu'est-ce qu'un scénario en prospective ? Le FAQ de la prospective.* https://www.iwebs.be/faq_prospective/quest-ce-quun-scenario-en-prospective/
- Calay, V., Claisse, F., Guyot, J.-L., & Ritondo, R. (2022b). *Qu'est-ce que la prospective ? Le FAQ de la prospective.* https://www.iwebs.be/faq_prospective/quest-ce-que-la-prospective/
- Calay, V., Claisse, F., Guyot, J.-L., & Ritondo, R. (2022c). *Quels sont les différents types de variables ? Le FAQ de la prospective.* https://www.iwebs.be/faq_prospective/quels-sont-les-differents-types-de-variables/
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M.,

- Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Péan, C. (2023, juillet 25). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* (First). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Cannet, P., Truoc, D. L. V., Crohas, J.-B., & Gilles, A. (2021, mars). *Le trop plein de SUV dans la publicité.* WWF. https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2021-11/20210325_Rapport_Le-trop-plein-de-SUV-dans-la-publicite_WWF-France.pdf
- Cici, B., Markopoulou, A., Frias-Martinez, E., & Laoutaris, N. (2014). Assessing the Potential of Ride-Sharing Using Mobile and Social Data: A Tale of Four Cities, 11.
- Conseil de l'UE. (2022, octobre 27). *Ajustement à l'objectif 55 : le Conseil adopte un règlement concernant les émissions de CO₂ des voitures et camionnettes neuves.* <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2023/03/28/fit-for-55-council-adopts-regulation-on-co2-emissions-for-new-cars-and-vans/>
- Contributeurs OpenStreetMap. (2021). Planet dump retrieved from <https://planet.osm.org>. <https://www.openstreetmap.org>
- Coroamă, V. C., Bergmark, P., Höjer, M., & Malmordin, J. (2020). A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services : Part I : Single Services. *Proceedings of the 7th International Conference on ICT for Sustainability*, 36-45. <https://doi.org/10.1145/3401335.3401716>
- Coroamă, V. C., & Pargman, D. (2020). Skill rebound: On an unintended effect of digitalization. *Proceedings of the 7th International Conference on ICT for Sustainability*, 213-219. <https://doi.org/10.1145/3401335.3401362>
- Couillet, R., & Poissonnier, G. (2023). Pourquoi et comment démanteler le numérique ?
- Coulombel, N., Boutueil, V., Liu, L., Viguié, V., & Yin, B. (2019). Substantial rebound effects in urban ridesharing: Simulating travel decisions in Paris, France. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 71, 110-126. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.12.006>
- Creutzig, F., Acemoglu, D., Bai, X., Edwards, P. N., Hintz, M. J., Kaack, L. H., Kilkis, S., Kunkel, S., Luers, A., Milojevic-Dupont, N., Rejeski, D., Renn, J., Rolnick, D., Rosol, C., Russ, D., Turnbull, T., Verdolini, E., Wagner, F., Wilson, C., ... Zumwald, M. (2022). Digitalization and the Anthropocene. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 47(1), 479-509. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120920-100056>
- Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf, E., Becker, W., Monforti-Ferrario, F., Quadrelli, R., Martin, A. R., Taghavi-Moharamli, P., Grassi, G., Rossi, S., Melo, J. B. D., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., & Vignati, E. (2023). *GHG emissions of all world countries.* JRC/IEA. Luxembourg. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023
- Crutzen, P. J. (2002). The “anthropocene”. *J. Phys. IV France*, 12(10), 1-5. <https://doi.org/10.1051/jp4:20020447>
- Cucurachi, S., van der Giesen, C., & Guinée, J. (2018). Ex-ante LCA of Emerging Technologies. *Procedia CIRP*, 69, 463-468. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.005>
- Delaunay, T. (2018, septembre 24). *L'intégration du covoiturage dans le système de mobilité francilien : hybrider le transport collectif et individuel pour asseoir l'hégémonie de l'automobile ?* [Thèse de doct., Université Paris-Est]. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-02066266>
- de Palma, A., Javaudin, L., Stokkink, P., & Tarpin-Pitre, L. (2022). Ride-sharing with Inflexible Drivers in the Paris Metropolitan Area, 29.
- DINSIC. (2020, février 28). *Le Point d'Accès National aux données ouvertes de transport.* Point d'Accès National. <https://transport.data.gouv.fr/>
- Downs, A. (1962). The law of peak-hour expressway congestion. *Traffic Quarterly*, 16(3). <https://trid.trb.org/view/694596>
- Doyle, E., Stabler, B., Paul, B. M., & Rosenthal, B. (2023, juillet 31). *PopulationSim.* <https://github.com/ActivitySim/populationsim>
- Dubernet, T. J. P., Rieser-Schüssler, N., & Axhausen, K. W. (2013). Using a multi-agent simulation tool to estimate the car-pooling potential, 14 p. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000052402>
- Duranton, G., & Turner, M. A. (2011). The Fundamental Law of Road Congestion: Evidence from US Cities. *American Economic Review*, 101(6), 2616-2652. <https://doi.org/10.1257/aer.101.6.2616>
- ecoinvent. (2020, septembre 25). *System Models - ecoinvent.* <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/system-models/>
- Erhardt, G. D., Roy, S., Cooper, D., Sana, B., Chen, M., & Castiglione, J. (2019). Do transportation network companies decrease or increase congestion? *Science Advances*, 5(5), eaau2670. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau2670>

- Ericsson, E., Larsson, H., & Brundell-Freij, K. (2006). Optimizing route choice for lowest fuel consumption – Potential effects of a new driver support tool. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 14(6), 369-383. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2006.10.001>
- ETSI. (2015, février). *Methodology for environmental Life Cycle Assessment (LCA) of Information and Communication Technology (ICT) goods, networks and services.* https://www.etsi.org/deliver/etsi_es/203100_203199/203199/01.03.01_60/es_203199v010301p.pdf
- European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook : General guide for life cycle assessment - detailed guidance.* Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2788/38479>
- Fagnant, D. J., & Kockelman, K. M. (2018). Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas. *Transportation*, 45(1), 143-158. <https://doi.org/10.1007/s11116-016-9729-z>
- Falk, J., Gaffney, O., Bhownik, A. K., Bergmark, P., Galaz, V., Gaskell, N., Henningsson, S., Höjer, M., Jacobson, L., Jónás, K., Kåberger, T., Klingenberg, D., Lenhart, J., Loken, B., Lundén, D., Malmodin, J., Malmqvist, T., Olausson, V., Otto, I., ... Shalit, T. (2020, janvier). *Exponential Roadmap 1.5.1. Future Search.* https://exponentialroadmap.org/wp-content/uploads/2020/03/ExponentialRoadmap_1.5.1_216x279_08_AW_Download_Singles_Small.pdf
- Fauré, E., Arushanyan, Y., Ekener, E., Miliutenko, S., & Finnveden, G. (2017). Methods for assessing future scenarios from a sustainability perspective. *Eur J Futures Res*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s40309-017-0121-9>
- Ferreboeuf, H. (2018, octobre). *Pour une sobriété numérique.* The Shift Project. <https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2018/11/Rapport-final-v8-WEB.pdf>
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekwall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., & Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Flipo, F., Dobré, M., & Michot, M. (2013). *La face cachée du numérique : l'impact environnemental des nouvelles technologies.* Éditions L'Échappée.
- Flipo, F., & Gossart, C. (2009). Infrastructure numérique et environnement. L'impossible domestication de l'effet rebond. *Terminal. Technologie de l'information, culture & société*, (103-104). <https://doi.org/10.4000/terminal.3093>
- Francisco Luciano. (2017, septembre 14). *Décarboner la mobilité dans les Zones de moyenne densité.* The Shift Project. Paris, France. <https://theshiftproject.org/article/publication-du-rapport-decarboner-la-mobilite-dans-les-zones-de-moyenne-densite-cest-possible/>
- Freitag, C., Berners-Lee, M., Widdicks, K., Knowles, B., Blair, G. S., & Friday, A. (2021). The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations. *PATTER*, 2(9). <https://doi.org/10.1016/j.patter.2021.100340>
- Fulton, L., Mason, J., & Meroux, D. (2017, mai). *Three Revolutions in Urban Transportation: How To Achieve the Full Potential of Vehicle Electrification, Automation, and Shared Mobility in Urban Transportation Systems Around the World by 2050.* Institute of Transportation Studies. <https://itdpdotorg.wpeengine.com/wp-content/uploads/2017/04/ITDP-3R-Report-FINAL.pdf>
- Furuhashi, M., Dessouky, M., Ordóñez, F., Brunet, M.-E., Wang, X., & Koenig, S. (2013). Ridesharing: The state-of-the-art and future directions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 57, 28-46. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.08.012>
- Gaillard, C. (2023). Voitures de plus en plus grosses : un problème de taille! [magazine]. <https://www.auto-infos.fr/article/voitures-de-plus-en-plus-grosses-un-probleme-de-taille.265056>
- Galil, Z. (1986). Efficient algorithms for finding maximum matching in graphs. *ACM Comput. Surv.*, 18(1), 23-38. <https://doi.org/10.1145/6462.6502>
- Galland, S., Knapen, L., Yasar, A.-U.-H., Gaud, N., Janssens, D., Lamotte, O., Koukam, A., & Wets, G. (2014). Multi-agent simulation of individual mobility behavior in carpooling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 45, 83-98. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.12.012>
- Garin, M., Baucher, A., Paris-Saclay, U., Paris-Saclay, E. N. S., & Borelli, C. (2023). Que la transition écologique soit, et la transition numérique fut.
- GeSI. (2015). #SMARTer2030 *ICT Solutions for 21st Century Challenges.* The Global e-Sustainability Initiative. https://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report.pdf
- GeSI. (2019). *Digital with Purpose: Delivering a SMARTer2030 (summary).* The Global Enabling Sustainability Initiative. https://gesi.org/storage/files/DIGITAL%20WITH%20PURPOSE_Summary_A4-WEB_watermark.pdf

- Gkartzonikas, C., & Gkritza, K. (2019). What have we learned? A review of stated preference and choice studies on autonomous vehicles. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 98, 323-337.
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.12.003>
- Gossart, C. (2014, janvier 1). Rebound Effects and ICT : A Review of the Literature.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3301.3926>
- GraphHopper. (2022, février 8). *GraphHopper* (Version 4.0dev). <https://github.com/graphhopper/graphhopper>
- Grimal, L., Burger, N., di Loreto, I., & Troussier, N. (2021). Design of an interdisciplinary evaluation method for multi-scaled sustainability of computer-based projects. A work based on the Sustainable Computing Evaluation Framework (SCEF), 9.
- GSMA & Carbon Trust. (2019). *The Enablement Effect*. Carbon Trust. London.
https://www.gsma.com/betterfuture/wp-content/uploads/2019/12/GSMA_Enablement_Effect.pdf
- Guo, Y., Goncalves, G., & Hsu, T. (2013). A multi-destination daily carpooling problem and an ant colony based resolution method. *RAIRO-Oper. Res.*, 47(4), 399-428. <https://doi.org/10.1051/ro/2013049>
- Gupta, U., Kim, Y. G., Lee, S., Tse, J., Lee, H.-H. S., Wei, G.-Y., Brooks, D., & Wu, C.-J. (2022). Chasing Carbon : The Elusive Environmental Footprint of Computing. *IEEE Micro*, 42(4), 37-47.
<https://doi.org/10.1109/MM.2022.3163226>
- Håkansson, C., & Finnveden, G. (2015). Indirect rebound and reverse rebound effects in the ICT-sector and emissions of CO₂: <https://doi.org/10.2991/ict4s-env-15.2015.8>
- Haldar, A., & Sethi, N. (2022). Environmental effects of Information and Communication Technology - Exploring the roles of renewable energy, innovation, trade and financial development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111754. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111754>
- Haoues, N. (2013, juin 24). *Analyse du Cycle de Vie Conséquentielle*. Pôle Éco-conception.
- Hartman, I. B.-A., Keren, D., Dbai, A. A., Cohen, E., Knapen, L., Yasar, A.-U.-H., & Janssens, D. (2014). Theory and Practice in Large Carpooling Problems. *Procedia Computer Science*, 32, 339-347.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.433>
- Hasiak, F., & Palmier, P. (2019, juin). *Le covoiturage pour la mobilité quotidienne*. Montréal, Canada.
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02285733>
- Héran, F. (2019, mars). Le trafic induit par l'élargissement de l'A480 et l'aménagement de l'échangeur du Rondeau dans la traversée de Grenoble. <http://heran.univ-lille1.fr/wp-content/uploads/Trafic-induit-A480.pdf>
- Hickel, J., Kallis, G., Jackson, T., O'Neill, D. W., Schor, J. B., Steinberger, J. K., Victor, P. A., & Ürge-Vorsatz, D. (2022). Degrowth can work – here's how science can help. *Nature*, 612(7940), 400-403.
<https://doi.org/10.1038/d41586-022-04412-x>
- Bandiera_abtest: a Cg_type: Comment Subject_term: Economics, Policy, Sustainability.
- Hilty, L. M., & Aebsicher, B. (2015). ICT for Sustainability: An Emerging Research Field. In L. M. Hilty & B. Aebsicher (Éd.), *ICT Innovations for Sustainability* (p. 3-36). Springer International Publishing.
- Hilty, L. M., Aebsicher, B., & Rizzoli, A. E. (2014). Modeling and evaluating the sustainability of smart solutions. *Environmental Modelling & Software*, 56, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.04.001>
- Hörl, S., & Axhausen, K. W. (2021). Relaxation-discretization algorithm for spatially constrained secondary location assignment. *Transportmetrica A : Transport Science*, 0(0), 1-20. <https://doi.org/10.1080/23249935.2021.1982068>
- Hörl, S., & Balac, M. (2021a). Synthetic population and travel demand for Paris and Île-de-France based on open and publicly available data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 130.
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103291>
- Hörl, S., & Balac, M. (2021b). Open synthetic travel demand for Paris and Île-de-France: Inputs and output data. *Data in Brief*, 39, 107622. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107622>
- Hörl, S., & Puchinger, J. (2023). Modeling the ecological and economic footprint of last-mile parcel deliveries using open data : A case study for Lyon. *11th Symposium of the European Association for Research in Transportation (hEART 2023)*. <https://hal.science/hal-04102894>
- Horner, N. C., Shehabi, A., & Azevedo, I. L. (2016). Known unknowns: Indirect energy effects of information and communication technology. *Environ. Res. Lett.*, 11(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/10/103001>
- Humar, I., Ge, X., Xiang, L., Jo, M., Chen, M., & Zhang, J. (2011). Rethinking energy efficiency models of cellular networks with embodied energy. *IEEE Network*, 25(2), 40-49. <https://doi.org/10.1109/MNET.2011.5730527>
- IEA. (2021, octobre). *Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector*. International Energy Agency. Paris, France. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- INA. (2023, janvier 31). «Autostop», l'initiative des radios locales pour aider les voyageurs lors de la grève de 1995. L'INA éclaire l'actu. <https://www.ina.fr/ina-eclaire-actu/solidarite-greve-covoiturage-radio-autostop>

- INS2I. (2023, juillet 13). *Cristal collectif du CNRS : des pistes pour un numérique plus écoresponsable*. CNRS Sciences informatiques. <https://www.ins2i.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/cristal-collectif-du-cnrs-des-pistes-pour-un-numerique-plus-ecoresponsable>
- Insee. (2016b, octobre 13). IRIS. In *Insee*. <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1523>
- Insee. (2022, juin). *Les exploitations principale et complémentaire*. Insee. <https://www.insee.fr/fr/information/2383177>
- Ipsen, K. L., Zimmermann, R. K., Nielsen, P. S., & Birkved, M. (2019). Environmental assessment of Smart City Solutions using a coupled urban metabolism—life cycle impact assessment approach. *Int J Life Cycle Assess*, 24(7), 1239-1253. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1453-9>
- IRENA. (2019, avril 8). *Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition)*. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. <https://www.irena.org/Publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>
- ITU. (2015, août 24). *Methodology for environmental life cycle assessments of information and communication technology goods, networks and services*. https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-L.1410-201412-1!!PDF-E&type=items
- ITU. (2019, novembre). *Methodology for assessing the aggregated positive sector-level impacts of ICT in other sectors (ITU-T L.1451)*. Telecommunication standardization sector of ITU. https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-L.1451-201911-1!!PDF-E&type=items
- Jalali, R., Koohi-Fayegh, S., El-Khatib, K., Hoornweg, D., & Li, H. (2017). Investigating the Potential of Ridesharing to Reduce Vehicle Emissions. *Urban Planning*, 2(2), 26-40. <https://doi.org/10.17645/up.v2i2.937>
- Jfpochon. (2021, avril 22). *Français : L'image classique du Donut; la mesure à laquelle les frontières sont transgressées et les fondements sociaux atteints ne sont pas visibles sur ce diagramme*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Illustration_th%C3%A9orie_du_donut.svg
- Julagasigorn, P., Banomyong, R., Grant, D. B., & Varadejsatitwong, P. (2021). What encourages people to carpool? A conceptual framework of carpooling psychological factors and research propositions. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100493>
- Kaufmann, V. (2002). Temps et pratiques modales. Le plus court est-il le mieux? The rationality of perception and modal choice. Is quickest best? *Recherche - Transports - Sécurité*, 75, 131-143. [https://doi.org/10.1016/S0761-8980\(02\)00015-8](https://doi.org/10.1016/S0761-8980(02)00015-8)
- Keil, A. K., & Steinberger, J. K. (2023). Cars, capitalism and ecological crises : understanding systemic barriers to a sustainability transition in the German car industry. *New Political Economy*, 0(0), 1-21. <https://doi.org/10.1080/13563467.2023.2223132>
- Keszey, T. (2020). Behavioural intention to use autonomous vehicles : Systematic review and empirical extension. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 119, 102732. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102732>
- Koomey, J. G. (2007). Estimating total power consumption by servers in the U.S. and the world, 31.
- Koomey, J. G. (2008). Worldwide electricity used in data centers. *Environ. Res. Lett.*, 3(3), 034008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/3/3/034008>
- Kühne, K., Bartsch, N., Tate, R. D., Higson, J., & Habet, A. (2022). "Carbon Bombs" - Mapping key fossil fuel projects. *Energy Policy*, 166, 112950. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112950>
- Labee, P., Rasouli, S., & Liao, F. (2022). The implications of Mobility as a Service for urban emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 102, 103128. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103128>
- Lambert, S., Van Heddeghem, W., Vereecken, W., Lannoo, B., Colle, D., & Pickavet, M. (2012). Worldwide electricity consumption of communication networks. *Opt. Express*, 20(26), B513. <https://doi.org/10.1364/OE.20.00B513>
- Lange, S., Pohl, J., & Santarius, T. (2020). Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand? *Ecological Economics*, 176, 106760. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106760>
- Lawrence Berkeley National Laboratory. (2016). *Center of Expertise for Energy Efficiency in Data Centers*. <https://datacenters.lbl.gov/>
- Lees Perasso, E., Vateau, C., & Domon, F. (2022). Etude Numérique et Environnement - Analyse prospective 2030 et 2050. *Les SUV, néfastes pour l'environnement, à l'honneur dans la pub*. (2021, mars 24). L'info durable. <https://www.linfodurable.fr/environnement/les-suv-nefastes-pour-l-environnement-lhonneur-dans-la-pub-24733>
- Li, R., Liu, Z., & Zhang, R. (2018). Studying the benefits of carpooling in an urban area using automatic vehicle identification data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 93, 367-380. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.06.012>

- Ligozat, A.-L., Lefevre, J., Bugeau, A., & Combaz, J. (2022). Unraveling the Hidden Environmental Impacts of AI Solutions for Environment Life Cycle Assessment of AI Solutions. *Sustainability*, 14(9), 5172. <https://doi.org/10.3390/su14095172>
- Loi européenne sur le climat (2020, décembre 17). <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-14171-2020-INIT/fr/pdf>
- LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (1) (2009, août 3).
- Long, T. B., Blok, V., & Coninx, I. (2016). Barriers to the adoption and diffusion of technological innovations for climate-smart agriculture in Europe : evidence from the Netherlands, France, Switzerland and Italy. *Journal of Cleaner Production*, 112, 9-21. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.044>
- Ma, S., Zheng, Y., & Wolfson, O. (2015). Real-Time City-Scale Taxi Ridesharing. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 27(7), 1782-1795. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2014.2334313>
- Malmodin, J., & Bergmark, P. (2015). Exploring the effect of ICT solutions on GHG emissions in 2030. <https://doi.org/10.2991/ict4s-env-15.2015.5>
- Malmodin, J., Bergmark, P., & Matinfar, S. (2018). A high-level estimate of the material footprints of the ICT and the E&M sector, 168-186. <https://doi.org/10.29007/q5fw>
- Malmodin, J., Lövhagen, N., Bergmark, P., & Lundén, D. (2023, avril 20). *ICT Sector Electricity Consumption and Greenhouse Gas Emissions – 2020 Outcome*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4424264>
- Malmodin, J., & Lundén, D. (2018). The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. *Sustainability*, 10(9), 3027. <https://doi.org/10.3390/su10093027>
- Martinez, L. M., & Viegas, J. M. (2017). Assessing the impacts of deploying a shared self-driving urban mobility system: An agent-based model applied to the city of Lisbon, Portugal. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6(1), 13-27. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.05.005>
- McNally, M. G. (2000). The Activity-Based Approach.
- McNally, M. G. (2007, janvier 1). The Four-Step Model. In D. A. Hensher & K. J. Button (Éd.), *Handbook of Transport Modelling* (p. 35-53, T. 1). Emerald Group Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/9780857245670-003>
- McNally, M. G., & Rindt, C. R. (2007, janvier 1). The Activity-Based Approach. In D. A. Hensher & K. J. Button (Éd.), *Handbook of Transport Modelling* (p. 55-73, T. 1). Emerald Group Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/9780857245670-004>
- Meadows, D. H., of Rome, C., & Associates, P. (Éd.). (1974). *The limits to growth: A report for the club of rome's project on the predicament of mankind* (2. ed). Universe books.
- Mericskay, B. (2019). Potentiels et limites des traces (géo)numériques dans l'analyse des mobilités : l'exemple des données de la plateforme de covoiturage BlaBlaCar. *cybergeo*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.31990>
- Miller, E. (2023). The current state of activity-based travel demand modelling and some possible next steps. *Transport Reviews*, 43(4), 565-570. <https://doi.org/10.1080/01441647.2023.2198458>
- Miller, K., Chng, S., & Cheah, L. (2022). Understanding acceptance of shared autonomous vehicles among people with different mobility and communication needs. *Travel Behaviour and Society*, 29, 200-210. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2022.06.007>
- Molkenthin, N., Schröder, M., & Timme, M. (2020). Topological universality of on-demand ride-sharing efficiency. *Phys. Rev. Lett.*, 125(24). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.248302>
- MTE-MCT. (2023, juin 7). *Le covoiturage en France, ses avantages et la réglementation en vigueur*. Ministères Énergie Territoires. <https://www.ecologie.gouv.fr/covoiturage-en-france-avantages-et-reglementation-en-vigueur>
- Nagao, T., Takei, Y., & Hannoe, S. (2015). Evaluation Methods of the 'By ICT' Effect. 13(3).
- négaWatt. (2021, octobre 19). *Scénario négaWatt 2022*. négaWatt. Paris. <https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2022>
- Newman, J., Lurkin, V., & Garrow, L. (2016). LARCH: A package for estimating multinomial, nested, and cross-nested logit models that account for semi-aggregate data. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/201287>
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., & Solecki, W. (2017). The roads ahead : Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169-180. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
- Papagiannidis, S., & Marikyan, D. (2022). Environmental sustainability : A technology acceptance perspective. *International Journal of Information Management*, 63, 102445. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2021.102445>

- Papoutsis, P., Fennia, S., Bridon, C., & Duong, T. (2021). Relaxing door-to-door matching reduces passenger waiting times: A workflow for the analysis of driver GPS traces in a stochastic carpooling service. *Transportation Engineering*, 4, 100061. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100061>
- Parrique, T. (2019, décembre 16). *The political economy of degrowth* [These de doctorat]. Université Clermont Auvergne (2017-2020). <https://www.theses.fr/2019CLFAD003>
- Persson, L., Carney Almroth, B. M., Collins, C. D., Cornell, S., de Wit, C. A., Diamond, M. L., Fantke, P., Hassellöv, M., MacLeod, M., Ryberg, M. W., Søgaard Jørgensen, P., Villarrubia-Gómez, P., Wang, Z., & Hauschild, M. Z. (2022). Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. *Environ. Sci. Technol.*, 56(3), 1510-1521. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>
- Picon, A. (2014). *Smart Cities : Théorie et critique d'un idéal auto-réalisateur*. Éditions B2. <https://editions-b2.com/les-livres/6-smart-cities.html>
- Pirson, T., Delhaye, T. P., Pip, A. G., Le Brun, G., Raskin, J.-P., & Bol, D. (2023). The Environmental Footprint of IC Production : Review, Analysis, and Lessons From Historical Trends. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 36(1), 56-67. <https://doi.org/10.1109/TSM.2022.3228311>
- Plan de déplacements urbains de l'agglomération grenobloise (2019, novembre 7). <https://smmag.fr/investir-pour-lavenir/pdu-2030/>
- Pursell, W. (1943). *When You Ride Alone You Ride With Hitler!* https://www.archives.gov/exhibits/powers_of_persuasion/use_it_up/images_html/ride_with_hitler.html
- Raballand, W., & Laharotte, P.-A. (2019). Estimation du potentiel de covoiturage par la modélisation des déplacements. *46e Congrès ATEC ITS France - Les Rencontres de la Mobilité Intelligente*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02284065>
- Raballand, W., & Laharotte, P.-A. (2020a). Évaluation a priori de services de covoiturage par la modélisation des déplacements. *47e Congrès ATEC ITS France-Les Rencontres de la Mobilité Intelligente*.
- Raballand, W., & Laharotte, P.-A. (2020b). Estimation of carpooling potential by trip modelling. *8th Transport Research Arena TRA 2020*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02503684>
- Rasouli, S., & Timmermans, H. (2014). Activity-based models of travel demand : promises, progress and prospects. *International Journal of Urban Sciences*, 18(1), 31-60. <https://doi.org/10.1080/12265934.2013.835118>
- Rattle, R. (2010). *Computing Our Way to Paradise?: The Role of Internet and Communication Technologies in Sustainable Consumption and Globalization*. Rowman & Littlefield.
- Raupach, M. R., Marland, G., Ciais, P., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Klepper, G., & Field, C. B. (2007). Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 104(24), 10288-10293. <https://doi.org/10.1073/pnas.0700609104>
- Raworth, K. (2012). A safe and just space for humanity - Can we live within the doughnut? https://doi.org/10.1163/2210-7975_HRD-9824-0069
- Raworth, K. (2017). A Doughnut for the Anthropocene: Humanity's compass in the 21st century. *The Lancet Planetary Health*, 1(2), e48-e49. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30028-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30028-1)
- Ray, J.-B. (2014). Planning a Real-time Ridesharing Network : Critical Mass and Role of Transfers. <https://trid.trb.org/view/1313921>
- Registre de Preuve de Covoiturage. (2021, avril). *Données des trajets*. covoiturage.beta.gouv.fr. <https://doc.covoiturage.beta.gouv.fr/acteurs-de-la-mobilite-utiliser-les-donnees-ouvertes-du-covoiturage/open-data-ouverture-des-donnees>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuarterma, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Rich, D., Bhatia, P., Finnegan, J., Levin, K., & Mitra, A. (2014). *Norme de politique et d'action*. World Ressources Institute. États-Unis. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/French%20%20Policy%20and%20Action%20Standard_0.pdf
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Drücke, M., Fetzer, I., Bala, G., von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., ... Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37), eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>
- Ripple, W. J., Wolf, C., Newsome, T. M., Barnard, P., & Moomaw, W. R. (2020). World Scientists' Warning of a Climate Emergency. *BioScience*, 70(1), 8-12. <https://doi.org/10.1093/biosci/biz088>

- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., ... Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472-475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Rodier, C., Alemi, F., & Smith, D. (2016). Dynamic Ridesharing: Exploration of Potential for Reduction in Vehicle Miles Traveled. *Transportation Research Record*, 2542(1), 120-126. <https://doi.org/10.3141/2542-15>
- Rolnick, D., Donti, P. L., Kaack, L. H., Kochanski, K., Lacoste, A., Sankaran, K., Ross, A. S., Milojevic-Dupont, N., Jaques, N., Waldman-Brown, A., Lucchini, A., Maharaj, T., Sherwin, E. D., Mukkavilli, S. K., Kording, K. P., Gomes, C., Ng, A. Y., Hassabis, D., Platt, J. C., ... Bengio, Y. (2019, novembre 5). *Tackling Climate Change with Machine Learning*. <http://arxiv.org/abs/1906.05433>
- Roussilhe, G. (2021, mars). *Que peut le numérique pour la transition écologique ?*
<https://gauthierroussilhe.com/pdf/NTE-Mars2021.pdf>
- RTE. (2022, février). *Futurs énergétiques 2050*. RTE. <https://rte-futursenergetiques2050.com>
- Schaubroeck, T., Schaubroeck, S., Heijungs, R., Zamagni, A., Brandão, M., & Benetto, E. (2021). Attributional & Consequential Life Cycle Assessment: Definitions, Conceptual Characteristics and Modelling Restrictions. *Sustainability*, 13(13), 7386. <https://doi.org/10.3390/su13137386>
- Selective History of Ridesharing*. (2009, février 22). MIT "Real-Time" Rideshare Research.
<http://ridesharechoices.scripts.mit.edu/home/2009/02/history-of-ridesharing/>
- SMMAG. (2022). *Les chiffres clés de l'EMC² 2019-2020*. Grenoble.
- Söderström, O., Paasche, T., & Klauser, F. (2014). Smart cities as corporate storytelling, 25.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13604813.2014.906716>
- Sonnemann, G., Vigon, B., Valdivia, S., & Rack, M. (2011). *Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases : A Basis for Greener Processes and Products*. <https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2011%20-%20Global%20Guidance%20Principles.pdf>
- Stallman, R. (s. d.). *Qu'est-ce que le logiciel libre ?* Projet GNU - Free Software Foundation.
<https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.html>
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., & Ludwig, C. (2015). The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1), 81-98. <https://doi.org/10.1177/2053019614564785>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., de Vries, W., de Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries : Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Stiglic, M., Agatz, N., Savelsbergh, M., & Gradišar, M. (2015). The benefits of meeting points in ride-sharing systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, 82, 36-53. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.07.025>
- Stratégie Nationale bas-carbone (2020, mars).
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2020-03-25_MTES_SNBC2.pdf
- Tafreshian, A., Masoud, N., & Yin, Y. (2020). Frontiers in Service Science : Ride Matching for Peer-to-Peer Ride Sharing : A Review and Future Directions. *Service Science*, 12(2-3), 44-60.
<https://doi.org/10.1287/serv.2020.0258>
- The Shift project. (2022). *Climat, crises, le plan de transformation de l'économie française*. Odile Jacob.
- Tombaz, S., Frenger, P., Olsson, M., & Nilsson, A. (2016). Energy performance of 5G-NX radio access at country level. *2016 IEEE 12th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. <https://doi.org/10.1109/WiMOB.2016.7763183>
- Travel Forecasting Resource. (2023, juillet 14). *Activity Based Models*. <https://tfresource.org>
- UNEP. (2023, novembre). *Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again)*. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43922>
- U.S. Department of Energy. (2015). Advanced Sensors, Control, Platforms, and Modeling for Manufacturing (Smart Manufacturing) : Technology Assessment.
- Valeri, C., Buzea, D., Dugast, C., & Crépel, A. (2023, mars 22). *Guidance on avoided emissions*. Net Zero Initiative, wbcisd. <https://www.wbcisd.org/contentwbc/download/15909/229494/1>
- van Beek, L., Hager, M., Pelzer, P., van Vuuren, D., & Cassen, C. (2020). Anticipating futures through models : the rise of Integrated Assessment Modelling in the climate science-policy interface since 1970. *Global Environmental Change*, 65, 102191. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102191>
- Vion-Dury, P. (2019). Le paradoxe de Jevons [magazine], hors-série, 52-52.

- Vivien, F.-D. (2009). Les modèles économiques de soutenabilité et le changement climatique. *Regards croisés sur l'économie*, 6(2), 75-83. <https://doi.org/10.3917/rce.006.0075>
- Vosooghi, R., Puchinger, J., Jankovic, M., & Vouillon, A. (2019). Shared autonomous vehicle simulation and service design. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 107, 15-33. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.08.006>
- Wade, L. (2008, septembre 20). *World War II Carpool Propaganda - Sociological Images*. The Society Pages. <https://thesocietypages.org/socimages/2008/09/20/world-war-ii-carpool-propaganda/>
- Wang-Erlandsson, L., Tobian, A., Van Der Ent, R. J., Fetzer, I., Te Wierik, S., Porkka, M., Staal, A., Jaramillo, F., Dahlmann, H., Singh, C., Greve, P., Gerten, D., Keys, P. W., Gleeson, T., Cornell, S. E., Steffen, W., Bai, X., & Rockström, J. (2022). A planetary boundary for green water. *Nat Rev Earth Environ*, 3(6), 380-392. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00287-8>
- WCED. (1987). *Our Common Future*. United Nations World Commission on Environment and Development.
- Wegener, M., & Fuerst, F. (2004, janvier 1). *Land-Use Transport Interaction: State of the Art*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1434678>
- Williams, E. (2011). Environmental effects of information and communications technologies. *Nature*, 479(7373), 354-358. <https://doi.org/10.1038/nature10682>
- Williams, L., Sovacool, B. K., & Foxon, T. J. (2022). The energy use implications of 5G: Reviewing whole network operational energy, embodied energy, and indirect effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112033. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112033>
- WWF & HP. (2008, février). *Outline for the first global IT strategy for CO2 reductions*. WWF & HP. [https://assets-global.website-files.com/64abf03488f32826460fe327/64ff19d86f3186c4eb3c3dff_6398b14d7bf819b66e41bd6_global_strategy_for_the_1st_billion_tonnes_with_ict_by_wwf%20\(1\).pdf](https://assets-global.website-files.com/64abf03488f32826460fe327/64ff19d86f3186c4eb3c3dff_6398b14d7bf819b66e41bd6_global_strategy_for_the_1st_billion_tonnes_with_ict_by_wwf%20(1).pdf)
- Yao, R., & Bekhor, S. (2021). A Dynamic Tree Algorithm for Peer-to-Peer Ridesharing Matching. *Netw Spat Econ*, 21(4), 801-837. <https://doi.org/10.1007/s11067-021-09523-y>
- Zwick, F., Kuehnel, N., Moeckel, R., & Axhausen, K. W. (2021). Agent-based simulation of city-wide autonomous ride-pooling and the impact on traffic noise. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102673>