

DÉCARBONER LA MOBILITÉ
DANS LES ZONES DE MOYENNE DENSITÉ
Moins de carbone, plus de lien

THE SHIFT
PROJECT

THE CARBON TRANSITION THINK TANK



Note Méthodologique

Auteur : Nicolas RAILLARD,
groupe de travail dirigé par Francisco LUCIANO

Août 2017



Étude réalisée avec
le soutien de la
Caisse des Dépôts

Crédit photo de couverture :
Virginie Girardon, Bruno Louis

Acronymes

2RM	Deux-roues motorisé
BAU	Business as usual
BE/BEX	Bus Express
CD	Courte distance
CP	Covoiturage Potentiel (section Covoiturage)
CSP	Catégorie socio-professionnelle
DB	(Scénario) Développement Bas
Dév	(Scénario) Développement
DT	Domicile-travail
ENTD	Enquête Nationale Transports Déplacements
ETP	Emploi à Temps Plein
Gi	(Scénario) Gisement
HT	Hors taxe
IDF	Ile-de-France
LD	Longue distance
PE	Périurbain élargi
p.km	Personne.kilomètre
PME	Petites et Moyennes Entreprises
TC	Transports en Commun, ou Trajet Covoitable (section Covoiturage)
TI	Trajet Initial (section Covoiturage)
TIC	Technologies de l'information et de la communication
TPE	Transports Publics Express
VAE	Vélo à Assistance Electrique
VCAE	Vélo-Cargo à Assistance Electrique
v.km	Véhicule.kilomètre
VP	Voiture Particulière
ZAU	Zonage en Aires Urbaines
ZMD	Zone de Moyenne Densité
ZUU	Zonage en Unités Urbaines

Les unités utilisés sont déclinées par puissance de 10 selon la nomenclature suivante : k = kilo = 10^3 ; M = méga = 10^6 ; G = giga = 10^9 ; T = tera = 10^{12}

Table des matières

Chapitre 1 - Introduction.....	9
1.1. Composition du groupe de travail.....	9
1.2. Les étapes de travail du projet.....	9
1.3. Les scénarios utilisés.....	12
1.4. Méthodologie de calcul des dépenses.....	16
1.5. Structure du document.....	18
Chapitre 2 - Modèle de mobilité IMMOVE (EDF)	19
2.1. Descriptif général.....	19
2.2. Fonctionnement.....	19
2.3. Mise-à-jour et validation 2008-2014.....	28
2.4. Scénario de référence 2014-2026	29
Chapitre 3 - Télétravail.....	33
3.1. Hypothèses pour le télétravail.....	33
3.2. Résultats.....	35
3.3. Interprétation.....	37
3.4. Bilan économique	38
Chapitre 4 - Distribution des achats de grande surface.....	43
4.1. Hypothèses pour la distribution des achats de grandes surfaces.....	43
4.2. Résultats.....	49
4.3. Interprétation	51
4.4. Bilan économique.....	53
Chapitre 5 - Système vélo.....	59
5.1. Hypothèses.....	59
5.2. Résultats.....	64
5.3. Interprétation.....	66
5.4. Scénarios cyclomoteur.....	70
5.5. Vélo + Train.....	71
5.6. Bilan économique	77
Chapitre 6 - Transports Publics Express (TPE).....	81

6.1. Etapes de calcul.....	81
6.2. Hypothèses du scénario « TPE Base ».....	83
6.3. Résultats du scénario « TPE Base ».....	94
6.4. Analyse d'un scénario intra-ZMD.....	97
6.5. Analyse de sensibilité.....	99
6.6. Analyse de la situation en Ile-de-France, dans un scénario Gisement.....	102
6.7. Bilan économique.....	106
Chapitre 7 - Covoiturage.....	111
7.1. Etapes de calcul.....	111
7.2. Calculs pour le scénario Gisement.....	122
7.3. Calculs pour les scénarios Développement.....	125
7.4. Synthèse des hypothèses sur les nouveaux comportements de mobilité.....	131
7.5. Résultats.....	132
7.6. Interprétation.....	134
7.7. Bilan économique.....	136
Chapitre 8 - Système de mobilité combiné.....	143
8.1. Hypothèses.....	143
8.2. Résultats.....	150
8.3. Interprétation.....	155
8.4. Bilan économique.....	159
Chapitre 9 - Bibliographie.....	163
Chapitre 10 - Annexes.....	167
10.1. Annexe 1 : Calcul du taux de remplissage avec système de covoiturage tenant compte du taux de remplissage observé sans système de covoiturage.....	167
10.2. Annexe 2 : Traitement des estimations brutes des experts covoiturages, pour le scénario Dév.....	168
10.3. Annexe 3 : Calcul du taux de remplissage moyen à partir des communautés de CP pour les motifs autres que le DT, dans le scénario Gisement.....	172
10.4. Annexe 4 : Calcul de la probabilité qu'un trajet initial TI pour le motif DT soit covoiturable.....	173
10.5. Annexe 5 : Traitement des estimations vélo.....	174
10.6. Annexe 6 : Calculs pour le scénario gisement TPE.....	177
10.7. Annexe 7 : Pourquoi nous n'avons pas approfondi certaines pistes de la vie de proximité.....	179

Chapitre 1 - Introduction

Cette Note Méthodologique accompagne le Rapport principal. Elle contient une description détaillée de la manière dont la modélisation a été réalisée.

1.1. Composition du groupe de travail

Le groupe de travail a initialement réuni 6 à 8 personnes – professionnels, porteurs de projets et experts du secteur – qui ont été choisis selon trois critères : leur expertise dans un des domaines d'action, leur intérêt pour les domaines d'action autres que leur domaine d'expertise et leur disponibilité. Les membres du Groupe de Travail élargi sont, à ce jour et par ordre alphabétique :

Jean-Baptiste **Boneu**, OuiHop

Nina **Bourgier**, MOP Easy

André **Broto**, Vinci Autoroutes

Jean-Michel **Cayla**, EDF

Christian **Dubost**, SNCF

Véronique **Michaud**, CVTC

Olivier **Paul-Dubois-Taine**, IESF

Béatrice **Vauday**, EcoSyst'M

Aurélien **Bigo**

Coline **Macquet**

Thomas **Matagne**, ECOV

Laura **Papet**

Direction

Francisco **Luciano**, avec

Nicolas **Raillard** et Clémence **Vorreux**

D'autres experts ont également été consultés ponctuellement pour avis.

1.2. Les étapes de travail du projet

Le projet s'est structuré autour de cinq domaines d'actions : le télétravail, la distribution des achats de grande surface, le système vélo, les transports publics express (TPE) et le covoiturage. Pour chacun de ces domaines, plusieurs phases de travail ont eu lieu (voir Figure 1) :

1 – Etat des lieux

Nous avons dressé l'état des lieux des pratiques relatives à chaque domaine, dans les zones de moyenne densité (ZMD). Dans le cadre du covoiturage par exemple, nous avons fait une revue de la littérature sur le covoiturage courte distance, et analysé les données disponibles (ENTD 2008) sur

l'accompagnement en voiture de personnes extérieures au ménage. Les retours d'expériences de start-ups, et les modes d'organisation sur ce marché ont aussi été pris en compte.

2 – Identification d'une évolution prometteuse

Des experts ont été sollicités afin de contribuer à l'élaboration de scénarios à l'horizon 2026 potentiellement intéressants en termes de réduction du CO₂.

Ainsi, c'est en nous appuyant sur les retours d'experts que nous avons élaboré, par exemple, le modèle de tournées de livraison dernier kilomètre pour la distribution des achats. Ce scénario a permis d'estimer les ordres de grandeur des émissions évitées par une nouvelle organisation de l'approvisionnement dans les zones de moyenne densité.

3 – Analyse d'impacts sur les comportements de mobilité locale

Nous avons analysé l'impact des différents domaines étudiés sur les comportements de mobilité : Comment les comportements de mobilité s'adaptent-ils pour chacun des domaines, et pour différents niveaux de motivation ?

Par exemple, les experts du covoiturage ont retenu quatre dimensions explicatives des comportements de covoiturage (le type de ménage auquel appartient la personne qui se déplace ; si cette personne a accès à la voiture particulière (VP) ; la distance à parcourir et le motif du déplacement), puis ils ont estimé la probabilité qu'un trajet correspondant à une combinaison de ces quatre dimensions se fasse en covoiturage. L'élaboration d'un modèle de mobilité en covoiturage permet ensuite d'estimer les possibilités de covoiturage en fonction du nombre d'usagers motivés pour utiliser ce mode de déplacements.

4 – Calcul des émissions de CO₂ évitées

Les émissions de CO₂ évitées par le domaine étudié, comparativement à un scénario « Référence », ont été calculées grâce au modèle de la mobilité française conçu par J.M. Cayla (EDF), IMMOVE. Le scénario Référence est basé sur le scénario Vision 2030 de l'ADEME et sur les projections démographiques de l'INSEE.

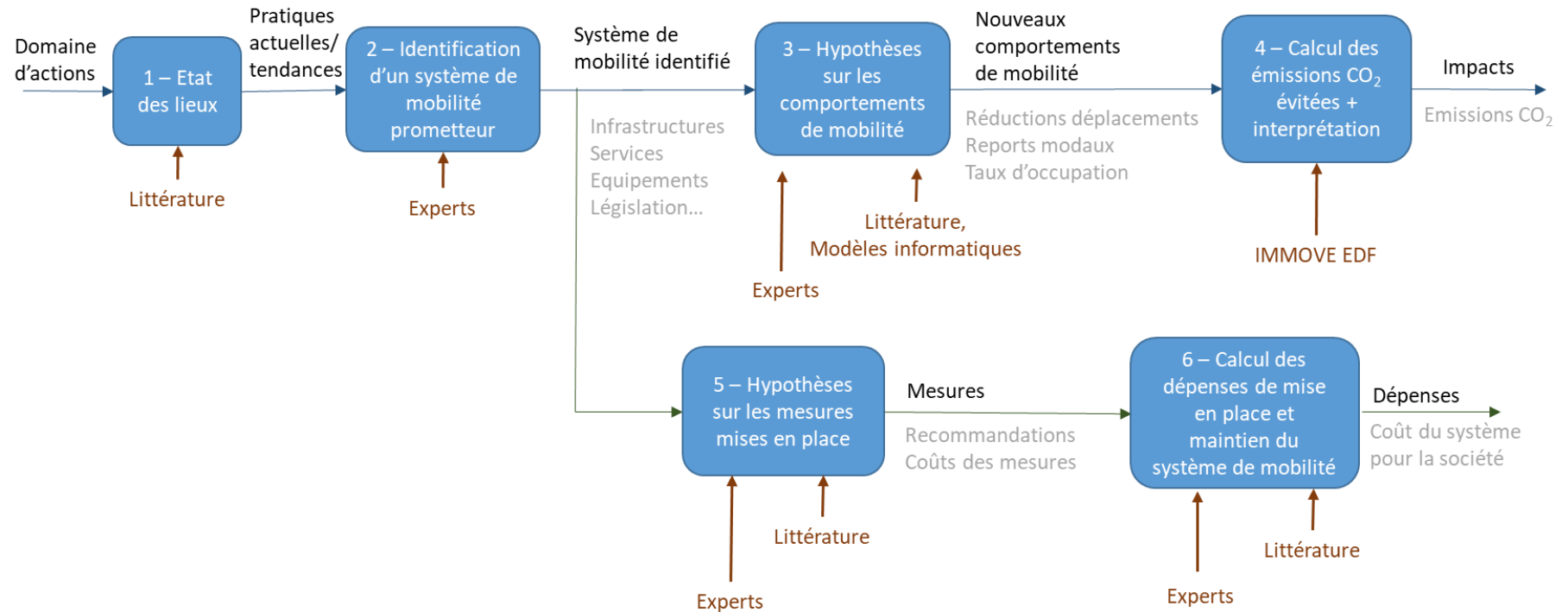
5 – Hypothèses sur les mesures mises en place

Nous avons identifié les mesures qu'il faudrait mettre en place pour que le scénario modélisé (à l'horizon 2026) se matérialise.

6 – Estimation des dépenses

Pour chaque trajectoire nous avons chiffré les différentes actions en termes de dépenses à faire par l'ensemble de la société.

Figure 1 : Etapes de travail pour chacun des domaines d'actions.



Ce document a pour objectif d'expliquer plus précisément les phases 3 (*Analyse d'impacts sur la mobilité locale*), 4 (*Calcul des émissions de CO₂ évitées*), et 6 (*Calcul des dépenses pour la société*) de chaque domaine d'action, et pour la combinaison des différents domaines d'action entre eux. Partant d'un système de mobilité envisagé comme étant prometteur du point de vue des émissions CO₂, il détaille les hypothèses retenues afin d'évaluer son impact sur les comportements de mobilité et donc sur les émissions de CO₂ associées, d'ici 2026. L'impact sur les comportements a été estimé selon deux scénarios différents (1.3). L'impact CO₂ a été estimé par le modèle de mobilité IMMOVE. Enfin, les dépenses en jeu dans la mise en place et le maintien du système de mobilité ont été estimées (1.4).

1.3. Les scénarios utilisés

Les comportements de mobilité face à une nouvelle alternative dépendent de la perception qu'un individu peut avoir de ses avantages et désavantages par rapport aux options existantes. Différents facteurs peuvent influencer cette perception : incitations matérielles ou symboliques, restrictions, taxes, avantages et récompenses, coûts monétaires, etc.

Par exemple, il paraît évident que le prix du pétrole, s'il dépasse certaines limites, jouera un rôle important sur les choix de mobilité en présence d'alternatives à la voiture (l'une des mesures de cet effet est l'élasticité-prix). Il en va de même pour une taxe carbone qui serait de plus en plus forte sur l'essence et le diesel, ou pour des mesures de restriction d'usage de la voiture à certains jours de la semaine, etc.

Les comportements de mobilité dépendent aussi de la culture et des pratiques de la population considérée : les habitants des Zones de Moyenne Densité (ZMD), dont le mode de vie est hautement dépendant de la possession et de l'usage d'une (ou plusieurs) voiture(s) particulière(s), sont-ils prêts à modifier leur mobilité, même en présence d'offres alternatives à la voiture ?

Ces éléments d'incertitude sont pris en compte dans la présente étude via la construction de trois scénarios différents :

- le scénario « Gisement » (Gi)¹ ;
- le scénario « Développement » (Dév)² ;
- le scénario « Développement bas » (DB)³.

Chacun des scénarios représente un état « motivationnel » de la population des ZMD. Par conséquent, trois jeux de comportements de mobilité, et trois résultats en termes d'émissions CO₂ seront produits pour chaque domaine d'action.

Dans chacun des scénarios, nous supposons que les destinations et la fréquence des déplacements sont indépendantes du mode utilisé.

1.3.1. Scénario « Développement » (Dév)

Dans le **scénario « Développement » (Dév)**, le système de mobilité proposé est entièrement mis en place, et la population a connaissance de la nouvelle offre qu'il constitue. On suppose dans ce scénario que l'offre de mobilité a changé, mais qu'aucun élément fiscal (tel une taxe carbone), de

¹ Le scénario « gisement » correspond au scénario *Potentiel Maximal* dans le rapport de synthèse.

² Le scénario « Développement » correspond au scénario « Volontariste » dans le rapport de synthèse.

³ Le scénario « Développement bas » n'est pas utilisé dans le rapport de synthèse.

règlementation (telle l'interdiction de la Voiture Particulière, VP, dans certaines zones) ou de contexte économique (tel un prix fortement croissant du pétrole) ne dégrade l'attractivité des alternatives au domaine considéré. Les comportements de mobilité dans ce scénario sont donc déterminés par l'incitation que la solution constitue par elle-même, dans un monde n'ayant pas (beaucoup⁴) changé par ailleurs.

Il s'agit d'un scénario dans lequel tout a été fait pour mettre en place le nouveau système de mobilité mais où l'attractivité des alternatives est peu modifiée. L'intérêt de ce scénario est d'évaluer l'efficacité « endogène » de la solution en termes d'impacts carbone à un horizon de temps de 10 ans.

1.3.2. Scénario « Développement bas » (DB)

Dans le scénario « Développement bas » (DB), la population utilisatrice du nouveau système de mobilité identifiée dans le scénario Dév, est réduite de moitié. Ce scénario est un dérivé du scénario précédent. L'ensemble des deux constitue un **test de sensibilité à la motivation que génère la solution par elle-même**. Autrement dit, on cherche avec ce scénario très contrasté par rapport au précédent, à comparer le taux d'émissions de CO₂ selon l'attractivité (endogène ou exogène) que génère l'offre nouvelle de mobilité.

Ce test permet de mesurer l'effet d'une variation des hypothèses de motivation sur les émissions de CO₂ évitées, que cette variation soit vue comme une correction de l'hypothèse, ou comme un test de sensibilité sur les processus du modèle.

1.3.3. Scénario Gisement (Gi)

Dans le scénario « Gisement » (Gi), on suppose que **tous les habitants des ZMD sont prêts à modifier leurs comportements de mobilité dans le sens de la solution proposée**. Par exemple, pour le domaine du covoiturage, le scénario « Gisement » prend pour hypothèse que tout le monde *veut* covoiturer pour ses besoins de mobilité (sans forcément trouver d'opportunité de covoiturage). Le scénario n'explicite pas la nature de la motivation (le « pourquoi » derrière cette motivation) mais en mesure les effets. Le scénario « gisement » permet ainsi de mesurer les effets maximum en termes d'émissions CO₂, de budget pour les ménages et d'énergie consommée, de la mise en place de la solution. Il répond à la question : « Combien, au plus, peut-on espérer éviter d'émissions CO₂ grâce à cette solution ? ». La mise en évidence du gisement de CO₂ évité par la solution proposée permet d'évaluer sa pertinence en regard des moyens nécessaires à sa mise en œuvre, et en comparaison avec d'autres solutions possibles (estimation du coût à la tonne de CO₂ évitée). **Le gisement permet donc de faire le tri entre les solutions qui mènent à des réductions significatives d'émissions CO₂ et les autres**. Il peut de plus constituer un objectif, prétexte à l'action vers la solution proposée, dans le cas où cette dernière est prometteuse.

La définition du scénario « Gisement » implique de **fixer des limites « physiques »** à cette motivation. Par exemple, il paraît difficile d'imaginer que la majorité des individus fassent des trajets de 50 km à vélo pour aller travailler tous les jours. Ces limites ont été fixées en tenant compte des us et coutumes actuels des français. Elles sont fonction des incitations et contraintes exogènes au système de mobilité, elles-mêmes émergentes des structures sociales, économiques et légales en place, qui déterminent en grande partie les comportements de mobilité.

⁴ Voir le scénario de référence utilisé, décrit dans la section « Scénario de référence 2014-2026 ».

Cette étude s'appuie sur l'hypothèse de **l'existence d'un prix du carburant fossile ou (de manière équivalente) du carbone**, qui, toutes choses égales par ailleurs, mène à ces limites « physiques » en jouant sur l'attractivité de l'usage de la VP thermique (voir Figure 2). Par exemple :

- la distance moyenne du détour nécessaire pour aller chercher un covoitureur augmente avec le prix du carburant : selon une rationalité économico-temporelle, si l'essence est plus chère, un détour légèrement plus long mais qui permet de partager les frais, devient « rentable ».
- De même, si on considère la flexibilité que les individus sont prêts à fournir pour arranger leurs horaires avec un covoitureur, on constatera qu'elle augmente avec le prix du carbone.
- Plus le prix du carburant est élevé, plus les individus seront prêts à remplacer des trajets en VP par des trajets en vélo, et plus les distances moyennes parcourues en vélo seront grandes.

Ainsi, on peut représenter l'incitation qui mène à chaque limite par un prix du carbone équivalent toutes choses égales par ailleurs, représentant directement une perte d'attractivité de la VP thermique (Figure 2). Ce prix du carbone est donc associé aux comportements qui, en moyenne sur la population, atteignent ces limites sans les dépasser, et qui sont à l'origine d'émissions CO₂ évitées. On obtient ainsi une gradation en termes d'émissions CO₂ évitées entre le scénario « Développement » et le scénario « Gisement », la différence entre les deux étant explicable par une perte d'attractivité de la VP qu'on choisit ici de représenter sous forme d'un prix du carbone (Figure 3).

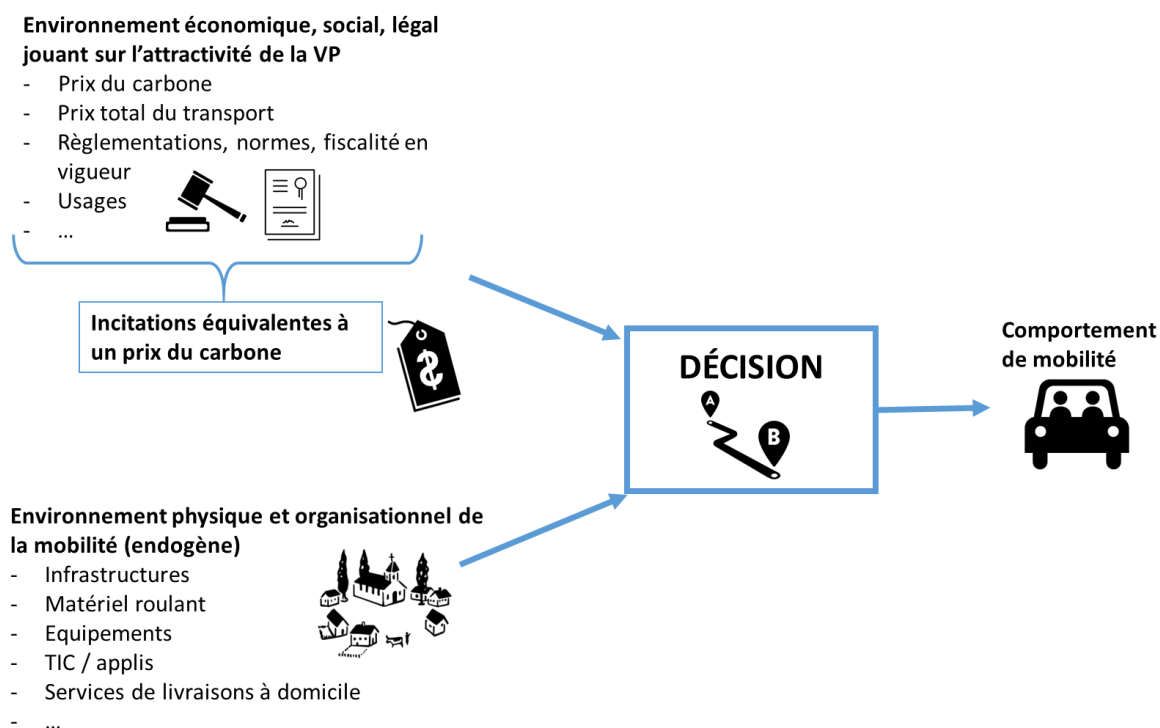


Figure 2 : Modalité de prise de décision sur les comportements de mobilité, qui dépend d'incitations endogènes au système de mobilité existant et d'incitations exogènes.

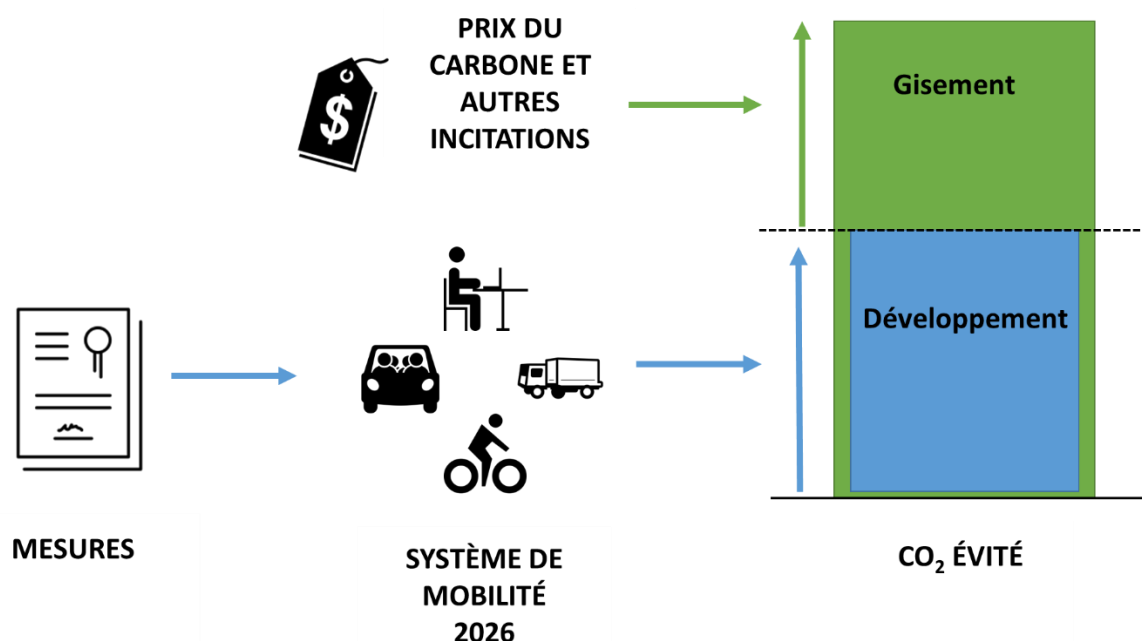


Figure 3 : Définition des scénarios Développement et Gisement, pour chacun des domaines d'action considérés. Les incitations endogènes constituées par les systèmes de mobilité mis en place en 2026 mènent à éviter les émissions CO₂ qui seront calculées par les scénarios Dév et DB. Lorsque des incitations exogènes fortes s'additionnent aux incitations endogènes, la quantité de CO₂ évitée est plus grande, et est calculée par le scénario Gisement (Gi).

La philosophie avec laquelle chacun des scénarios a été conçu étant expliquée, il convient de nuancer les conditions de leur atteinte. Ces scénarios représentent in fine un ensemble d'hypothèses dont nous avons étudié les conséquences (en termes d'émissions CO₂ et de dépenses induites) dans cette étude. En ce sens, chaque scénario est un point représentant un ensemble de paramètres indépendants dans l'espace des comportements de mobilité (Ji, dans la Figure 4), donnant lieu à des points de mesure dans les espaces des émissions CO₂ et des dépenses ((Ei, Di) dans la Figure 4). On peut relier les comportements à la mise en place de mesures préalables destinées à modifier les comportements (Ii dans la Figure 4). Cependant, nous ne faisons pas de lien quantitatif précis entre les mesures mises en place et les comportements obtenus. Tout au plus estimons nous que les mesures proposées (dans les différents chapitres du rapport) induisent des comportements qui vont dans la direction du jeu de comportements pris en hypothèses, sans être capable de quantifier la magnitude des changements de comportements. Ainsi, nous préférons présenter les trajectoires proposées comme menant à un ensemble de jeux de comportements possibles, dont l'un d'eux est le point Ji testé. En soi, le calcul de la réduction des émissions de CO₂ associés à un changement de comportements permet de donner un ordre de grandeur des changements de comportement à obtenir pour produire une telle réduction des émissions de CO₂.

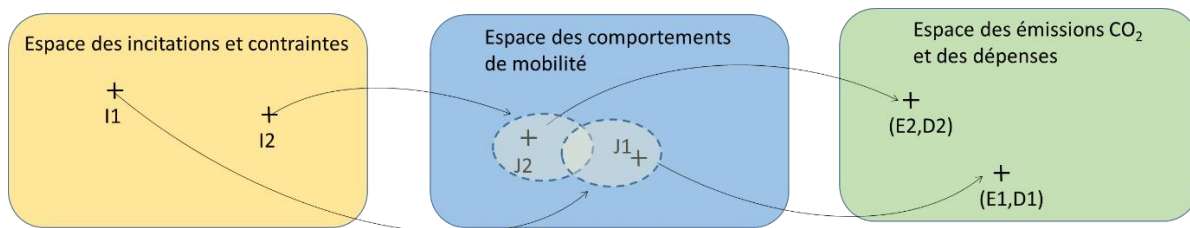


Figure 4 : A un jeu d'incitations et de contraintes I1 (par exemple, une incitation fiscale pour le covoiturage associée à un ensemble d'aires de covoiturage, et à une taxe carbone sur le carburant) correspond un ensemble de jeu de comportements de mobilité (à un niveau le plus micro possible, comme par exemple une augmentation du nombre d'individus motivés par le covoiturage selon différents motifs, et pour un temps maximum d'arrangement entre les covoitureurs de 30 min). Dans cette étude, nous avons sélectionné plusieurs points de test, chacun correspondant à un scénario (par exemple, J1 pourrait être le test d'une augmentation du nombre de covoitureurs pour les loisirs de +7 % et de celui du domicile-travail de +9 %, avec un temps maximum d'arrangement entre les covoitureurs de 30 min). Pour chaque point de test, nous avons calculé la réduction des émissions de CO₂ associée (par exemple E1), et les dépenses de mise en place des mesures (par exemple D1). On peut en conclure que pour obtenir une réduction des émissions E1, il faut une magnitude de changement de comportements J1. Pour espérer obtenir le changement de comportement J1, la mise en place de tout ou partie des trajectoires proposées est nécessaire.

1.4. Méthodologie de calcul des dépenses

Le but de ce calcul est d'évaluer la différence de coût entre deux systèmes de mobilité (le scénario considéré et le scénario Référence), qui répondent tous deux au même besoin.

En raisonnant par analogie, un avion assouvit le besoin de se déplacer rapidement sur de longues distances. Lorsqu'un concepteur d'avion fait évoluer le design de son avion, différents paramètres changent, notamment les intrants nécessaires à son fonctionnement, c'est-à-dire nécessaires à l'assouvissement du besoin. Par exemple, si le moteur consomme moins de kérosène, alors la quantité de kérosène à service constant diminue. Si les pièces en titane du nouveau moteur ont une durée de vie plus longue, alors la quantité de titane consommé à service constant diminue. Pour chaque intrant, un tel bilan peut être fait. Il en va de même pour « l'intrant » monétaire. Combien d'argent est investi dans la création et le maintien dudit service, au long de la vie du système ? Et cette somme d'argent a-t-elle évolué avec le nouveau design de l'avion ?

Nous avons comparé, pour chaque domaine d'action, les dépenses induites par le système de mobilité en France métropolitaine tel qu'il existerait dans le scénario Référence (Sref) et celles induites par un système de mobilité modifié (appelé S'), en 2026 (Figure 5). Nous avons ainsi listé tous les éléments composant le système (qu'il s'agisse de biens ou de services) et nous sommes posé les questions suivantes :

- Pour les éléments matériels :
 - Combien cet élément coûte-t-il ?
 - Au bout de combien de temps aura-t-on réinvesti l'argent mis initialement dans cet élément pour qu'il assure sa fonction continuellement (question de la « durée de vie » de l'élément) ?
- Pour les éléments humains (travail)
 - Combien de personnes pour assurer le service ?
 - Pour quel salaire ?

La liste obtenue constitue les différents postes de dépenses. Afin de ne pas lister les postes qui seraient égaux dans le système de mobilité Sref et dans le système de mobilité modifié S' en 2026, nous n'avons listé que ceux ayant évolué entre Sref et S'. Trois types de poste ont été identifiés :

- Le poste de dépense a été modifié entre Sref et S'. Par exemple, la mise en place d'un système vélo modifie le poste de dépense « consommation de carburant », car le remplacement de l'usage de la VP par le vélo permet de réduire cette consommation.
- Le poste de dépense a été créé. Par exemple, la mise en place d'un système vélo requiert la mise en place de vélo-école sur le territoire, poste qui n'existe pas dans le système de mobilité 2008.
- Le poste de dépense a été supprimé. Par exemple, la mise en place de solutions alternatives à la VP pourrait mener certains ménages à se passer de VP et donc à supprimer ce poste de dépense.

Pour détecter plus rapidement les éléments différents entre les deux systèmes, nous nous sommes posé les questions suivantes :

- Quels éléments matériels (infrastructures, équipements...) sont-ils différents entre les deux systèmes ? En quoi leur maintenance est-elle différente ?
- Quelle différence y a-t-il entre les quantités de carburant consommées par les systèmes ? Quels usages sont-ils différents ?
- Quels métiers sont-ils différents entre les deux systèmes ?

Nous avons supposé dans cette analyse qu'un seul acteur agrégé (l'ensemble des consommateurs finaux, qu'il s'agisse de collectivités, d'entreprises, ou de ménages) assume les dépenses. Ainsi, nous avons mesuré le coût global du système, qui est une image de la quantité d'heures de travail humain pour produire le service considéré. Les postes de dépenses induites par le système de mobilité de référence Sref ont été listés, ainsi que ceux du système modifié S'. Les postes sur lesquels les dépenses de S' sont supérieures à ceux de Sref représentent une **augmentation des dépenses**. Au contraire, ceux sur lesquels les dépenses de S' sont inférieures à ceux de Sref représentent une **réduction des dépenses**. Lorsque les réductions des dépenses sont supérieures à leurs augmentations, on parlera de **bénéfice** apporté par le système de mobilité. Dans le cas contraire, on parlera de **déficit** causé par le système de mobilité.

Pour l'estimation finale des différents postes :

- Les dépenses sont estimées hors taxe sur la consommation (TVA, et TICPE pour le carburant).
- Les dépenses dues aux salaires pour les différents services sont estimées en incluant les charges sociales (patronales et salariales) ; elles correspondent donc à l'argent dépensé par les entreprises (ou par l'Etat) pour verser les salaires (ou traitements) pour assurer lesdits services. La prise en compte des charges sociales permet d'être cohérent avec le coût final du service, tout comme le prix hors taxe d'un produit tient compte des salaires, charges sociales incluses.
- Les dépenses ont été annualisées, afin de comparer les systèmes en régime stabilisé (autrement dit, on amortit les coûts initiaux sur le nombre d'années au bout desquelles on aura réinvesti la somme initiale en maintenance). Pour cela, on divise la dépense initiale par la « durée de vie » estimée (en années).
- Une méthode de type « bottom-up » a été utilisée, via une estimation du coût unitaire des différents éléments du système, puis une multiplication par le nombre d'unités ayant ce coût dans le système. Par exemple, le coût du système de covoiturage se base sur une estimation du coût unitaire d'une station de covoiturage et sur une estimation du nombre de stations nécessaires au bon fonctionnement du système proposé.

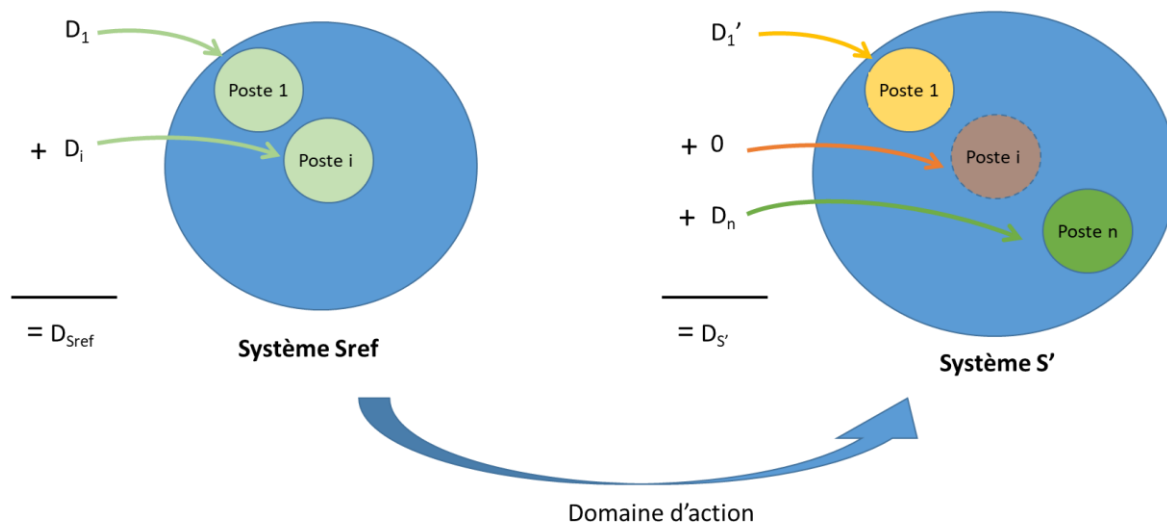


Figure 5 : Différents postes de dépenses en 2026 (D_i) dans le système de mobilité du scénario Référence (Sref), et dans un système de mobilité modifié par la mise en place de différentes actions (Système S'). En passant de Sref et S', le poste 1 est modifié, le poste i est supprimé, et le poste n est apparu. La différence entre $D_{S'}$ et D_{Sref} représente le bénéfice, ou le déficit, apporté par la mise en place de S' par rapport à Sref.

1.5. Structure du document

Le document se compose d'une première partie expliquant le fonctionnement du modèle IMMOVE utilisé pour calculer les émissions de CO₂ des différents systèmes de mobilité proposés, sous différentes hypothèses d'usage de ces systèmes (les scénarios). Le scénario de référence, auquel sont comparés les résultats des nouveaux systèmes de mobilité, y est détaillé, ainsi que la zone géographique d'étude (les « zones de moyenne densité », ZMD).

Une seconde partie est dédiée à chaque domaine d'action : le télétravail, la distribution des achats de grande surface, le système vélo, les TPE, et le covoiturage. Pour chacune, les points suivants sont abordés :

- **Le lien entre le système de mobilité proposé et la quantification des comportements de mobilité** : cette quantification a été faite en fonction de différents facteurs, déterminants de la mobilité, tels que le type de ménage auquel appartient la personne faisant le trajet, sa catégorie socio-professionnelle, la distance du trajet, ou son motif. Elle fournit une estimation des nouveaux besoins en mobilité (par exemple, réduction des besoins par une réorganisation de la vie locale), de nouvelles parts modales (par exemple, un report modal vers le vélo), ou de nouveaux taux de remplissage (par exemple, un taux de remplissage moyen des voitures plus grand en présence d'un système de covoiturage). Ces caractéristiques des nouveaux comportements de mobilité en présence du système de mobilité constituent les hypothèses d'entrée du modèle IMMOVE. Les résultats, en termes de réduction des émissions de CO₂, obtenus via le modèle IMMOVE en partant de ces hypothèses, sont présentés.
- **L'interprétation des résultats** : expliquant comment le modèle a généré les valeurs obtenues à partir des hypothèses d'entrée, et comparant les différents scénarios entre eux.
- **Le bilan économique**

Chapitre 2 - Modèle de mobilité IMMOVE (EDF)

2.1. Descriptif général

IMMOVE est un modèle de mobilité à l'échelle de la France, intégrant les mobilités longue distance et courte distance des passagers.

En entrée, le modèle s'appuie sur les comportements de mobilité sur différentes catégories de trajets. Par exemple, il considère la part modale, le type de véhicule utilisé, et le taux de remplissage pour effectuer un trajet vers une activité de loisirs, d'une distance de 7 à 15 km, par une personne célibataire retraitée et dont les revenus sont supérieurs au 3^{ème} décile de la distribution de revenus française.

La part modale et le type de véhicule déterminent les émissions CO₂ du trajet. Plus d'un millier de types de trajets sont ainsi pris en compte dans les données d'entrées. En additionnant les émissions des trajets de chaque type, le modèle permet d'établir une estimation des émissions de la mobilité française dans son ensemble. De même, le modèle permet de calculer la consommation d'énergie afférente à la mobilité française, et la part du budget « mobilité » des ménages dans leur budget complet.

Ce calculateur a été conçu par EDF afin d'évaluer les impacts de changements de comportements de mobilité ou de changements organisationnels sur la mobilité française (exprimée en personne.km (p.km)), ses émissions CO₂, sa consommation énergétique, sa part dans les budgets des ménages et l'évolution du parc de voitures (par exemple, les effets d'une aide à l'achat de voitures électriques). Le modèle se base sur des données représentatives de l'année 2008 (CGDD, 2008).

Le fonctionnement global du calculateur est décrit ci-après ; la méthode qui a permis de prolonger la validité du modèle de 2008 à 2014 (la mise-à-jour du modèle) est ensuite détaillée ; enfin, le scénario de 2014 à 2026, pris pour référence de cette étude, est présenté.

2.2. Fonctionnement

2.2.1. Données d'entrée

Le modèle comprend plusieurs types de données d'entrée. Les données de mobilité française intégrées par défaut dans le modèle sont issues de l'Enquête Nationale Transports et Déplacements (ENTD) de 2008 (CGDD, 2008). De même, les données sur le type de voiture particulière (VP) possédée par les ménages (carburant au diesel ou à l'essence, puissance fiscale, âge du véhicule) sont issues de l'ENTD 2008. La consommation unitaire en conditions réelles de conduite estimée des VP provient des fiches techniques du site Lacentrale.fr (La Centrale.fr, 2016), qui fait le lien entre les données disponibles dans l'ENTD 2008 et la consommation mixte lors du Nouveau Cycle Européen de Conduite. Les types de carburant et consommations unitaires des Transports en Commun (TC) sont issus de données GART, CERTU et STIF.

Les données démographiques utilisées sont issues de l'INSEE : la projection des structures familiales (INSEE, 2007), la projection démographique par âge (INSEE, 2010), la projection démographique des régions (INSEE, 2010).

2.2.2. Calcul des sorties

Partant de ces données 2008, le modèle projette le système de mobilité dans le temps, et raisonne par année. Le modèle calcule les données annuelles suivantes :

- La quantité de mobilité, en Gp.km/an, par mode, par distance et par type de ménage
- Les distances parcourues par les VP, en veh.km/an, par distance et par type de ménage
- Les émissions de CO₂, en Mt/an
- La consommation d'énergie, en TWh/an, par mode, par distance et par type de ménage
- Les dépenses monétaires pour l'achat, le carburant, l'assurance et l'entretien de la voiture particulière ainsi que les titres de transport en commun, par type de ménage
- Le parc de VP, en million d'unités, par gamme, carburation, millésime (l'année de mise en vente du véhicule) et type de ménage

Cette sous-section détaille la manière dont le modèle calcule les émissions de CO₂ françaises pour une année.

Le calcul des émissions CO₂ est basé sur l'identité de Kaya :

$$CO_2 = \frac{CO_2}{NRJ} * \frac{NRJ}{veh.km} * \frac{veh.km}{p.km} * \frac{p.km}{traj} * \frac{traj}{pop} * pop$$

Avec :

- CO_2 , la masse de CO₂ émise par la mobilité française l'année considérée (en Mt)
- $\frac{CO_2}{NRJ}$, la quantité moyenne de CO₂ émise par unité d'énergie consommée dans le système de mobilité français (en Mt.J⁻¹). Cette quantité est déterminée par le mix énergétique français utilisé dans la mobilité. Par exemple, la part des différentes carburations dans les parcs de véhicules considérés (diesel, essence, GPL, gaz naturel, électricité) est utilisée. Dans le cas de l'électricité, le mix électrique français est utilisé.
- $\frac{NRJ}{veh.km}$, la quantité d'énergie consommée par véhicule.km (en J.veh⁻¹.km⁻¹). Il s'agit de la consommation unitaire moyenne du parc de véhicule français.
- $\frac{veh.km}{p.km}$, la quantité moyenne de veh.km par p.km (en veh/p), qui est l'inverse du taux de remplissage moyen des véhicules.
- $\frac{p.km}{traj}$, la distance moyenne des trajets (en km/traj).
- $\frac{traj}{pop}$, le nombre moyen de trajets par personne sur l'année considérée (en traj/an/p).
- pop , la taille de la population l'année considérée (en p)

Selon le même raisonnement, l'énergie totale consommée par la mobilité française peut être calculée, ainsi que le budget que cela représente pour les ménages (connaissant la distribution des budgets de ménages par quintile).

Dans la suite de la description du modèle, seules les émissions CO₂ seront mentionnées, mais les raisonnements sont les mêmes pour l'énergie consommée, le budget des ménages etc.

2.2.3. Catégories de trajets considérées dans le modèle

L'identité de Kaya, dans le modèle, n'est pas appliquée à une mobilité française moyenne, mais à de nombreuses catégories de trajets. Un trajet est caractérisé par :

- l'individu qui se déplace,
- le motif de son déplacement,

- la distance réalisée,
- le mode de transport,
- le type de route empruntée,
- etc.

Dans le modèle, chacune de ces caractéristiques est décrite selon différentes catégories. Par exemple, la distance du trajet n'est pas représentée selon un continuum de distances allant de 0 à 80 km, mais par plusieurs catégories (fourchettes) de distances (de 7 à 15 km est l'une de ces catégories). Le Tableau 1 résume l'ensemble des catégories prises en compte dans le modèle (y compris les catégories relatives à la mobilité longue distance). Au total, le modèle contient plus de 1000 populations de trajets différentes, qui correspondent à autant de combinaisons parmi les différentes catégories.

Tableau 1 : Catégories de trajets utilisées dans le modèle IMMOVE.

Variable	Nombre de catégories	Catégories
Niveau de vie	5	ratio entre le revenu du foyer et le nombre d'unités de consommation, distribué en quintiles
Structure familiale	6	célibataire +/- 65 ans; couple sans enfants +/- 65 ans; famille monoparentale; couple avec enfants
Tissu (voir section Zonage d'étude)	3	Rural ZMD Centre urbain
Ménages	90	90 catégories, résultant de la combinaison de trois variables : - niveau de vie (5 quintiles) - structure familiale (6 catégories) - tissu (3 catégories)
CSP	6	Scolaire, étudiant, employé/ouvrier, cadre/intermédiaires, personne au foyer, chômeur, retraité
Accès à la voiture particulière (VP)	3	0 ; 0,5 et 1 ou + (en VP/adulte du ménage)
Individus	267	267 catégories résultant de la combinaison et du regroupement de ménages, CSP et accès VP
Motif de déplacement	10	travail, études, trajet pro, achats proximité, achats hypermarché, démarches, santé, café/resto, loisirs, vacances/visites
Distance du déplacement	12	<1km, 1-3km, 3-7km, 7-15km, 15-30km, 30-50km, 50-100km, 100-250km, 250-500km, 500-1000km, 1000-3000km, >3000km
Trajet	85	70 catégories de trajets en mobilité locale et 15 catégories de trajets longue distance basés sur distance x motif
Mode	8	Marche à pied, vélo, 2 roues motorisés, voiture particulière, route (bus, car), ferroviaire urbain (métro, tram), train et avion
Voies	3	urbain (<50km/h), route et autoroute
Gamme VP	3	Petit, moyen, grand véhicule (PTAV)
Carburation	6	Essence, Gazole, GPL, GNV, VHR, VE
Energie	6	Essence, Gazole, GPL, GNV, Electricité, Kérosène

C'est en appliquant l'identité de Kaya à chaque population de trajets puis en additionnant les émissions CO₂ obtenues que les émissions CO₂ de la mobilité française dans son ensemble sont obtenues.

Par exemple, l'identité de Kaya sera appliquée pour la population de trajets particulière suivante : un ouvrier vivant en couple avec enfants dans une ZMD, dont les revenus sont dans le 2^{ème} quintile, qui a accès à une VP, et fait un déplacement domicile-travail de 15 à 30 km, avec sa voiture (une essence de taille moyenne) par la route. Ce type de déplacement rassemble un certain nombre de trajets, c'est-à-dire qu'il forme une population de trajets. Le modèle applique l'identité de Kaya à cette population, c'est-à-dire :

- multiplie la taille annuelle de la population de trajets concernée (combien de trajets de ce type sont réalisés chaque année en France, *traj* dans l'identité de Kaya) par la distance moyenne réalisée par cette population de trajets,
- puis la divise par le taux de remplissage moyen de cette population,
- la multiplie par la quantité d'essence par km des voitures sur ces trajets,
- et enfin la multiplie par les émissions de CO₂ par litre d'essence consommé. On obtient ainsi la quantité de CO₂ émise par cette population de trajets.

En additionnant les quantités émises par l'ensemble de populations de trajets⁵ qui constituent la mobilité française, le modèle détermine les émissions CO₂ de l'ensemble de la mobilité française.

2.2.4. Projection au-delà de l'année 2008

Le modèle contient toutes les caractéristiques de la mobilité française en 2008, ainsi qu'une méthode de calcul pour obtenir les émissions CO₂ d'un système de mobilité à partir de ses caractéristiques. Ces recueils de données permettent au modèle de calculer les émissions CO₂ (a) de la mobilité française telle qu'elle a été mesurée en 2008 par l'ENTD, mais aussi d'évaluer les émissions (b) de la mobilité française selon l'évolution des comportements des populations, du type de voitures dont elles disposent, etc, en modifiant les données d'entrée. Ainsi par exemple, si l'on souhaite analyser les émissions de CO₂ en 2008 en posant l'hypothèse que 15 % des trajets domicile-travail avaient été réalisés en transport en commun plutôt qu'en voiture, il est possible de le faire en supposant que la part modale des TC avait été plus grande.

Ce qui nous intéresse ici, c'est que le modèle va plus loin : **il permet de projeter la mobilité française dans l'avenir en s'appuyant sur deux indicateurs : la projection de la démographie française, et le renouvellement du parc de voitures.** La Figure 6 résume les mécanismes de calcul du modèle IMMOVE.

Le premier mécanisme consiste à prendre les hypothèses de projections démographiques de l'INSEE pour générer la demande en mobilité. La demande évolue en tenant compte du type de ménage, de l'âge et de la région d'appartenance. Par exemple, si la population des membres d'un couple de moins de 65 ans et sans enfants, vivant en Bretagne, génère 100 000 déplacements/an et que cette population augmente de 10 %, il y aurait non plus 100 000, mais 110 000 déplacements/an, qui seraient répartis dans les différentes catégories de trajets (par motifs, modes, distances...) telles qu'ils l'étaient avec la population initiale. D'autre part, la démographie a un impact sur le nombre de voitures vendues. L'application du modèle suppose donc une augmentation de la population sans

⁵ Certains types de trajets n'existent pas (par exemple, les trajets en vélo pour un motif domicile travail de plus de 100 km). D'autres ne sont pas statistiquement significatifs. Dans ce cas, les quelques trajets concernés sont agglomérés avec un type de trajets proches.

changement des comportements liés à la mobilité au sein de chaque catégorie de population (achats de véhicules et trajets effectués par ménage ou par personne).

Le second mécanisme met en jeu le parc global de voitures particulières et son usage. Les ménages utilisent plus ou moins ce parc en fonction de leurs comportements de mobilité. Le parc considéré répond au postulat suivant : lorsque des voitures ont parcouru une distance totale suffisamment grande, elles sont considérées comme étant en fin de vie, et sont remplacées par des voitures neuves l'année suivante. Le parc des voitures neuves, caractérisé par des parts de type de carburation, de gamme de voiture et d'énergie utilisée, évolue selon des hypothèses modulables. Ces hypothèses sont fixées dans cette étude par le « scénario Référence ». Ainsi par exemple, dans un scénario qui suppose que les voitures neuves vendues consomment moins que les voitures du parc en usage, et s'améliorent d'année en année, une lente baisse de la consommation moyenne du parc serait observée au cours des années, par intégration des voitures neuves moins émettrices.

Au sein de la population de ménages, le ratio voitures neuves sur voitures d'occasion dépend de la classe de revenu du ménage. Chaque type de ménage, lorsqu'il achète une voiture neuve, le fait en accord avec les statistiques de sa population en ce qui concerne la gamme et la carburation de la voiture. Enfin, pour chaque type de ménage, le parc de voitures est suivi par âge calendaire et kilométrique des voitures. L'âge moyen du parc par type de ménage est donc connu.

En dehors de ces deux mécanismes, les variables de la mobilité sont supposées constantes par défaut (mais peuvent être modifiées pour tester des scénarios) :

- La demande en mobilité par type de distance et par motif : le modèle suppose par exemple que le nombre de trajets et de km annuels pour aller faire les courses en voiture par personne reste constant.
- Les parts modales par type de distances, de tissu urbain, d'accès à la VP et de motif.
- Les taux de remplissage par distance, motif, accès à la VP et structure familiale.
- Le nombre de VP par ménage, selon les types de ménage.
- Les parts du marché des véhicules neufs, en fonction du mode, du type de VP et du type de ménage le cas échéant : par exemple, le modèle suppose que les parts de marché des VP neuves achetées par les couples sans enfant, du 2^{ème} quintile, de l'urbain dense sont allouées à x % à des petites voitures essences, à y % à des petites voitures diesel, etc, les pourcentages considérés étant constants.
- La durée de vie des véhicules, selon le mode et, pour les VP, leur type (carburation et gamme), suit une loi log-normale fonction du kilométrage, constante avec le temps, de moyenne 135 000 km, et de maximum 250 000 km.
- Les ratios d'utilisation des VP, par type de VP et de ménages sont également constants. Par exemple, le modèle suppose que les VP diesel sont utilisés plus intensément que les VP essence. Le ratio sert à corriger l'allocation des p.km annuels en VP sur les différents parcs de voitures.

C'est en jouant sur ces variables que différents scénarios mettant en jeu les comportements de mobilité peuvent être testés.

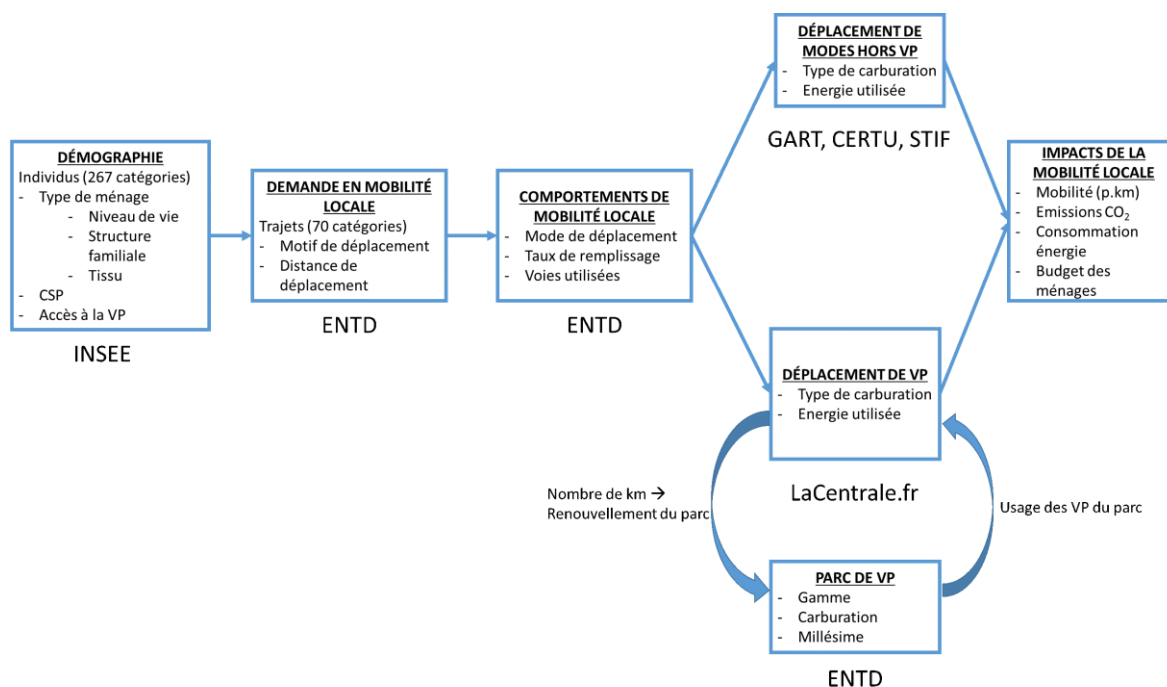


Figure 6 : Les étapes effectuées par IMMOVE pour chaque année modélisée, avec les sources de données utilisées par les différentes étapes.

2.2.5. Zonage d'étude

Les trajets captés par le modèle se caractérisent par une zone d'origine et une zone de destination. Le présent projet s'est focalisé sur les « Zones de Moyenne Densité » (ZMD). L'élément atomique du zonage utilisé est la commune, ce qui est classiquement le cas pour les zonages INSEE (zonage en aires urbaines ZAU et zonage en unités urbaines ZUU).

Pour construire les ZMD, deux facteurs géographiques ont été utilisés : la taille de l'aire urbaine à laquelle la commune appartient, et son éloignement par rapport au centre de ladite aire urbaine. Les ZMD sont constituées des communes appartenant aux aires urbaines, éloignées du centre pour les grandes aires, et proches du centre pour les petites (voire les villes-centre elles-mêmes). Le zonage mis en place se base donc sur deux dimensions : la taille des aires urbaines, et les quatre catégories du zonage en aires urbaines de l'INSEE (qui fait une discrimination entre ville-centre, banlieue, périurbain et rural). Il s'inspire de l'étude sur les modes de vie et opinions des français en fonction de leur lieu de vie réalisée par le CREDOC (CREDOC, 2009). Les deux critères de cette construction ciblent à la fois les communes de ZMD, par définition moyennement denses, et l'absence ou l'insuffisance de dessertes par les transports en commun.

De manière plus détaillée, les ZMD sont construites à partir du ZAU et du ZUU de l'INSEE. Pour chaque commune, on détermine une zone d'appartenance selon deux indicateurs :

- Position dans l'aire urbaine :
 - Si la commune est hors aire urbaine ou multipolarisée, il s'agit d'une commune dite rurale (1^{ère} colonne dans le Tableau 2)
 - Si la commune est polarisée, en banlieue, ou si c'est la ville-centre, elle est dite respectivement polarisée (2^{ème} colonne, dont l'ensemble définit, dans ce rapport, le

Périurbain Elargi, PE), périphérique du pôle urbain (3^{ème} colonne), ou ville-centre du pôle urbain (4^{ème} colonne).

- Dimensions de l'aire urbaine :
 - Si la commune en question est rurale, sa taille est définie par sa population,
 - Si la commune n'est pas rurale, la taille est celle de la commune centre de l'aire urbaine à laquelle elle appartient.
 - Catégorie des communes selon leur taille:
 - Taille strictement inférieure à 2 000 habitants (1^{ère} ligne du Tableau 2)
 - Taille comprise entre 2 000 et 100 000 habitants (2^{ème} ligne du tableau)
 - Taille strictement supérieure à 100 000 habitants, hors agglomération parisienne (3^{ème} ligne du tableau)
 - Agglomération de Paris (4^{ème} ligne du tableau)

Le Tableau 2 illustre le croisement entre les deux dimensions, et définit les différents secteurs du zonage utilisé dans IMMOVE :

- Le **rural** est représenté en rouge et est constitué des communes rurales (tissus 1 et 2) et des communes polarisées des petites (tissu 5) et moyennes aires urbaines (tissu 6).
- La **banlieue** est représentée en orange et est constituée des communes polarisées des grandes aires urbaines (tissu 7) et de l'agglomération parisienne (tissu 8), des communes périphériques des pôles urbains hormis le pôle parisien (tissus 10 et 11), et des villes-centre des aires urbaines de moyenne taille (tissu 14).
- Le **centre urbain** est représenté en jaune et est constitué des communes périphériques du pôle urbain parisien (tissu 12) et des villes-centre des grandes agglomérations (tissu 15) et de Paris (tissu 16). Note : les communes périphériques du pôle parisien de la grande couronne ne suivent pas cette règle : elles sont incluses dans la banlieue (plus précisément, dans le tissu 8) au lieu du tissu 12.
- Par construction, certaines catégories sont inexistantes (par exemple les communes rurales d'une agglomération de plus de 100 000 hab).

Tableau 2 : Les différentes zones du zonage utilisé dans IMMOVE. Source : EDF.

Unité urbaine appartenance	Commune rurale	Commune polarisée	Commune pôle urbain périphérique	Commune pôle urbain ville centre	
< 2000 hab	1 (14.8%)	5 (10.5%)			Rural Banlieue Centre urbain
2000-100 000	2 (8.4%)	6 (0.9%)	10 (5.0%)	14 (10.2%)	
> 100 000 hab		7 (3.6%)	11 (15.4%)	15 (13.0%)	
Agglo Paris		8 (7.6%)	12 (7.0%)	16 (3.6%)	

La zone appelée ZMD figure en orange (Figure 7), et est constituée de secteurs situés dans le périurbain ou la banlieue des grandes aires urbaines, ou proches de centres d'aires urbaines de taille moyenne.

Cette zone est caractérisée par une densité moyenne : environ 460 hab/km², quand la densité du rural est de 45 hab/km², celle du centre urbain de 4 400 hab/km², pour une moyenne nationale est de 120 hab/km².

Les ZMD représentent environ 40 % de la population française, et couvrent 11 % du territoire (voir Figure 7).

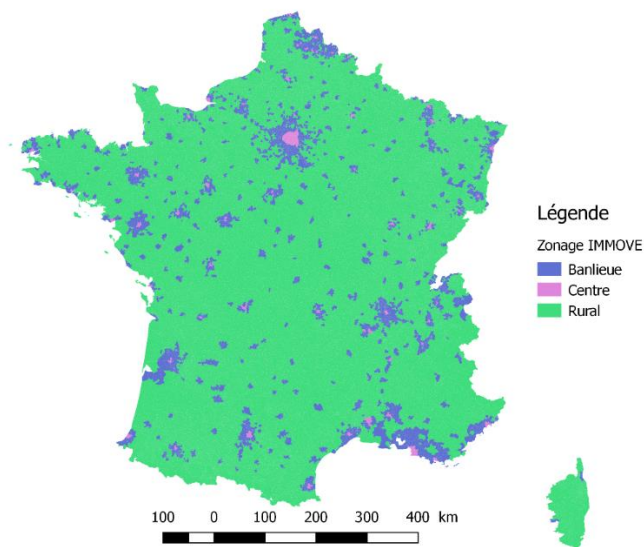


Figure 7 : Carte de la France métropolitaine avec une coloration des communes en fonction du zonage utilisé dans IMMOVE.

La structure de la mobilité locale (p.km) des ZMD en fonction des distances et des motifs est illustrée Figure 8.

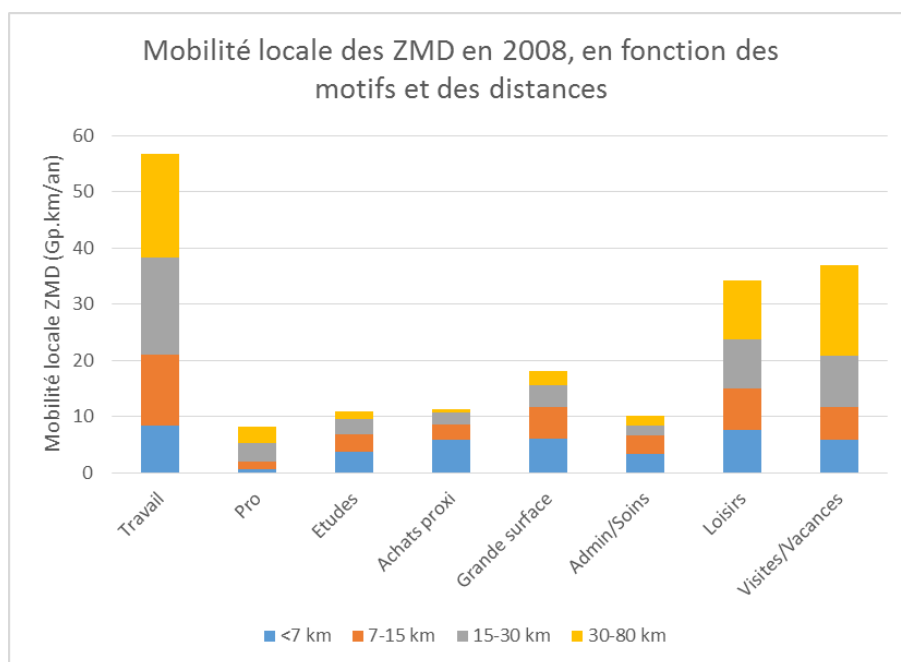


Figure 8 : Structure de la mobilité locale dans les ZMD en 2008, par motif et par distance. Source : EDF, (CGDD, 2008).

2.3. Mise-à-jour et validation 2008-2014

2.3.1. Mise-à-jour du modèle

Le modèle est basé sur les données de mobilité de l'ENTD 2008. Afin de projeter la mobilité française dans les années suivantes, des hypothèses sont faites, comme décrit dans la section « Projection au-delà de l'année 2008 ». Certaines de ces hypothèses peuvent être mises à jour par des mesures concernant la mobilité faites après 2008. Par exemple, la projection démographique faite par l'INSEE en 2008 peut être revue par des mesures de démographie plus récentes. Ou encore, les parts de marché du neuf entre les VP diesel et les VP essence telles que mesurées en 2008 ont évolué depuis. Des données sont disponibles pour mettre à jour ces parts. De cette manière, **les parts de marché du neuf entre les VP essence et les VP diesel, les consommations unitaires de ces deux types de VP, et les ratios d'utilisation diesel/essence ont été mis à jour en utilisant la base de données de la Commission des Comptes des Transports de la Nation (CCTN) (CGDD, 2015).**

Ainsi, l'augmentation de la part des VP diesel dans le parc français⁶ a été prise en compte dans IMMOVE, ainsi que le moindre usage moyen des véhicules essence comme diesel (voir Figure 9).

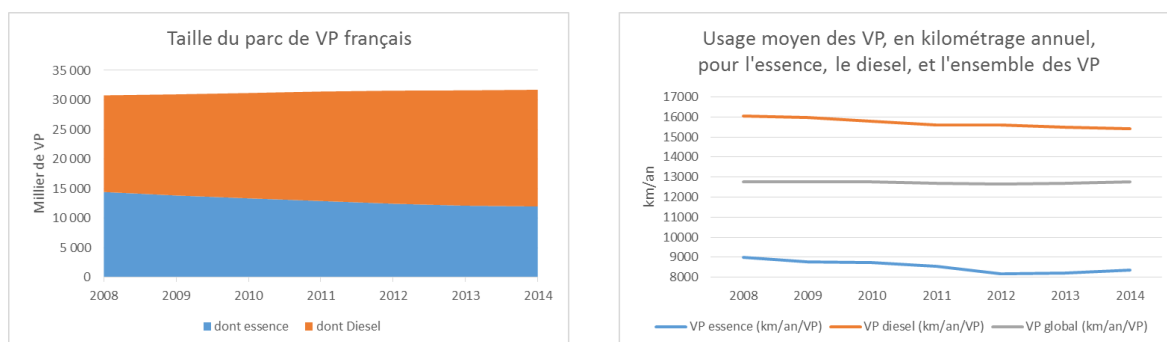


Figure 9 : Figure de gauche : évolution de la taille du parc français de VP par type de motorisation (essence ou diesel) ; figure de droite : usage moyen des VP en France, en kilométrage annuel par type de motorisation. Source : (CGDD, 2015)

2.3.2. Validation du modèle

Cette mise-à-jour s'est d'autre part accompagnée d'une **validation des résultats du modèle sur les six ans séparant 2008 et 2014**. En comparant les projections faites par le modèle sur cette période en termes de parc de VP, de trafic VP (c'est-à-dire les veh.km parcourus annuels) et de consommation d'énergie avec les mesures des Comptes des transports, la validité du modèle a été testée. La validation est concluante dans le sens où **les écarts entre les résultats du modèle et les mesures des Comptes des transports évoluent peu entre 2008 et 2014**. Ces écarts initiaux (en 2008) s'expliquent par un comptage différent de la mobilité par l'ENTD et la CCTN. L'ENTD est une enquête réalisée auprès des Français alors que la CCTN déduit les comportements de mobilité des dépenses de carburant mesurées sur le territoire français, en supposant un taux de remplissage constant des VP, égal à 1,8271, supérieur au taux mesuré par l'ENTD (1,35 p.km/v.km

⁶ La part des voitures diesels dans le parc automobile français augmente, même si leur part dans la vente de voitures neuves diminue. En effet, cette part était toujours supérieure à celle de l'essence en 2014.

en mobilité locale). Mis à part cet écart initial, le modèle IMMOVE produit bien les tendances mesurées par les Comptes de transports.

2.4. Scénario de référence 2014-2026

2.4.1. Hypothèses

Le scénario de référence (appelé scénario « Référence ») retenu dans ce projet est inspiré du scénario Vision 2030, par l'ADEME (ADEME, 2013), en ce qui concerne les évolutions technologiques sur les VP d'ici 2030. Cette vision, d'après l'ADEME, « cherche à tirer, de manière ambitieuse mais réaliste, le potentiel maximum des économies d'énergie et des énergies renouvelables jusqu'en 2030. [... La Vision 2030] ne repose pas sur un changement radical de mode de vie, une baisse du confort ou sur le pari de ruptures technologiques fortes ».

Les hypothèses qui ont été retenues dans le cadre du présent projet sont résumées dans les Tableau 3 et Tableau 4. Ces hypothèses mènent à un parc 39 % moins émissif en CO₂ à mobilité en VP équivalente, grâce à une baisse des ventes des voitures thermiques au profit d'hybrides rechargeables et d'électriques, ainsi que d'une baisse significative (28 %) des consommations unitaires des voitures thermiques de 6,4 L/100 km à 4,6 L/100 km.

Tableau 3 : Effets des hypothèses du scénario Vision 2030 de l'ADEME sur les ventes et sur le parc de VP en 2030. Source : (ADEME, 2013)

	Ventes 2010	Ventes 2030	Parc 2010	Parc 2030
Thermique	100%	68%	100%	89%
Hybride rechargeable	0%	22%	0%	7%
Electrique	0%	10%	0%	4%
Total Parc	2,2 millions	2 millions	35 millions	35 millions
gCO ₂ / km	127	49	165	100

Tableau 4 : Hypothèses d'émissions unitaires, de volume de vente, et de parts des ventes, des VP neuves en 2030, dans le scénario Vision 2030. Source : (ADEME, 2013). GNV = Gaz naturel véhicule ; VHR = véhicule hybride rechargeable ; VE = véhicule électrique ; RE = range extender.

Principales ventes 2030	gCO ₂ /km	Milliers	Parts des ventes 2030
Diesel	85	305	16%
Essence	95	303	15%
Hybride Diesel	50	171	9%
Hybride Essence	60	540	28%
GNV	95	10	1%
VHR + VE RE	30	432	22%
VE	0	196	10%
TOTAL	49	2 millions	

En dehors des évolutions technologiques issues du scénario Vision 2030 de l'ADEME et des évolutions démographiques projetées par l'INSEE, les paramètres de mobilité sont figés dans le modèle à leur

valeur de 2014 (qui est leur valeur de 2008 en ce qui concerne les paramètres non affectés par la mise-à-jour 2008-2014).

2.4.2. Résultats

Comme décrit précédemment, IMMOVE part d'une hypothèse démographique, illustrée en Figure 11. La population des ZMD croît de 7,9 % selon cette hypothèse entre 2008 et 2026. Cet accroissement s'accompagne d'un vieillissement de la population, qui mène à une moindre mobilité moyenne par personne. Par conséquent, la mobilité dans les ZMD croît de 3,3 % seulement, c'est-à-dire moins vite que la population, comme l'illustre la Figure 10.

La croissance démographique et de la mobilité s'accompagnent d'une évolution du parc de VP. Le nombre de VP en circulation augmente de 7,5 % de 2008 à 2026 dans les ZMD. La composition du parc évolue, avec une lente pénétration de l'électrique et de l'hybride rechargeable, illustrée en Figure 13. Ceci s'accompagne d'une baisse des émissions unitaires moyennes, par véh.km, de 30 % environ (Figure 12) et donc d'une baisse des émissions globales de 23 % (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

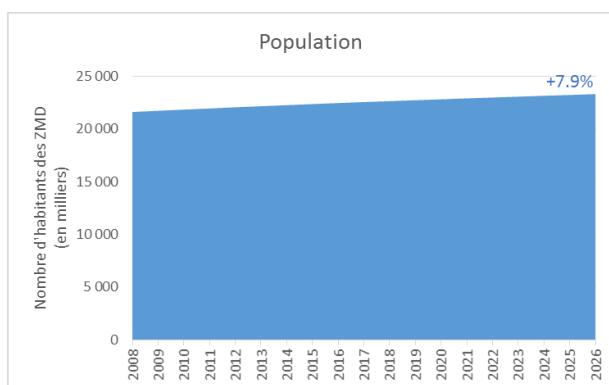


Figure 11 : Hypothèse d'évolution démographique pour les ZMD, dans IMMOVE, de 2008 à 2026.
Source : EDF.

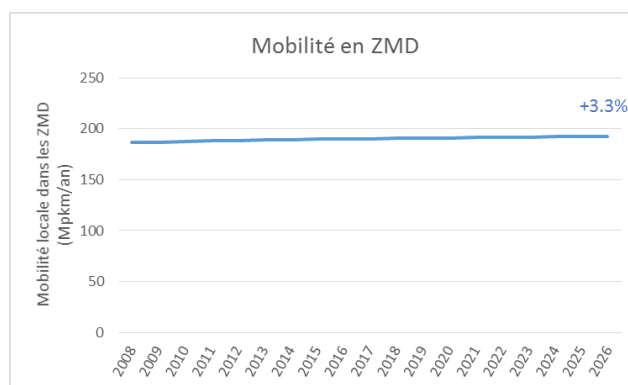


Figure 10 : Evolution de la mobilité locale dans les ZMD de 2008 à 2026. Source : EDF.

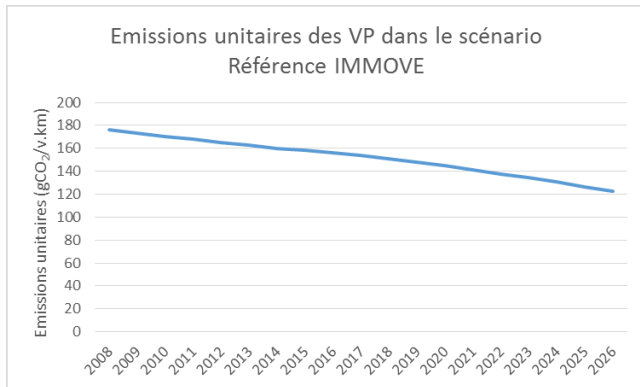


Figure 12 : Evolution des émissions unitaires moyennes du parc de VP selon le scénario Référence, de 2008 à 2026. Source : EDF.

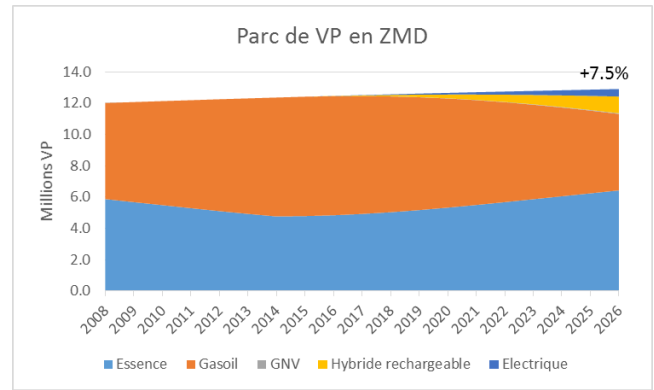


Figure 13 : Evolution du parc de VP en ZMD selon le scénario référence, de 2008 à 2026, selon IMMOVE. Source : EDF.

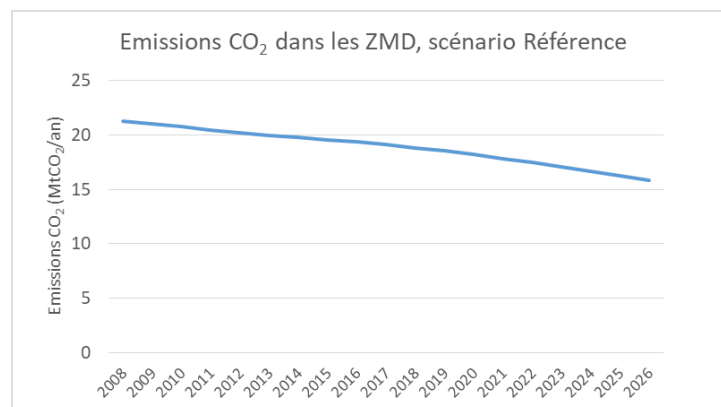


Figure 14 : Evolution des émissions CO₂ selon le scénario référence, de 2008 à 2026. Source : EDF.

Chapitre 3 - Télétravail

Le télétravail réduit les déplacements domicile travail, et donc les besoins de mobilité dans les ZMD. Notre objectif est d'établir l'impact du télétravail sur les déplacements, selon les différents scénarios motivationnels, et de calculer la réduction des émissions CO₂ évitées par l'application de chacun d'eux.

3.1. Hypothèses pour le télétravail

Les hypothèses faites dans le cadre de l'estimation des changements de comportements relatifs au télétravail diffèrent selon les scénarios.

Le scénario Gisement ne prend pas en compte les tendances culturelles et managériales françaises considérées comme des freins dans la littérature sur le sujet. Il prend seulement en compte les considérations de productivité organisationnelle et de faisabilité du télétravail en fonction des types d'emplois dans les ZMD.

Ainsi, 47 % des emplois pourraient bénéficier d'aménagement en télétravail dans les ZMD, selon une estimation à l'échelle de la France supposant une pénétration des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) dans tous les secteurs professionnels (Roland Berger firm, CAS, 2009).

D'autre part, le temps de travail optimum admis pour le télétravail serait de 2 jours par semaine, selon deux études (Roland Berger firm, CAS, 2009; GreenWorking, 2012). Au-delà de 2 jours, l'information au sein des équipes et la productivité individuelle seraient impactées, diminuant la productivité globale de l'entreprise.

Nous adoptons ces deux valeurs pour nos calculs.

Le scénario Développement, quant à lui, intègre les tendances managériales et culturelles. Les tendances sont favorables aux grandes entreprises qui ont plus de moyens pour mettre en place le télétravail. Une importante enquête sur les pratiques de télétravail et sur leurs perceptions par les différents acteurs (salariés et employeurs) au sein de Petites et Moyennes Entreprises (PME) souligne que les PME ne sont pas prêtes à développer le télétravail (Aguilera, Lethiais, Rallet, & Proulhac, 2016). D'autres indicateurs (retours d'expérience d'entreprises aux U.S.A qui ont effectivement développé le télétravail de manière majoritaire, telles Xerox) montrent que le développement pérenne du télétravail requiert d'importants moyens dans les ressources humaines, pour la formation, la planification d'autant qu'il induit des changements managériaux et de gouvernance (Morgan, 2015).

Concrètement, le scénario Développement se base sur les hypothèses suivantes :

- 30 % des emplois dans les entreprises de taille intermédiaire ou grande (nombre de salariés supérieur à 250) et 10 % des emplois dans les entreprises de taille inférieure sont télétravaillés en 2026. Note : 30 % d'emplois télétravaillés est le taux observé en Finlande, où le télétravail se définit par une durée de travail de plus de 8 heures/mois en dehors de la structure habituelle de travail.
- 68 % des emplois sont publics ou issus d'entreprises de grande taille et de taille intermédiaire, et 32 % sont des emplois issus de petites entreprises. Ces chiffres sont issus de l'INSEE (INSEE, 2014; INSEE, 2014) :

- la fréquence de télétravail parmi les emplois susceptibles de bénéficier de ce dispositif, est de un jour par semaine.

Ces hypothèses supposent donc un développement très important du télétravail dans les entreprises de toutes tailles et débouchent sur un taux moyen de télétravail très supérieur à ce qui est observé dans les économies développées tertiaisées. A noter cependant une forte progression du nombre de start-ups en quête de locaux modulables et adaptables pendant la période d'incubation et de lancement de leurs activités.

Le scénario Développement Bas est basé sur un nombre d'emplois télétravaillés deux fois plus faible que dans le scénario Développement et une moyenne de jours télétravaillés de 1 par semaine. Ces hypothèses restent ici encore supérieures à ce qui est observé dans les économies développées tertiaisées.

Le nombre de trajets évités par le télétravail est déterminé selon l'équation suivante :

$$\%traj_{TW,tot} = \%jrs_{TW,PME} * \%jobs_{TW,PME} * \%jobs_{PME,tot} + \%jrs_{TW,GIE} * \%jobs_{TW,GIE} * \%jobs_{GIE,tot} \quad (1)$$

traj représente un nombre de trajets, *jrs* un nombre de jours, *jobs* un nombre d'emplois ; % une proportion ; l'indice *TW* le télétravail, *tot* la totalité de l'ensemble, *PME* les petites et moyennes entreprises, et *GIE* les grandes entreprises ou les entreprises de taille intermédiaire. Le premier indice représente le numérateur de la proportion et le second indice le dénominateur. Par exemple, $\%jobs_{TW,PME}$ est la part des emplois télétravaillés dans les PME.

Le résultat de l'application de cette équation aux hypothèses mentionnées ci-dessus pour l'année 2026, définit le taux de réduction des trajets grâce au télétravail :

Scénario Gisement :

$$\%traj_{TW,tot,Gi} = \frac{2}{5} * 0,47 * 0,32 + \frac{2}{5} * 0,47 * 0,68 = 19\% \quad (2)$$

Scénario Développement:

$$\%traj_{TW,tot,Dév} = \frac{1}{5} * 0,1 * 0,32 + \frac{1}{5} * 0,3 * 0,68 = 4,8\% \quad (3)$$

Scénario Développement Bas :

$$\%traj_{TW,tot,DB} = \frac{1}{5} * \frac{0,1}{2} * 0,32 + \frac{1}{5} * \frac{0,3}{2} * 0,68 = 2,4\% \quad (4)$$

Récapitulatif :

Scénario	$\%jrs_{TW,PME}$	$\%jobs_{TW,PME}$	$\%jobs_{PME,tot}$	$\%jrs_{TW,GIE}$	$\%jobs_{TW,GIE}$	$\%jobs_{GIE,tot}$	$\%traj_{TW,tot}$
Gi	2/5	0,47	0,32	2/5	0,47	0,68	0,19
Dév	1/5	0,10	0,32	1/5	0,30	0,68	0,048
DB	1/5	0,05	0,32	1/5	0,15	0,68	0,024

Le tableau suivant réunit les hypothèses relatives aux différents scénarios pour le télétravail.

	Scénario Gisement	Scénario Développement	Scénario Développement bas
Communautés initiales	Habitants des ZMD	Habitants des ZMD	Habitants des ZMD
Trajets générés	Trajets DT	Trajets DT	Trajets DT
Assiette (trajets concernés)	DT : 19 % des trajets	DT : 4,8 % des trajets	DT : 2,4 % des trajets
Effet sur la mobilité	DT : effacement des trajets	DT : effacement des trajets	DT : effacement des trajets

3.2. Résultats

Voici la synthèse des résultats obtenus pour les scénarios relatifs au télétravail, pour l'année 2026 en comparaison avec le scénario Référence :

Tableau 5 : Principaux résultats des scénarios Télétravail en 2026, comparé au scénario Référence

	Scénario Gisement	Scénario Développement	Scénario Développement Bas
Réduction de la mobilité (pkm)	4,6 %	1,4 %	0,7 %
Parts modales (p.km)	Inchangées	Inchangées	Inchangées
Taux de remplissage (p.km/v.km)	Inchangés	Inchangés	Inchangés
Réduction des émissions CO ₂ (Mt/an)	0,72	0,21	0,11
Réduction des émissions CO ₂ (%)	4,5 %	1,3 %	0,7 %

Le télétravail permet de réduire le trafic de VP (v.km) initial lié à la demande en mobilité (p.km) pour le motif DT dans les ZMD. Les résultats sont donnés ici en termes de mobilité et non en termes de trafic (Figure 21).

Le scénario Référence suppose une lente augmentation de la mobilité due à l'évolution démographique. Le scénario Gisement conduit à une baisse de la mobilité locale de 4,6 % à l'horizon 2026 tandis que le scénario Dév mène à une baisse de la mobilité locale de 1,4 % à la même échéance.

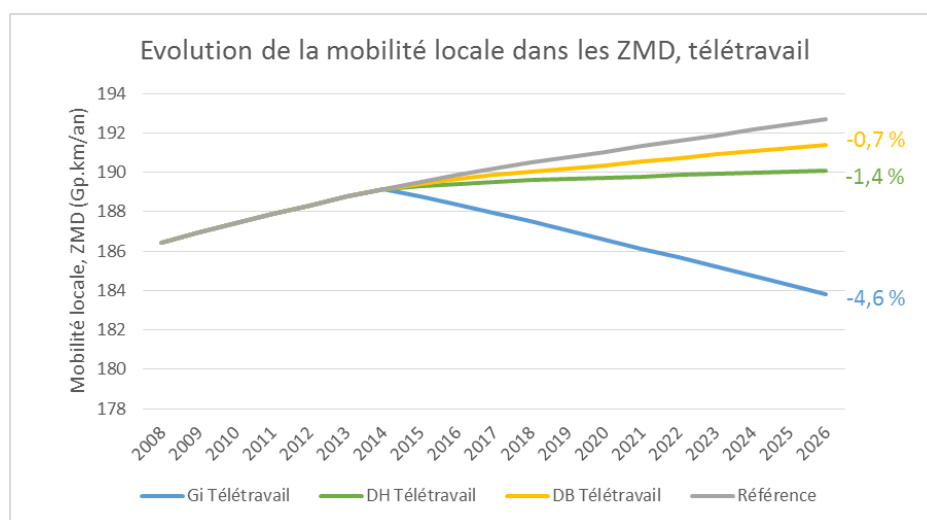


Figure 15 : Evolution de la mobilité dans les ZMD, pour le scénario Référence et les scénarios pour le télétravail. Les pourcentages indiqués en face des courbes des scénarios gisement correspondent à la diminution de mobilité mesurée en 2026 par rapport au scénario gisement.

Dans le scénario Gi, la baisse de la mobilité atteint 4,6 %, et permet une réduction de 4,5 % des émissions CO₂ par rapport au scénario Référence en 2026. Dans le scénario Dév, la baisse des émissions CO₂ par rapport au scénario Référence en 2026 est de 1,3 %, pour une baisse de la mobilité de 1,4 %.

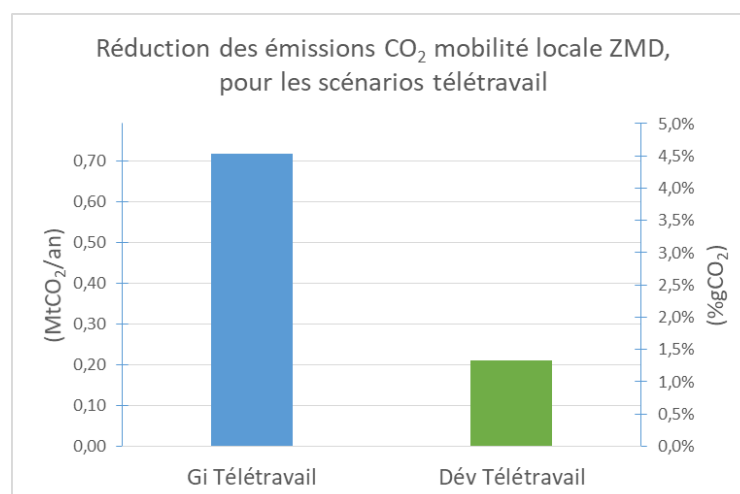


Figure 16 : Réduction des émissions CO₂, pour les scénarios Gi télétravail et Dév télétravail en pourcentage par rapport au scénario Référence en 2026.

3.3. Interprétation

Pour mieux comprendre les ordres de grandeur obtenus, nous nous sommes basés sur la situation observée en 2008, et avons supposé la mise en place du système de télétravail, et son usage, dès cette année-ci. En comparant la situation initiale (observée en 2008) et la situation finale (hypothèse pour cette vérification : le système de télétravail est mis en place en 2008), nous avons obtenu la baisse des émissions CO₂ qui peut être raisonnablement attendue si la structure de la mobilité des ZMD ne change pas radicalement entre 2008 et 2026. La baisse attendue est effectivement très proche des résultats fournis par le modèle IMMOVE pour chaque scénario

La réduction de la mobilité pour le motif DT est définie en valeur relative et est appliquée à chaque catégorie de trajet ayant ce motif. Ainsi, une diminution de 19 % de la mobilité se répercute directement, parmi les trajets en VP, en une diminution de 19 % de la mobilité en VP, et donc en une diminution de 19 % du trafic VP. Le raisonnement pour calculer les émissions CO₂ évitées a donc été directement fait sur le trafic VP, qui compte pour 96 % des émissions de CO₂ des ZMD (Tableau 6). Une diminution de 19 % des trajets avec les autres modes est aussi modélisée dans IMMOVE, mais est considérée comme négligeable dans cette reconstitution.

Tableau 6 : Calcul de la baisse des émissions CO₂ attendue si le système de télétravail était mis en place en 2008, pour le scénario Gisement

Année 2008	Travail	Autres motifs	Total
Trafic VP initial (Gv.km)	36	81	117
Réduction du trafic DT (%v.km)	19%	0%	-
Trafic VP évité (Gv.km)	6.9	0	6.9
Trafic VP final (Gv.km)	29	81	110
Diminution trafic (%v.km)	5.9%		
Part VP dans émissions CO ₂ en 2026 (%v.km)	95%		
Diminution CO ₂ attendue (%gCO ₂)	5.6%		
Diminution CO ₂ obtenue IMMOVE (%gCO ₂)	4.5%		

On observe un écart significatif (19 %) entre l'estimation faite sur l'année 2008 et les résultats obtenus par IMMOVE vis-à-vis du scénario Référence. Cet écart peut s'expliquer par :

- le vieillissement de la population, qui réduit le poids de la mobilité Domicile-Travail par rapport aux autres motifs et donc abaisse les réductions potentielles d'émissions CO₂.
- Le fait que les actifs roulent plus : ils atteignent la fin de vie de leur VP plus rapidement, ce qui accélère le roulement de leur parc de VP. Ce parc se renouvelant plus vite par rapport au reste du parc, ses voitures émettent moins, si bien que les v.km concernés par le télétravail sont moins carbonés que les v.km moyens. Le télétravail a donc moins d'effet sur les émissions.

Des écarts entre l'estimation et les résultats obtenus, allant dans le même sens mais plus faibles, sont observés pour les scénarios Développement.

Les scénarios ne prennent pas en compte les effets rebond possibles qu'implique le télétravail :

- augmentation de la distance des déplacements domicile-travail, les salariés bénéficiant du télétravail pouvant faire plus de compromis sur leur lieux de vie et donc vivre plus loin de leur lieu habituel de travail. Cet effet est un effet de moyen/long terme ;
- augmentation de la mobilité longue distance pendant les week-ends accolés à un jour télétravaillé.

3.4. Bilan économique

Nous avons identifié les postes de dépenses qui diffèrent entre le scénario Référence et les scénarios Télétravail, dans lesquels le système de télétravail a été mis en place dans les ZMD. Les dépenses sont exprimés hors taxe.

- Les **lieux** de télétravail sont supposés être bâtis dans les ZMD spécifiquement pour permettre le télétravail, et en fonction du besoin d'accueil d'actifs (qui dépend du scénario).
- La surface globale nécessaire à l'accueil des actifs est calculée en se basant :
 - sur une estimation du nombre d'actifs en France (INSEE, 2015), à partir de laquelle on estime le nombre d'actifs dans les ZMD (au prorata de la part de la population française dans les ZMD, 40 %).
 - Nous supposons une répartition égale chaque jour ouvré du nombre de télétravailleurs, qui dépend du scénario. Cette hypothèse suppose que les résultats obtenus en termes de surface nécessaire pour le télétravail sont des valeurs basses (car il est probable que des pics de fréquentation des lieux de coworking existent en fonction des jours).
 - Pour obtenir le nombre de télétravailleurs allant travailler dans un lieu de coworking, nous supposons que 20 % des télétravailleurs travaillent de chez eux, donc que 80 % des télétravailleurs travaillent d'un lieu de coworking.
 - Enfin, la surface à bâtir nécessaire au télétravail est déduite de la surface nécessaire par salarié dans les lieux de coworking (supposée égale à 9 m² par travailleur). Les calculs sont effectués dans le Tableau 7.
- Nous supposons un coût de construction du mètre carré d'espace de coworking, dans les ZMD, de 5 000 €/m².

Tableau 7 : Estimation de la surface de lieux de coworking nécessaire au fonctionnement du système de télétravail, en fonction du scénario considéré.

	Gi	DH
Nombre d'actifs en France	26 740 000	26 740 000
Nb travailleurs ZMD	9 412 480	9 412 480
Part des télétravailleurs ZMD chaque jour ouvré	19%	4.80%
Nombre de télétravailleurs ZMD chaque jour ouvré	1 788 371	451 799
Part des télétravailleurs à la maison	20%	20%
Nb télétravailleurs dans lieux de coworking chaque jour	1 430 697	361 439
Surface nécessaire par télétravailleur dans lieux de coworking (m ²)	9	9
Espace nécessaire lieux de coworking (m ²)	12 876 273	3 252 953

- Le **matériel** dans les espaces de coworking (mobilier, imprimantes, consommation d'électricité et de chauffage) est estimé à 20 €/m²/an (hypothèse basée sur 6 000 € de mobilier qui dure 10 ans et 1 300 € de frais d'électricité pour 100 m², ainsi qu'une imprimante à 1 600 €/an pour 300 m², le tout exprimé hors taxe).
- Les **ressources humaines** nécessaires au bon fonctionnement des espaces de coworking (nettoyage, gestion) : le nombre d'employés est déterminé en fonction de l'espace de coworking (donc en fonction du scénario) : on suppose deux employés à temps-plein au SMIC pour gérer 1 320 m² d'espace.
- L'augmentation de la durée de vie de la VP des ménages et la moindre consommation de carburant par les ménages sont comptabilisés comme pour les scénarios Covoiturage (section 7.7), avec les valeurs de réduction du trafic local 2026 suivantes, obtenues par la simulation :
 - 4,7 % de trafic local (soit 3,4 % du trafic global) évité pour le scénario Gisement
 - 1,4 % de trafic local (soit 1,0 % du trafic global) évité pour le scénario Développement
- La réduction de l'entretien de la voirie induite par le moindre trafic VP est considérée comme négligeable dans cette étude (Baaj, 2012).

Les résultats des calculs sont détaillés dans le Tableau 8 et le Tableau 9.

Dans le scénario Développement, le télétravail est globalement déficitaire de 200 M€/an (autrement dit, ce scénario induit 200 M€/an de dépenses supplémentaires à celles du scénario Référence), les dépenses annualisées à faire pour que le système fonctionne n'étant pas complètement compensées par les économies faites sur l'usage de la VP et la consommation de carburant. **Dans le scénario Gisement, le télétravail est déficitaire de 800 M€/an par rapport au scénario Référence.**

L'usage plus ou moins fort du système de télétravail joue légèrement sur le déficit induit. Les augmentations, comme les réductions de dépense, sont proportionnelles au nombre de télétravailleurs. Cependant, le coefficient de proportionnalité est plus grand pour les augmentations que celui pour la réduction des dépenses, si bien que les premières augmentent plus que les

dernières lorsque le nombre de télétravailleurs augmente. C'est pourquoi le déficit augmente avec l'usage du télétravail.

En revanche, le prix du carburant, le prix des VP neuves, et la consommation unitaire moyenne du parc de VP ont un poids important dans l'estimation des dépenses :

- Plus le prix du carburant est élevé, plus le Télétravail permet des économies
- Plus le prix des VP neuves est élevé, plus le Télétravail permet des économies
- Plus la consommation unitaire moyenne du parc de VP est élevée, plus le Télétravail permet des économies. Cela illustre le fait qu'une amélioration technologique menant à une moindre consommation des véhicules induit une moindre incitation monétaire à mettre en place un système de Télétravail.

Tableau 8 : Les différents postes de dépenses du télétravail, pour le scénario Gi. La colonne « Coût total S' (M€) » est calculée en multipliant la colonne « Coût unitaire (€) » par la colonne « Nombre d'unités dans S' ». Le coût total S' est ensuite divisé par la durée de vie pour obtenir le coût à l'année de S'. Pour les types de modification « Modif » (deuxième colonne), le coût à l'année de Sref est calculé tel que décrit dans la section 7.7.2. Pour les types de modification « Création », le coût à l'année de Sref est nul, ce poste de dépense n'existant pas dans le scénario de Référence.

Élément différent entre S' et Sref	Type de modification	Coût unitaire HT (€)	Unité	Nombre d'unités dans S'	Unité	Coût total S' (M€)	Durée de vie (an)	Coût à l'année S' (M€)	Coût à l'année Sref (M€)
Espaces de coworking	Création	5 000	€/m2	12 876 273	m2	64 381	50	1 288	-
Matériel dans les espaces de coworking	Création	20	€/m2/an	12 876 273	m2	261	1	261	-
Ressources humaines pour la gestion des espaces de coworking, ménage	Création	29 796	€/pers/an	19 510	pers	581	1	581	-
Augmentation durée de vie VP	Modif	20 833	€/VP	17 465 281	VP	363 860	11,9	30 475	31 535
Moins de carburant pour les ménages	Modif	0,94	€/L	5 720 076 996	L	5 112	1	5 112	5 363
						Total annuel (M€)		39 138	38 318
						Surcoût total annuel (M€)		820	

Tableau 9 : Les différents postes de dépenses du télétravail, pour le scénario Dév. La colonne « Coût total S' (M€) » est calculée en multipliant la colonne « Coût unitaire (€) » par la colonne « Nombre d'unités dans S' ». Le coût total S' est ensuite divisé par la durée de vie pour obtenir le coût à l'année de S'. Pour les types de modification « Modif » (deuxième colonne), le coût à l'année de Sref est calculé tel que décrit dans la section 7.7.2. Pour les types de modification « Création », le coût à l'année de Sref est nul, ce poste de dépense n'existant pas dans le scénario de Référence.

Élément différent entre S' et Sref	Type de modification	Coût unitaire HT (€)	Unité	Nombre d'unités dans S'	Unité	Coût total S' (M€)	Durée de vie (an)	Coût à l'année S' (M€)	Coût à l'année Sref (M€)
Espaces de coworking	Création	5 000	€/m2	3 252 953	m2	16 265	50	325	-
Matériel dans les espaces de coworking	Création	20	€/m2/an	3 252 953	m2	66	1	66	-
Ressources humaines pour la gestion des espaces de coworking, ménage	Création	29 796	€/pers/an	4 929	pers	147	1	147	-
Augmentation durée de vie VP	Modif	20 833	€/VP	17 465 281	VP	363 860	11,7	31 222	31 535
Moins de carburant pour les ménages	Modif	0,94	€/L	5 720 076 996	L	5 289	1	5 289	5 363
						Total annuel (M€)		38 470	38 318
						Surcoût total annuel (M€)		152	

Chapitre 4 - Distribution des achats de grande surface

De même que pour le télétravail, l'optimisation de la distribution des achats sur le dernier kilomètre pour réduire les déplacements individuels vers et depuis les grandes surfaces, vise à baisser les déplacements dans les ZMD. Notre objectif est de quantifier cette baisse pour estimer les émissions CO₂ qui pourraient être évitées en conséquence.

4.1. Hypothèses pour la distribution des achats de grandes surfaces

Dans le cadre du scénario gisement, qui propose de remplacer les trajets liés aux achats en grande surface par un ensemble de tournées de livraison à domicile, nous avons fait une simulation informatique de la distribution des achats par tournées dans le Périurbain Elargi. Cette simulation permet de comparer le nombre de véhicule.km parcourus par les consommateurs qui vont faire leurs courses individuellement en grandes surfaces et le nombre de véhicule.km parcourus par l'ensemble des camionnettes mises en service pour remplacer ces trajets par des tournées de livraisons.

A dire d'expert (logistique), le système de distribution proposé dans le cadre du scénario Gisement ne serait pas rentable, donc ne se développerait pas sans incitation réglementaires ou fiscale. Nous avons donc décidé de ne pas associer de scénarios « Développement » à ce système de distribution d'achats par tournées. En revanche, l'expert logistique interrogé a souligné qu'une tendance à la livraison d'achats collaborative se développait.

En l'absence d'autres données d'experts, un second scénario gisement, basé sur un système de livraison collaborative entre voisins, a été proposé et évalué.

4.1.1. Etapes de calcul pour le scénario gisement « distribution par tournées »

Hypothèse : le système de distribution par tournées remplace les trajets pour aller faire des achats en grandes surfaces mais pas les trajets pour faire des achats de proximité.

Le calcul menant aux changements de comportements induits par le système de distribution proposé est composé des étapes suivantes (Figure 17) :

- la part des p.km faite dans un objectif de shopping-loisir plutôt que de shopping-achat a fait l'objet d'une évaluation (section 4.1.1.1). On suppose ici que la part des trajets loisir dans les trajets « grande surface » reste constante sur l'horizon de temps de l'étude (alors que les centres commerciaux orientent de plus en plus leurs business model vers le loisir). Seuls les achats en supermarchés et hypermarchés non destinés au loisir, seront remplacés par des tournées.
- la fréquentation des différentes grandes surfaces a été évaluée (section 4.1.1.2). En associant cette fréquentation à la fréquence des tournées, on obtient le nombre de trajets à remplacer par les tournées pour chaque grande surface.

Une simulation de type Monte Carlo permet d'établir ensuite une estimation de l'efficacité des tournées (section 4.1.1.3) pour un nombre donné de trajets à remplacer.

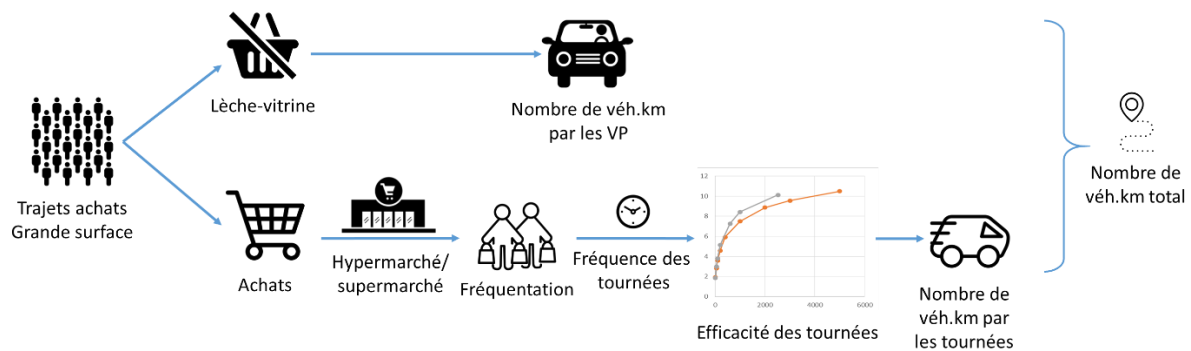


Figure 17 : Etapes de calcul pour déterminer le nombre de véh.km évités par le système de distribution proposé.

Enfin, les résultats sont intégrés afin d'obtenir la part des véh.km qui seraient évités grâce au système de distribution proposé (section 4.1.1.4).

4.1.1.1 Les achats loisirs

Afin d'estimer le nombre de v.km effectués pour les trajets d'achats « loisirs », intégrés dans la catégorie achat dans l'ENTD mais relevant plutôt du domaine des loisirs, les données de volume de courses ont été utilisées (CGDD, 2008). Dans le Périurbain Elargi, il ressort que 4 % des trajets pour les achats en grandes surfaces (représentant 12% des v.km pour les achats en grande surface) se terminent sans achats. On suppose donc que **12% des v.km pour le motif « achats en grande surface » sont faits dans un but de shopping-loisir**.

4.1.1.2 Part du trafic, et fréquentation moyenne des supermarchés et hypermarchés

Le reste des v.km est supposé être fait vers des supermarchés et hypermarchés dans un but d'achat. L'étude (CREDOC, 2012) nous indique que **42 % des v.km sont faits vers des hypermarchés et 46 % le sont vers les supermarchés**, la distance moyenne parcourue vers les supermarchés et vers les hypermarchés étant supposée équivalente (les 12 % restants étant faits pour le shopping-loisir).

Il est difficile d'établir la fréquentation moyenne de chacun de ces types de magasins, compte tenu du manque de données fiables. En se basant sur les données accessibles sur la fréquentation des centres commerciaux (Unibail Rodamco, 2016) et sur la surface des grandes surfaces (DGCCRF, 2012) et en supposant une linéarité entre la surface de magasin et la fréquentation (voir Tableau 10), on peut estimer grossièrement que la **fréquentation moyenne des hypermarchés est de 1 480 visites/jour, et celle des supermarchés est de 360 visites/jour**.

Tableau 10 : Hypothèses de fréquentation des hypermarchés et supermarchés, reconstruite par linéarité supposée entre la fréquentation et la surface des magasins.

	Centre commerciaux	Hypermarchés	Supermarché
Surface (m ²)	100 000	5 400	1 300
Fréquentation (pers/an)	10 millions	540 000	130 000
Fréquentation (pers/jour)	N/A (valeurs utilisées pour déduire les colonnes suivantes)	1 480	360

4.1.1.3 Description de la simulation Monte Carlo

Un modèle Monte Carlo a été développé afin d'estimer l'efficacité relative d'un système de distribution classique (chaque client vient physiquement chercher ses courses) et d'une distribution par tournées. Voici le fonctionnement de ce modèle :

- Un commerce, sur une durée donnée, génère un certain nombre de trajets de la part des clients qui font leurs courses. Dans le modèle, ce nombre est réglable pour tester l'effet de la fréquentation du magasin considéré.
- Les trajets sont aléatoirement générés suivant la loi de distribution des distances parcourues dans le Périurbain Elargi pour le motif achats en grande surface (ENTD), comme illustré sur le panneau gauche de la Figure 18.
- Ces trajets génèrent un trafic (en v.km) dans le cadre du système de distribution classique, mesuré comme étant égal à deux fois la somme des distances des trajets (simulant l'ensemble des allers-retours en VP).
- On compare ce trafic généré au trafic que générerait le même commerce avec le système de distribution proposé. Voici comment le trafic généré par le système de tournées (en v.km) est calculé :
 - le volume total d'achats est calculé en supposant un volume moyen d'achat par trajet (200L, soit un chariot de courses plein, proche de ce qui est mesuré via l'ENTD)
 - Cela détermine un nombre de tournées, en supposant un volume pour chaque véhicule de livraison de 3 m³.
 - Chaque tournée est ensuite générée via les règles suivantes :
 - La tournée commence par le point de livraison le plus proche de l'entrepôt
 - on livre les points de proche en proche, par distance minimale entre chaque point. Chaque point livré est soustrait de la liste des points à livrer.
 - on rentre à l'entrepôt une fois le véhicule vide
 - Les livraisons s'arrêtent lorsque tous les points ont été livrés (voir panneau droit Figure 18).
 - On calcule, pour ce tirage, le nombre de v.km dans le système classique divisé par le nombre de v.km par tournées.
- On répète les étapes précédentes 10 fois afin de moyenner les résultats, en mesurant leur écart type pour s'assurer de leur bonne représentativité.

Le résultat final est un nombre moyen de v.km parcourus dans le système classique, divisé par un nombre de v.km parcourus dans le nouveau système de distribution, pour une fréquentation d'un magasin donnée. L'effet de la polarisation du territoire a également été testé en utilisant un module

de polarisation permettant de former des foyers générateurs de trajets, simulant l'agglomération des habitats dans certaines zones (Figure 19).

Les résultats sont synthétisés sur la Figure 20, en fonction de ces deux paramètres : nombre de trajets et polarisation du territoire. Plus le nombre de trajets remplacés par des tournées est grand, plus l'efficacité des tournées est importante.

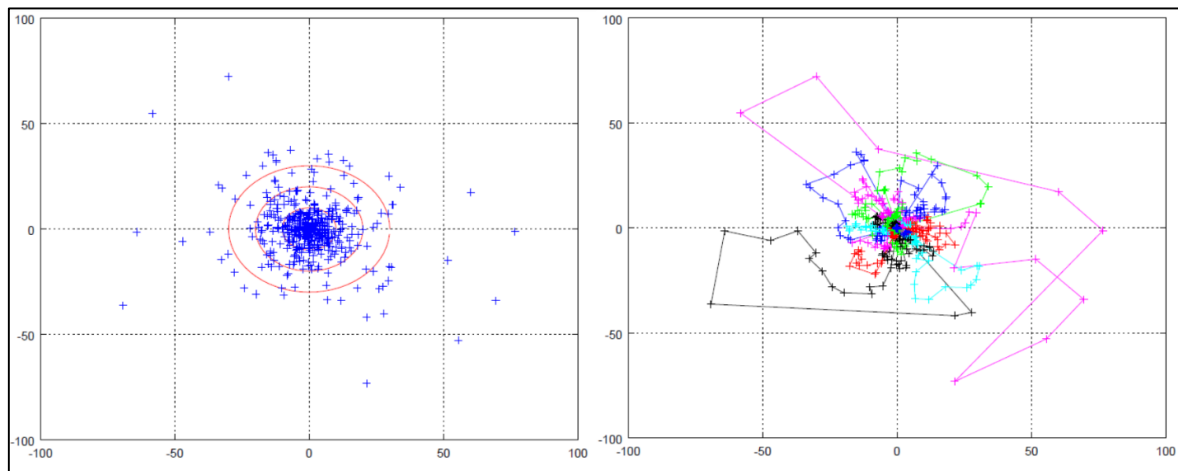


Figure 18 : Exemple de tirage aléatoire de 500 trajets dans le PE (gauche), et les (34) tournées associées (droite). La grande surface est située au centre de la figure. Les points représentent les origines des trajets achats générés par la population. L'échelle est en km.

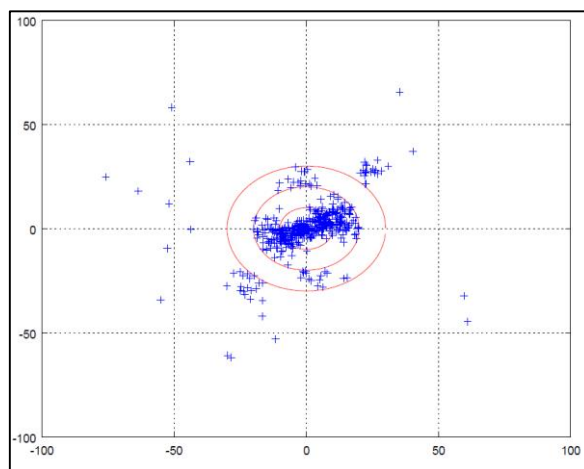


Figure 19 : Tirage aléatoire de 500 trajets utilisant le module de polarisation du territoire.

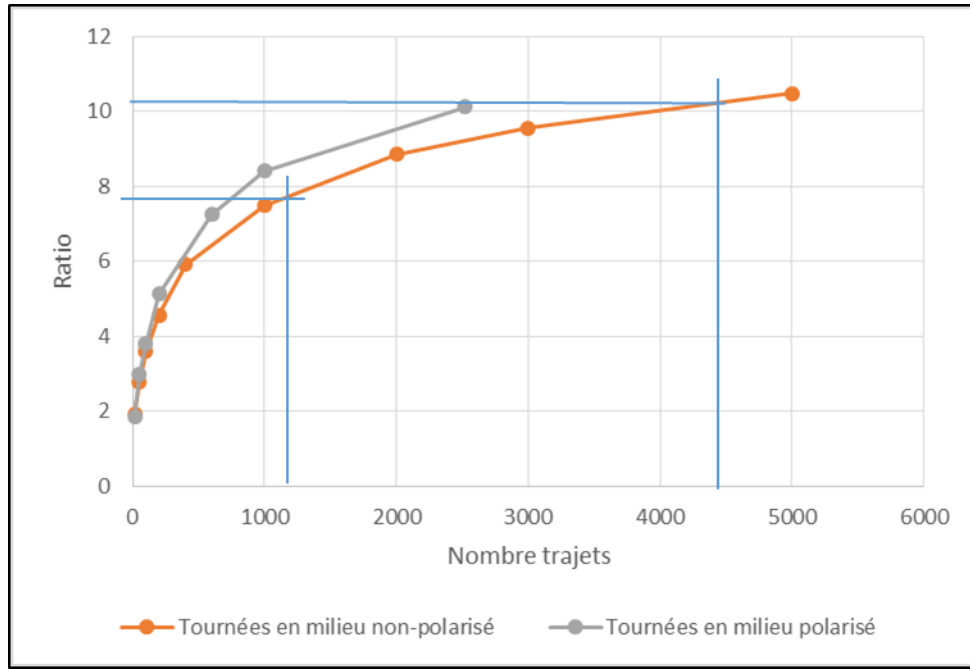


Figure 20 : Ratio v.km (classique)/v.km (tournées) en fonction du nombre de trajets, dans un milieu non-polarisé et dans un milieu polarisé. La lecture du ratio pour les valeurs particulières « 1 080 trajets » (fréquentation des supermarchés sur trois jours) et « 4 440 trajets » (fréquentation des hypermarchés sur trois jours) est illustrée.

4.1.1.4 Estimation de l'efficacité globale du nouveau système de distribution

Les tournées du système de distribution proposé passent tous les 3 jours. Elles remplacent donc les visites cumulées pendant une période de 3 jours. On peut alors estimer l'efficacité globale du nouveau système de distribution dans les ZMD, η_{ZMD} , en utilisant l'équation suivante :

$$\eta_{ZMD}^{-1} = \frac{vkm_{st}}{vkm_{cla}} = \frac{vkm_{lo} + f(NT_{hyp,3jr})^{-1} * vkm_{hyp} + f(NT_{sup,3jr})^{-1} * vkm_{sup}}{vkm_{cla}} \quad (5)$$

$$= \tau_{lo} + f(NT_{hyp,3jr})^{-1} * \tau_{hyp} + f(NT_{sup,3jr})^{-1} * \tau_{sup}$$

Avec :

$\frac{vkm_{st}}{vkm_{cla}}$: ratio des v.km du système de tournées sur le ratio des v.km du système de distribution classique,

$\tau_{lo} = \frac{vkm_{lo}}{vkm_{cla}}$: part des v.km faits pour les achats « loisir »,

$\tau_{hyp} = \frac{vkm_{hyp}}{vkm_{cla}}$: part des v.km faits pour les achats en hypermarché,

$\tau_{sup} = \frac{vkm_{sup}}{vkm_{cla}}$: part des v.km faits pour les achats en supermarché ;

f : fonction donnant l'efficacité du système de tournées, décrite Figure 20

$NT_{hyp,3jr}$: nombre de trajets moyens sur 3 jours pour les hypermarchés

$NT_{sup,3jr}$: nombre de trajets moyens sur 3 jours pour les supermarchés

Les valeurs utilisées dans ce scénario sont les suivantes :

$$NT_{hyp,3jr} = 3 * 1480 = 4440 \text{ traj} \quad (6)$$

$$NT_{sup,3jr} = 3 * 360 = 1080 \text{ traj} \quad (7)$$

$$\tau_{lo} = 12\% \text{ v.km} \quad (8)$$

$$\tau_{hyp} = 42\% \text{ v.km} \quad (9)$$

$$\tau_{sup} = 46\% \text{ v.km} \quad (10)$$

On a donc :

$$\eta_{ZMD}^{-1} = 0,12 + \frac{0,42}{10} + \frac{0,46}{7,6} = 0,22 = \frac{1}{4,5} \quad (11)$$

On obtient finalement une efficacité moyenne de 4,5, soit **une réduction de 78 % des v.km** grâce au système de distribution proposé.

On suppose ici que les véhicules de livraison utilisés (des petits utilitaires neufs) émettent en moyenne la même quantité de CO₂/km que le parc de VP moyen utilisé pour aller faire les courses. La réduction en termes de v.km est donc égale à la réduction en termes d'émissions CO₂.

4.1.2. Hypothèses pour le scénario gisement « livraison collaborative »

Le système de livraison collaborative met en jeu deux groupes de consommateurs, pour chaque acte d'achat : ceux qui commandent sur Internet et se font livrer, et ceux qui vont faire leurs courses en grande surface et qui livrent les courses de ceux qui ont commandé sur Internet. On suppose dans ce scénario que 40 % des achats faits par les utilisateurs d'Internet sont des achats qui sont livrés par un voisin (50 % étant le maximum théorique si les ménages voisins fonctionnent par couple, l'un allant faire les courses et livrant, et l'autre se faisant livrer ses courses).

En extrapolant les données sur le taux d'utilisation d'Internet en fonction de la classe d'âge (CREDOC, 2014), on suppose ici qu'en 2026 :

- 95 % des moins de 65 ans utilisent Internet
- 75 % des plus de 65 ans utilisent Internet

En se basant sur les données de projection démographique de l'INSEE (INSEE, 2010), on suppose ici que les plus de 65 ans représenteront 23 % de la population française en 2026, soit environ 30 % de la population de plus de 20 ans (en âge de conduire), les 70 % restants ayant entre 20 et 65 ans. La part des distances pour le motif « achats en grandes surfaces » qui est remplacée par la livraison collaborative, $\%v.km_{liv}$ se calcule alors :

$$\%v.km_{liv} = 0,40 * 0,95 * 0,70 + 0,40 * 0,75 * 0,30 = 36\% \quad (12)$$

4.1.3. Synthèse des hypothèses

Le tableau suivant synthétise les hypothèses qui ont été prises pour estimer l'impact de la distribution des achats. Ces hypothèses, dans le modèle, sont appliquées progressivement de 2015 à 2026. C'est en 2026 que le système est supposé atteindre son développement complet.

Tableau 11 : Synthèse des hypothèses sur les comportements de mobilité en présence des systèmes de distribution d'achats proposés

	Scénario Gisement « distribution par tournées »	Scénario Gisement « livraison collaborative »
Communautés initiales	Habitants des ZMD	Habitants des ZMD
Trajets générés	Trajets achats grandes surfaces se terminant par des achats (88 % des v.km)	Trajets achats grandes surfaces
Assiette (trajets concernés)	Motif « achats grandes surfaces » : 78 % des v.km	Motif « achats grandes surfaces » : 36 % des v.km
Effet sur la mobilité	Effacement des v.km	Effacement des v.km

4.2. Résultats

Le Tableau 12 résume les principaux résultats obtenus pour les deux scénarios (gisement) considérés pour la distribution des achats.

Tableau 12 : Principaux résultats des scénarios gisement « livraison par tournées » et « livraison collaborative », en 2026 comparés au scénario Référence.

	Scénario Gisement « distribution par tournées »	Scénario Gisement « livraison collaborative »
Réduction de la mobilité (pkm)	7,8 %	3,6 %
Parts modales (p.km)	Inchangées	Inchangées
Taux de remplissage (p.km/v.km)	Inchangés	Inchangés
Réduction des émissions CO ₂ (Mt/an)	1,3	0,62
Réduction des émissions CO ₂ (%)	8,5 %	3,9 %

Les solutions de livraison sur le dernier kilomètre proposées dans les deux scénarios gisement permettent de réduire le trafic de VP (v.km) initial lié à la demande en mobilité (p.km) pour les achats en grande surface dans les ZMD. Les résultats sont donnés ici en termes de mobilité et non en termes de trafic (Figure 21).

Le scénario Référence suppose une lente augmentation de la mobilité due à l'évolution démographique. Le scénario gisement « distribution par tournées » conduit à une baisse de la mobilité locale de 7,8 % à l'horizon 2026 tandis que le scénario gisement « livraison collaborative » mène à une baisse de la mobilité locale de 3,6 % à la même échéance.

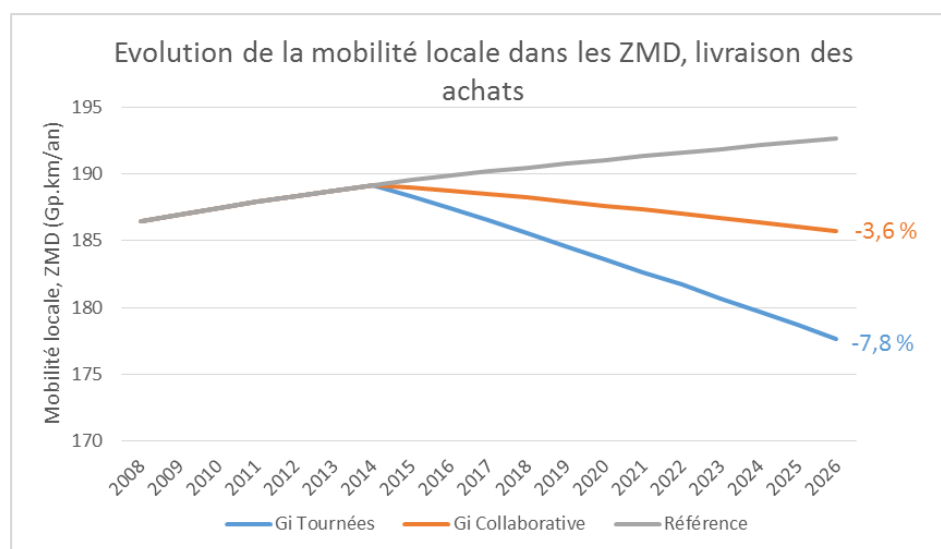


Figure 21 : Evolution de la mobilité dans les ZMD, pour le scénario Référence et les deux scénarios gisement pour la distribution des achats. Les pourcentages indiqués en face des courbes des scénarios gisement correspondent à la diminution de mobilité mesurée en 2026 par rapport au scénario Référence.

Cette mobilité est ensuite à répartir sur les différents modes dans IMMOVE, pour appliquer les taux de remplissage observés dans l'ENTD 2008. Les parts modales et taux de remplissage du scénario Gi sont très similaires de ceux du scénario Référence. Des différences du second ordre (inférieures à quelques % d'écart avec le scénario Référence) apparaissent par le fait que la mobilité évitée par le système de distribution dépend plus de la VP que la moyenne (les déplacements pour les achats en grandes surfaces sont faits en grande majorité en VP). Eviter cette mobilité mène ainsi à une légère baisse de la part modale globale de la VP dans les ZMD.

Dans le scénario « distribution par tournées », la baisse de la mobilité atteint 7,8 %, et permet une réduction de 8,5 % des émissions CO₂ par rapport au scénario Référence en 2026. Dans le scénario « livraison collaborative », la baisse des émissions CO₂ par rapport au scénario Référence en 2026 est de 3,9 %.

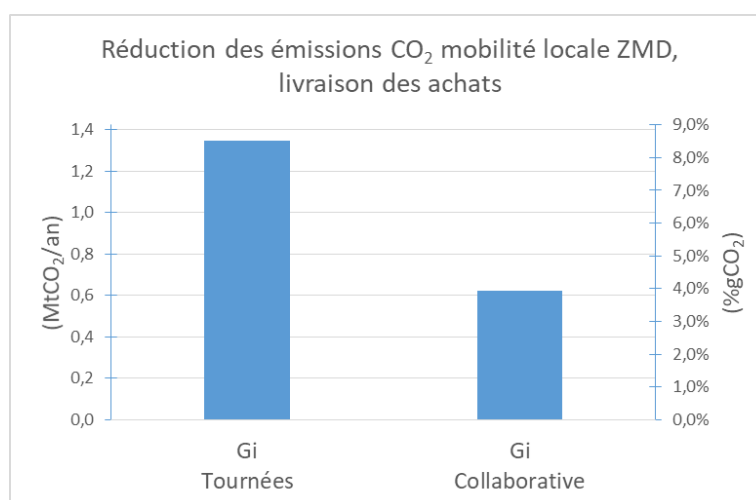


Figure 22 : Réduction des émissions CO₂, pour les 2 scénarios Gi « distribution par tournées » et « livraison collaborative », en pourcentage par rapport au scénario Référence en 2026.

La réduction des émissions de CO₂ est très légèrement supérieure à la baisse de la mobilité, car les déplacements VP pour les achats en grande surfaces, sont plus carbonés que la moyenne (usage de la VP plus élevé que pour les autres motifs).

4.3. Interprétation

Pour mieux comprendre les ordres de grandeur obtenus, nous nous sommes basés sur la situation observée en 2008, et avons supposé la mise en place du système de distribution par tournées, et son usage, dès cette année-ci. En comparant la situation initiale (observée en 2008) et la situation finale (hypothèse pour cette vérification : le système de livraison est mis en place en 2008), nous avons obtenu la baisse des émissions CO₂ qui peut être raisonnablement attendue si la structure de la mobilité des ZMD ne change pas radicalement entre 2008 et 2026. La baisse attendue est effectivement très proche des résultats fournis par le modèle IMMOVE pour chaque scénario.

La réduction de la mobilité pour le motif « achats en grandes surfaces » est définie en valeur relative et est appliquée à chaque catégorie de trajet ayant ce motif. Ainsi, une diminution de 78 % de la mobilité se répercute directement, parmi les trajets en VP, en une diminution de 78 % de la mobilité en VP, et donc en une diminution de 78 % du trafic VP. Le raisonnement pour calculer les émissions CO₂ évitées a donc été directement fait sur le trafic VP, qui compte pour 96 % des émissions de CO₂ des ZMD (Tableau 13).

Tableau 13 : Calcul de la baisse des émissions CO₂ attendue si le système de distribution des achats par tournées (Gi « distribution par tournées ») était mis en place en 2008.

Année 2008	Grandes surfaces	Autres motifs	Total
Trafic VP initial (Gv.km)	13	104	117
Réduction du trafic DT (%v.km)	78%	0%	-
Trafic VP évité (Gv.km)	10	0	10
Trafic VP final (Gv.km)	2.8	104	107
Diminution trafic (%v.km)	8.5%		
Part VP dans émissions CO ₂ en 2026 (%v.km)	95%		
Diminution CO ₂ attendue (%gCO ₂)	8.1%		
Diminution CO ₂ obtenue IMMOVE (%gCO ₂)	8.5%	OK	

Les scénarios Gi « distribution par tournées » et Gi « livraison collaborative » mènent à des hypothèses différentes. Ces deux modèles de livraisons sont cependant équivalents du point de vue des émissions CO₂ dans le cas limite où la livraison par tournées fonctionnerait si bien qu'un voisin pourrait se spécialiser dans la livraison d'achats pour un ensemble de personnes de son voisinage. La livraison ne serait plus assurée par une entreprise de livraison ou par l'enseigne de grande distribution, mais par une entreprise de l'économie collaborative. Les émissions CO₂, elles, seraient réduites de manière égale dans les deux cas. Le jeu d'acteurs, les flux monétaires ainsi que la gouvernance d'un tel système seraient cependant très différents.

La livraison des achats donne une plus grande accessibilité aux ménages en situation de précarité aux produits de grandes surfaces. Les scénarios « distribution des achats » supposent un remplacement de trajets *existants* dans le scénario Référence, et négligent le fait qu'une nouvelle offre de livraison généralisée pourrait donner accès aux produits de grandes surfaces à certains ménages en situation de précarité vis-à-vis de la mobilité (situation financière, cognitive ou physique qui empêche l'accès à la VP), qui devaient faire tous leurs achats dans des magasins de proximité. Certains ménages qui ne faisaient pas leurs courses en grande surface pourraient alors faire appel à ce nouveau service pour avoir accès aux produits des grandes surfaces. En moyenne, les tournées devront donc couvrir certains trajets supplémentaires, qui ont été négligés dans cette étude. Cependant, la plus grande accessibilité permise par la livraison des achats peut être considérée comme une externalité positive de ce système de distribution.

Les scénarios négligent aussi l'impact de ce système de livraison sur les comportements d'achats en magasins de proximité. Les tournées ne passant que tous les trois jours, il est possible que les déplacements pour les achats d'appoint et pour les achats de produits frais soient plus fréquents, donc qu'on observe une légère augmentation de la mobilité correspondante.

4.4. Bilan économique

4.4.1. Scénario « distribution par tournées »

Nous avons identifié les postes de dépenses qui diffèrent entre le scénario Référence et le scénario « distribution par tournées », dans lesquels le système de livraison par tournées a été mis en place dans les ZMD. Les dépenses sont exprimées hors taxe. Le système de tournées est assuré par une chaîne logistique constituée d'un entrepôt robotisé qui reçoit les références et dans lequel les paniers sont constitués (de type drive), puis d'un système de livraison par camionnettes partant de l'entrepôt. Les commandes et paiements sont faits en ligne, soit par le consommateur directement (s'il a accès à Internet), soit par un service téléphonique dédié le faisant à la place du consommateur. Voici les hypothèses prises dans le cadre de ce scénario :

- Le changement de modèle d'affaire pour passer d'une grande surface classique à un entrepôt de type drive a globalement été supposé neutre d'un point de vue monétaire, pour un service de grande distribution équivalent. Les surfaces à construire et entretenir sont plus faibles dans le cas de l'entrepôt (l'espace d'entrepôt est optimisé pour la constitution des paniers et non pas pour la présentation et le passage des chariots, et le drive avec livraison ne nécessite pas de parking). Les dépenses de chauffage et d'éclairage sont moindres dans le modèle drive que dans le modèle grande surface. La préparation des achats pour le modèle drive est assurée par du personnel qui n'existe pas dans le modèle grande surface. Cependant, les entrepôts de type drive sont très automatisés et optimisés pour la constitution des paniers. D'autre part, la mise en rayon nécessite plus de main d'œuvre que la mise en entrepôt. Il a été supposé, après validation d'expert, que ces postes se compensent. Cela se traduit par des marges équivalentes entre les drives de type entrepôt robotisé et les grandes surfaces. Ainsi, les dépenses associées aux postes en question n'ont pas été chiffrées individuellement.
- La flotte de véhicules de livraison a été dimensionnée en fonction du nombre de tournées à réaliser tous les trois jours ouvrés, pour remplacer un nombre de trajets pour motif « achats en grande surface » (hors achats loisirs) mesuré à 19,8 millions dans les ZMD. Il a été supposé que les achats sont deux fois plus agrégés par ménage que pour les achats en grande surface, comme cela est suggéré par la valeur moyenne du panier en drive, qui est environ du double de celle du panier en grande surface. Ainsi, on suppose que 9,9 millions de trajets pour motif « achats en grande surface » sont remplacés par le système de livraison tous les trois jours ouvrés. Le nombre de véhicules nécessaires pour couvrir ces trajets est déterminé ainsi :
 - Une tournée remplace 15 trajets aller-retour de 6,8 km en moyenne dans les ZMD
 - La tournée réduit de 88 % les kilomètres des trajets aller-retour
 - Donc chaque tournée parcourt en moyenne $15 \times 2 \times 6,8 \times (1 - 0,88) = 24$ km.
 - Les véhicules de livraison roulent à une vitesse moyenne de 40 km/h, chaque livraison prend 3 minutes (on suppose des livraisons rapides car une personne est toujours présente pour les réceptionner), et le chargement des 15 paniers prend 5 minutes
 - Donc chaque tournée dure environ 1h30, si bien que chaque jour ouvré, 4,8 tournées en moyenne sont faites par véhicule (ce dernier roulant 7 heures par hypothèse). On en déduit que $3 \times 4,8 \times 15 = 218$ livraisons sont effectuées tous les 3 jours ouvrés par véhicule.

- Pour couvrir la demande en livraison évoquée ci-dessus (9,9 millions tous les 3 jours), il faut donc $9,9 \text{ m}/218 = 45\,500$ véhicules environ.
- La quantité de carburant consommée par les véhicules de livraison a été estimée selon les calculs suivants :
 - Le nombre de kilomètres parcourus par chaque véhicule annuellement (soit 4,8 tournées de 24 km chacune, pendant 250 jours ouvrés) est de $250 \times 4,8 \times 24 = 30\,000$ km environ
 - La consommation unitaire moyenne de la flotte de véhicules de livraison en 2026 est supposée être de 4,2 L/100 km, valeur intermédiaire entre la consommation unitaire du parc de voitures selon le scénario Référence (4,7 L/100 km), et la consommation unitaire du parc de VP neuves (3,9 L/100 km).
 - La consommation agrégée annuelle (45 500 véhicules roulant chacun 30 000 km, à 4,2 L/100 km) est donc de $45\,500 \times 30\,000 \times 4,2/100 = 56,7$ ML de carburant.
- Le prix du carburant, comme pour les autres domaines d'action, est de 0,94 €/L (HT).
- Les tournées sont effectuées par une personne. Le nombre d'emplois à temps plein (ETP) requis pour assurer les tournées est déterminé ainsi :
 - 45 500 véhicules doivent être conduits chaque jour ouvré (250 jours/an), ce qui requiert environ 11,4 millions de personnes.jour
 - Chaque ETP travaille 220 jours par an. Donc $11,4 \text{ m}/220 = 51\,800$ ETP environ sont requis pour assurer les tournées dans les ZMD
 - Chaque livreur est payé au SMIC
- Un réseau de consignes automatisées est mis en place pour les livraisons qui ne peuvent pas être récupérées dans la plage horaire des points-relais ou voisins. Il a été supposé qu'un bloc de consignes est installé pour 100 ménages des ZMD, et que la valeur unitaire d'un bloc est de 16 700 € HT.
- Le gardiennage des achats par les voisins ou les points-relais est rémunéré par une commission de 1,50 €/achat.
 - Comme évoqué, 9,9 millions d'achats sont effectués tous les 3 jours ouvrés dans les ZMD
 - On suppose que 2/3 des achats requièrent un gardiennage, le reste étant réceptionné directement par le ménage, ou étant livré en consigne automatisée. Ainsi, annuellement, $9,9 \text{ m}/3 \times 250 \times 2/3 = 552$ millions d'achats sont gardiennés.
 - Ainsi, si on suppose un point-relais pour 50 ménages (soit $11,5 \text{ m}/50 = 233\,000$ points relais), chaque point-relais gardienne en moyenne $552 \text{ m}/233\,000/250 = 9,5$ panier/jour ouvré, générant un revenu annuel supplémentaire de $552 \text{ m}/233\,000 \times 1,50 = 3\,500$ €/an.
- Des équipements frigorifiques supplémentaires sont mis en place dans les points-relais ou chez les voisins proposant un gardiennage, si besoin. Il a été supposé qu'une unité frigorifique de 16 700 € est installée par 50 ménages des ZMD en moyenne.
- Une centrale d'appel est mise en place pour permettre aux personnes n'ayant pas accès à Internet pour des raisons techniques, cognitives ou financières, de commander leurs courses par téléphone. Les employés de la centrale sont supposés être payés au SMIC. Le nombre d'ETP permettant d'assurer un tel service est calculé ainsi :
 - On suppose que 5 % de la population des ZMD n'a pas accès à Internet d'ici 2026
 - Cela représente chaque jour ouvré $9,9 \text{ m}/3 \times 0,05 = 165\,500$ achats environ, donc un même nombre de commandes à gérer journalièrement.

- On suppose que le temps de prendre une commande avec un client est de 8 min. Ainsi, chaque jour.homme permet de traiter $8/60*7 = 53$ commandes, la journée de travail étant supposée être de 7 h.
- Par conséquent, le nombre de jour.homme requis annuellement pour traiter les commandes est de $165\,500/53*250 = 788\,000$ environ, ce qui est équivalent à 3 600 ETP travaillant 220 jours/an. On les suppose rémunérés au SMIC.

L'augmentation de la durée de vie de la VP des ménages et la moindre consommation de carburant par les ménages sont comptabilisés comme pour les scénarios Covoiturage (voir section 7.7), avec une valeur de réduction du trafic VP local 2026 obtenue par la simulation de 9,9 %, soit 7,1 % du trafic global.

La réduction de l'entretien de la voirie induite par le moindre trafic VP est considérée comme négligeable dans cette étude (Baaj, 2012).

Les résultats du calcul sont détaillés dans le Tableau 14.

Le scénario « distribution par tournées » induit des augmentations de dépenses qui ne sont pas complètement compensées par la réduction des dépenses qu'il permet : ce scénario est déficitaire de 400 M€/an par rapport au scénario Référence.

Le poste de dépense principal est la main d'œuvre pour les tournées. Ce poste n'existe pas dans le scénario Référence car la livraison n'y est pas rémunérée (elle est effectuée par le consommateur lui-même). Cependant, cette transition d'un service non salarié à un service salarié s'accompagne par des créations d'emplois, par un gain de temps pour le consommateur, et par un gain de temps global pour la société. Le second poste de dépense est la main d'œuvre pour le gardiennage des achats. Ce poste n'existe pas dans le scénario Référence, puisque le gardiennage n'y est pas nécessaire. Le gardiennage constituera cependant une activité économique accrue (sous forme de revenus complémentaires pour les commerces et services de proximité, ou pour les retraités par exemple) Viennent ensuite les équipements frigorifiques, qui constituent un poste de dépenses important et dont les valeurs n'ont pas pu être validées par des sources extérieures. Enfin, la flotte de véhicules de livraison constitue le dernier poste de dépense non négligeable devant le bilan global. Cependant, ce poste est directement lié à la réduction d'utilisation des VP des ménages, qui le compense plus que largement (dépense annuelle de 187 M€ contre une réduction des dépenses annuelles de 2,2 G€).

Le bilan net du système de livraison est très sensible :

- Au niveau de salaire horaire des employés de livraison et au niveau de rémunération du gardiennage : si ceux-ci augmentent, alors les dépenses globales augmentent (le système de livraison est alors moins rentable économiquement parlant)
- Au prix du carburant et à la consommation unitaire des VP. Si ceux-ci augmentent, alors les dépenses globales diminuent (il devient plus rentable pour la société de mettre en place le système de livraison)
- Au prix des VP neuves. Si celui-ci augmente, les dépenses globales diminuent.

Tableau 14 : Les différents postes de dépenses du scénario « distribution par tournées ». La colonne « Coût total S' (M€) » est calculée en multipliant la colonne « Coût unitaire (€) » par la colonne « Nombre d'unités dans S' ». Le coût total S' est ensuite divisé par la durée de vie pour obtenir le coût à l'année de S'. Pour les types de modification « Modif » (deuxième colonne), le coût à l'année de Sref est calculé tel que décrit dans la section 7.7.2. Pour les types de modification « Création », le coût à l'année de Sref est nul, ce poste de dépense n'existant pas dans le scénario de Référence.

Elément différent entre S' et Sref	Type de modification	Coût unitaire HT (€)	Unité	Nombre d'unités dans S'	Unité	Coût total S' (M€)	Durée de vie (an)	Coût à l'année S' (M€)	Coût à l'année Sref (M€)
Bâtiments (grande surface dans Sref et entrepôt drive dans S')	Modif	N/A	€/magasin	N/A	magasin	-	50	-	-
Ressources humaines préparation et finalisation de l'achat	Modif	N/A	€/pers/an	N/A	pers	-	1	-	-
Equipements logistiques	Modif	N/A	€/magasin	N/A	magasin	-	50	-	-
Flotte de véhicules de livraison	Création	20 833	€/veh	45 544	véh	949	5,1	187	-
Carburant utilisé par la livraison	Création	0,94	€/L	64 280 890	L	60	1	60	-
Ressources humaines pour la livraison	Création	29 796	€/pers/an	51 755	pers	1 542	1	1 542	-
Consignes de dépôt/retrait des achat	Création	16 667	€/bloc consignes	116 435	bloc consignes	1 941	50	39	-
Ressources humaines gardiennage des achats	Création	1,50	€/achat	551 768 166	achat	828	1	828	-
Equipements frigorifiques /congélation pour le gardiennage des achats	Création	16 667	€/unité frigorifique	232 870	unité frigorifique	3 881	10	388	-
Ressources humaines pour aide à la commande sans Internet	Création	29 796	€/pers/an	3 583	pers	107	1	107	-
Augmentation durée de vie VP	Modif	20 833	€/VP	17 465 281	VP	363 860	12,4	29 295	31 535
Moins de carburant achat pour les ménages	Modif	0,94	€/L	5 720 076 996	L	4 832	1	4 832	5 363
						Total annuel (M€)		38 933	38 552
						Surcoût total annuel (M€)		381	

4.4.2. Scénario « livraison collaborative »

De même, nous avons identifié les postes de dépenses qui diffèrent entre le scénario Référence et le scénario « livraison collaborative », dans lequel le système de livraison collaborative a été mis en place dans les ZMD.

- Chaque achat livré par un voisin qui fait ses courses dans la grande surface doit être préparé par un employé qui parcourt les rayons pour constituer le panier. Ces employés sont supposés être payés au SMIC. Leur nombre pour préparer les achats est déterminé ainsi :
 - 36 % des achats sont livrés par un voisin, ce qui représente $9,9\text{m}/3 \times 0,36 = 1,2$ millions d'achats par jour ouvré.
 - Le temps de préparation du panier moyen est supposé être de 30 minutes (Megnin, 2013), si bien qu'un employé peut préparer 14 paniers par jour travaillé .
 - Donc $1,2\text{m}/14 = 85\,000$ pers.jour sont requis pour préparer les paniers, soit environ $85\,000 \times 250/220 = 97\,000$ ETP qui travaillent 220 jours/an.
- On suppose que les livreurs collaboratifs sont rémunérés à hauteur de 3 €/achat livré. Comme calculé ci-dessus, le nombre d'achats livrés par jour ouvré est de 1,2 millions environ. Ainsi, annuellement (250 jours ouvrés), cela représente 298 millions de livraisons.
- L'augmentation de la durée de vie de la VP des ménages, la moindre consommation de carburant par les ménages, ainsi que l'entretien réduit de la voirie sont comptabilisés comme pour les scénarios Covoiturage (voir section 7.7), avec une valeur de réduction du trafic local 2026 obtenue par la simulation de 4,0 % (soit 2,9 % du trafic global).

Le système de livraison collaborative représente un déficit annuel pour la société de 2,6 G/an par rapport au scénario Référence.

L'estimation des coûts de ce système est très sensible :

- Au niveau de salaire des employés qui préparent les paniers, et au niveau de rémunération du service de livraison.
- Au niveau de productivité de la préparation des paniers. Si la productivité augmente (par exemple par un système de drive accolé au magasin physique, qui prépare les paniers), alors les dépenses globales diminuent.
- Au prix du carburant et à la consommation unitaire des VP. Si ceux-ci augmentent, alors les dépenses globales diminuent (il devient plus rentable pour la société de mettre en place le système de livraison)
- Au prix des VP neuves. Si celui-ci augmente, les dépenses globales diminuent.

Tableau 15 : Les différents postes de dépenses du scénario « Livraison collaborative ». La colonne « Coût total S' (M€) » est calculée en multipliant la colonne « Coût unitaire (€) » par la colonne « Nombre d'unités dans S' ». Le coût total S' est ensuite divisé par la durée de vie pour obtenir le coût à l'année de S'. Pour les types de modification « Modif » (deuxième colonne), le coût à l'année de Sref est calculé tel que décrit dans la section 7.7.2. Pour les types de modification « Création », le coût à l'année de Sref est nul, ce poste de dépense n'existant pas dans le scénario de Référence.

Élément différent entre S' et Sref	Type de modification	Coût unitaire HT (€)	Unité	Nombre d'unités dans S'	Unité	Coût total S' (M€)	Durée de vie (an)	Coût à l'année S' (M€)	Coût à l'année Sref (M€)
Ressources humaines préparation et finalisation de l'achat	Création	29 796	€/pers/an	96 739	pers	2 882	1	2 882	-
Ressources humaines pour la livraison	Création	3	€/achat livré	297 954 810	achat livré	894	1	894	-
Augmentation durée de vie VP	Modif	20 833	€/VP	17 465 281	VP	363 860	11,9	30 618	31 535
Moins de carburant achat pour les ménages	Modif	0,94	€/L	5 720 076 996	L	5 146	1	5 146	5 363
						Total annuel (M€)		40 961	38 318
						Surcoût total annuel (M€)		2 643	

Chapitre 5 - Système vélo

Le système vélo proposé favorise un report modal de la voiture, mais aussi des transports collectifs routiers et ferrés vers le vélo. Notre objectif est de quantifier ce report modal, et le taux d'émissions de CO₂ évitées. Dans ce chapitre les reports modaux sont supposés être effectués vers les modes vélo et marche à pied sans distinction, ces deux modes étant considérés comme n'émettant pas de CO₂.

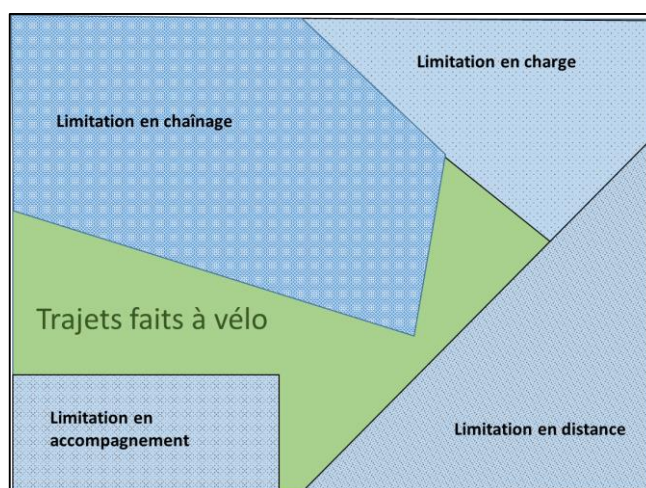
5.1. Hypothèses

Comme pour les autres domaines d'actions, nous avons émis des hypothèses selon chaque scénario. Il a été néanmoins supposé dans les scénarios « système vélo » que le report modal vers le vélo ou la marche se faisait au prorata des parts modales observées au sein des autres modes. Ainsi par exemple, si la part modale du vélo/marche évolue de 0 à 10 % de 2008 à 2026 pour un type de trajets, qui est réalisé à 90 % en VP, 5 % en train et 5 % en bus en 2008, alors les parts modales seront en 2026 de :

	Vélo/marche	VP	Train	Bus
Fictif 2008 ⁷	0 %	90 %	5 %	5 %
2026	10 %	81 %	4,5 %	4,5 %

5.1.1. Scénario Gisement

Nous avons défini des limites chiffrées quant à l'usage du vélo pour tenir compte de ses limites physiques. Elles sont supposées réductrices ; autrement dit, si une des caractéristiques d'un trajet dépasse ces limites, le trajet est réputé ne pas pouvoir se faire à vélo (Figure 23).



⁷ Les valeurs ne reflètent aucune réalité et n'ont été choisies qu'à titre d'illustration du mécanisme de report modal tel qu'il a été modélisé.

Figure 23 : Schématisation de l'ensemble des trajets des ZMD, et des limites excluant certains de ces trajets de l'usage du vélo (dans le cadre du scénario Gisement). Les trajets qui ne sont exclus par aucune des limites sont réputés pouvoir se faire à vélo (zone verte restante).

5.1.1.1 Distances

Le système vélo en place à l'horizon 2026 est supposé apporter aux cyclistes un trajet sûr sur des distances inférieures ou égales à celles qui seraient parcourues en voiture (pas de détour induit par le choix du mode vélo par rapport à la voiture).

Dans le scénario Gisement, le temps maximum passé à vélo par trajet est de 30 minutes. Par conséquent, seules les distances inférieures à 7 km sont supposées pouvoir être parcourues en vélo, tricycle ou quadricycle classique ; les distances inférieures à 10 km peuvent être parcourues en vélo, tricycle ou quadricycle à assistance électrique (VAE) ; les distances inférieures à 20 km peuvent être parcourues en s-pedelec. Les vélos-cargo, vélos-cargo à assistance électrique (VCAE) peuvent aussi parcourir des distances de 7 km au plus. Tous les ménages sont équipés des types de vélo leur permettant de couvrir ces gammes de parcours. Autrement dit, si une personne doit faire un trajet de 19km (aller), nous supposons qu'elle aura un s-pedelec à sa disposition. Si une autre doit parcourir 8km, nous supposons qu'elle aura a minima un VAE.

5.1.1.2 Chaînage⁸

Aux contraintes de distances ont été ajoutées des contraintes de chaînage : une estimation de la part des trajets de moins de 20 km mais faisant partie d'un chaînage de plus de 40 km a été faite en se basant sur l'ENTD (CGDD, 2008). On peut ainsi calculer que 15 % des p.km fait dans les ZMD sont parcourus sur de tels trajets. L'hypothèse a été prise que ces p.km ne seront pas faits à vélo : un multiplicateur de 0,85 est donc appliqué à la part modale vélo pour tous les motifs.

5.1.1.3 Charge

Les vélos classiques, VAE et s-pedelecs peuvent transporter des volumes de la taille d'un panier. Les vélos-cargo, vélos-cargo à assistance électrique (VCAE) et vélos équipés de carrioies peuvent transporter des volumes équivalents à un caddie de supermarché. Les volumes dépassant celui d'un caddie ne peuvent pas être transportés à vélo. En se basant sur les données de l'ENTD 2008 (CGDD, 2008), nous avons sélectionné les hypothèses suivantes, de part des trajets étant faits à vélo :

Distance	Achats de proximité	Achats en grande surface
< 7km	95 %	79 %
7 – 20 km	91 %	49 %

Lecture : 79 % des trajets de moins de 7 km pour le motif « achat en grande surface » peuvent être faits en vélo selon le critère « charge » (car ils requièrent sur le chemin du retour le transport d'un volume inférieur ou égal à un caddie, qui peut être effectué en vélo cargo).

⁸ Un chaînage, ou trajet chaîné, est un trajet enchaînant plusieurs motifs différents sans repasser par le domicile. Par exemple, déposer son enfant à l'école sur le chemin du travail, puis rentrer chez soi le soir (les motifs « accompagner » puis « travail » s'enchaînent sans repasser par le domicile).

5.1.1.4 Nombre de personnes transportables

Seuls les vélos-cargo, VCAE, et vélos avec carriole sont utilisés pour transporter des personnes. Le scénario suppose que ces vélos permettent de transporter une personne au plus. Le scénario suppose que seuls les trajets de personnes qui ne peuvent pas faire de vélo (y compris tricycles et quadricycles) sont faits par vélo-cargo ou carriole, accompagnés.

Ainsi, le scénario gisement suppose que :

- Tous les trajets faits de manière autonome actuellement seront faits de manière autonome en vélo en 2026 (dans la limite des autres contraintes explicitées dans cette section). Par exemple, un trajet en voiture en tant que conducteur pourra être fait en vélo. On suppose que les trajets faits autrement qu'en VP accompagné sont faits de manière autonome (VP seul, TC, marche, moto...). Ces trajets représentent 56 % (VP seul) + 17 % (autres modes) = 73 % des p.km dans les ZMD. Les transports spécialisés pour la santé représentent une part faible des émissions CO₂ des ZMD (moins de 0,1 %) et sont donc négligés pour ce calcul Gisement.
- Les autres trajets (c'est-à-dire les trajets en VP en tant que passager) peuvent être faits en vélo si la personne est transportée en vélo cargo. Parmi les 83 % de p.km parcourus en VP dans les ZMD, 56 % sont faits seul, 17 % ont exactement un passager, et 10 % ont deux passagers ou plus. Il est donc supposé ici que 17 % des p.km peuvent être faits en vélo-cargo, et que 10 % ne peuvent pas être faits en vélo du tout. Par simplification, nous ne tenons pas compte des passagers de VP qui savent faire du vélo⁹.

Distance	Tous motifs
< 7km	$\%pkm_{vélo} = \%pkm_{vélo\ class} + \%pkm_{vélo\ cargo}$ $= (0,17 + 0,56) + 0,17 = 90\%$
7 – 20 km	$\%pkm_{vélo} = \%pkm_{vélo\ class} = (0,17 + 0,56) = 73\%$

Lecture : dans les ZMD, le fait de devoir transporter une autre personne n'est un obstacle à l'utilisation du vélo que dans 10% des cas (100% - 90%) pour les distances de moins de 7 km. Cette valeur exprime le pourcentage de p.km, tous motifs confondus.

Le scénario Gisement suppose une adhésion forte au système vélo, ce qui rendrait certaines pratiques de mobilité actuelles obsolètes. Par exemple, un bon système vélo permettrait aux jeunes de ne plus se faire accompagner en voiture mais de prendre leur vélo de manière sûre sur de plus longues distances qu'actuellement. L'hypothèse faite de conserver la mobilité de 2008 a donc des limites notamment sur les trajets d'accompagnement.

Ce scénario tient compte des distances parcourues, des charges transportées, du chaînage des trajets, et du transport de passagers. Il ne tient pas compte du climat, de l'horaire du trajet (trajet de nuit...), ou du différentiel de vitesse entre le vélo et la VP et de son importance pour la personne se déplaçant (en fonction de sa CSP par exemple).

⁹ En se basant sur les estimations démographiques de (INSEE, 2016), et les données sur la pratique du vélo de (Observatoires des mobilités actives - CVTC, 2013), on peut estimer que la part des personnes sachant faire du vélo en France en 2013 est de 85 %.

5.1.1.5 Intégration des hypothèses par motif et distances

En multipliant les contraintes par distance et par motif (incluant les contraintes de charge, de transport de passagers et de chaînage), les hypothèses finales pour le scénario Gisement, en part modale (%p.km) pour le vélo, sont les suivantes :

Distance	Achats proximité	Achats grande surface	Autres motifs
< 7km	$0,95*0,85*0,90$ = 73 %	$0,79*0,85*0,90$ = 60 %	$0,85*0,90$ = 77 %
7 – 20 km	$0,91*0,85*0,73$ = 56%	$0,49*0,85*0,73$ = 30%	$0,85*0,73$ = 62 %
>20 km	0%	0%	0%

5.1.2. Développement

Des experts vélo ont été consultés dans le cadre du projet pour contribuer à l'élaboration du scénario Développement Haut. Les changements de comportements relatifs à la mise en place de ce système vélo ont été évalués pour les différentes catégories de trajets. Ainsi, un croisement entre la distance, la CSP de la personne faisant le trajet, et le motif du trajet a permis de définir les catégories de trajets. Pour chacune des combinaisons possibles de ces trois variables (Tableau 16), les experts ont évalué la probabilité qu'un tel trajet soit fait à vélo ou à pied en 2026, en supposant le système vélo proposé mis en place. Deux équipes d'experts ont fait cet exercice.

Des accords clairs entre les deux groupes ressortent : plus la distance du trajet est élevée, moins la probabilité qu'il soit fait en vélo ou marche est grande ; les trajets faits par les étudiants ont une probabilité plus grande que les autres d'être faits en vélo ou marche ; au contraire, les trajets faits par les retraités sont moins propices à ces modes ; les motifs les plus propices à ces modes sont les motifs professionnels, alors que le motif le moins propice est « les achats en grandes surfaces ».

Deux désaccords ressortent du travail des experts : le motif « soin/administratif » a été jugé propice au vélo/marche par un groupe mais pas par l'autre ; de même, le motif « accompagner/aller chercher » a mené à un désaccord. Dans ce dernier cas, le groupe suggérant que le motif était propice au vélo/marche a aussi mentionné dans sa description du système vélo un accès possible aux vélos et équipements permettant de transporter des personnes.

Les résultats obtenus ont été moyennés entre les deux groupes d'experts et ont ensuite été normalisés sous forme de pourcentages représentant la probabilité qu'un trajet de la catégorie considérée soit fait en vélo ou à pied (Tableau 16, annexe 10.5 pour le détail des étapes de calcul). Les trajets de catégories jugées sans potentiel par les experts (ceux de plus de 15 km) ne subiront aucune modification de parts modales dans ce scénario.

Tableau 16 : Probabilités associées à différentes catégories de trajets pour que les trajets de ladite catégorie soient faits à vélo ou à pied dans les ZMD en 2026, en supposant que le système vélo proposé soit mis en place, d'après les experts vélo interrogés dans le cadre de ce projet. En orange, les catégories de trajets qui seront très probablement faites en vélo ou à pieds (probabilité supérieure à 90%).

Motifs de trajet ↓	CSP →	Scolaire	Etudiant	Employé/ ouvrier	Cadre/ intermédiaire	Personne au foyer	Chômeur	Retraité
Achats grande surface	0-3km	10%	90%	60%	60%	70%	70%	40%
	3-7km	0%	70%	30%	20%	30%	40%	30%
	7-15km	0%	30%	10%	10%	10%	20%	20%
Achats proximité	0-3km	90%	100%	80%	80%	90%	90%	65%
	3-7km	60%	80%	65%	55%	60%	80%	40%
	7-15km	10%	20%	25%	25%	20%	10%	0%
Soins/démarches	0-3km	60%	70%	60%	60%	50%	70%	40%
	3-7km	40%	50%	50%	50%	40%	50%	20%
	7-15km	30%	30%	20%	20%	20%	20%	10%
Visites amis/famille	0-3km	100%	80%	90%	90%	90%	100%	70%
	3-7km	80%	60%	60%	60%	60%	80%	30%
	7-15km	30%	30%	30%	30%	30%	40%	20%
Accompagner/aller chercher	0-3km	20%	40%	30%	40%	60%	60%	40%
	3-7km	0%	20%	20%	30%	30%	30%	30%
	7-15km	0%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
Loisirs	0-3km	100%	100%	80%	80%	80%	80%	80%
	3-7km	70%	80%	60%	60%	70%	70%	50%
	7-15km	20%	50%	50%	50%	50%	50%	30%
Domicile Travail/ études	0-3km	90%	90%	100%	100%	0%	0%	0%
	3-7km	70%	90%	70%	70%	0%	0%	0%
	7-15km	20%	50%	30%	40%	0%	0%	0%
Autres professionnels	0-3km	0%	100%	90%	90%	0%	0%	0%
	3-7km	0%	90%	70%	70%	0%	0%	0%
	7-15km	0%	40%	40%	40%	0%	0%	0%

5.1.3. Développement Bas

Le scénario Développement Bas suppose par définition des modifications des comportements deux fois moins importantes que celles estimées par les experts. Les probabilités ainsi obtenues pour le scénario Développement seront divisées par deux.

5.1.4. Synthèse des hypothèses sur les nouveaux comportements de mobilité

Tableau 17 : Synthèse des hypothèses sur les comportements de mobilité en présence du système vélo proposé

	Scénario Gisement	Scénario Développement	Scénario Développement Bas
Communautés initiales	Habitants des ZMD	Habitants des ZMD	Habitants des ZMD
Trajets générés	Tous	Tous	Tous
Assiette (trajets concernés)	Fonction de (distance, motif) ; voir section 5.1.1.5	Fonction de (distance, CSP, motif), voir Tableau 16	Cf scénario Développement, mais divisée par 2
Effet sur la mobilité	Report modal vers le vélo/marche	Report modal vers le vélo/marche	Report modal vers le vélo/marche

5.2. Résultats

Le système vélo ne modifie, dans le modèle IMMOVE, que les parts modales (ici exprimées en p.km). Ainsi, la mobilité locale est supposée égale à celle du scénario Référence, en légère augmentation sur la période 2008-2026. Les parts modales sont modifiées selon les modalités décrites dans le Tableau 17, en fonction du type de trajet considéré. Globalement, les simulations aboutissent à une répartition des parts modales représentées Figure 24, en 2026. L'évolution de ces parts modales entre 2015 et 2026 est supposée linéaire : ce n'est qu'en 2026 que le système proposé dans les scénarios atteint ses effets maximums.

Tableau 18 : Principaux résultats des scénarios Vélo en 2026, comparés au scénario Référence

	Scénario Gisement	Scénario Développement	Scénario Développement Bas
Réduction de la mobilité (pkm)	Inchangée	Inchangée	Inchangée
Parts modales (p.km)	Vélo/marche = 36 %	Vélo/marche = 18 %	Vélo/marche = 10 %
Taux de remplissage (p.km/v.km)	Inchangés	Inchangés	Inchangés
Réduction des émissions CO ₂ (Mt/an)	4,4	2,4	1,1
Réduction des émissions CO ₂ (%)	33 %	15 %	6,8 %

La part modale des modes vélo/marche grandit dans chaque scénario, principalement au détriment de la part de la voiture, en valeur absolue (Figure 24). En variation relative dans le Scénario Dév, la part modale du vélo/marche passe de 4,2 % en 2016 à 18 % en 2026, soit une multiplication par 4 de l'usage de ces modes en 10 ans. Le scénario Dév suppose donc un développement massif et rapide de l'usage des cycles. L'usage de la voiture, dans le même temps, diminue de 14 %, celui des deux-roues motorisés de 20%, et celui des TC de 15 % environ.

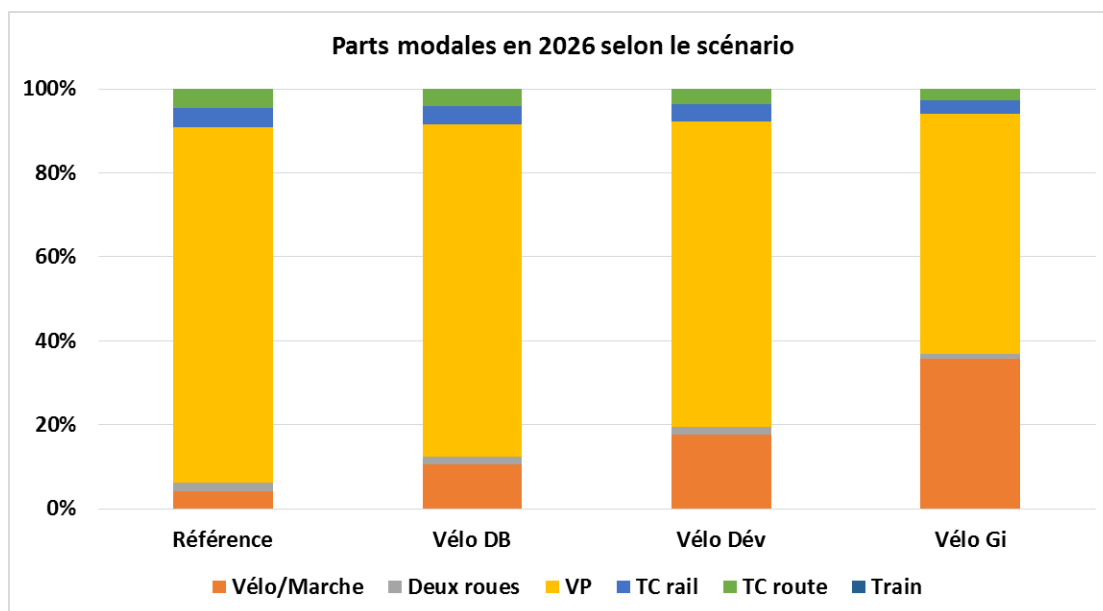


Figure 24 : Parts modales en p.km en 2026 pour le scénario Référence et pour les trois scénarios vélo.

Ces reports modaux se traduisent directement en véhicules à moteur qui circulent moins (en conservant les taux de remplissage observés dans l'ENTD), donc en émissions CO₂ évitées par rapport au scénario

Référence : le scénario gisement mène à réduire les émissions de 33 %, et le scénario développement de 15 %, par rapport au scénario Référence (Figure 25).

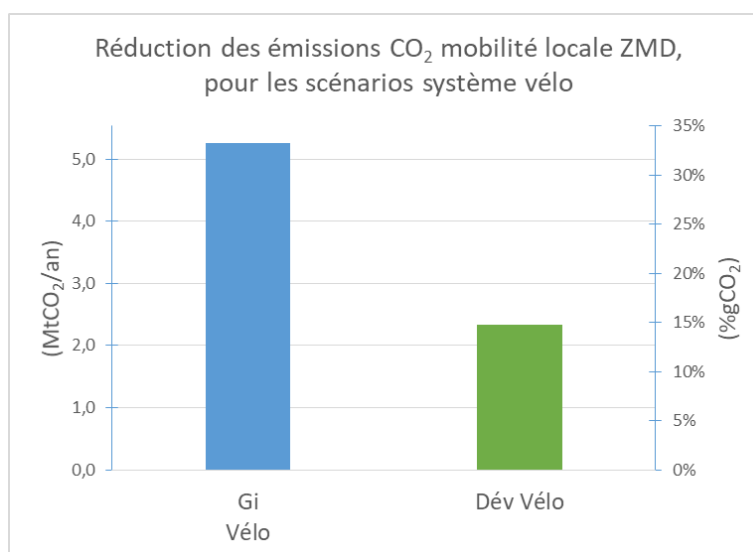


Figure 25 : Evolution des émissions CO₂ annuelles dans les ZMD, selon le scénario Référence et les trois scénarios vélo. Les pourcentages indiqués correspondent aux baisses d'émissions CO₂ par rapport au scénario Référence, en 2026.

5.3. Interprétation

Pour mieux comprendre les ordres de grandeur obtenus, nous nous sommes basés sur la situation observée en 2008, et avons supposé la mise en place du système vélo, et son usage, dès cette année-ci. En comparant la situation initiale (l'observé en 2008) et la situation finale (hypothèse pour cette vérification : le système vélo est mis en place en 2008), nous avons obtenu la baisse des émissions CO₂ qui peut être raisonnablement attendue si la structure de la mobilité des ZMD ne change pas radicalement entre 2008 et 2026. La baisse attendue est effectivement très proche des résultats fournis par le modèle IMMOVE pour chaque scénario.

La mobilité en VP qui est allouée au système vélo réduit le trafic VP du même pourcentage que cette mobilité. Dans le scénario Gi, 73 % des p.km pour le motif « achats de proximité » sur des trajets de 7 km ou moins, sont affectés au vélo, quel que soit le mode utilisé initialement. Ainsi, 73 % des p.km VP sur ces trajets sont affectés au vélo, ce qui réduit de 73 % le trafic VP sur ces trajets. Ce calcul est effectué sur chaque type de trajet afin d'estimer la réduction du trafic VP globale puis la réduction des émissions (Tableau 19).

A partir des calculs « de validation » effectués sur l'année 2008, il a été possible de reconstituer les segments de mobilité reportés sur le vélo, par catégorie de distance (Figure 26). Ainsi, on fait apparaître (dans cet ordre) les distances qui sont trop longues pour être parcourues en cycle, les distances qui ne sont pas parcourues en cycles car elles font partie d'un trajet chaîné long, celles qui ne sont pas parcourues en cycles pour cause de transport de charge, celles qui ne sont pas parcourues en cycles pour cause de transport de personnes, et enfin celles qui sont parcourues en cycle. On remarque que 74 % des distances sont parcourues en cycle sur les trajets inférieurs à 7 km et 58 % des distances sont parcourues en cycles sur les trajets compris entre 7 et 20 km.

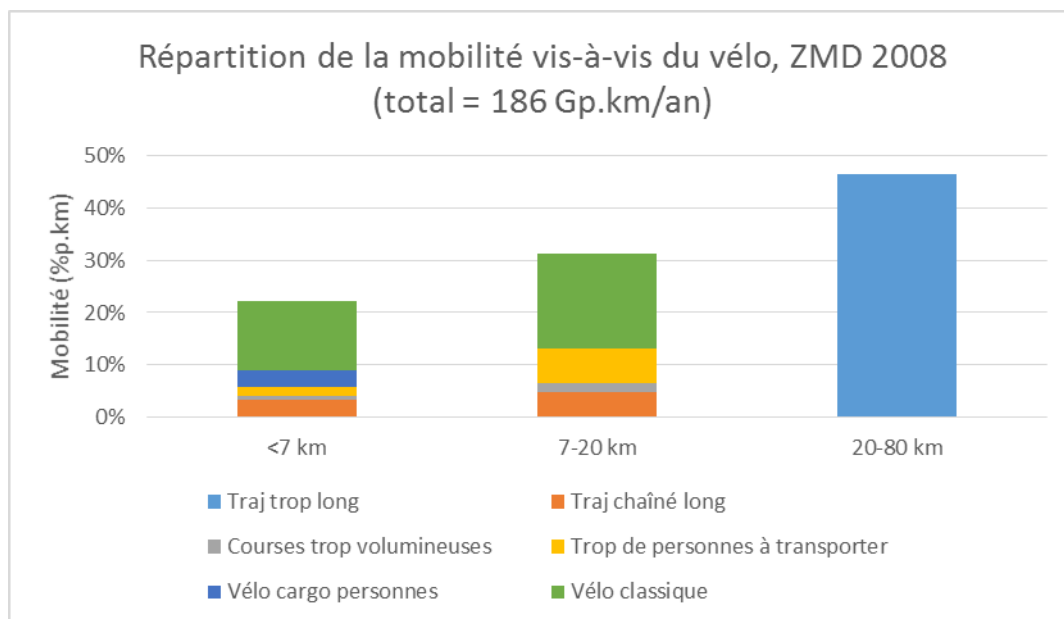


Figure 26 : Répartition de la mobilité locale des ZMD, reconstituée sur l'année 2008, en appliquant les hypothèses du scénario Gisement vélo. Le total de la mobilité considérée est de 186 Gp.km/an.

Le scénario Dév est ambitieux et réaliste. Il est issu des estimations de développement de l'usage du vélo par les experts, en supposant un système vélo mis en place en 2026. L'estimation des experts mène, comme mentionné précédemment, à une dynamique très forte de l'usage du vélo dans les ZMD pendant 10 ans. Ce développement produit une réduction des émissions CO₂ de 15 % en 2026. La dynamique est d'autant plus forte que l'usage du vélo est très faible en 2016 dans les ZMD. Les p.km effectivement modifiés, en termes de mode, entre le scénario Référence et le scénario Dév s'élèvent à 15 % de la mobilité locale sur 10 ans, soit un changement moyen de 1,4 % pkm/an, ce qui paraît ambitieux, et réaliste.

On peut estimer, par une analyse « de validation » du scénario Dév sur l'année 2008, qu'environ 50 % des distances sont parcourues en vélo pour les trajets inférieurs à 7 km, et environ 20 % des distances sont parcourues en vélo pour les trajets compris entre 7 et 15 km, aucune distance n'étant parcourue à vélo au-delà de 15 km. Ces valeurs sont obtenues en supposant par simplification que chaque catégorie (CSP X motif) contient le même nombre de trajets, puis en moyennant les valeurs données par les experts par classe de distance.

Dans le scénario Dév, on observe une quasi-linéarité entre la motivation à utiliser le système vélo et l'impact CO₂ du système vélo : lorsque les estimations des experts diminuent de 50 %, la réduction des émissions diminue de 54 %.

Le système vélo donne accès à la mobilité aux plus précaires ou aux jeunes, sans pour autant augmenter les émissions de CO₂. **Les scénarios vélo considèrent que la mobilité totale ne change pas dans les ZMD avec la mise en place du système vélo.** Autrement dit, l'induction de mobilité est négligée, alors que le système vélo permet à certains de retrouver de la mobilité ou d'allonger les distances parcourues. Cela concerne notamment les exclus de la mobilité en VP, par exemple les jeunes ou les personnes en situation de précarité financière, cognitive, ou physique, dont la situation ne permet pas l'accès au permis de conduire ou à la VP directement. Cette augmentation de la mobilité ne joue cependant pas sur les émissions CO₂ mais constitue une externalité positive de la mise en place du système vélo.

Le système vélo permet de maintenir la mobilité face à une contrainte carbone qui augmenterait fortement, tout en décarbonant la mobilité avant que cette contrainte ne soit forte. Une réduction de 15 % des émissions de CO₂ par le système vélo (résultat du scénario Dév) correspond à environ 25 % des déplacements faits à vélo dans les ZMD, ce qui suppose une pratique du vélo déjà bien établie. Une contrainte carbone ne mènerait pas à un changement radical de mode d'organisation, mais simplement à prendre le vélo un peu plus souvent, pour des distances plus longues, en utilisant un système qui est déjà en place. Cela constitue une réserve de résilience importante face à la contrainte carbone : la réduction des émissions peut être doublée (si le contexte carbone évolue), comme suggéré par le scénario Gi, tout en conservant la mobilité, et sans effet de seuil sur l'évolution des pratiques (sans devoir changer « brutalement » ses pratiques de mobilité).

Tableau 19 : Calcul de la baisse des émissions CO₂ attendue si le système vélo était mis en place en 2008, pour le scénario Gisement, et comparaison avec la réduction obtenue par IMMOVE.

Année 2008	Achats proxi < 7km	Achats proxi 7-20 km	Grandes Surfaces <7 km	Grandes Surfaces 7-20 km	Autres motifs <7 km	Autres motifs 7-20 km	Autres trajets	Total
Trafic VP initial (v.km)	3.3	2.5	4.1	5.0	15.9	30.2	55.8	117
Trafic reporté vers vélo (%v.km)	73%	56%	60%	30%	77%	62%	0%	-
Trafic VP évité (v.km)	2.4	1.4	2.5	1.5	12.1	18.7	0.0	38.7
Trafic VP final (v.km)	0.9	1.1	1.6	3.5	3.7	11.5	55.8	78.1

Diminution trafic (%v.km)	33.1%	
Part VP dans émissions CO ₂ en 2026 (%v.km)	95%	
Diminution CO ₂ attendue (%gCO ₂)	31.6%	
Diminution CO ₂ obtenue IMMOVE (%gCO ₂)	33.2%	OK

5.4. Scénarios cyclomoteur

Nous analysons dans cette section l'impact d'un remplacement du système vélo par un « système cyclomoteur », dans lequel tous les p.km reportés vers le vélo (y compris le s-pedelec) dans les scénarios précédents seraient reportés sur le cyclomoteur thermique 50 cm³ (normativement placé dans la même catégorie que le s-pedelec). En se basant sur une valeur des émissions directes du cyclomoteur 50 cm³ de 67 gCO₂/v.km (ADEME, 2014), et en supposant une amélioration de l'efficacité énergétique de sa motorisation de 10 % d'ici 2026, et un taux de remplissage du cyclomoteur égal à celui de la VP dans le scénario Référence (1,34 p.km/v.km), on obtient les calculs et résultats du Tableau 20. On y suppose que la mobilité reportée vers le cyclomoteur (première ligne du tableau) est la mobilité à pied ou à vélo du scénario vélo, ôtée de la mobilité à pied ou à vélo du scénario Référence (c'est donc l'augmentation de mobilité active due à la mise en place du système vélo qui est affectée au cyclomoteur).

Tableau 20 : Calcul des émissions évitées pour les scénarios Cyclomoteur. On part de la mobilité reportée vers le cyclomoteur, calculée à partir la mobilité reportée vers le vélo + marche. En multipliant cette mobilité par les émissions unitaires par p.km du cyclomoteur, on obtient les émissions de CO₂ générées par le parc de cyclomoteurs. Ces émissions sont ajoutées à celles du scénario vélo correspondant (Dév et Gi respectivement) pour obtenir les émissions de CO₂ totales du scénario Cyclomoteur. On compare enfin ces émissions aux émissions du scénario Référence.

	Dév Cyclomoteur	Gi Cyclomoteur	Unité
Mobilité reportée vers Cyclomoteur	26	61	Gp.km/an
Emission unitaire cyclomoteur / v.km	0,060	0,060	kgCO ₂ /v.km
Emission unitaire cyclomoteur / p.km	0,045	0,045	kgCO ₂ /p.km
Emissions CO ₂ ajoutées par rapport au scénario vélo	1,2	2,7	MtCO ₂ /an
Emissions CO ₂ totales	14,7	13,3	MtCO ₂ /an
Emissions évitées par rapport au scénario Référence	1,2	2,5	MtCO ₂ /an
Emissions évitées par rapport au scénario Référence	7%	16%	%

Le scénario Dév Cyclomoteur permet ainsi d'éviter 7 % des émissions de CO₂ de la mobilité locale des ZMD (à comparer aux 15 % des émissions évitées dans le scénario Dév vélo), et 16 % des émissions dans le scénario Gi Cyclomoteur (à comparer aux 33 % évitées dans le scénario Gi vélo) (Figure 27).

Ces résultats montrent qu'environ la moitié des réductions des émissions provient de la **légèreté** et de la **faible vitesse de pointe** du véhicule (soit le cyclomoteur, soit le vélo, VAE, etc). L'élimination du moteur thermique explique l'autre moitié de la réduction.

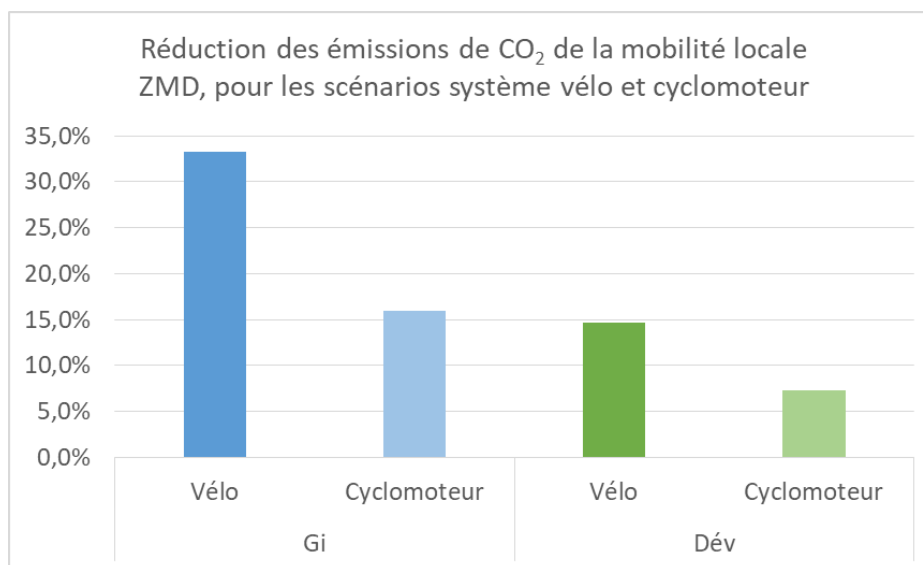


Figure 27 : Réduction des émissions de CO₂ de la mobilité locale des ZMD, pour les scénarios Vélo et Cyclomoteur, par rapport au scénario Référence en 2026.

5.5. Vélo + Train

La possibilité de combiner deux modes particulièrement efficaces sur le plan énergétique, le vélo et le train, a été traitée dans plusieurs études récentes (ADEME, 2016; CGDD, 2016; Projet PREDIT PORT-VERT, 2011).

Dans cette section, nous estimons la réduction des émissions qui serait obtenue par un développement de l'intermodalité vélo + train. Plus particulièrement, nous analysons deux sources de réduction des émissions.

5.5.1. Source 1 de réduction des émissions de CO₂

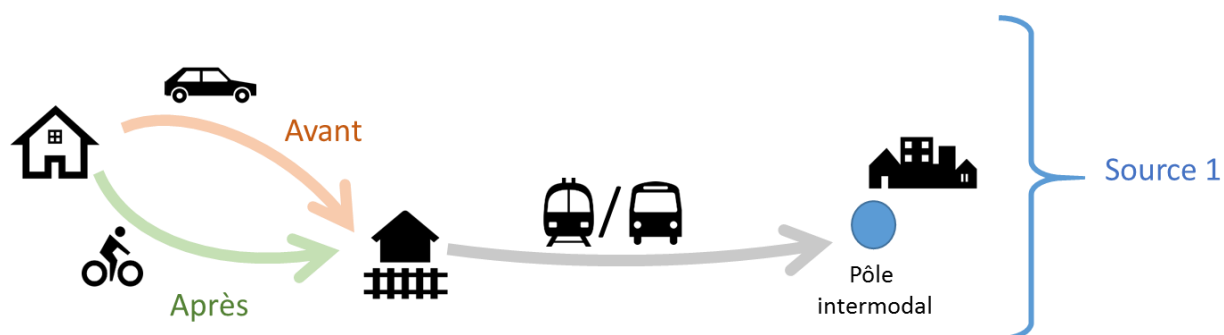


Figure 28 : Schématisation du report modal de la VP vers le vélo sur le segment entre le domicile et la gare, qui est la source 1 de réduction des émissions de CO₂.

Le report modal de la VP vers le vélo, sur des trajets parcourus en VP pour aller de l'origine à la gare puis en train pour atteindre le pôle intermodal ou la destination, permet de réduire les v.km et donc les émissions CO₂. Les trajets suivants sont concernés :

- Trajets faits en plusieurs segments dont l'un est fait en VP en tant que conducteur et un autre est fait en TER / SNCF banlieue ou RER.
- Trajets accompagnés pour aller à la gare, ou pour en revenir.

Sur ces trajets, la réduction des émissions est obtenue en remplaçant le(s) segment(s) faits en VP par le vélo. Cette source 1 de réduction des émissions (Figure 28) peut être quantifiée à partir des chiffres de l'ENTD 2008 (Tableau 21) :

D'abord nous calculons le nombre de v.km en voiture pour aller à la gare (tous motifs) partant d'une hypothèse très haute, à savoir, que 25 % des distances parcourues sur des trajets intermodaux incluant un segment « train urbain » le sont en VP, les 75 % restants étant parcourus en TC. Ainsi, sur les 14,6 Mv.km/sem de trajets intermodaux VP + train (colonne 2 du Tableau 21, qui liste les distances parcourues pour ce type de trajets dans les ZMD en 2008 selon la classe de distance), 3,6 Mv.km/sem sont supposés être faits en VP (colonne 3 du Tableau 21), le reste en TC.

Puis nous supposons que la *totalité* des trajets d'accompagnement pour aller à une gare à moins de 7 km de distance sont faits à vélo (le reste des trajets restant inchangé), une deuxième hypothèse plutôt haute. Les trajets d'accompagnement pour aller à une gare génèrent environ 10 Mv.km/sem (colonne 4 du Tableau 21), et, parmi ces derniers, ceux de moins de 7 km correspondent à 1,3 Mv.km/sem (colonne 5 du Tableau 21).

Ces deux sources sont multipliées par deux pour obtenir les distances aller-retour et par 52 pour passer de valeurs hebdomadaires à une valeur totale annuelle. Le report modal de la VP vers le vélo est ainsi estimé à **520 Mv.km/an**.

5.5.2. Source 2 de réduction des émissions de CO₂

L'amélioration du système vélo peut aussi rendre la *totalité* de la chaîne origine – destination attractive. Autrement dit, un trajet fait totalement en VP peut être remplacé par un trajet intermodal vélo + TER / RER / SNCF banlieue. L'attractivité de cette alternative dépendra schématiquement de la somme des améliorations (par rapport à la situation actuelle)

- du système vélo entre le domicile et la gare
- du système vélo à la gare (stationnement, sécurité)
- du système ferroviaire entre la gare de départ et la gare d'arrivée
- des autres modes (TC, VLS etc.), entre la gare d'arrivée et la destination

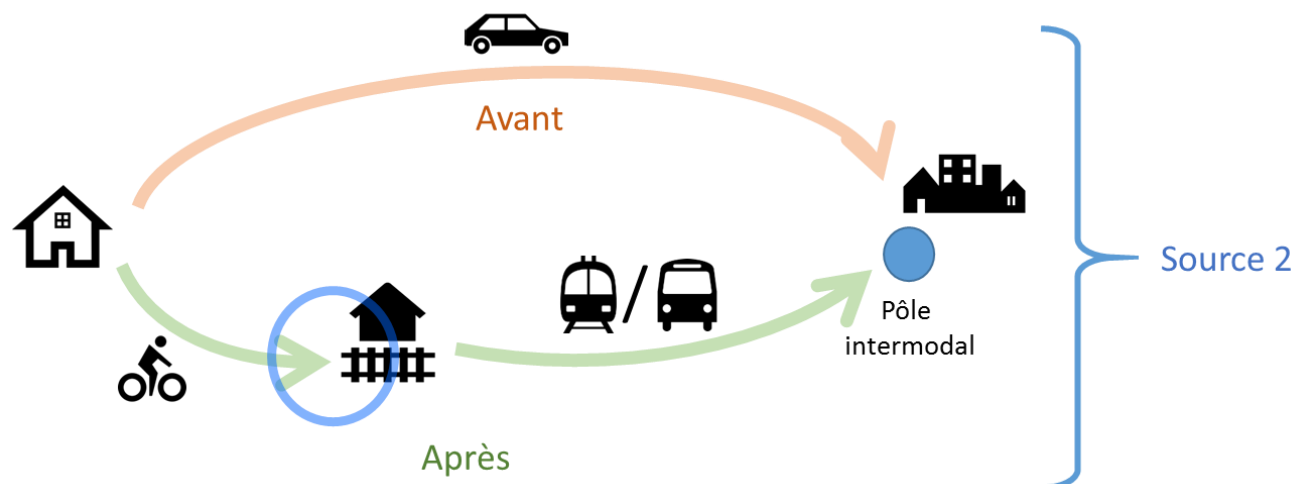


Figure 29 : Schématisation du report modal de la VP seule vers l'intermodalité vélo + train, constituant la source 2 de réduction des émissions CO₂.

La source 2 concerne le *deuxième maillon* de cette chaîne : les améliorations du stationnement à la gare (Figure 29).

Corollaire : Dans ce calcul, nous ne tenons pas compte des changements dans les autres maillons. Nous supposons ainsi que le développement du système vélo ne rend pas l'usage de la VP plus difficile, et donc que les trajets VP ne sont pas différents en présence du système vélo. Par conséquent, le trajet en VP ne perd pas en compétitivité, et le trajet en train ne gagne pas en compétitivité à cause des améliorations du système vélo, *sauf en ce qui concerne le stationnement en gare*. Les trajets faits en VP et non pas en train pour des raisons *autres que des difficultés de stationnement à la gare de départ* sont donc supposés toujours faits en VP. L'impact des améliorations des autres maillons de la chaîne est traité dans le Chapitre 6 – Transports Publics Express, p. 81.

L'enquête (ADEME, 2016), donne un ordre de grandeur du report modal induit par la création de consignes à vélo : « 12 % des abonnés à la consigne utilisaient précédemment la voiture sur l'ensemble du trajet et sont passés à la solution vélo + TER. » (ADEME 2016, p20). L'assiette du pourcentage est le nombre d'utilisateurs de la consigne. L'ADEME parle de 30 000 places de stationnement de vélos dont 30% en consigne, soit 9000 places de consignes (ADEME 2016, p 5). Le trajet moyen de ces personnes fait 39,5 km, aller simple (p 16). Ces chiffres correspondent au territoire national (pas aux ZMD).

Partant de ces résultats d'enquête, nous ajoutons quelques hypothèses ambitieuses pour estimer le potentiel à l'horizon 2026 dans les ZMD (Tableau 22) :

- nous supposons que le nombre de places de stationnement de vélos est multiplié **par 10** (à pourcentage de places de consigne constant). Autrement dit, le nombre de places de stationnement dans les gares française passe de 30 000 à 300 000 (et celui des places de consigne de 9000 à 90 000) (lignes 1 à 3 du Tableau 22);
- le nombre de personnes passant de la VP seule à l'intermodalité vélo + train est de 12 % du nombre de consignes, soit 10 800 personnes (ligne 4 du Tableau 22) ;

- nous supposons que ces personnes génèrent en moyenne deux trajets de 39,5 km par jour ouvré, soit environ 4,3 Mv.km/sem (lignes 5 et 6 du Tableau 22)
- nous supposons que ce nombre est proportionnel à la population concernée, soit, pour les ZMD, 43 % du total national, donc 1,8 Mv.km/sem, soit encore **96 Mv.km/an** (lignes 7 et 8 du Tableau 22).

5.5.3. Résultats

La combinaison des sources 1 et 2 représente, pour des hypothèses de report modal fortes :

- environ 0,5 % du trafic local dans les ZMD en 2026 (lignes 1 et 2 du Tableau 23)
- environ 1,7 % du trafic DT local dans les ZMD (ligne 3 du Tableau 23)
- Le gisement CO₂ correspondant est donc d'environ 0,5 % des émissions totales des ZMD induites par la mobilité locale (ligne 4 du Tableau 23). On peut estimer ce gisement à environ 81 ktCO₂/an en 2026 (ligne 5 du Tableau 23).

Faut-il conclure que la combinaison vélo + train n'aura presque pas d'impact sur les émissions, même si on multiplie par 10 le nombre de places de stationnement vélo dans les gares ? **Non**. Il faut plutôt conclure que les améliorations de l'accessibilité à la gare n'auront pas d'impact réel en absence d'actions fortes pour améliorer les maillons longs (entre la gare de départ et la destination), pour améliorer le système vélo dans son ensemble, et pour réduire l'attractivité de la voiture.

Le potentiel des transports publics rapides (meilleur service ferroviaire, lignes de bus express) fait justement l'objet du volet « Transports Publics Express ».

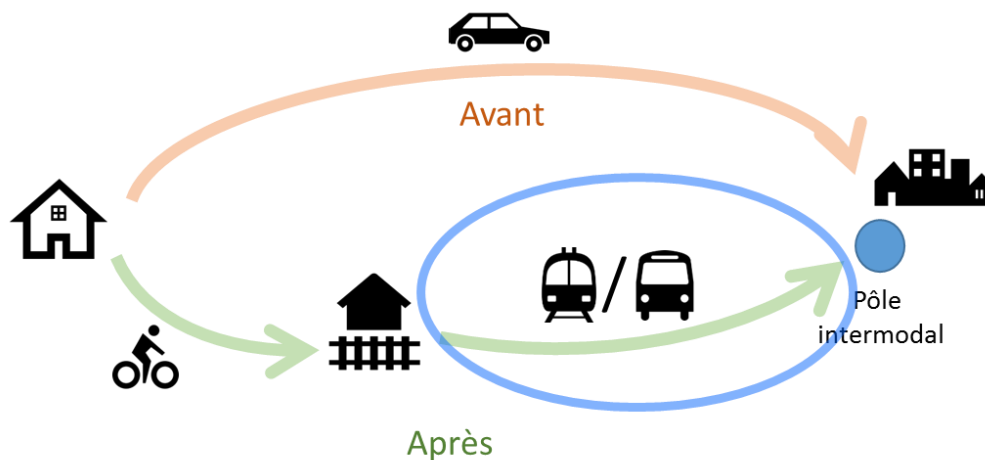


Figure 30 : Le potentiel de réduction des émissions CO₂ dû à une amélioration du segment Transport Public Express (ferroviaire, ou bus express) est estimé dans le volet « Transports Publics Express »

Tableau 21 : Estimation de la source 1 de réduction des émissions de CO₂, en termes de trafic VP évité. La première composante de cette source provient du report modal lors de trajets intermodaux VP + train vers le vélo + train. La seconde composante provient du report modal de trajets d'accompagnement en VP vers le vélo (accompagné ou non).

ZMD, 2008				
Classe de distance	Distances en intermodalité VP + Train, au départ du domicile (v.km/sem)	Part des distances faite en VP sur les trajets intermodaux VP+Train (25 %) (v.km/sem)	Distances d'accompagnement à la gare, au départ du domicile (v.km/sem)	Distances d'accompagnement faisables à vélo (< 7 km) (v.km/sem)
<7 km	103 214	25 804	1 336 968	1 336 968
07-20 km	4 783 404	1 195 851	41 634	0
20-30 km	5 324 825	1 331 206	2 512 660	0
30-50 km	2 878 964	719 741	4 295 222	0
50-80 km	1 495 520	373 880	1 621 898	0
Total	14 585 927	3 646 482	9 808 382	1 336 968
	Source 1, trafic ZMD	9 966 900	v.km/sem (aller-retour)	
		520	Mv.km/an (aller-retour)	

Tableau 22 : Estimation de la source 2 de réduction des émissions de CO₂, en termes de trafic VP évité.

	Valeur	Unité	Hypothèse
Nombre de stationnements en gare en France 2008	30 000	-	ADEME 2016
Nombre de stationnements en gare en France 2026	300 000	-	Développement du système vélo qui multiplie par 10 le nombre de places de stationnement
Nombre de consignes en gare en France (30 %)	90 000	-	ADEME 2016
Nombre de convertis par les consignes en France (12 %)	10 800	-	ADEME 2016
Distance moyenne des trajets remplacés	39.5	km	ADEME 2016
Mobilité VP remplacée en France	4 266 000	v.km/sem	1 aller-retour 5 fois par semaine pour les utilisateurs de consigne
Mobilité VP remplacée dans les ZMD	1 834 380	v.km/sem	43 % de la population française vit dans les ZMD
Source 2, trafic ZMD	96	Mv.km/an	

Tableau 23 : Estimation du trafic VP évité et des émissions CO₂ associées dans les ZMD, grâce aux sources 1 et 2 de réduction des émissions de CO₂.

	Valeur	Unité	Hypothèse
Source 1 + Source 2, trafic par rapport au trafic local ZMD	615	Mv.km/an	
	0,53	%	Trafic induit par la mobilité locale dans les ZMD de 116 Gv.km/an
Source 1 + Source 2, trafic par rapport au trafic DT local ZMD	1,71	%	Trafic induit par la mobilité locale DT dans les ZMD de 36 Gv.km/an
Source 1 + Source 2, émissions CO₂ par rapport aux émissions de la mobilité locale ZMD	0,51	%	Emissions dues au trafic local VP dans les ZMD est de 96% des émissions ZMD
	81	ktCO ₂ /an	Emissions annuelles ZMD en 2026 de 16 MtCO ₂ /an

5.6. Bilan économique

Nous avons identifié les postes de dépenses qui diffèrent entre le scénario Référence et les scénarios Vélo, dans lesquels le système vélo a été mis en place dans les ZMD :

- Chaque adulte du ménage dispose d'un vélo adapté à ses besoins de mobilité quotidienne : un vélo classique si la plupart de ses déplacements sont dans un rayon de 7 km du domicile, un VAE dans les zones à relief ou si les déplacements vont au-delà de 7 km et jusqu'à 12 km ; un s-pedelec si les trajets quotidiens sont plus longs ; pour les personnes à mobilité réduite, un véhicule adapté type tricycle. Ainsi, en moyenne, nous supposons que tous les adultes ont un vélo à 1 250 € HT.
- Chaque ménage dispose d'un vélo cargo, ou d'une carriole, pour aller faire les courses. Ce véhicule est supposé coûter 1670 € HT.
- Les enfants des ménages sont supposés disposer d'un vélo classique à 200 €, et le ménage moyen est supposé disposer de 3 cadenas sécurisés à 75 €, soit un total de 354 € HT d'équipement par ménage.
- La durée de vie des véhicules et équipement est supposée dépendre de l'usage du vélo. Chaque véhicule est ainsi supposé avoir une durée de vie kilométrique de 15 000 km (Del Duce, 2011), et être plus ou moins utilisé selon le scénario. Ainsi, dans le scénario Gi, chaque vélo est utilisé 1 600 km/an selon les résultats IMMOVE et le nombre de vélos supposés dans ce modèle, et dans le scénario Dév, chaque vélo est utilisé 760 km/an.
- Chaque adulte dispose d'équipements vestimentaires adaptés à sa pratique du vélo dans sa région. Nous avons supposé que l'ensemble des sur-vêtements de pluie coûte 83 € HT et dure 3 ans en moyenne.
- Des autoroutes à vélos sont mises en place le long de chaque autoroute, route nationale, et route départementale, ces dernières étant supposées trop fréquentées pour qu'une « route-vélo » soit sûre. Le coût de construction d'une autoroute vélo est de 330 000 €/km HT (RAC-F, FNH, 2014), et elle est supposée avoir une durée de vie de 30 ans.
- Des « routes-vélo » sont mises en place sur chaque route communale (il s'agit concrètement de deux bandes cyclables de chaque côté de la route). Le coût de mise en place est de 5 800 €/km HT (CVTC, 2004), et les bandes sont supposées durer 15 ans.
- Le réseau routier métropolitain est caractérisé ainsi :
 - Le réseau routier communal est constitué de 680 000 km de route (ADEME, 2015), dont 11 % dans les ZMD (ces dernières couvrant 11 % du territoire)
 - Le réseau routier départemental est constitué de 383 000 km de route (ADEME, 2015), dont 11 % dans les ZMD
 - Le réseau routier national est constitué de 11 800 km de route (MEEM, 2014), dont 11 % dans les ZMD
 - Le réseau autoroutier est constitué de 7 850 km d'autoroutes (MEEM, 2014), dont 11 % dans les ZMD
- Une signalisation routière dédiée aux vélos est mise en place sur toutes les routes. Le coût d'un tel dispositif est de 2 500 €/km HT (CVTC, 2004) et est supposé durer 15 ans.
- Des zones 30 km/h sont mises en place dans toutes les agglomérations. Cette mesure est supposée avoir un coût négligeable car ne nécessitant que quelques panneaux aux entrées de l'agglomération.
- Des places de stationnement voiture sont remplacées par des places de stationnement vélo. Nous avons supposé que les coûts en jeu étaient les mêmes annuellement que le stationnement soit réservé aux VP ou aux vélos (donc même coût dans les scénarios vélo que dans le scénario Référence).

- Des ouvrages d'art importants, type ponts anti-coupure, sont mis en place si nécessaire. Nous avons supposé qu'un ouvrage d'art pour 5 communes en moyenne serait mis en place, soit 573 ouvrages d'art de ce type dans les ZMD. Nous avons supposé un coût de 830 000 € HT par ouvrage d'art, chacun durant 30 ans.
- Un réseau de vélo-école et de points d'informations concernant le vélo dans les communes est mis en place dans les scénarios vélo. Nous avons supposé qu'un employé par commune assurerait ces besoins, l'apprentissage du vélo étant bien plus rapide que celui de la voiture. Les employés sont rémunérés au double du SMIC dans les scénarios vélo.
- Des applications smartphone et sites internet dédiés à l'information sur le vélo sont mis en place nationalement. Leur coût de développement et de maintenance sont supposés négligeables devant les autres postes de dépense.
- L'augmentation de la durée de vie de la VP des ménages et la moindre consommation de carburant par les ménages, sont comptabilisés comme pour les scénarios Covoiturage (voir section 7.7), avec les valeurs de réduction du trafic 2026 suivantes, obtenues par la simulation :
 - 33 % de trafic local (soit 24 % du trafic global) évité pour le scénario Gisement
 - 14 % de trafic local (soit 10 % du trafic global) évité pour le scénario Développement
- La réduction de l'entretien de la voirie induite par le moindre trafic VP est considérée comme négligeable dans cette étude (Baaj, 2012).

Les calculs sont détaillés dans les Tableau 24 et Tableau 25.

Le système vélo, en scénario Développement, induit des augmentations de dépenses qui sont globalement compensées par les réductions des dépenses. En scénario Gisement, le système vélo génère un bénéfice de 2,9 milliards €/an par rapport au scénario Référence.

Les postes de dépense principaux sont dûs à l'équipement des ménages en vélos de différents types et équipements associés (cadenas, vêtements). Le prix de ces différents éléments est une variable importante dans la constitution des dépenses globales dûes au vélo. On peut imaginer que le développement massif de l'usage du vélo, dans les deux scénarios, mène à des réductions de coûts de production importants, augmentant ainsi la rentabilité du système vélo. Ainsi, on peut mesurer par une analyse de sensibilité qu'une baisse globale de 1 % du prix des équipements et véhicules diminue les dépenses globales de 1 % dans le scénario Gisement et de 3,6 % dans le scénario Développement (soit une sensibilité de 1,0 et 3,6 respectivement). Autrement dit, une baisse de 10 % des dépenses en équipement des ménages par rapport aux hypothèses présentées mènerait à une économie de 520 M€ pour le scénario Dév (au lieu de 380 M€) et de 3,3 G€ pour le scénario Gi (au lieu de 3,0 G€).

Les dépenses liées aux infrastructures et ressources humaines du système vélo sont négligeables (d'un facteur 10) devant celles liées aux équipements des ménages.

L'estimation des dépenses globales du système vélo est très sensible :

- Au poste des « véhicules vélo » et des équipements nécessaires à l'usage quotidien du vélo. Plus ces dépenses sont faibles, plus le système vélo est rentable.
- Au prix du carburant et à la consommation unitaire moyenne du parc de VP. Plus ces dépenses sont élevées, plus le système vélo est rentable pour la société.
- Au prix des VP neuves. Plus les dépenses sont élevées, plus le système vélo est rentable pour la société.

Tableau 24 : Les différents postes de dépenses du scénario Vélo Gisement. La colonne « Coût total S' (M€) » est calculée en multipliant la colonne « Coût unitaire (€) » par la colonne « Nombre d'unités dans S' ». Pour les types de modification « Modif » (deuxième colonne), le coût à l'année de Sref est calculé tel que décrit dans la section 7.7.2. Pour les types de modification « Création », le coût à l'année de Sref est nul, ce poste de dépense n'existant pas dans le scénario de Référence.

Elément différent entre S' et Sref	Type de modification	Coût unitaire HT (€)	Unité	Nombre d'unités dans S'	Unité	Coût total S' (M€)	Durée de vie (an)	Coût à l'année S' (M€)	Coût à l'année Sref (M€)
VAE, s-pedelegs, tricycles	Création	1 250	€/véhicule	18 736 056	véhicule	23 420	9	2 496	-
Cargo bikes, e cargo bike, trailers	Création	1 667	€/véhicule	11 643 521	véhicule	19 406	9	2 068	-
Cadenas + vélos classiques	Création	354	€/équipement	11 643 521	équipement	4 124	9	440	-
Equipements vestimentaires	Création	83	€/adulte	18 736 056	adulte	1 561	3	520	-
Autoroutes vélo	Création	333 333	€/km	45 149	km	15 050	30	502	-
Routes vélo (=2 bandes cyclables)	Création	5 833,33	€/km	75 412	km	440	15	29	-
Signalisation vélo	Création	2 500	€/km	120 561	km	301	15	20	-
Zones 30 dans les agglomérations	Création	-	€/agglo	2 864	agglo	-	15	-	-
Transformation stationnement VP en stationnement vélo	Modif	300,00	€/place	150 824	place	45	15	3	3
Ouvrages d'art, ponts anti-coupure	Création	833 333	€/ouvrage	573	ouvrage	477	30	16	-
Ressources humaines Vélo-école + maison d'info	Création	59 592	€/pers/an	2 864	pers	171	1	171	-
Applis, sites web d'infos	Création	-	€/appli	-	appli	-	1	-	-
Augmentation durée de vie VP	Modif	20 833	€/v	17 465 281	VP	363 860	15,1	24 090	31 535
Moins de carburant pour les ménages	Modif	0,94	€/L	5 720 076 996	L	3 600	1	3 600	5 363
						Total annuel (M€)		35 377	38 321
						Surcoût total annuel (M€)		- 2 944	

Tableau 25 : Les différents postes de dépenses du scénario Vélo Développement. La colonne « Coût total S' (M€) » est calculée en multipliant la colonne « Coût unitaire (€) » par la colonne « Nombre d'unités dans S' ». Le coût total S' est ensuite divisé par la durée de vie pour obtenir le coût à l'année de S'. Pour les types de modification « Modif » (deuxième colonne), le coût à l'année de Sref est calculé tel que décrit dans la section 7.7.2. Pour les types de modification « Création », le coût à l'année de Sref est nul, ce poste de dépense n'existant pas dans le scénario de Référence.

Élément différent entre S' et Sref	Type de modification	Coût unitaire HT (€)	Unité	Nombre d'unités dans S'	Unité	Coût total S' (M€)	Durée de vie (an)	Coût à l'année S' (M€)	Coût à l'année Sref (M€)
VAE, s-pedelegs, tricycles	Création	1 250	€/véhicule	18 736 056	véhicule	23 420	20	1 187	-
Cargo bikes, e cargo bike, trailers	Création	1 667	€/véhicule	11 643 521	véhicule	19 406	20	984	-
Cadenas + vélos classiques	Création	354	€/équipement	11 643 521	équipement	4 124	20	209	-
Equipements vestimentaires	Création	83	€/adulte	18 736 056	adulte	1 561	3	520	-
Autoroutes vélo	Création	333 333	€/km	45 149	km	15 050	30	502	-
Routes vélo (=2 bandes cyclables)	Création	5 833,33	€/km	75 412	km	440	15	29	-
Signalisation vélo	Création	2 500	€/km	120 561	km	301	15	20	-
Zones 30 dans les agglomérations	Création	-	€/agflo	2 864	agflo	-	15	-	-
Transformation stationnement VP en stationnement vélo	Modif	300,00	€/place	150 824	place	45	15	3	3
Ouvrages d'art, ponts anti-coupure	Création	833 333	€/ouvrage	573	ouvrage	477	30	16	-
Ressources humaines Vélo-école + maison d'info	Création	59 592	€/pers/an	2 864	pers	171	1	171	-
Applis, sites web d'infos	Création	-	€/appli	-	appli	-	1	-	-
Augmentation durée de vie VP	Modif	20 833	€/v	17 465 281	VP	363 860	12,8	28 358	31 535
Moins de carburant pour les ménages	Modif	0,94	€/L	5 720 076 996	L	4 610	1	4 610	5 363
						Total annuel (M€)		38 030	38 321
						Surcoût total annuel (M€)		- 291	

Chapitre 6 - Transports Publics Express (TPE)

Les transports publics express sont des transports en commun rapides et avec peu d'arrêts le long de leur trajet. Entrent dans cette catégorie les trains périurbains (RER, SNCF) et les TER, ainsi que certaines offres basées sur le mode bus¹⁰, que nous appelons ici « Bus Express ». Ces bus empruntent les voies rapides existantes afin de déposer les passagers à un pôle intermodal permettant de continuer le trajet dans l'urbain dense.

Cette section étudie la réduction des émissions de CO₂ induite par le report modal de la voiture particulière vers ces modes. Ni les effets d'induction de mobilité, ni les reports modaux depuis les modes autres que la VP ne sont considérés, alors qu'ils mènent à une augmentation de la charge des véhicules (bus ou train), ou à une augmentation du nombre de véhicules (c'est-à-dire, in fine, à une augmentation des émissions et des dépenses globales), comparativement à la situation où seul le report modal depuis la VP est pris en compte. Le report modal depuis d'autres modes peut, dans certaines situations (notamment la présence d'un réseau ferré), ne pas être négligeable (par exemple, 52 % des usagers des bus Trans'Isère viennent du TER (La Fabrique de la Cité, 2015)).

6.1. Etapes de calcul

La méthode utilisée est un bilan CO₂ sur le report modal de la VP vers les TPE (voir Figure 32). Dans un premier temps, la mobilité VP évitée de par le report modal est estimée, permettant d'estimer le trafic VP évité, et *in fine* les émissions de CO₂ évitées par ce report.

La méthode utilisée pour calculer le trafic VP évité de par le report modal de la VP vers les TPE est décrite Figure 31. Elle consiste, à partir de l'ENTD 2008, du recensement (INSEE, 2013) et de données géographiques (exploitées via QGIS, un Système d'Informations Géographiques), à cibler la mobilité locale concernée par les TPE, selon les critères suivants : les trajets parcourus en jours ouvré, dont le départ se fait en heure de pointe (afin que le TPE ait un avantage temporel en évitant les congestions), agrégeant de forts flux, dont la distance est suffisamment grande (toujours dans l'optique d'avantage temporel du TPE sur la VP), effectué en VP ou deux-roues motorisés, et dont l'origine est située proche d'une gare (pour le train) ou d'une autoroute (pour le bus express).

Ces modes sont attractifs vis-à-vis de la VP pour des distances suffisamment grandes. En effet, afin d'observer un gain de temps sur le trajet par rapport à la VP, il faut que le temps passé en intermodalité soit compensé par le différentiel de vitesse entre le TPE qui ne subit pas la congestion et la VP, qui, elle, la subit. Le domaine de pertinence (en distance de trajet) de chaque mode est estimé selon le critère temps.

La mobilité allouable à chaque mode est alors modulée par le domaine de pertinence dudit mode. On en déduit, via l'ENTD 2008 la quantité de v.km qui est reportée de la VP vers le bus express, ou vers le train, puis la quantité de CO₂ évitée par ce report modal en se basant sur l'année 2026 du modèle IMMOVE.

¹⁰ Ce mode est en fait techniquement un car plutôt qu'un bus, n'autorisant pas la station debout, et rendant le port de la ceinture de sécurité obligatoire (de par la directive du Parlement Européen 2003/20/CE)

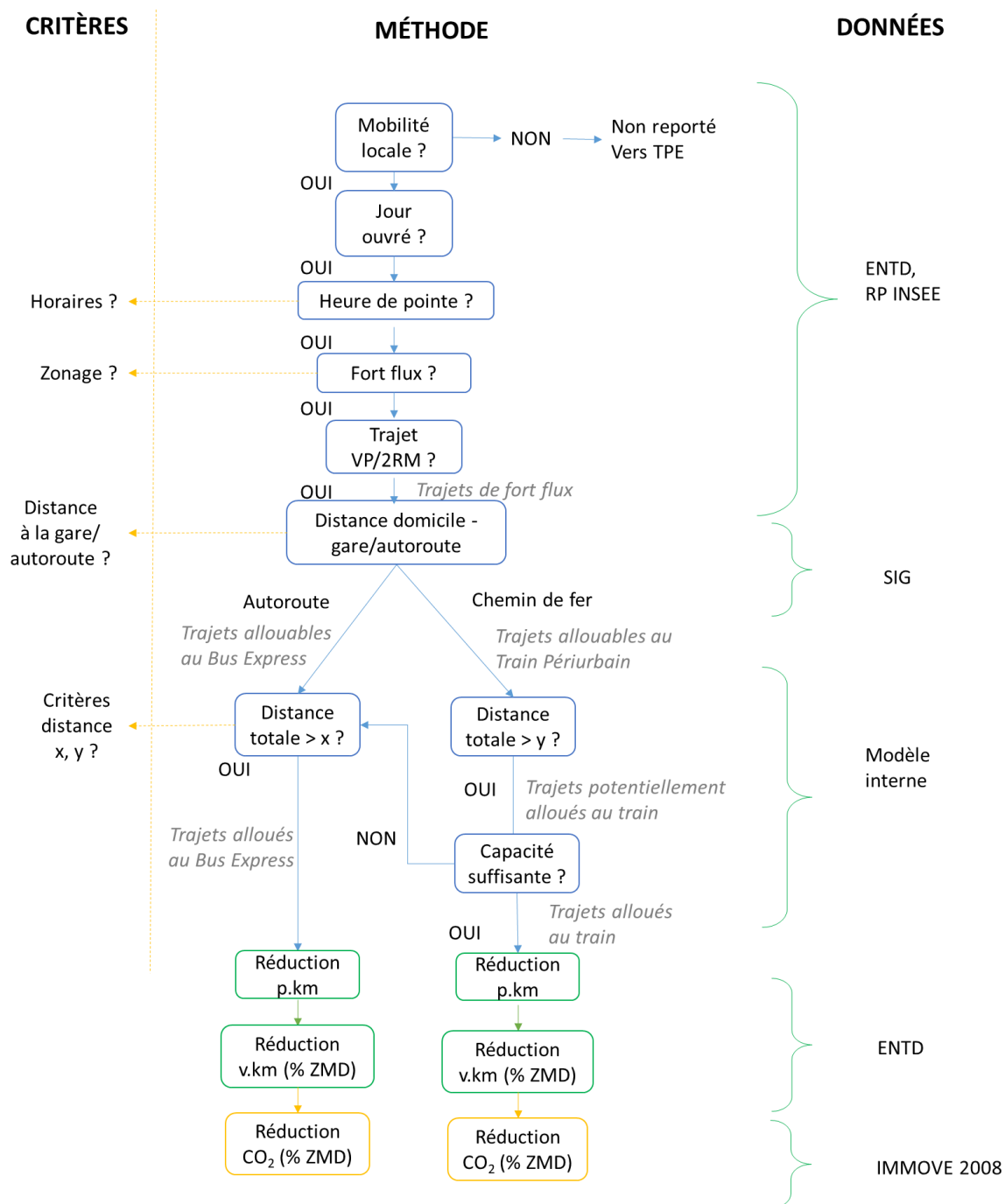


Figure 31 : Méthode de calcul de la réduction des émissions CO₂ dans le scénario Gisement TPE, critères utilisés, et données utilisées. La nomenclature des trajets restants entre chaque étape est faite en gris.

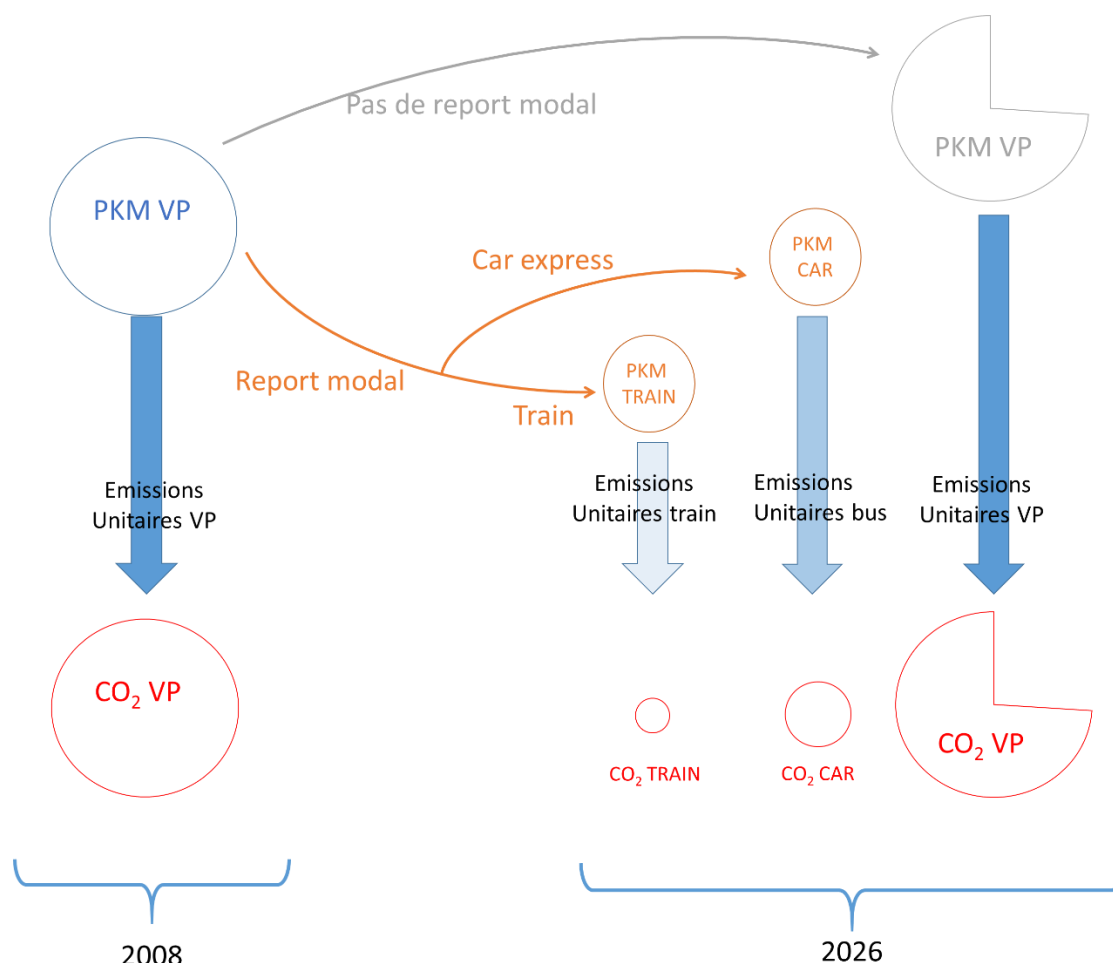


Figure 32 : Méthodologie de calcul de réduction des émissions de CO₂ dans le scénario Gisement TPE.

6.2. Hypothèses du scénario « TPE Base »

Cette section décrit les différentes hypothèses formant le scénario « TPE Base ». Ce scénario sert ensuite de référence pour décrire des sous-scénarios, dérivés de ce premier.

On se base sur la mobilité locale en jour ouvré, soit 74 % de la mobilité locale métropolitaine. En se basant sur différents retours d'expériences français et madrilènes sur les lignes de bus express, on considère que les flux captés par le bus express sont majoritairement (80 %) des flux domicile-travail et minoritairement (20 %) des flux domicile-étude. Ces flux sont de l'ordre de 2 000 trajets aller par jour, ou supérieurs. Aucun motif n'est exclu de la mobilité qui peut être effectuée en TPE, mais le calibrage de certaines hypothèses est effectué en utilisant des données sur les flux domiciles-travail estimés en 2013 (INSEE, 2013). Les autres hypothèses sont calibrées en se basant sur l'ENTD 2008.

6.2.1. Heure de pointe

Afin de définir les heures de pointe en jour ouvré, nous nous sommes basés sur une exploitation (ENTD 2008) des horaires de départ des trajets radiaux (tels que définis dans le paragraphe suivant) de plus de 7 km, les TPE étant supposés couvrir une mobilité radiale suffisamment longue pour être attractifs (voir section 6.2.3). On observe (Figure 33) deux pics de distances parcourues, essentiellement dus au motif domicile-travail, entre 6 h et 9 h le matin, et entre 16 h et 20 h le soir.

Nous avons retenus ces horaires comme étant les plus propices à l'attractivité des TPE, étant donnée la plus grande probabilité de congestion à ces heures-ci.

Ainsi, parmi la mobilité locale en jour ouvré (74 % de la mobilité locale), un peu plus de la moitié (56 %) est effectuée en heure de pointe (soit 42 % de la mobilité locale).

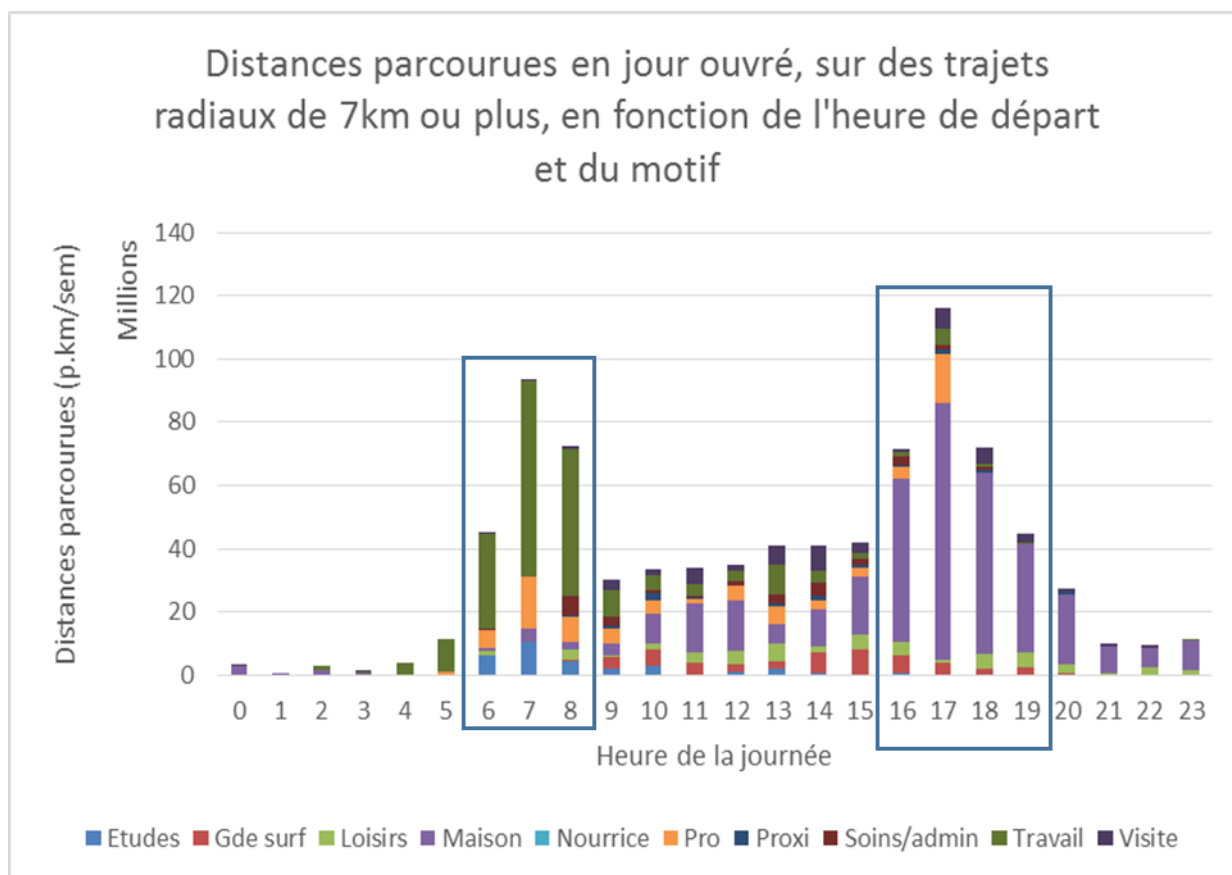


Figure 33 : Distances parcourues en jour ouvré, sur des trajets radiaux de plus de 7 km, en fonction de l'heure de départ du trajet et de son motif.

6.2.2. Captation des forts flux

Les flux les plus importants, tels que mesurés par le Recensement de la Population (INSEE, 2013), sont radiaux. En couplant les données de flux domicile-travail avec le zonage utilisé dans cette étude (voir exemples Figure 35, Figure 36 et Figure 37), il apparaît que les flux les plus concentrés (concernant plus de 2 000 trajets/jr) de portée supérieure à 7 km sont radiaux, et se font entre une commune des ZMD et la ville-centre de l'Aire Urbaine. Nous avons donc défini la radialité des trajets comme le fait qu'un trajet ait une extrémité dans une commune de ZMD et l'autre extrémité dans la ville-centre de la même Aire Urbaine. Le sens du trajet n'a pas été pris en compte, étant donné que l'exploitation des transports en commun nécessite que les véhicules fassent des allers-retours le long de leur axe de déplacement. Les flux dans les deux sens peuvent donc être captés par les TPE (Figure 34).

		Destination		
		Rural	ZMD	Centre
Origine	Rural			
	ZMD			X
	Centre		X	

Figure 34 : Définition de la radialité dans cette section : un trajet est dit radial si son couple Origine-Destination est coché dans cette matrice.

Selon ce critère, 16 % des distances locales en jour ouvré et heure de pointe sont radiales, soit 6,8 % de la mobilité locale. Notons que les distances parcourues sur d'autres parcours (les 84 % restants), sauf cas particuliers, sont réparties en des flux beaucoup plus diffus, non adaptés aux TPE.

Une analyse des flux journaliers inter-communes de plus de 100 salariés (INSEE, 2013) montre que les flux radiaux (environ 56 Mp.km/jr) sont composés à plus de 40 % de flux supérieurs à 1 000 salariés, alors que les flux non radiaux internes aux ZMD (environ 30 Mp.km) sont composés à 11 % de flux supérieurs à 1 000 salariés, confirmant la pertinence du critère de radialité vis-à-vis des TPE.

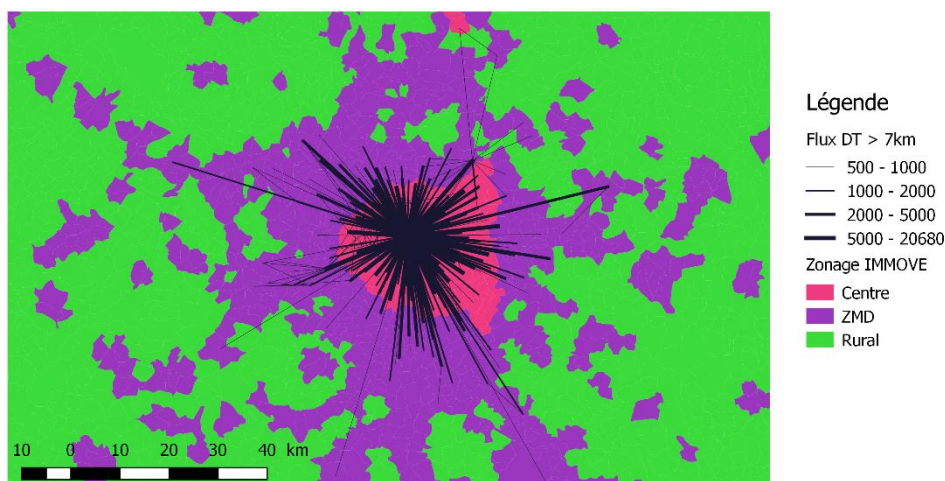


Figure 35 : Flux domicile-travail, tels que mesurés par (INSEE, 2013), c'est-à-dire par le nombre de salariés logeant dans la commune d'origine du flux et travaillant dans la commune de destination du flux, en Ile-de-France.

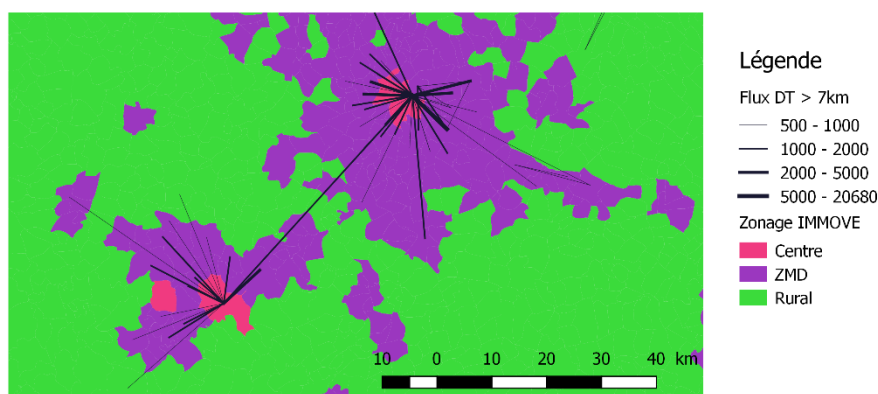


Figure 36 : Flux domicile-travail, tels que mesurés par (INSEE, 2013), c'est-à-dire par le nombre de salariés logeant dans la commune d'origine du flux et travaillant dans la commune de destination du flux, autour de Lyon et Saint-Etienne.

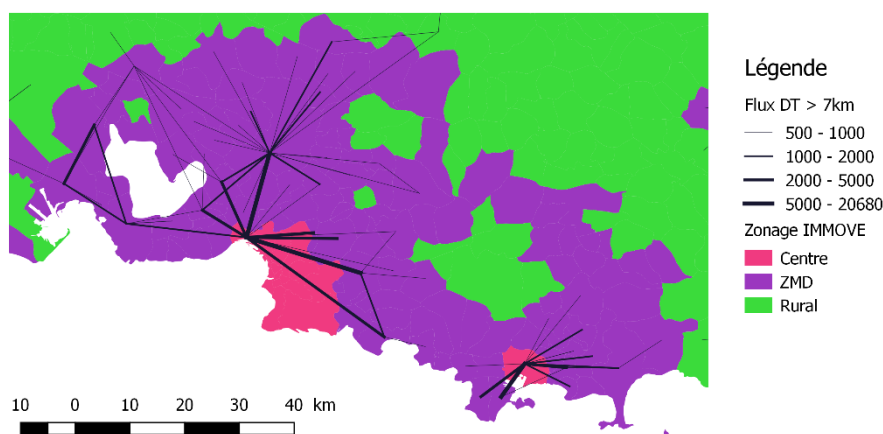


Figure 37 : Flux domicile-travail, tels que mesurés par (INSEE, 2013), c'est-à-dire par le nombre de salariés logeant dans la commune d'origine du flux et travaillant dans la commune de destination du flux, autour de Marseille, Aix-en-Provence et Toulon.

Cependant, ne tenir compte que des trajets radiaux mène à négliger les trajets non-radiaux qui se font sur de forts flux. Une analyse des flux supérieurs à 500 salariés (flux supposé suffisant) des ZMD et dont la distance de trajet est supérieure à 7 km permet d'estimer que 430 Mp.km/an se font en interne des ZMD (ZMD-ZMD), pour 3 000 Mp.km/an qui se font entre les ZMD et le centre. Ainsi, afin d'obtenir une estimation des distances parcourues sur de forts flux, il faut corriger à la hausse, d'environ 15 %, les distances parcourues sur les trajets radiaux. Une telle correction est effectuée pour obtenir la part de la mobilité agrégeant les forts flux.

6.2.1. Mode

Parmi la mobilité restante (en jour ouvré, heure de pointe et radiale), et afin de calculer le trafic VP évité grâce aux TPE, on suppose que seule la mobilité effectuée en VP ou deux-roues motorisés (2RM) est reportée sur les TPE, c'est-à-dire 4,8 % de la mobilité locale. En tenant compte de la correction permettant d'obtenir l'ensemble des trajets de fort flux, c'est 5,5 % de la mobilité qui est concernée.

Le calcul de cette mobilité, dite mobilité « de fort flux » est résumé Figure 38.

	Distances (p.km/sem)	Part des distances (%p.km)
Mobilité locale	9 176 673 732	100.0%
+ jour ouvré	6 770 543 346	73.8%
+ heure pointe	3 816 358 487	41.6%
+ radiale (ZMD <-> Centre)	621 507 895	6.8%
+ VP / deux-roues motorisés	442 114 974	4.8%
+ correction forts flux non radiaux => mobilité de fort flux	506 336 113	5.5%

Figure 38 : Mobilité de fort flux (mobilité locale, en jour ouvré, en heure de pointe, radiale (avec correction incluant les forts flux non radiaux), et effectuée en VP ou deux-roues motorisé). Les parts des distances sont exprimées en pourcentage de la mobilité locale en France métropolitaine (et non pas en ZMD). Source : exploitation de ENTND 2008.

Note : l'ordre d'application des différents filtres ne joue pas sur le résultat final, mais change les résultats intermédiaires. Un traitement des données en considérant d'abord la mobilité VP + deux-roues motorisés est présenté en Figure 39. Dans la mobilité VP locale, en jour ouvré et heure de pointe, on observe que la part des trajets radiaux est de 14 % (Figure 39 : part de la cinquième ligne dans la quatrième ligne), ce qui est légèrement inférieur à la part des trajets radiaux dans la mobilité locale tous modes, en jour ouvré et heure de pointe (16 %, voir Figure 38 : part de la quatrième ligne dans la troisième). Cela est en cohérence avec le fait que le train a une part importante de cette dernière mobilité, voir Figure 40).

	Distances (p.km/sem)	Part des distances (%p.km)
Mob locale	9 176 673 732	100.0%
+ VP / Deux-roues motorisés	7 938 295 025	86.5%
+ jour ouvré	5 725 340 425	62.4%
+ heure pointe	3 130 429 001	34.1%
+ radiale (ZMD <-> Centre)	442 114 974	4.8%
+ correction forts flux non radiaux => mobilité de fort flux	506 336 113	5.5%

Figure 39 : Mobilité de fort flux (mobilité locale, en jour ouvré, en heure de pointe, radiale, et effectuée en VP ou deux-roues motorisé), en mettant le filtre « VP » en première étape du calcul. Les parts des distances sont exprimées en pourcentage de la mobilité locale en France métropolitaine (et non pas en ZMD). Source : exploitation de ENTND 2008.

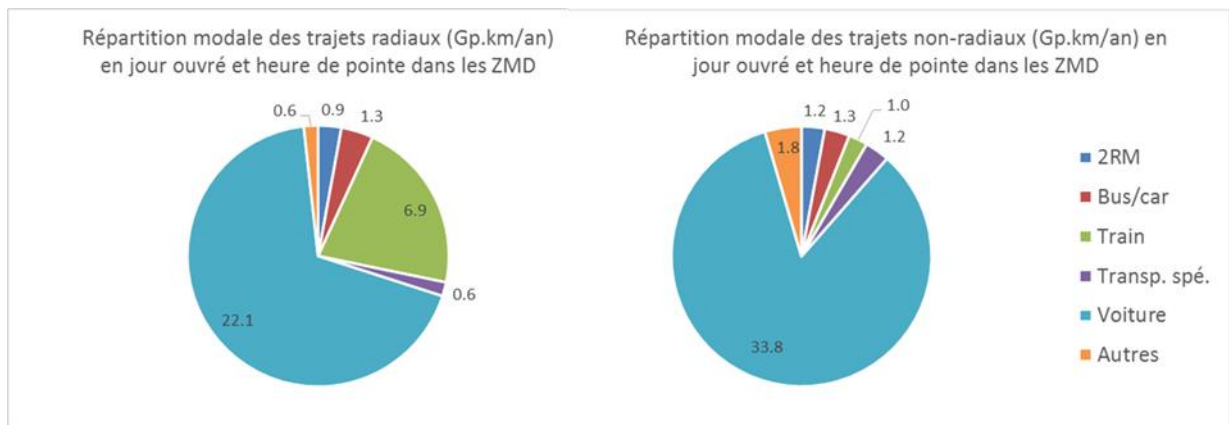


Figure 40 : Répartition modale des trajets en jour ouvré, heure de pointe, radiaux (figure de gauche) et non-radiaux (figure de droite), en fonction du mode.

6.2.2. Distance entre le domicile et la gare/ l'autoroute

Nous avons réalisé une étude géographique afin d'estimer la part de la population concernée par les TPE, proxy de la part des trajets de forts flux qui peuvent être réalisés en TPE (Figure 41 et Figure 42). Les hypothèses sélectionnées ont été les suivantes, pour les ZMD :

- Toutes les personnes logeant à moins de 5 km d'une gare ferroviaire et à moins de 5 km d'un tracé d'autoroute, sont spatialement susceptibles d'effectuer leurs trajets de fort flux en jour ouvré et heure de pointe en train (50 % des trajets) ou en bus express (50 % des trajets).
- Hors ces personnes, celles logeant à moins de 5 km d'une gare ferroviaire sont spatialement susceptibles d'effectuer leurs trajets radiaux en jour ouvré et heure de pointe en train mais pas en bus express.
- Hors ces personnes, celles logeant à moins de 5 km d'un tracé d'autoroute sont spatialement susceptibles d'effectuer leurs trajets radiaux en jour ouvré et heure de pointe en bus express mais pas en train.

On obtient les résultats suivants, pour les ZMD :

- 72 % des personnes vivent à moins de 5 km d'une gare *et* d'une voie rapide
- 10 % des personnes vivent à moins de 5 km d'une gare exclusivement
- 11 % des personnes vivent à moins de 5 km d'une voie rapide exclusivement
- 7 % des personnes ne vivent ni proche d'une gare, ni proche d'une voie rapide

Par conséquent, on suppose, sur la mobilité de fort flux, que :

- $72/2 + 10 = 46$ % des distances sont « allouables » au train (soit au total $506 \times 0,46 = 234$ Mp.km/sem).
- $72/2 + 11 = 47$ % des distances sont « allouables » au Bus Express (soit au total $506 \times 0,47 = 240$ Mp.km/sem).

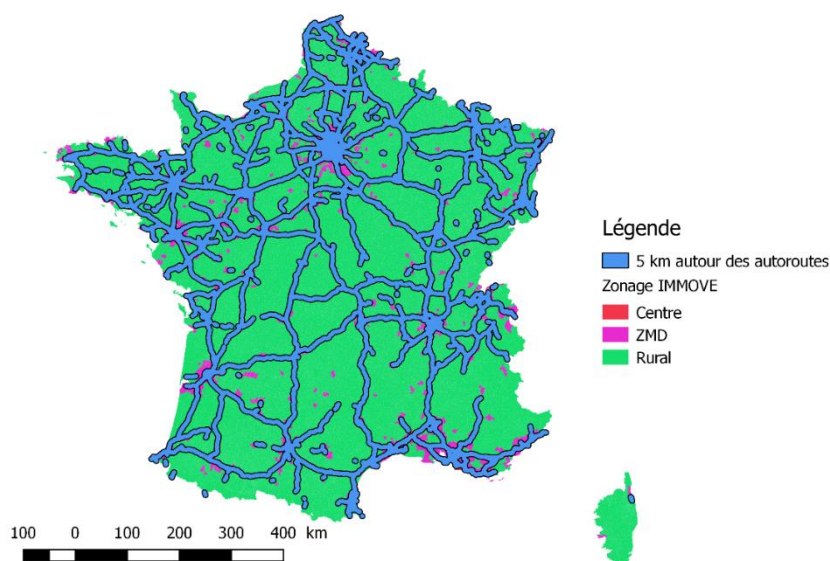


Figure 41 : Zones de 5 km autour des voies rapides en France métropolitaine. Les ZMD, en violet, sont largement couvertes par ces zones de 5 km.

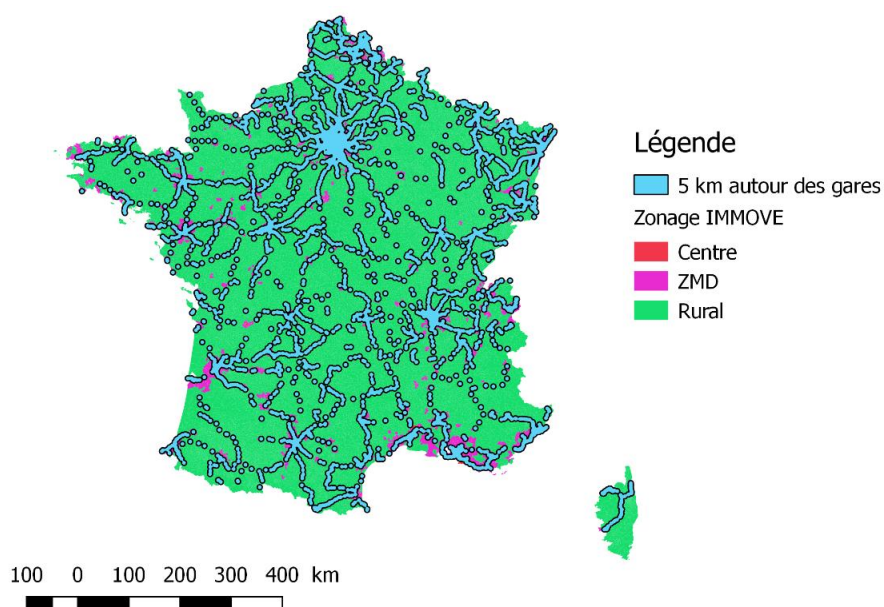


Figure 42 : Zones de 5 km autour des gares et haltes ferroviaires en France métropolitaine. Les ZMD, en violet, sont largement couvertes par ces zones de 5 km.

6.2.3. Distance parcourue en TPE

Nous supposons que le choix de report modal de la VP vers un TPE ne dépend que du critère temps : si le temps mis en TPE est moins grand que le temps mis en VP, alors on suppose que le passager utilise un TPE. Autrement, on suppose qu'il ne reporte pas sa mobilité et reste en VP. On néglige donc l'effet psychologique de la moindre fiabilité, de la moindre prédictibilité et de la moindre

flexibilité des transports en commun, ainsi que la différence de confort entre la VP et les transports en commun (que la VP soit vue comme plus confortable ou non, selon chacun).

Le modèle utilisé est le suivant (voir Figure 43) :

- Un trajet effectué en VP (« avant ») est remplacé par un trajet (« après ») composé de trois segments et deux connexions intermodales :
 - Un segment en VP permettant d'aller à la station de TPE
 - Une connexion entre la VP et le TPE
 - Un segment rapide de TPE, jusqu'à un pôle intermodal. Pour le bus express, ce segment est réalisé sur voie rapide.
 - Une connexion entre le TPE et un transport en urbain dense (bus, tramway, métro, vélo, voiture...)
 - Un segment en transport en urbain dense
- Si le trajet « après » est fait en bus express, on suppose que le trajet en VP « avant » suivait exactement le même trajet que celui fait « après » (c'est-à-dire, l'individu rejoignait la voie rapide en VP, puis l'empruntait, et terminait son trajet dans l'urbain dense en VP)
- Si le trajet « après » est fait en train, on suppose que le trajet en VP « avant » était fait entièrement en ZMD, sans emprunter de voie rapide. On suppose que la distance faite en VP « avant » est égale à 1,1 fois la distance parcourue sur le trajet « après » (pour prendre en compte le fait que le train parcourt une trajectoire généralement rectiligne, donc plus courte que celle faite en VP).
- Le trajet « avant » se termine par une recherche de stationnement de 5 min.

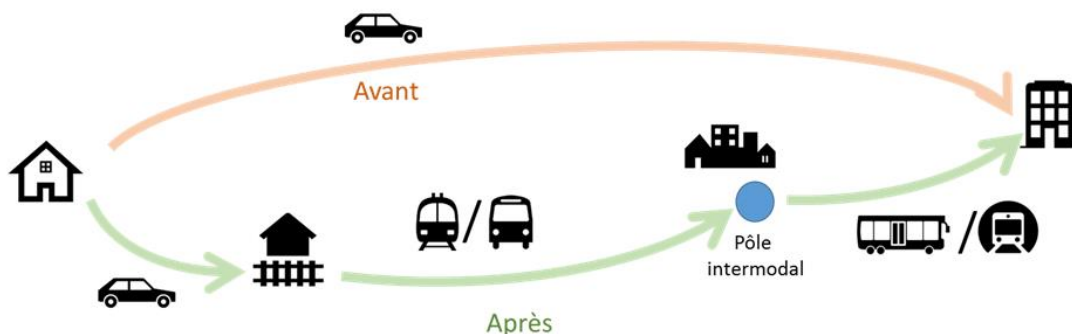


Figure 43 : Représentation du modèle de report modal de la VP vers un TPE.

- Seuls deux paramètres indépendants sont conservés :
 - La distance effectuée en TPE
 - La vitesse en VP, avant le report modal. Dans le cas « bus express », la vitesse moyenne en VP *sur voie rapide* est le paramètre considéré. Dans le cas « train », la vitesse moyenne en VP sur le trajet total est considérée.
- Les paramètres suivants ont été fixés :
 - Le premier segment est supposé fait en VP à une vitesse moyenne de 30 km/h
 - Le bus express est supposé rouler à une vitesse commerciale de 70 km/h (une moyenne de 55 km/h étant annoncées sur les horaires des lignes existantes, mais celle-ci pouvant être améliorée par des aménagements adaptés pour éviter la congestion)
 - Le train urbain est supposé rouler à une vitesse commerciale de 72 km/h (les trains urbains d'Ile de France type RER ont une vitesse commerciale de 50 km/h, pour

26 % de la mobilité pendulaire métropolitaine ; dans les autres régions (74 % de la mobilité pendulaire), les TER ont une vitesse commerciale de 80 km/h. Le barycentre des vitesses a été pris comme vitesse moyenne métropolitaine).

- Le troisième segment est supposé être fait en transport urbain dense, à vitesse moyenne de 20 km/h.
- Les premier et troisième segments sont chacun de longueur égale à 10% du trajet fait en TPE.
- Entre chaque segment, une durée d'intermodalité est simulée :
 - 8 min pour passer de la VP au bus express (ce qui tient compte de la variabilité plus grande des horaires du bus express dues aux conditions de trafic, de météo, par rapport aux trains urbains)
 - 5 min pour passer de la VP au train urbain
 - 8 min pour accéder aux transports urbains du dernier segment

6.2.3.1 Bus Express

Sous ces hypothèses, le bus express devient plus rapide que la VP pour les distances (en bus express) supérieures à 20 km, si la vitesse moyenne sur voie rapide en VP est de 45 km/h ou moins. Le bus express devient plus rapide que la VP pour les distances supérieures à 15 km si la vitesse moyenne sur voie rapide en VP est inférieure à 39 km/h. Pour que le bus express soit plus rapide que la VP sur les distances supérieures à 10 km, il faut que la vitesse moyenne en VP sur la voie rapide soit inférieure à 32 km/h (Figure 44).

		Vitesse VP segment voie rapide (km/h)									
		105	70	63	56	45	39	35	32	28	25
Distance parcourue en TPE (km)	2	VP	VP	VP	VP	VP	VP	VP	VP	VP	VP
	5	VP	VP	VP	VP	VP	VP	VP	VP	VP	VP
	10	VP	VP	VP	VP	VP	VP	VP	BE	BE	BE
	15	VP	VP	VP	VP	VP	BE	BE	BE	BE	BE
	20	VP	VP	VP	VP	BE	BE	BE	BE	BE	BE
	25	VP	VP	VP	VP	BE	BE	BE	BE	BE	BE
	30	VP	VP	VP	VP	BE	BE	BE	BE	BE	BE
	35	VP	VP	VP	VP	BE	BE	BE	BE	BE	BE
	40	VP	VP	VP	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE
	45	VP	VP	VP	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE
	50	VP	VP	VP	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE
	55	VP	VP	VP	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE
	60	VP	VP	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE
	65	VP	VP	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE
	70	VP	VP	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE

Figure 44 : Zone de pertinence de la VP et du Bus Express (BE), sous les hypothèses détaillées, en fonction de la distance du segment en BE (sur voie rapide), et de la vitesse moyenne en VP sur ce segment. Clé de lecture : le Bus Express est plus rapide que la VP sur les trajets dont le segment bus est de 15 km ou plus si la vitesse en VP sur le segment voie rapide est inférieure à 39 km/h.

On suppose ici que la vitesse moyenne en heure de pointe sur voie rapide en VP est d'environ 45 km/h : l'exploitation de la base ENTOD sur le trafic concerné utilisant les autoroutes donne une vitesse moyenne de 39 km/h sur l'ensemble du trajet (incluant les sections hors voie rapide) ; les données recueillies sur le réseau de voies rapides francilien indiquent des vitesses par section variant de 15 à 60 km/h dans la rocade A86 et de 15 km/h à plus de 75 km/h au-delà de la rocade (IAU IDF, 2010). On en déduit un domaine de pertinence du bus express par rapport à la voiture sur les

trajets dont le segment rapide est de 20 km ou plus, c'est-à-dire les trajets dont la distance totale est de 24 km ou plus. Cela correspond à l'observé en Ile-de-France : on peut estimer que 70 % des lignes empruntant des voies rapides parcourent des distances supérieures à 20 km (IAU IDF, 2006).

Pour le scénario Base, les hypothèses sélectionnées sont les suivantes :

- 0 % des distances parcourues sur des trajets de moins de 15 km sont reportées de la VP au bus express
- 50 % des distances parcourues sur des trajets de 15 km à 20 km sont reportées de la VP au bus express
- 100 % des distances parcourues sur des trajets de plus de 20 km sont reportées de la VP au bus express

La distribution de la mobilité (en p.km) vis-à-vis de la distance des trajets, mesurée par l'ENTD 2008 sur la mobilité pendulaire VP, permet d'estimer la part de la mobilité « reportable » qu'on alloue au bus express selon ce critère de distance : 60 % (Tableau 26).

Tableau 26 : Calcul de la part des pkm « allouables au Bus Express » qui est « allouée au Bus Express ».

Plage de distance (km)	Distribution des pkm fort flux	% pkm alloués au Bus Express en fonction de la distance du trajet (hypothèse)	Part pkm allouée au Bus Express
0-15	34%	0%	0%
15-20	12%	50%	6%
>20	54%	100%	54%
Total	100%	-	60%

6.2.3.2 Train

Quant au train, il devient plus rapide que la VP sur des distances (sur le segment train) de 13 km ou plus si la vitesse moyenne de la VP en ZMD (hors voie rapide) est inférieure à 39 km/h. Il devient plus rapide que la VP sur des distances (en train) de 10 km ou plus si la vitesse moyenne de la VP en ZMD (hors voie rapide) est inférieure à 37 km/h (Figure 45).

		Vitesse VP ZMD (km/h)									
		54	49	44	39	37	34	32	29	27	25
Distance TC (km)	5	VP	VP	VP	VP	VP	VP	VP	VP	T	T
	6	VP	VP	VP	VP	VP	VP	VP	T	T	T
	8	VP	VP	VP	VP	VP	T	T	T	T	T
	10	VP	VP	VP	VP	T	T	T	T	T	T
	13	VP	VP	VP	T	T	T	T	T	T	T
	20	VP	VP	T	T	T	T	T	T	T	T
	25	VP	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	30	VP	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	35	VP	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	40	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	45	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	50	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	55	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	60	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
	70	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T

Figure 45 : Zone de pertinence de la VP et du train (T), sous les hypothèses détaillées, en fonction de la distance du segment en train, et de la vitesse moyenne en VP sur le trajet complet. Clé de lecture : le train est plus rapide que la VP sur les trajets dont le segment train est de 13 km ou plus si la vitesse en VP sur le segment voie rapide est inférieure à 39 km/h.

Une analyse de l'ENTD permet de mesurer que le trafic VP et deux-roues motorisés, en jour ouvré, heure de pointe, radial se fait à une vitesse moyenne de 34 km/h. On en déduit un domaine de pertinence du train par rapport à la voiture sur les trajets dont le segment train est de 8 km ou plus, c'est-à-dire les trajets dont la distance totale est de 10 km ou plus.

Pour le scénario Gisement, les hypothèses sélectionnées sont les suivantes :

- 0 % des distances parcourues sur des trajets de moins de 7 km sont reportées de la VP au train
- 50 % des distances parcourues sur des trajets de 7 km à 10 km sont reportées de la VP au train
- 100 % des distances parcourues sur des trajets de plus de 10 km sont reportées de la VP au train

La distribution de la mobilité (en p.km) vis-à-vis de la distance des trajets, mesurée par l'ENTD 2008 sur la mobilité pendulaire VP, permet d'estimer la part de la mobilité « reportable » qu'on alloue au train selon ce critère de distance : 85 % (Tableau 27).

Tableau 27 : Calcul de la part des pkm « allouables au train » que est « potentiellement allouée au Train ».

Plage de distance (km)	Distribution des pkm fort flux	% pkm alloués au Train en fonction de la distance du trajet (hypothèse)	Part pkm potentiellement allouée au Train
0-7	10%	0%	0%
7-10	10%	50%	5%
>10	80%	100%	80%
Total	100%	-	85%

Voici une comparaison des hypothèses prises sur la part des p.km allouables au Train, qui est potentiellement allouée au Train, et sur la part des p.km allouables au Bus Express, qui est allouée au Bus Express, en fonction de la distance du trajet (Figure 46).

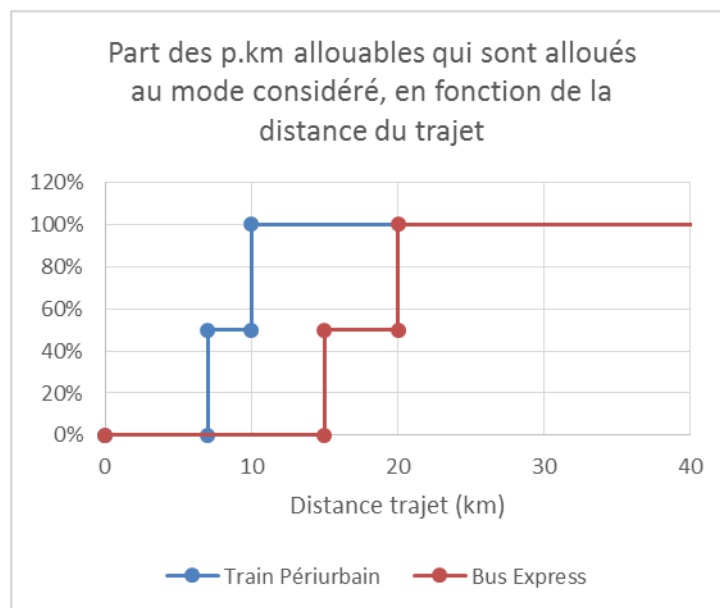


Figure 46 : Hypothèses prises sur la part des p.km allouables qui sont alloués au mode considéré, en fonction de la distance du trajet, pour le Train et pour le Bus Express.

6.2.4. Limitation de la capacité d'absorption du Train

Nous supposons qu'aucune nouvelle voie de chemin de fer ne sera mise en service pour accueillir la mobilité supplémentaire potentiellement allouée au train, pour des raisons de coûts d'investissement dans ce type d'infrastructure. Ainsi, une limitation de l'augmentation de la mobilité transportée par le mode train a été supposée, à 30 % d'augmentation sur le segment de la mobilité pendulaire (sauf dans le scénario « Priorité Train », où aucune limite d'augmentation de la mobilité pendulaire en train n'a été posée, voir p. 99).

La mobilité potentiellement allouée au train ($85\% \times 234 \text{ Mp.km/sem} = 200 \text{ Mp.km/sem}$) dépasse la limitation supposée ci-dessus pour le train (actuellement, le train transporte 128 Mp.km/sem , si bien que 30 % d'augmentation correspondent à $38,5 \text{ Mp.km/sem}$). Une saturation est donc mise en place sur cette valeur, et la mobilité au-dessus du seuil de saturation est alors considérée comme allouable au Bus Express. La mobilité qui peut être absorbée par l'augmentation de capacité du système ferroviaire est allouée au train.

6.3. Résultats du scénario « TPE Base »

Les hypothèses présentées permettent d'estimer la mobilité VP allouée au Bus Express et au Train (voir Tableau 28) :

- 253 Mp.km/sem (13 Gp.km/an) sont alloués au Bus Express, soit 2,8 % de la mobilité locale
- 38 Mp.km/sem (2,0 Gp.km/an) sont alloués au Train, soit 0,4 % de la mobilité locale.

La mobilité allouée aux TPE est donc allouée à 87 % au Bus Express et à 13 % au Train.

Tableau 28 : Calcul de la mobilité allouée au Bus Express et au Train. En partant de la mobilité de fort flux, on calcule, pour le bus puis le train, la mobilité reportable selon le critère géographique de proximité audit mode, puis la mobilité allouée selon les critères de distances minimales. Enfin, le critère d'absorption maximale de mobilité par le Train est appliqué (au plus 38,5 Mp.km/sem, dernière ligne du tableau). La mobilité allouable au Train mais non absorbable est alors considérée comme reportable sur le Bus Express (161 Mp.km/sem, Cf. troisième ligne du tableau). Les parts des distances sont exprimées en pourcentage de la mobilité locale en France métropolitaine (et non pas en ZMD).

Mobilité	Taux allocation	Distances (p.km/sem)	Part des distances (%p.km)
Mobilité de fort flux	-	506 336 113	5,5%
Reportable Bus Express (critère géographique)	47%	239 589 530	2,6%
Non absorbable Train (critère absorption)	-	181 812 685	2,0%
Total	-	421 402 215	4,6%
Allouée Bus Express (critère distance)	60%	252 771 531	2,8%
Reportable Train (critère géographique)	46%	234 187 758	2,6%
Allouable Train (critère distance)	85%	199 430 213	2,2%
Absorbable Train (critère absorption)	-	38 492 327	0,4%

Le bilan global dont la méthodologie est présentée Figure 32 peut alors être effectué, en prenant les hypothèses suivantes :

- Afin de rendre les résultats comparables avec les autres domaines d'action, on restreint les calculs à la mobilité réalisée par les habitants des ZMD, c'est-à-dire 93 % de la mobilité allouée à chaque mode (mesuré via l'ENTD 2008 ; il s'agit de la part des distances effectuées un jour ouvré, en heure de pointe, et radiales, dont le départ se fait de la maison en ZMD ou bien dont l'arrivée se fait à la maison en ZMD, signifiant que la distance a été parcourue par un habitant des ZMD).
- Le taux de remplissage des VP sur la mobilité allouée aux TPE est de 1,18 p.km/v.km (mesuré via l'ENTD 2008).
- L'émission unitaire moyenne de CO₂ du parc de VP en 2026 est de 124 gCO₂/v.km (valeur moyenne du scénario Référence en 2026, selon IMMOVE), ce qui correspond à une consommation unitaire de 4,7 L/100 km.
- L'émission unitaire moyenne du Bus Express est de 750 gCO₂/v.km en 2026 (valeur calculée à partir de la moyenne des émissions de la catégorie « autocars » de (ADEME, Deloitte, 2008), et en supposant une baisse de la consommation de 10 % d'ici 2026, correspondant au final à une consommation unitaire de 30 L/100 km), pour un taux de remplissage moyen de 17 passagers (en tenant compte du retour à vide, valeur utilisée dans (La Fabrique de la Cité, 2015)), soit 44 gCO₂/p.km.
- L'émission unitaire moyenne du Train est de 9 gCO₂/p.km (valeur moyenne du scénario Référence en 2026, selon IMMOVE).

Les résultats obtenus sont présentés Tableau 29. Dans le scénario Base, le Bus Express permet d'éviter 4,7 % des émissions de CO₂ de la mobilité locale, tandis que le train permet d'en éviter 1,1 %, soit un total pour les TPE de 5,9 % (Figure 47).

Tableau 29 : Calcul des impacts en termes de trafic et émissions CO₂ du report modal de la VP vers le Bus Express, et du report modal de la VP vers le Train, dans le scénario Base TPE.

	Report VP - Bus	Report VP -Train	Source
Mobilité reportée (p.km/sem)	252 771 531	38 492 327	-
Part de cette mobilité par les habitants des ZMD	0,93	0,93	ENTD
Mobilité reportée ZMD (p.km/sem)	235 077 524	35 797 864	
Mobilité reportée ZMD (%p.km)	6,6%	1,0%	
Taux de remplissage (p.km/v.km)	1,18	1,18	ENTD
Trafic VP évité dans les ZMD (v.km/sem)	199 200 441	30 334 463	-
Trafic VP évité dans les ZMD (%v.km)	8,9%	1,4%	
Emissions VP par v.km en 2026 (gCO ₂ /v.km)	124	124	IMMOVE
Emissions CO ₂ du trafic VP évité ZMD (MtCO ₂ /an)	1,29	0,20	-
Emissions CO ₂ du trafic VP évité ZMD	8,1%	1,2%	
Emissions TPE par v.km (gCO ₂ /v.km)	750	-	ADEME 2008
Taux de remplissage moyen TPE (p.km/v.km)	17	-	La Fabrique de la Cité
Emissions TPE par p.km (gCO ₂ /p.km)	44	9	Base Carbone ADEME
Emissions du trafic TPE ZMD additionnel (MtCO ₂ /an)	0,54	0,02	-
Emissions nettes évitées ZMD (MtCO ₂ /an)	0,75	0,18	-
Emissions nettes évitées ZMD (%tCO ₂)	4,7%	1,1%	-

Les parts modales passent alors de 4,6 % à 5,6 % pour le train et de 4,4 % à 11 % pour le bus (express et urbain), dans les ZMD. Sur la mobilité de forts flux, les reports modaux dans le scénario Base correspondent à une multiplication par 10 de la mobilité pour les bus (passant de 1,4 Gp.km/an à 14 Gp.km/an), et à une augmentation de 28 % de la mobilité pour les trains (passant de 6,7 Gp.km/an à 8,6 Gp.km/an).

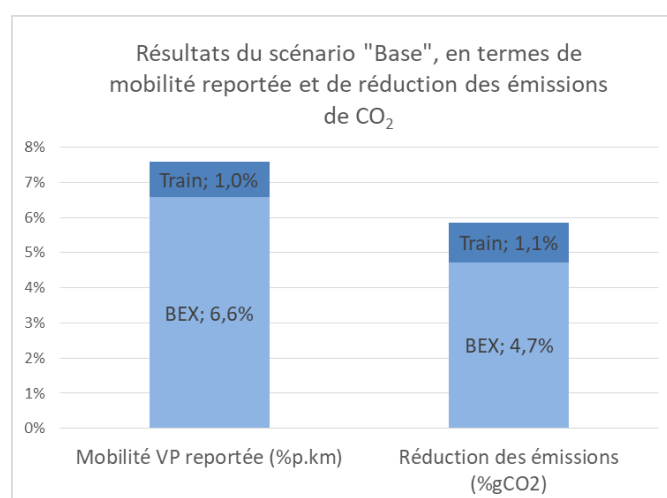


Figure 47 : Mobilité reportée vers les TPE, et réduction des émissions de CO₂ par rapport à la mobilité locale dans les ZMD, pour le scénario TPE Base.

6.4. Analyse d'un scénario intra-ZMD

Nous avons mené une analyse complémentaire supposant que tous les trajets au sein des ZMD sont également parcourables en TPE, en addition des trajets de fort flux. Ainsi, en plus des trajets radiaux et non-radiaux de fort flux, nous intégrons tous les flux non-radiaux (c'est-à-dire effectués depuis une commune des ZMD vers une commune des ZMD, peu importe la taille du flux).

Ces trajets intra-ZMD représentent des flux diffus pour lesquels, sauf exception, les TPE ne sont pas pertinents, que cela soit d'un point de vue financier, énergétique et CO₂ (transporter de faibles flux en mode lourd mène à déplacer un mode lourd peu rempli, donc énergétiquement moins performant que la VP). Ces flux diffus peuvent plutôt être captés par des offres de transport plus flexibles, avec horaires et points de passage adaptés en temps réel à la demande, et différentes tailles de véhicules en fonction du besoin. Ils peuvent également être captés par le covoiturage (voir Chapitre 7 – Covoiturage).

		Destination		
		Rural	ZMD	Centre
Origine	Rural			
	ZMD		X	X
	Centre		X	

En tenant compte des trajets intra-ZMD, la base de trajets locaux, en jour ouvré, en heure de pointe, et selon le zonage testé, est de 1 096 Mp.km/sem (à comparer aux 506 Mp.km/sem considérés dans la mobilité radiale). Notons que, sans surprise, les trajets ZMD-ZMD en jour ouvré et heure de pointe sont faits en grande majorité en VP et deux-roues motorisés (93 %), puis en train (4 %) et en bus (1 %), à comparer avec les trajets radiaux réalisés à 69 % en VP, 23 % en train et 3 % en bus. En effet, les réseaux de train étant essentiellement radiaux, ces flux ne sont pas captés efficacement par le train (un passage par le centre est nécessaire) ; ces flux étant diffus, ils ne sont captés efficacement ni par le bus (lent, avec beaucoup d'arrêts, donc non compétitif avec la VP) ni par le bus express (modèle financier non viable pour les flux diffus).

En conservant les mêmes règles de report de cette mobilité sur le bus et le train que précédemment, on obtient les reports de mobilité locale suivants :

Mobilité		Taux allocation	Distances (p.km/sem)	Part des distances (%p.km)
Locale, jour ouvré, heure pointe, zonage choisi		-	1 095 650 150	11,9%
	Reportable Bus Express (critère géographique)	47%	518 442 784	5,6%
	Non absorbable Train (critère absorption)	-	393 420 675	4,3%
	Total	-	911 863 459	9,9%
	Allouée Bus Express (critère distance)	60%	546 967 041	6,0%
	Reportable Train (critère géographique)	46%	506 754 003	5,5%
	Allouable Train (critère distance)	85%	431 542 876	4,7%
	Absorbable Train (critère absorption)	-	38 492 327	0,4%

Nous posons les hypothèses suivantes :

- Taux de remplissage moyen des Bus Express périurbains (tous flux confondus, radiaux comme intra-ZMD) de 9 personnes par bus, obtenus en considérant une moyenne de 17

- personnes par bus pour les forts flux (ie, les flux radiaux) et une moyenne de 7 personnes par bus pour les faibles flux (les flux intra-ZMD) (en tenant compte du retour à vide),
- Emissions de 15 gCO₂/p.km pour le train périurbain, correspondant à un taux de remplissage moyen de 47 p/train (ADEME, 2012)
- Taux de remplissage moyen des VP de 1,18 p.km/v.km (mesuré sur les trajets considérés)

On obtient les réductions de mobilité VP, de trafic VP, et d'émissions CO₂ suivants sur les ZMD (Tableau 30) :

- 15 % de la mobilité reportée vers les TPE
- 21 % du trafic VP évité
- 5,0 % des émissions de CO₂ évitées, au lieu des 5,9 % obtenus sur la mobilité radiale uniquement

La réduction est moins grande que pour les trajets de forts flux uniquement, car le Bus Express mène à plus d'émissions de CO₂ que ce qu'il permet d'en éviter sur les trajets diffus (c'est-à-dire, hors forts flux). En effet, sur les trajets diffus le taux de remplissage supposé est suffisamment faible pour que la VP soit plus efficace en termes d'émissions par p.km (750/7 = 107 gCO₂/p.km pour le Bus Express, contre 124/1,18 = 105 gCO₂/p.km pour la VP).

Tableau 30 : Calcul des impacts en termes de trafic et émissions CO₂ du report modal de la VP vers le Bus Express, et du report modal de la VP vers le Train, dans le scénario « Intra-ZMD ».

	Report VP - Bus	Report VP -Train	Source
Mobilité reportée (p.km/sem)	546 967 041	38 492 327	-
Part de cette mobilité par les habitants des ZMD	0,93	0,93	ENTD
Mobilité reportée ZMD (p.km/sem)	508 679 348	35 797 864	
Mobilité reportée ZMD (%p.km)	14,2%	1,0%	
Taux de remplissage (p.km/v.km)	1,18	1,18	ENTD
Trafic VP évité dans les ZMD (v.km/sem)	431 045 678	30 334 463	-
Trafic VP évité dans les ZMD (%v.km)	19,3%	1,4%	
Emissions VP par v.km en 2026 (gCO ₂ /v.km)	124	124	IMMOVE
Emissions CO ₂ du trafic VP évité ZMD (MtCO ₂ /an)	2,79	0,20	-
Emissions CO ₂ du trafic VP évité ZMD	17,6%	1,2%	
Emissions TPE par v.km (gCO ₂ /v.km)	750	-	ADEME 2008
Taux de remplissage moyen TPE (p.km/v.km)	9	-	La Fabrique de la Cité
Emissions TPE par p.km (gCO ₂ /p.km)	82	15	Base Carbone ADEME
Emissions du trafic TPE ZMD additionnel (MtCO ₂ /an)	2,17	0,03	-
Emissions nettes évitées ZMD (MtCO ₂ /an)	0,62	0,17	-
Emissions nettes évitées ZMD (%tCO ₂)	3,9%	1,1%	-

6.5. Analyse de sensibilité

6.5.1. Répartition Bus Express / Train : « Priorité Bus » et « Priorité Train »

Une analyse de sensibilité à la répartition des trajets de fort flux vers le Train (trajets allouables au Train) et vers le Bus Express (trajets allouables au Bus Express) a été faite, via deux sous-scénarios : dans le scénario « Priorité Train », 100 % des trajets fort flux sont alloués au train, tandis que dans le scénario « Priorité Bus », 100 % de ces trajets sont alloués au Bus Express.

Le scénario « Priorité Train » suppose que toute la mobilité fort flux est allouable au train (c'est-à-dire, que les personnes vivant à la fois proche d'une gare et proche d'une autoroute privilégient le train), puis que la mobilité potentiellement allouée au Train est allouée au Train (c'est-à-dire qu'on suppose la capacité d'absorption du système ferroviaire est illimitée). On obtient dans ce scénario une part modale de 13,8 % pour le train et de 5,3 % pour le bus (express et urbain), et une réduction globale des émissions de CO₂ de 11 % (1,8 MtCO₂/an).

Le scénario « Priorité Bus » suppose que toute la mobilité fort flux est allouée vers le Bus Express (c'est-à-dire, que les personnes vivant à la fois proche d'une gare et proche d'une autoroute privilégient le Bus Express). Ce scénario donne les mêmes résultats que le scénario Base, la limitation d'absorption du train menant à allouer le maximum de mobilité au Bus Express. On obtient donc une part modale de 5,6 % pour le train et une part modale de 11 % pour le bus (express et urbain), et une réduction des émissions de CO₂ dues à la mobilité locale dans les ZMD de 5,9 % (0,93 MtCO₂/an).

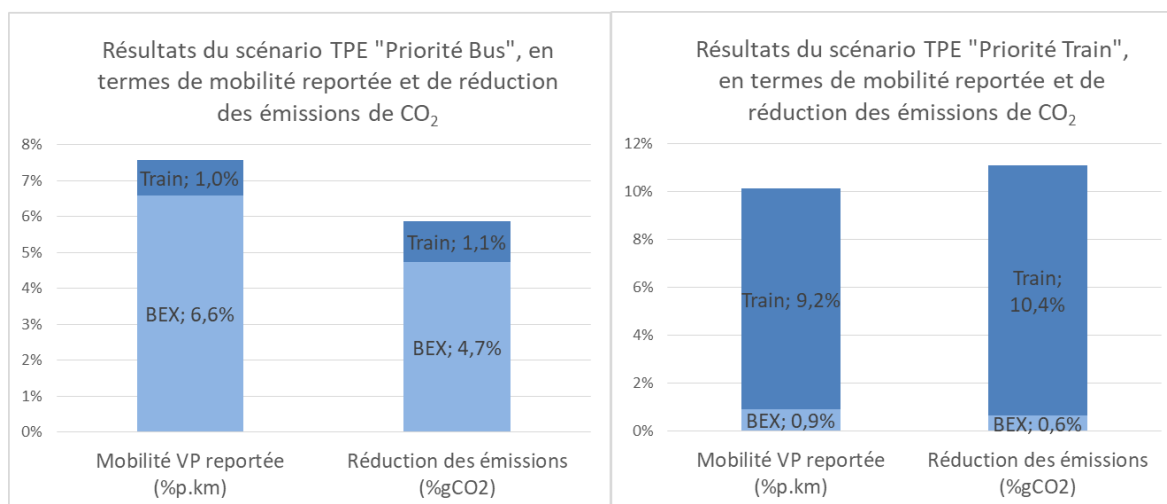


Figure 48 : Mobilité reportée vers les TPE, et réduction des émissions de CO₂ par rapport à la mobilité locale dans les ZMD, pour le scénario Gisement « Priorité Bus » (à gauche), et « Priorité Train » (à droite).

6.5.2. Critère distance : « Gisement » et « Développement »

Une analyse de sensibilité au choix du critère de distance a été effectuée, sous forme de deux scénarios.

Le scénario « Développement » suppose une utilisation faible mais non nulle des TPE pour les distances courtes à moyennes, et une utilisation forte mais non totale des TPE pour les longues distances (Figure 49).

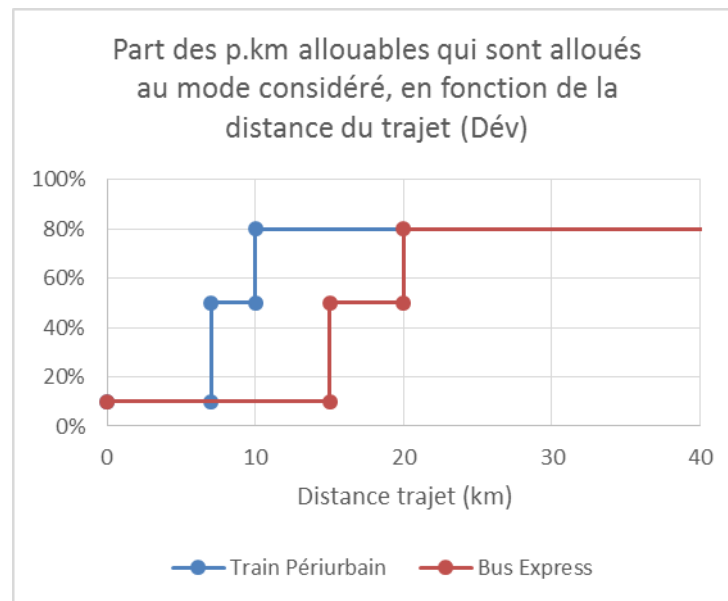


Figure 49 : Part des p.km allouables qui sont alloués au mode considéré, en fonction de la distance du trajet, pour le Train et pour le Bus Express, dans le scénario Développement.

Le scénario « Gisement » suppose une utilisation faible mais non nulle des TPE sur les distances courtes à moyennes, et une utilisation maximale des TPE à partir de distances plus courtes que celles du scénario « Base » (Figure 50).

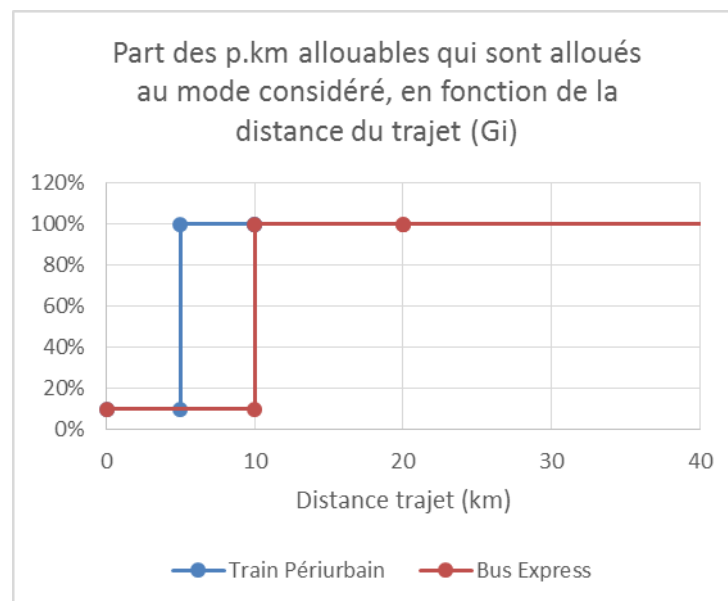


Figure 50 : Part des p.km allouables qui sont alloués au mode considéré, en fonction de la distance du trajet, pour le Train et pour le Bus Express, dans le scénario Gisement.

Le scénario Développement induit un report de la VP vers les TPE de 13 Gp.km/an dans les ZMD, soit 6,8 % de la mobilité locale des ZMD. Ce report évite l'émission de 840 ktCO₂/an (660 ktCO₂/an pour le Bus Express et 180 ktCO₂/an pour le Train), soit 5,3 % des émissions dues à la mobilité locale des ZMD (Figure 51 et Figure 52).

Le scénario Gisement induit un report de la VP vers les TPE de 19 Gp.km/an dans les ZMD, soit 10 % de la mobilité locale des ZMD, dont 90 % est reportée vers le Bus Express, et 10 % vers le Train Périurbain. Ce report évite l'émission de 1,2 MtCO₂/an (1,0 MtCO₂/an pour le Bus Express et 180 ktCO₂/an pour le Train), soit 7,6 % des émissions dues à la mobilité locale des ZMD (Figure 51 et Figure 52). Les calculs sont détaillés pour ce scénario dans l'Annexe 6 p. 177.

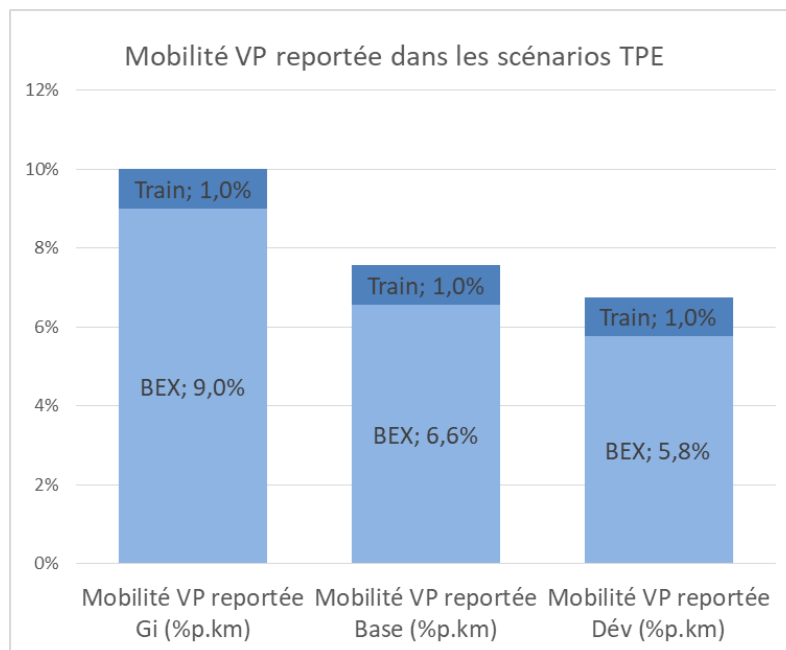


Figure 51 : Mobilité VP reportée vers les TPE, dans les scénarios Base, Gisement et Développement, en part des p.km locaux dans les ZMD.

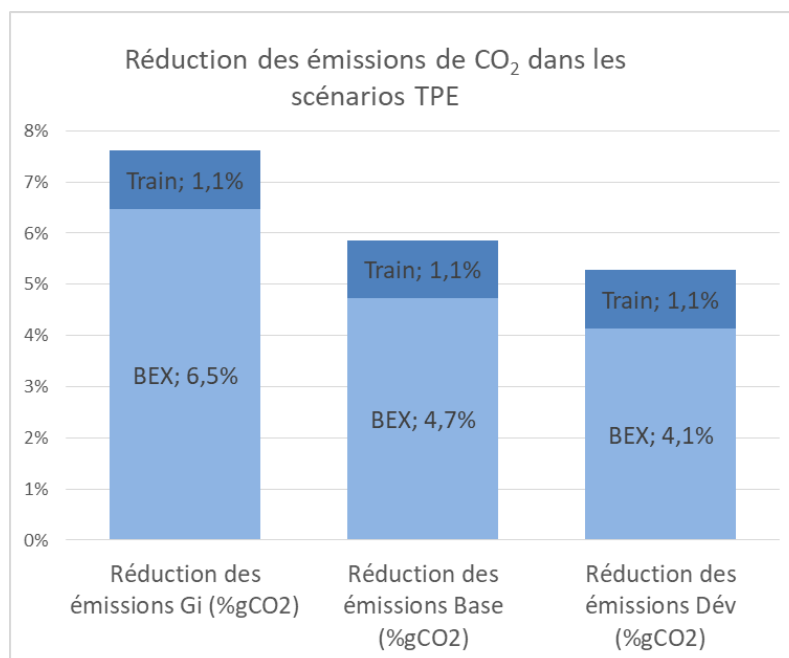


Figure 52 : Emissions CO₂ évitées dans les scénarios Base, Gisement et Développement, en part des émissions annuelles de la mobilité locale des ZMD.

6.6. Analyse de la situation en Ile-de-France, dans un scénario Gisement

La mobilité pendulaire francilienne est significativement différente de la mobilité pendulaire métropolitaine moyenne.

D'une part, la mobilité radiale de fort flux tous modes est surreprésentée dans la mobilité francilienne par rapport à la moyenne métropolitaine : 9 % de la mobilité locale partant des ZMD est radiale de fort flux, alors que 23 % l'est en Ile-de-France (Figure 53). La mobilité radiale de fort flux francilienne concentre cependant l'essentiel de la mobilité pendulaire faite en train (86 % de la mobilité radiale de fort flux en train est parcourue en Ile-de-France). Ainsi, le besoin en TPE, relativement à la mobilité, est plus concentré en IDF que la moyenne française.

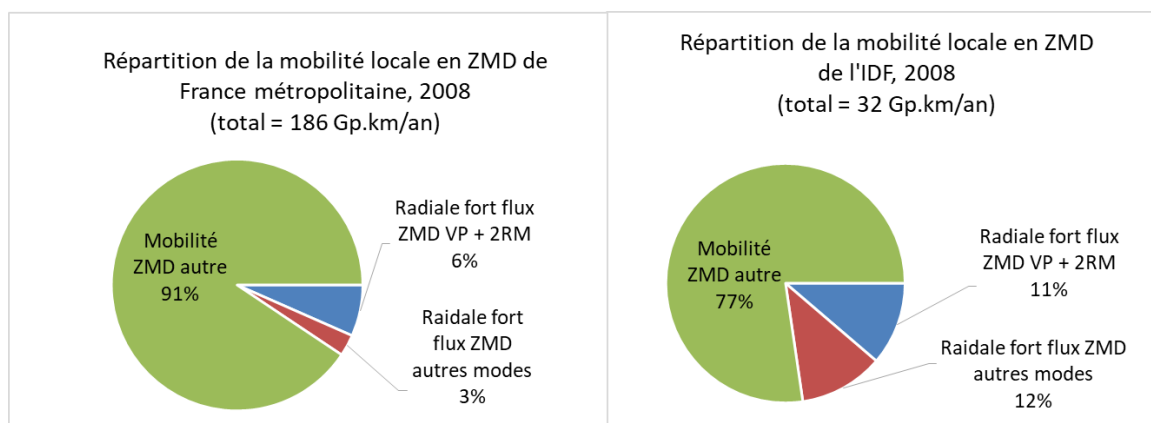


Figure 53 : Répartition de la mobilité locale partant des ZMD en 2008, en Ile-de-France et en France. Source : traitement ENT D 2008.

D'autre part, les distances parcourues sont significativement plus longues en Ile-de-France (Figure 54) : la distance médiane d'un trajet pendulaire VP francilien est de 30 km alors que la médiane métropolitaine est de 22 km. Par conséquent, une part plus importante de la mobilité radiale de fort flux remplit le critère de distance pour les TPE.

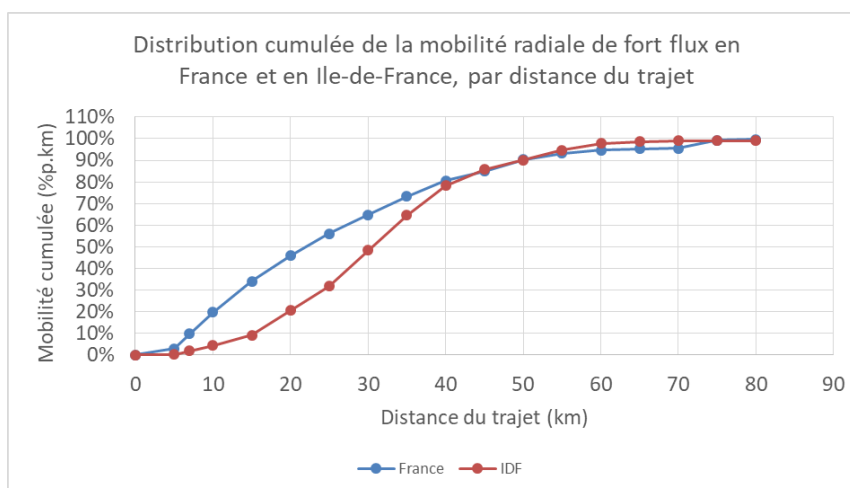


Figure 54 : Distribution cumulée de la mobilité pendulaire en France (courbe bleue) et en Ile-de-France (IDF, en rouge), par distance de trajet. Clé de lecture : en IDF, 20 % des trajets pendulaires font moins de 20 km ; en France, ce sont 45 % des trajets pendulaires qui font moins de 20 km.

Une analyse méthodologiquement identique à celle menée pour l'ensemble des ZMD (section 6.2) a été menée à l'échelle de l'Ile-de-France pour estimer le gisement de réduction des émissions à l'échelle d'une grande agglomération (scénario Gisement TPE IDF). Les critères utilisés sont identiques à ceux utilisés pour l'ensemble des ZMD pour le scénario Gisement (6.5.2) :

- Heure de pointe de 6 h à 9 h et de 16 h à 20 h
- Les forts flux (de plus de 500 salariés) sont pris en compte, ce qui mène, pour l'Ile-de-France, à un coefficient correcteur de 1,045 (voir section 6.2.2).
- Seule la mobilité VP est reportée vers les TPE
- L'éloignement géographique aux gares et aux autoroutes dans les ZMD est supposé être le même qu'en moyenne nationale
- Les critères de distance pour le train et pour le BE sont ceux du scénario Gisement (Figure 50)
- La limitation en capacité d'absorption de la mobilité reportée vers le train est maintenue à 30 %

Les résultats intermédiaires sont décrits dans les tableaux suivants :

Tableau 31 : Mobilité de fort flux (mobilité locale, en jour ouvré, en heure de pointe, radiale (avec correction incluant les forts flux non radiaux), et effectuée en VP ou deux-roues motorisé). Les parts des distances sont exprimées en pourcentage de la mobilité locale en IDF (et non pas en ZMD). Source : exploitation de ENTD 2008.

	Distances (p.km/sem)	Part des distances (%p.km)
Mobilité locale IDF	1 518 184 774	100.0%
+ jour ouvré	1 164 891 211	76.7%
+ heure pointe	880 680 157	58.0%
+ radiale (ZMD <-> Centre)	425 148 865	28.0%
+ VP / deux-roues motorisés	114 956 455	7.6%
+ correction forts flux non radiaux => Mobilité forts flux	120 156 866	7.9%

Tableau 32 : Calcul de la part des p.km « forts flux » qu'on alloue au Train

Plage de distance (km)	Distribution des pkm fort flux	% pkm alloués au Bus Express en fonction de la distance du trajet (hypothèse)	Part pkm allouée au Bus Express
0-10	4%	0%	0%
10-20	16%	100%	16%
>20	79%	100%	79%
Total	100%	-	96%

Tableau 33 : Calcul de la part des p.km « forts flux » qu'on alloue au Bus Express

Plage de distance (km)	Distribution des pkm fort flux	% pkm alloués au Train en fonction de la distance du trajet (hypothèse)	Part pkm potentiellement allouée au Train
0-5	0%	0%	0%
5-10	4%	100%	4%
>10	96%	100%	96%
Total	100%	-	100%

Tableau 34 : Calcul de la mobilité allouée au Bus Express et au Train. En partant de la mobilité VP locale en heure de pointe de jour ouvré, radiale (avec correction incluant les forts flux non radiaux), on calcule, pour le bus puis le train, la mobilité reportable selon le critère géographique de proximité audit mode, puis la mobilité allouée selon les critères de distances minimales. Enfin, le critère d'absorption maximale de mobilité par le Train est appliqué. Les parts des distances sont exprimées en pourcentage de la mobilité locale en IDF (et non pas en ZMD).

Mobilité	Taux allocation	Distances (p.km/sem)	Part des distances (%p.km)
Mobilité forts flux IDF	-	120 156 866	7.9%
Reportable Bus Express (critère géographique)	47%	56 856 160	3.7%
Non absorbable Train (critère absorption)	-	21 569 585	1.4%
Total	-	78 425 745	5.2%
Allouée Bus Express (critère distance)	96%	74 937 822	4.9%
Reportable Train (critère géographique)	46%	55 574 284	3.7%
Allouable Train (critère distance)	100%	55 379 831	3.6%
Absorbable Train (critère absorption)	-	33 885 717	2.2%

Tableau 35 : Calcul des impacts en termes de trafic et émissions CO₂ du report modal de la VP vers le Bus Express, et du report modal de la VP vers le Train, dans le scénario Gisement TPE appliqué à l'IDF.

	Report VP - Bus	Report VP -Train	Source
Mobilité reportée (p.km/sem)	74 937 822	33 885 717	-
Mobilité reportée vs ZMD IDF (%p.km)	11.9%	5.4%	
<i>Taux de remplissage (p.km/v.km)</i>	<i>1.18</i>	<i>1.18</i>	<i>ENTD</i>
Trafic VP évité en IDF (v.km/sem)	63 500 955	28 714 144	-
Trafic VP évité vs ZMD IDF (%v.km)	19.3%	8.7%	
<i>Emissions VP par v.km en 2026 (gCO₂/v.km)</i>	<i>124</i>	<i>124</i>	<i>IMMOVE</i>
Emissions CO ₂ du trafic VP évité ZMD (MtCO ₂ /an)	0.41	0.19	-
Emissions CO ₂ du trafic VP évité vs ZMD IDF (%MtCO ₂)	17.7%	8.0%	
<i>Emissions TPE par v.km (gCO₂/v.km)</i>	<i>750</i>	<i>-</i>	<i>ADEME 2008</i>
<i>Taux de remplissage moyen TPE (p.km/v.km)</i>	<i>17</i>	<i>-</i>	<i>La Fabrique de la Cité</i>
<i>Emissions TPE par p.km (gCO₂/p.km)</i>	<i>44</i>	<i>9</i>	<i>Base Carbone ADEME</i>
Emissions du trafic TPE IDF additionnel (MtCO ₂ /an)	0.17	0.02	-
Emissions nettes évitées IDF (MtCO ₂ /an)	0.24	0.17	-
Emissions nettes évitées vs ZMD IDF (%tCO ₂)	10.2%	7.3%	-

On constate (Tableau 31) la plus grande place de la mobilité de fort flux (incluant les flux radiaux et les forts flux non-radiaux) en IDF qu'en moyenne métropolitaine (7,9 % contre 5,5 %). On constate également (Tableau 32 et Tableau 33) la répartition en distance différente sur cette mobilité, entre l'IDF, où les distances sont plus longues, et la métropole. Ainsi, la part de la mobilité de fort flux captée par les TPE est plus grande, selon le critère distance, en IDF qu'en métropole (47 %*96 % + 46 %*100 % = 91 % en IDF contre 47 %*82 % + 46 %*97 % = 83 % en métropole). Enfin, la capacité du train étant proportionnellement plus grande en IDF qu'en métropole, l'augmentation de 30 % de cette dernière en IDF permet d'absorber proportionnellement plus de mobilité qu'en métropole (Tableau 34) : la mobilité reportable vers les TPE est reportée à 69 % vers le Bus Express et à 31 % vers le Train (contre 90 % Bus et 10 % Train dans le scénario Gi TPE).

Ainsi, au final (Tableau 35), 410 ktCO₂ sont évités chaque année, pour une population de 4,8 millions d'habitants. 3,9 Gp.km/an sont reportés de la VP vers le Bus Express et 1,8 Gp.km/an sont reportés de la VP vers le Train. Au total, 5,7 Gp.km/an sont reportés vers les TPE, ce qui correspondrait à la mobilité d'environ 650 000 personnes parcourant chaque jour ouvré une distance de 40 km, soit 13 % de la population concernée (4,8 millions d'habitants dans les ZMD franciliennes), 9 % pour le bus express et 4 % pour le train.

Si on rapporte la mobilité reportée de la VP aux TPE, au nombre d'habitants concernés, en se plaçant sur le périmètre de la mobilité pendulaire, on obtient le comparatif en Figure 55. Le multipolarisé madrilène contient 3,4 millions d'habitants.

La mobilité par habitant en IDF est couverte par les TPE autant que dans la région madrilène (2 450 p.km/hab/an en TPE en IDF contre 2 390 p.km/hab/an dans la région madrilène). La part du train, déjà plus forte en IDF qu'en région madrilène, augmente d'environ 30 %. Le Bus Express

apparaît comme un mode fort pour la région périurbaine francilienne, en atteignant 70 % de l'observé dans le périurbain madrilène.

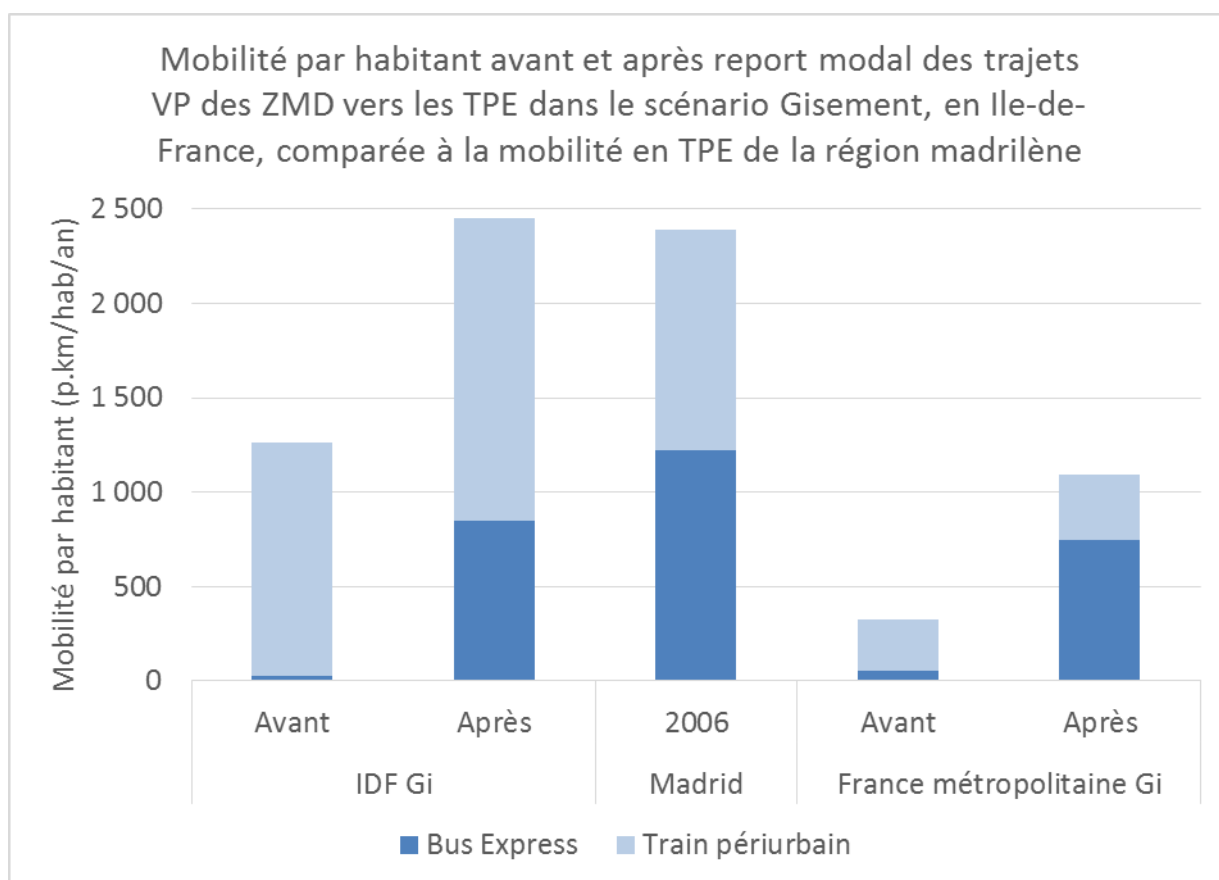


Figure 55 : Mobilité par habitant avant et après report modal de la VP sur le Bus Express et le Train, selon le scénario TPE Gisement pour l'IDF, et comparaison avec la région madrilène.

6.7. Bilan économique

Nous avons identifié les postes de dépenses qui diffèrent entre le scénario Référence et le scénario Gisement TPE, dans lequel les TPE ont été mis en place ou améliorés dans les ZMD :

Les hypothèses prises pour calculer les dépenses en jeu sont les suivantes :

- Les grands axes de chaque grande agglomération disposent :
 - d'un pôle multimodal (125 M€ HT chacun),
 - de 4 km de voie dédiée (5,8 M€/km HT) construite (et potentiellement plus en voies aménagées sur les bandes d'arrêt d'urgence ou terre-plein centraux, dont nous avons négligé les coûts dans cette étude),
 - de 4 gares autoroutières (25 M€ HT chacune).
- Les infrastructures ont une durée de vie de 30 ans.
- 12 grands axes sont considérés pour Paris, 4 pour Bordeaux, 4 pour Toulouse, 6 pour Lyon, 5 pour Marseille et 3 pour Strasbourg, soit 34 axes en tout pour les ZMD.
- La flotte de bus nécessaire est calculée ainsi :
 - On supposant une vitesse commerciale moyenne pour les Bus Express de 50 km/h, et que les bus circulent 3h le matin et 3h le soir. Chaque bus parcourt donc en

moyenne $50 \times 6 = 300$ km chaque jour ouvré, soit 75 000 km/an. La mobilité captée par les Bus Express dans ce scénario est de 16,8 Gp.km/an, soit, pour un taux de remplissage moyen de 17 p.km/v.km, 990 Mv.km/an. Il faut donc environ $990 \text{ m} / 75\,000 = 13\,200$ cars pour assurer cette mobilité. Chaque car coûte 208 000 € HT (Carbone 4 / La Fabrique de la Cité, 2015), et a une durée de vie de 10 ans.

- Chaque car est conduit par un actif 250 jours ouvrés par an, chaque actif travaillant 220 jours par an, soit $11\,492 \times 250 / 220 = 15\,000$ conducteurs.
- On suppose un nombre de salariés équivalent au nombre de conducteurs pour gérer l'exploitation des flottes de bus (gestion administrative, commerciale, maintenance), soit 15 000 salariés.
- On suppose l'ensemble des salariés rémunérés à 2 000 €/mois net, soit 52 000 €/an en tenant compte des charges sociales.
- Les bus consomment en moyenne 30 L/100 km. Les déplacements commerciaux des bus représentent 990 Mv.km/an, auxquels on ajoute 20 % de haut le pied¹¹. La consommation totale annuelle de la flotte est donc de $990 \text{ m} \times 1,20 \times 30 \times 10^7 = 360 \text{ ML/an}$.
- Un centre de maintenance par axe est construit, composé d'un parking pouvant accueillir la flotte de bus de l'axe considéré en fin de journée (soit $13\,200 / 34 = 390$ bus à accueillir) ainsi qu'un atelier de maintenance. On suppose le coût d'un tel centre de maintenance de 35 M€ HT, et la durée de vie de ces centres de 15 ans.
- Le parc de trains périurbains est remplacé par des rames à haute capacité, à hauteur de 12 M€ HT par nouvelle rame (Région Ile-de-France, 2017), pour environ 1 300 rames ; la durée de vie des rames est estimée à 30 ans.

Par exemple, pour Marseille, ces hypothèses correspondent à 50 lignes de bus express et 20 km de voies dédiées nouvellement construites. En comparaison, l'agenda mobilité d'Aix-Marseille Provence (Métropole Aix-Marseille Provence, 2016) prévoit une dizaine de lignes de bus express et une centaine de kilomètres de voies dédiées d'ici 2025.

L'augmentation de la durée de vie de la VP des ménages et la moindre consommation de carburant par les ménages sont comptabilisés comme pour les scénarios Covoiturage (voir section 7.7), avec une valeur de réduction du trafic local 2026 de 14 % (soit 10 % du trafic global).

La réduction d'entretien de la voirie induite par le moindre trafic VP est considérée comme négligeable dans cette étude (Baaj, 2012).

Les résultats sous ces hypothèses sont détaillés dans le Tableau 36.

Les TPE, en scénario Gisement, induit un bénéfice par rapport au scénario Référence d'environ 800 millions € chaque année dans les ZMD.

Les postes de dépense principaux sont dus au renouvellement du matériel roulant ferré, à l'acquisition des flottes de Bus Express et à leur opération (ressources humaines, carburant). Les dépenses liées aux infrastructures autoroutières sont du même ordre, mais plus faibles que celles liées au matériel roulant.

Ces dépenses sont plus que compensées par les économies faites par un moindre usage de la VP et par une consommation de carburant moindre.

L'estimation des dépenses du système TPE est très sensible :

¹¹ Tout déplacement non commercial d'un véhicule sur le réseau, tels les déplacements entre le centre de maintenance et la route commerciale.

- Au prix du carburant et à la consommation unitaire moyenne du parc de VP. Plus ces prix sont élevés, plus le système TPE est rentable pour la société.
- Au prix des VP neuves. Plus les prix sont élevés, plus le système TPE est rentable pour la société.

Tableau 36 : Les différents postes de dépenses du scénario TPE Gisement. La colonne « Coût total S' (M€) » est calculée en multipliant la colonne « Coût unitaire (€) » par la colonne « Nombre d'unités dans S' ». Le coût total S' est ensuite divisé par la durée de vie pour obtenir le coût à l'année de S'. Pour les types de modification « Modif » (deuxième colonne), le coût à l'année de Sref est calculé tel que décrit dans la section 7.7.2. Pour les types de modification « Création », le coût à l'année de Sref est nul, ce poste de dépense n'existant pas dans le scénario de Référence.

Élément différent entre S' et Sref	Type de modification	Coût unitaire HT (€)	Unité	Nombre d'unités dans S'	Unité	Coût total S' (M€)	Durée de vie (an)	Coût à l'année S' (M€)	Coût à l'année Sref (M€)
Pôles intermodaux autour des grandes agglomérations	Création	125 000 000	€/pôle	34	pôles	4 250	30	142	-
Aménagement des voies rapides autour des grandes agglomérations	Création	5 833 333	€/km	136	km	793	30	26	-
Gares autoroutières	Création	25 000 000	€/gare	136	gares	3 400	30	113	-
Parc de bus	Création	208 333	€/car	13 160	cars	2 742	10	274	-
Centres de maintenance	Création	35 000 000	€/centre	34	centres	1 190	15	79	-
Ressources humaines gestion bus	Création	51 820	€/an/salarié	29 910	salariés	1 550	1	1 550	-
Consommation en essence des bus	Création	0,94	€/L	355 330 450	L/an	333	1	333	-
Renouvellement du parc de trains périurbains	Création	12 254 902	€/rame	1 260	rames	15 441	30	515	-
Augmentation durée de vie VP	Modif	20 833	€/VP	17 465 281	VP	363 860	12,8	28 413	31 535
Moins de carburant pour les ménages	Modif	0,94	€/L	5 720 076 996	L	4 623	1,0	4 623	5 363
						Total annuel (M€)		37 490	38 318
						Surcoût total annuel (M€)		- 828	

Chapitre 7 - Covoiturage

Le développement d'un système de covoiturage efficace a trois effets : le plus évident est l'augmentation du taux de remplissage moyen des voitures; le second est un effet de report modal des autres modes vers la voiture; et le dernier est de permettre certains trajets qui n'auraient pas été possibles sans le système de covoiturage (effet d'induction). L'objectif de ce chapitre est d'estimer la part des trajets covoiturables, et de calculer les taux de remplissage correspondants, en posant l'hypothèse d'un système de covoiturage performant et accessible à tous en 2026. Notre objectif est d'estimer les émissions de CO₂ évitées, en nous appuyant sur l'augmentation des taux de remplissage. On suppose ici que l'effet de report modal et la création de nouvelles mobilités, sont négligeables. Ils sont estimés respectivement à 3 % et 7 % dans l'étude ADEME sur le covoiturage courte-distance (ADEME, 2015).

7.1. Etapes de calcul

Nous supposons d'abord que les covoitureurs appartiennent à une communauté, autrement dit, qu'ils ont quelque chose en commun qui les relie (et, accessoirement, contribue à réduire la réticence à partager les trajets). Dans le cas des déplacements domicile-travail (DT), la communauté est un groupement de lieux de travail situés à proximité les uns des autres. Dans le cas de tous les autres motifs de déplacement, la communauté est la commune de résidence.

Le taux de remplissage dépend du nombre de personnes de chaque communauté qui se déplacent au même moment et sur un même secteur géographique, et de la motivation de ces personnes à covoiturer. On discernera donc plusieurs taux de remplissage, correspondant aux différents scénarios motivationnels et aux différents motifs.

7.1.1. Vue générale

Les étapes de calcul menant au taux de remplissage relatif à une catégorie de trajets sont schématisées sur la Figure 57.

Partant d'une communauté initiale (par exemple un groupement d'établissements d'entreprises) qui génère des trajets dans une fenêtre de temps Δt (les « **trajets initiaux** » de la Figure 57, nommés par la suite **TI**), on détermine dans un premier temps la part des trajets covoiturables selon des critères de motivation et de chaînage (les « **trajets covoiturables** », nommés par la suite **TC**). On se place alors à un instant t de la fenêtre de temps Δt . Parmi les trajets covoiturables, on calcule un sous-ensemble dont les départs se font autour de l'instant t , au sein d'une fenêtre temporelle FT_t (on obtient alors les « **covoitages potentiels** », **CP_t**). **CP_t** représente donc l'ensemble des trajets qui peuvent être partagés au sein de cette fenêtre FT_t autour de l'instant t . Ce sont les trajets qui partagent le même moment de départ ou d'arrivée mais dont on ne sait pas si le détour à faire pour covoiturer est acceptable. On a par conséquent, en notation ensembliste et à chaque instant t : $TI \supset TC \supset CP_t$ (voir Figure 56).

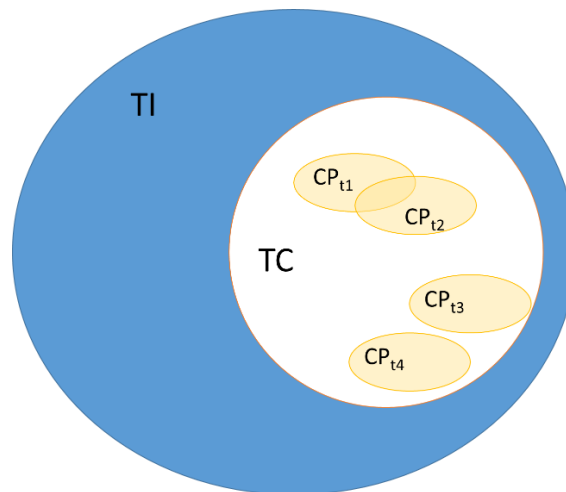


Figure 56 : Représentation des ensembles de trajets tels que définis dans ce rapport. TI est l'ensemble des trajets initiaux. TC est l'ensemble des trajets covoiturables. Les CP_t sont les ensembles des covoiturages potentiels, pour différents instants t , dont les départs sont faits au sein d'une fenêtre de temps FT_t autour de t . L'union des CP_t intégrés sur la fenêtre temporelle Δt sur laquelle tous les TI sont générés, est égale à l'ensemble TC. On peut imaginer CP_t balayant exactement TC avec t évoluant sur cette fenêtre temporelle Δt .

Enfin, on estime le taux de remplissage moyen $\tau_{r,t}$, qu'il est possible d'obtenir parmi les trajets de CP_t en tenant compte des contraintes géographiques (le détour à faire pour covoiturer est-il acceptable ?). Ce taux de remplissage est estimé en comptabilisant le nombre de VP requises pour transporter les trajets de CP_t , puis en divisant le nombre de trajets dans CP_t par le nombre de VP requises. On suppose que les CP_t contiennent tous le même nombre de covoiturages potentiels, quelle que soit l'instant t dans Δt et que la répartition géographique de ces trajets est indépendante du temps. Concrètement, cela revient à supposer que dans la fenêtre de temps contenant tous les TI, la fréquence des trajets générés est constante (autrement dit, les pics de mobilité sont négligés, ce qui nous mène à réduire le potentiel simulé du covoiturage par rapport à la réalité qui connaît des pics).

Sous ces hypothèses, le taux de remplissage $\tau_{r,t}$ est constant dans le temps sur la fenêtre temporelle Δt , et est donc applicable à l'ensemble des trajets covoiturables TC. Pour prendre en compte ces hypothèses simplifiées, les CP_t et $\tau_{r,t}$ sont désignés respectivement sous les sigles CP et τ_r .

Ce taux prend donc en compte de manière globale la possibilité qu'a chacun de trouver un covoitreur en fonction de sa localisation géographique et de ses horaires de trajets.

Quant aux autres trajets (ceux qui sont dans l'ensemble TI mais hors de l'ensemble TC), réalisés par des personnes non motivées par le covoiturage, ils conservent leur taux de remplissage moyen habituel.

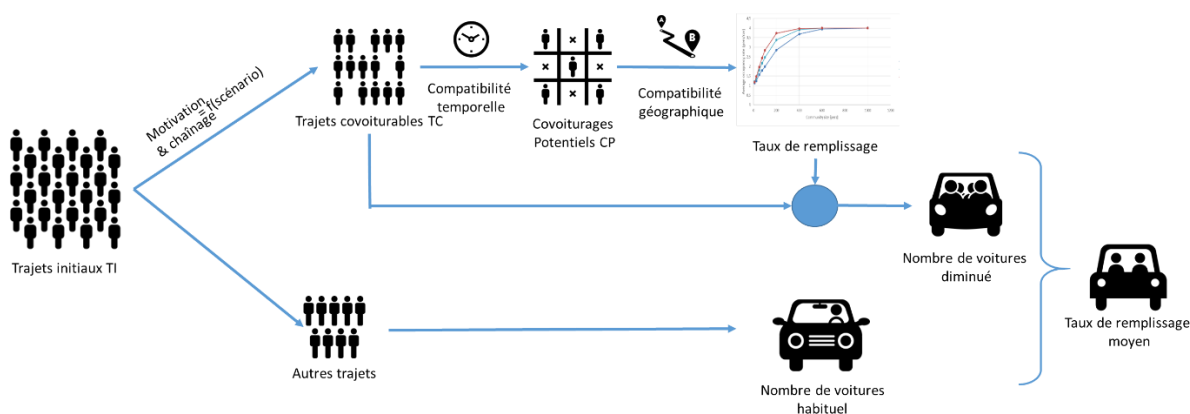


Figure 57 : Etapes de calcul menant d'une population au taux de remplissage moyen de cette population.

De manière plus détaillée, voici les étapes effectuées :

Déterminer les communautés considérées (section 7.1.2) : définition des communautés génératrices des trajets initiaux TI.

Déterminer la motivation des membres de la communauté, le chaînage des trajets et la compatibilité temporelle entre les trajets (voir section 7.1.3) : cette étape permet de ne garder que les covoiturages potentiels (CP) parmi les trajets initiaux. Dans les trois scénarios, on estime la proportion des TI qui sont covoiturables en plusieurs étapes :

- On détermine tout d'abord la motivation des membres de la communauté à covoiturer chaque catégorie de trajet. Cette motivation est de 100 % dans le scénario « Gi », et est basée sur des estimations d'experts dans les scénarios « Développement ».
- On détermine ensuite la part des p.km qui sont faits dans le cadre de chaînages. Cette part des p.km est supposée non-covoitable pour des raisons pratiques d'organisation du covoiturage sur plusieurs motifs consécutifs. En effet, le modèle de covoiturage proposé repose sur la mise en relation des mêmes covoitureurs pour le trajet aller et le trajet retour, excluant les trajets chaînés. La prise en compte de ces deux facteurs (motivation et chaînage) donne la part des trajets covoiturables TC dans les trajets initiaux TI.
- Enfin, une équation de compatibilité temporelle entre les trajets covoiturables TC est appliquée pour obtenir les covoiturages potentiels CP en se donnant une fenêtre temporelle FT.

Déterminer la compatibilité géographique entre les covoiturages potentiels (voir section 7.1.4) en tenant compte de la taille (en nombre de trajets) des différentes communautés de trajets déterminées lors des deux premières étapes (les CP). Le résultat est le taux de remplissage moyen sur les TC.

Intégrer les résultats sur l'ensemble des communautés considérées (section 7.1.5) afin d'obtenir le taux de remplissage *moyen* dans les ZMD pour les trois scénarios, et pour les deux types de communautés.

Ces étapes sont détaillées ci-dessous.

7.1.2. Communautés considérées

Des travaux de recherche et de traitement de données, permettent d'établir un ordre de grandeur des tailles des communautés formées dans le cadre du système de covoiturage. Deux types de communautés sont identifiés : les communautés de travailleurs, constituées de personnes co-localisées au sein de groupements d'établissements (7), et les communautés des communes situées en ZMD

(7.1.2.2). L'absence de données disponibles sur les groupements d'établissements (INSEE 2015), conduit à réaliser un traitement spécifique des données de taille d'établissements afin d'établir des hypothèses sur ces groupements et de déterminer les tailles des différentes communautés d'établissements co-localisés.

7.1.2.1 Etablissements d'entreprises

Les lieux de travail sont désignés sous le terme d'«établissements». Il s'agit de la destination des trajets domicile-travail. L'unité pertinente à prendre en compte à des fins de covoiturage, est le groupement géographique d'établissements. C'est en s'appuyant sur la distribution des salariés par taille d'établissement (voir Figure 58, basée sur (INSEE, 2015)), qu'une estimation du taux de covoiturage atteignable pour chaque groupement et chaque scénario, peut être établie.

L'illustration ci-après, apporte une lecture de cette distribution sur l'ensemble du territoire français. Par la suite, nous conserverons ces proportions en la ramenant à l'échelle des territoires périurbains.

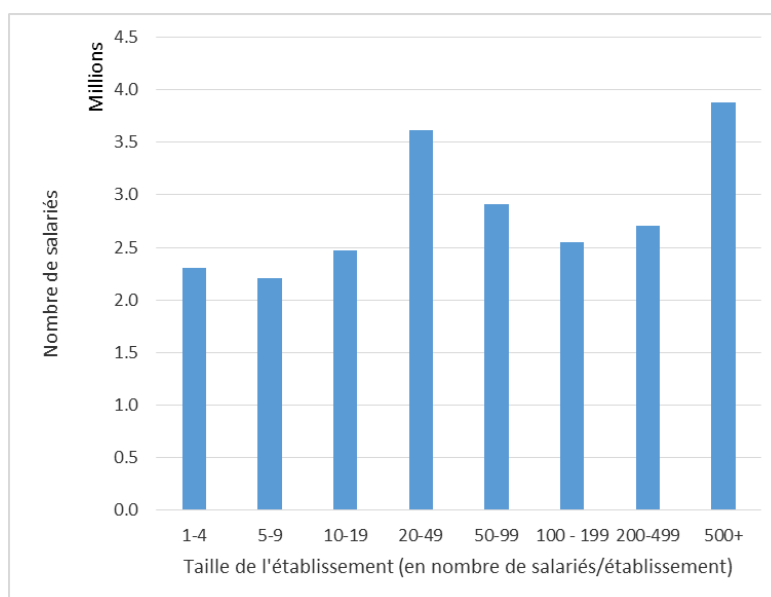


Figure 58 : Distribution du nombre de salariés par taille d'établissement en France. Clé de lecture : en France, on dénombre 3,6 millions de salariés travaillant dans des établissements comprenant entre 20 et 49 salariés.

Cette distribution ne tient pas compte des regroupements géographiques entre établissements (le plus souvent réunis dans des zones d'activités, des pépinières d'entreprises, etc.).

Nous avons donc posé les postulats suivants (voir détails dans le Tableau 37) :

- 50 % des établissements de moins de 4 personnes sont localisés à proximité immédiate des salariés (les salariés ne se déplacent pas).
- 80 % des établissements de moins de 20 salariés sont regroupés entre eux ou avec de plus grands établissements par groupes de 8 à 20 établissements (dans les centre-bourgs, à proximité des supermarchés et des hypermarchés).
- 75 % des établissements de 20 à 49 salariés sont regroupés entre eux ou avec de plus grands établissements, par groupes de 6 à 25 établissements (dans les centre-bourgs, à proximité des supermarchés et des hypermarchés).
- 50 % des établissements de 50 à 199 salariés sont regroupés entre eux, par groupes de 6 établissements (dans les zones d'activité).
- Les autres établissements sont géographiquement isolés.

Tableau 37 : Hypothèses de groupement des établissements selon différents types de groupements. Clé de lecture : les groupements de type « centre-bourg » regroupent 3 établissements de 1 à 4 salariés, 3 établissements de 5 à 9 salariés, et 2 établissements de 10 à 19 salariés. 30 % des établissements de ces tailles sont inclus dans des groupements de ce type (ligne « Portée »).

Taille établissement	Hypothèses de groupement			
	Centre-bourg	Grande surface	Centre commercial	Zone industrielle
Nb sal 1-4	3	5	10	0
Nb sal 5-9	3	5	5	0
Nb sal 10-19	2	1	5	0
Nb sal 20-49	0	0	5	2
Nb sal 50-99	0	1	0	2
Nb sal 100 - 199	0	0	0	2
Nb sal 200-499	0	0	0	0
Nb sal 500+	0	0	0	0
Portée	30%	25%	25%	50%

La prise en compte de ces postulats permet d'établir un nouveau schéma de la distribution des salariés par taille d'établissements (Figure 59).

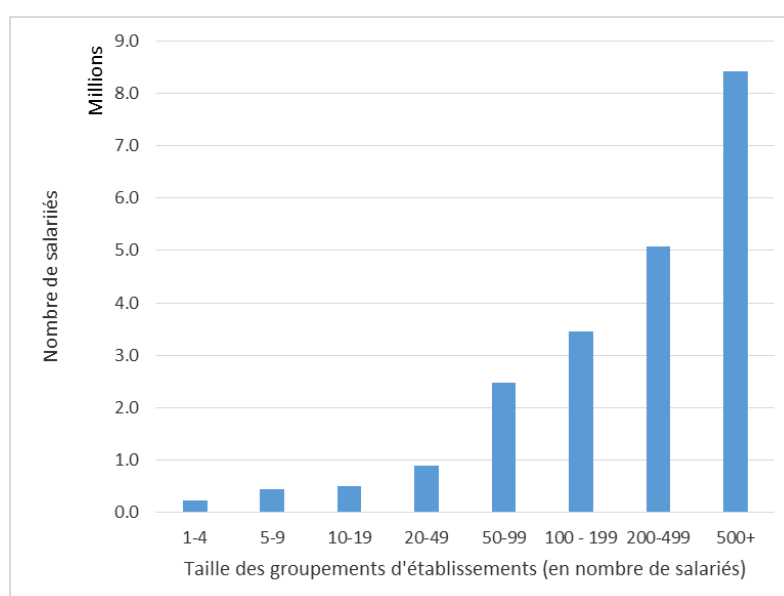


Figure 59 : Distribution du nombre de salariés par taille des regroupements d'établissements après prise en compte des postulats de regroupement.

Estimation du nombre de trajets générés par ces communautés :

- On suppose que tous les salariés font exactement 2 trajets chaque jour ouvré (cinq jours par semaine). Dans les faits, surtout dans les zones peu denses, une part non négligeable des salariés rentrent chez eux pour la pause-déjeuner (CGDD, 2014). Une étude plus poussée pourrait les prendre en compte.
- On suppose que chaque salarié effectue ses trajets dans deux tranches horaires de trois heures chacune : 7h00 à 10h00 pour aller au travail, et 17h00 à 20h00 pour rentrer du travail). Ce postulat se base sur le travail d'évaluation du potentiel du covoiturage pour les déplacements DT (CGDD, 2014), qui a fait des observations des horaires de ces déplacements. Une étude plus poussée pourrait prendre en compte l'augmentation des contrats à temps partiels et des horaires atypiques (IAU, 2016), observée actuellement, qui diminue les possibilités de

covoiturage au sein de la communauté de travailleurs, mais qui pourrait augmenter les possibilités de covoiturage au sein de la communauté de la commune d'habitation. Dans notre modèle, les trajets effectués par les actifs qui n'ont pas de lieu de travail habituel sont inclus dans le motif « professionnel » et s'inscrivent par conséquent dans la communauté de la commune d'habitation lorsqu'ils sont covoiturés (et non pas celle des travailleurs).

7.1.2.2 Communes

Dans notre modèle, la communauté de partage des trajets pour les motifs autres que le DT sont les communes. Nous nous sommes appuyés sur la taille des communes appartenant aux ZMD (Figure 60, basée sur (CGET, 2016)).

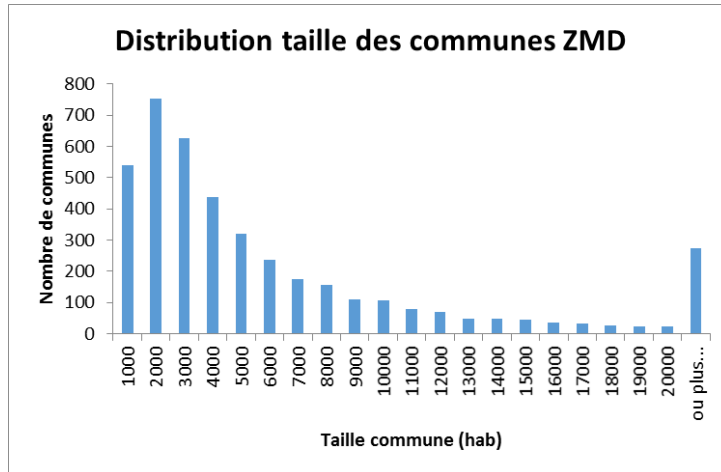


Figure 60 : Distribution des communes en ZMD par taille de population. Source : (CGET, 2016). Clé de lecture : on dénombre 626 communes dans les ZMD dont la population est comprise entre 2000 et 3000 habitants.

Afin d'estimer le nombre de trajets générés par ces communautés, nous supposons :

- que chaque personne composant ces communautés, génère 1,85 trajets par jour (nombre moyen de trajets par personne et par jour dans le périurbain élargi pour les motifs autres que le DT)
- que tous les trajets sont générés uniformément sur une plage horaire d'une durée de 14 heures. Cette hypothèse est conservatrice (elle minimise le potentiel du covoiturage) car elle néglige l'existence de pics de déplacements au cours de la journée (avant et après le travail, et le samedi).

7.1.3. Motivation, chaînage et compatibilité temporelle

La prise en compte de la motivation à covoiturer, du chaînage, permet d'établir un **modèle de compatibilité temporelle** entre les trajets, qui se résume par les équations suivantes, applicables à chaque communauté :

$$Traj_{CP} = Traj_{TC,\Delta t} * FT / \Delta t \quad (13)$$

$$Traj_{TC,\Delta t} = Pop * T_{CC,\Delta t}(motif, jr) * P_{TC} \quad (14)$$

$$P_{TC} = P_{mot} * P_{ch} \quad (15)$$

L'équation (13) permet d'obtenir le nombre de covoiturages potentiels CP sur une fenêtre temporelle FT au sein de la communauté, en tenant compte de la flexibilité temporelle moyenne des covoitureurs :

$Traj_{CP}$ représente le nombre de covoiturages potentiels (CP, c'est-à-dire les trajets covoiturables et compatibles temporellement).

$Traj_{TC,\Delta t}$ est le nombre de trajets covoiturables TC générés par la communauté de covoitureurs sur la plage de temps Δt .

Δt est la plage temporelle continue qui contient la grande majorité des trajets considérés. Par exemple, nous pouvons considérer que les déplacements domicile-travail vers un groupement d'établissements, sont majoritairement réalisés sur une plage de 3 heures le matin.

FT est la fenêtre temporelle moyenne dans laquelle les membres de la communauté de covoitureurs acceptent de décaler leur départ. Par exemple, une fenêtre temporelle de 1 heure signifie que chacun accepte de décaler son départ d'une demi-heure, soit plus tôt, soit plus tard.

Cette formule suppose donc que les trajets sont effectués de manière uniforme sur la plage temporelle Δt , autrement dit qu'il n'y a pas de pic de trajets au cours de cette plage, et qu'il n'y a aucun trajet en dehors de cette plage.

L'équation (14) prend en compte la motivation de la communauté considérée. Elle permet d'établir le nombre de trajets covoiturables TC, $Traj_{TC,\Delta t}$, générés par une communauté sur une fenêtre de temps donnée Δt .

Pop est la taille de la communauté considérée (en nombre de personnes).

$T_{CC,\Delta t}(motif, jr)$ est le nombre de trajets générés par membre de la communauté sur la plage Δt . Ce nombre dépend du motif et du jour de la semaine considéré.

P_{TC} est la part des trajets initiaux TI covoiturables.

$Pop * T_{CC,\Delta t}(motif, jr)$ est donc le nombre total de trajets générés par la communauté considérée, P_{TC} étant un coefficient permettant de ne garder que ceux qui sont covoiturables.

L'équation (15) permet de définir P_{TC} . Ce paramètre intègre des considérations de motivation des membres de la communauté à covoiturer et de chaînage des trajets :

P_{mot} étant la part des membres de la communauté qui sont motivés par le covoiturage,

P_{ch} étant la part des trajets considérés comme étant covoiturables selon le critère « chaînage » (c'est-à-dire, ici, la part des p.km parcourus sur des trajets NON-chaînés). A noter que les trajets chaînés sont supposés moins propices au covoiturage compte tenu des contraintes supplémentaires que le chaînage engendre pour le covoiturage.

Application sur un ensemble de 1000 salariés qui partagent le même lieu de travail

Ces salariés génèrent un trajet domicile-travail le matin, sur une fenêtre temporelle de 3 heures. Si on suppose de plus que 20 % de ces salariés désirent covoiturer, que 50 % des trajets restent sous une limite donnée de chaînage, et que les covoitureurs acceptent de décaler leur départ de 30 minutes pour arranger un covoiturage, le nombre de trajets covoiturables (24) peut être déterminé par l'application des équations (13), (14) et (15), avec les données suivantes :

$$P_{mot} = 20\% \quad (16)$$

$$P_{ch} = 50\% \quad (17)$$

$$\text{Donc : } P_{TC} = 0,2 * 0,5 = 10\% \quad (18)$$

$$Pop = 1000 \text{ pers} \quad (19)$$

$$T_{CC,\Delta t} = 1,0 \text{ traj/pers} \quad (20)$$

$$\text{Donc : } Traj_{TC,\Delta t} = 1000 * 1 * 0,10 = 100 \text{ traj} \quad (21)$$

$$\Delta t = 3 \text{ h} \quad (22)$$

$$FT = 1 \text{ h} \quad (23)$$

$$\text{Donc : } Traj_{CP} = 100 * \frac{1}{3} = 33 \text{ traj} \quad (24)$$

Autrement dit, chaque matin de jour ouvré, pendant 3 h, cette communauté de salariés peut partager 33 trajets sur chaque fenêtre temporelle d'une heure.

7.1.4. Compatibilité géographique

La compatibilité géographique des covoiturages potentiels est calculée à l'aide d'une simulation de type Monte Carlo. Les simulations Monte Carlo ont pour but de simuler des processus ayant une variabilité.

Dans notre cas, la variabilité est celle de l'agencement spatial des territoires constitutifs des ZMD, autrement dit, la distribution aléatoire des origines ou des destinations. En identifiant aléatoirement un grand nombre de situations différentes, on obtient une distribution des possibilités de covoiturage dans un panel de situations. Le modèle est simplifié aux situations où la destination (ou l'origine) du covoiturage est partagée, reposant sur l'idée de communautés partageant un lieu de vie (leur lieu de travail ou leur lieu d'habitation). Ainsi, les résultats obtenus ne tiendront pas compte des trajets qui ne partagent ni leur origine ni leur destination.

La simulation commence par la génération aléatoire, d'un ensemble de points origine (par exemple, les logements sont représentés par des croix bleues sur la Figure 61), par rapport à un point destination (par exemple, un groupement d'établissements d'entreprises : point central sur la figure). A partir de cette distribution spatiale de trajets, un algorithme détermine les possibilités de covoiturage, et en déduit un taux de remplissage moyen pour les covoiturages potentiels.

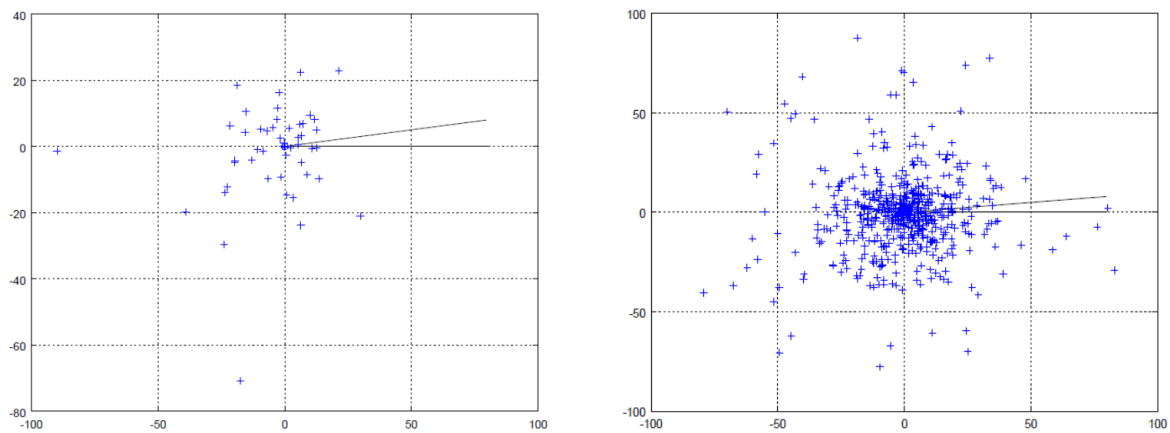


Figure 61 : Représentation de 2 situations différentes issue d'hypothèses aléatoires : l'une est un tirage de 50 covoiturages potentiels pour atteindre la destination commune ; l'autre est un tirage de 600 covoiturages potentiels pour atteindre la destination commune. Les trajets dont l'origine est dans l'angle en noir sont considérés comme pouvant être covoiturés. L'échelle est en km.

Les deux paramètres importants de cette simulation sont :

- le nombre de trajets pris en compte (50 sur la figure de gauche, 600 sur la figure de droite),

- la distance maximale de détour acceptable par le conducteur et/ou le passager pour se rejoindre et covoiturer ensemble (modélisée par l'angle sur la figure).

Dans les détails, voici les étapes successives effectuées par l'algorithme :

- **Initialisation des paramètres** : cette étape fixe le nombre de covoiturages potentiels, et la valeur de la distance maximale de détour pour covoiturer. Pour plus de simplicité, cette distance est exprimée en fonction de la distance à la destination. On suppose donc que plus le trajet à faire est long, plus l'acceptabilité d'un long détour pour covoiturer est grande. Plusieurs simulations ont été réalisées en fixant des valeurs différentes pour ces paramètres : des nombres de trajets allant de 15 trajets covoiturables à 1000 trajets covoiturables ont été balayés. Des distances maximales de détour, exprimées sous forme d'angles (appelés Angles de covoiturage), respectivement de 6,6 %, 10 % et 13,3 %, ont été simulées. Autrement dit, pour une distance à parcourir de 60 km, des détours maximums de 4 km, 6 km et 8 km ont été simulés.
- **Tirages aléatoires** : un ensemble de covoiturages potentiels est pris au hasard autour du point de destination (en suivant une distribution uniforme angulaire sur la plage $[0^\circ, 360^\circ]$). Il n'est pas utile de déterminer les distances à la destination, étant donné que le critère de covoiturage est un angle. Pour les illustrations (Figure 61), c'est la distribution en distance observée dans le Périurbain qui est utilisée.
- **Mesure des possibilités de covoiturage** : chaque trajet est analysé ; si d'autres trajets se trouvent dans le même angle de covoiturage, l'ensemble est sélectionné pour être partagés, et une voiture leur est allouée. Le covoiturage étant limité à 4 personnes, le nombre maximal de trajets à réunir est de 4. Si le trajet est seul dans son angle, il lui sera alloué une voiture à lui seul (autrement dit, le covoiturage est considéré comme étant impossible pour ce trajet). Les trajets assignés à une voiture sont alors supprimés de la liste de trajets, et le prochain trajet sur la liste est à son tour analysé.
- **Calcul du taux de remplissage moyen** : dès lors que l'ensemble des trajets sont alloués à une voiture, l'algorithme calcule le nombre total de voitures nécessaires à l'ensemble des trajets. En divisant le nombre de trajets couverts par le nombre de voitures, on obtient le taux de remplissage moyen pour ces trajets.
- **Itération** : Les 3 étapes précédentes sont répétées 10 fois afin de moyenner les résultats dans 10 distributions aléatoires de points différentes.

Ce modèle de covoiturage repose sur de multiples hypothèses, résumées ci-dessous. La plupart des hypothèses prises sont conservatrices puisqu'elles *réduisent* les possibilités de covoiturage par rapport à ce qu'on observerait dans des situations réelles.

- Les trajets covoiturés partagent une même destination et/ou une même origine. Cette hypothèse réduit les possibilités de covoiturage en se restreignant aux trajets partageant la même origine ou la même destination (alors que le covoiturage pourrait se faire sur un segment au milieu du trajet)
- La rencontre entre les covoitureurs peut se faire partout (aucune contrainte sur les lieux de rencontre n'est fixée, sachant que dans les faits, des contraintes restent incontournables : impossible par exemple de s'arrêter le long de l'autoroute pour prendre un covoitureur). Ce postulat requiert un réseau d'aires/points de covoiturage dense.
- Une voiture est accessible pour l'ensemble des covoitureurs qui réalisent le plus long trajet (les conducteurs). Environ 7 % des ménages du périurbain élargi n'ont pas de voiture (traitement ENTD 2008).
- Les covoiturages ne peuvent dépasser 4 personnes par véhicule.

- Le territoire n'est pas axialisé : sont considérés des trajets à vol d'oiseau. Autrement dit, l'effet d'agrégation des flux du réseau de voiries n'est pas pris en compte ici, ce qui réduit les potentiels de covoiturage.
- Le territoire n'est pas polarisé. Autrement dit, les villes/villages, groupements de commerces, spécialisation du territoire, n'ont pas été pris en compte dans la simulation, ce qui réduit aussi les possibilités de covoiturage.

Le nombre de trajets à assurer par le système de covoiturage ainsi que l'angle de covoiturage ont été manipulés afin d'observer leurs effets. Nous constatons ainsi, que plus le nombre de trajets est grand, plus le taux de remplissage obtenu l'est aussi. De même, le taux de remplissage augmente avec la dimension de l'angle de covoiturage (voir Figure 62).

Cette étude prendra en compte un angle de covoiturage de 10 %, en cohérence avec les détours observés parmi les covoitureurs courte distance utilisateurs d'aires de covoiturations (ADEME, 2015).

La loi obtenue, nommée $f_{CG}(Nb_{CP})$ (compatibilité géographique, fonction du nombre de covoiturations potentiels) est représentée en rouge sur la Figure 62.

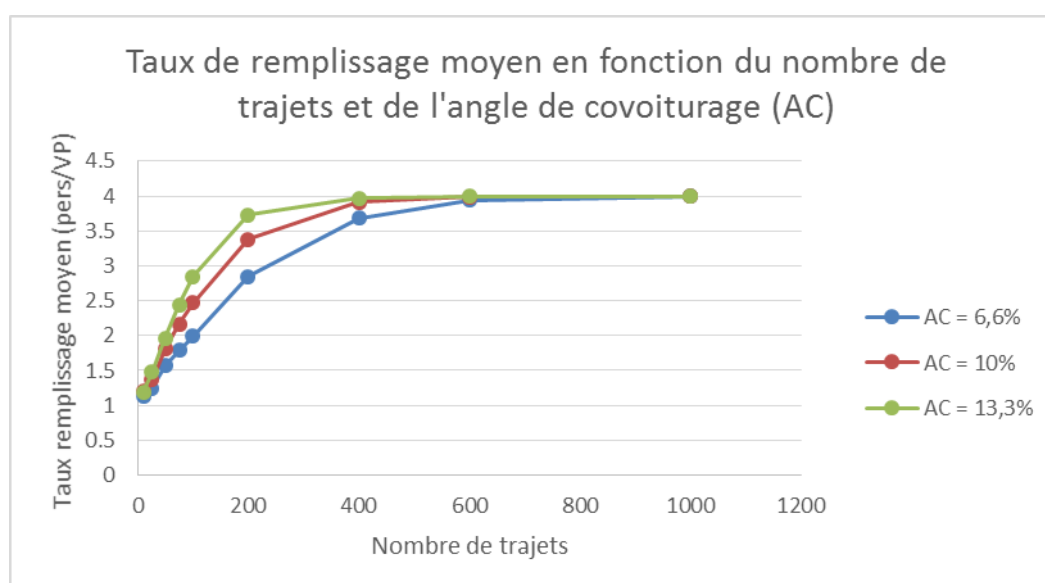


Figure 62 : Résultats de la simulation faisant varier le nombre de trajets à couvrir et l'angle de covoiturage (AC).

Cette loi ne prend pas en compte le covoiturage informel existant, car il a été implicitement supposé dans le modèle une situation de départ dans laquelle le taux de remplissage est égal à 1 traj/VP (le tirage aléatoire des covoiturations potentiels est un tirage angulaire uniforme, négligeant le fait que certains trajets sont déjà partagés). Par exemple, les cas de covoiturage déjà observés entre personnes du même ménage sont négligés par ce modèle. Ces covoiturations expliquent pourtant en grande partie les taux de remplissage observés sur ces territoires. Cette simplification du modèle a d'autant moins d'impact que le nombre de CP est important. A contrario, pour des nombres de CP faibles (par exemple dans les cas de petites communautés), cette simplification a des effets sensibles.

On peut cependant prouver (voir annexe 9) que pour les communautés de covoiturations potentiels de moins de 200 CP, le taux de remplissage moyen tenant compte du taux de remplissage déjà observé est correctement représenté par :

$$\tau_{moy} = \tau_{obs} + (\tau_{MC} - 1) = \tau_{obs} + \Delta\tau_{MC} \quad (25)$$

τ_{moy} est le taux de remplissage moyen en présence du covoiturage observé, τ_{obs} le taux de remplissage en trajet/VP observé avant mise en place du système de covoiturage et τ_{MC} le taux de remplissage obtenu par la loi $f_{CG}(Nb_{CP})$ à partir du nombre de trajets considéré Nb_{CP} .

L'écart à 1 du taux de remplissage obtenu par le modèle Monte Carlo, $\Delta\tau_{MC}$, sera donc interprété comme une *augmentation* du taux de remplissage mesuré sur le terrain, pour les communautés de CP de moins de 200 CP. Pour les communautés de plus de 200 CP, τ_{MC} sera directement interprété comme le taux de remplissage après la mise en place du système de covoiturage.

On utilisera donc τ_{moy} de l'équation (13) lorsque les communautés de CP sont de petites tailles (<200 trajets), et on utilisera directement τ_{MC} lorsque les communautés sont plus grandes. Par exemple, pour une communauté de 100 trajets DT vers un groupement d'établissements, sur laquelle un taux de remplissage de 1,1 traj/VP est observé avant la mise en place du covoiturage, on aura :

$$\tau_{obs} = 1,1 \text{ traj/VP} \quad (26)$$

$$\tau_{MC} = f_{CG}(100) = 2,5 \text{ traj/VP} \quad (27)$$

$$\tau_{moy} = \tau_{obs} + \Delta\tau_{MC} = 1,1 + (2,5 - 1) = 1,1 + 1,5 = 2,6 \text{ traj/VP} \quad (28)$$

On considère donc que le taux de remplissage moyen obtenu après mise en place du système de covoiturage dans cette communauté est de 2,6 traj/VP (au lieu de 2,5 traj/VP sans la correction tenant compte du taux de remplissage observé avant mise en place du système).

Les communautés initiales étant décrites et les modèles de compatibilité détaillés, le taux de remplissage moyen pour les différents scénarios peut être calculé.

7.1.5. Intégration des résultats

Les étapes précédentes ont montré comment le taux de remplissage moyen pour une communauté donnée, $\tau_{moy,com}$ était calculé. Ces calculs peuvent être effectués sur une communauté de covoiturage pour les motifs autres que le DT (la commune de Rodez par exemple, qui s'inscrit dans les ZMD). L'étape qui suit permet d'intégrer de manière simplifiée les résultats pour toutes les communes des ZMD. La simplification consiste à calculer un taux de remplissage pour toute une *classe* de taille de communauté. Par exemple, on ne considèrera pas la communauté de covoiturage potentiel de Rodez (3 086 trajets dans chaque fenêtre temporelle d'une heure pour les motifs autres que le DT, dans le scénario Gisement) mais l'ensemble des communautés de covoiturage potentiel dont la taille est comprise entre 3 050 trajets et 3 100 trajets dans les ZMD (soit 14 communautés dans les ZMD).

On dispose en effet des données de distributions suivantes :

- Nombre de salariés par taille de groupement d'établissements (en nombre de salariés, voir Figure 59)
- Nombre de communes par taille de commune (en nombre d'habitant, voir Figure 60)

Les équations suivantes sont utilisées pour calculer le taux de remplissage moyen τ_{moy} à partir de la distribution des CP par classe de taille d'ensemble de CP, et de la loi donnant le taux de remplissage moyen en fonction du nombre de covoiturages potentiels :

$$T_i = t_i * freq_i \quad (29)$$

$$\tau_{moy} = \frac{\sum T_i}{\sum VP_i} = \frac{\sum T_i}{\sum \frac{T_i}{\tau_i}} = \sum T_i * \left(\sum \frac{T_i}{f(t_{i-1})} \right)^{-1} \quad (30)$$

L'indice i fait référence aux classes de taille de chaque ensemble de covoiturages potentiels.

Pour les communautés dont les motifs sont *autres que les DT*, ces classes sont définies par cinquantaine de trajets CP :

$$i_a \in \{[50.k, 50.(k+1)], k \in \mathbb{N}\} \quad (31)$$

Pour les ensembles dont les motifs sont *les déplacements DT*, ces classes sont définies ainsi :

$$i_{DT} \in \{[1,4], [5,9], [10,19], [20,49], [50,99], [100,199], [200,499], [500,+\infty]\} \quad (32)$$

t_i représente le nombre de covoiturages potentiels (donc par fenêtre temporelle choisie), c'est-à-dire la taille des communautés identifiées par l'indice i . Dans les calculs, t_i est le centre de la plage de taille i . Par exemple, $t_{[1,4]DT} = 2,5 CP$. De même, $t_{[50,100]a} = 75 CP$.

T_i est le nombre *total* de covoiturages potentiels pour les ensembles CP de taille t_i . Par exemple, $T_{[1,4]DT} \simeq 210\,000 CP$ dans le scénario Gisement. Il s'agit de la somme des tailles d'ensembles d'indice $[1,4]_{DT}$. Autrement dit, 210 000 CP appartiennent à des ensembles de 1 à 4 trajets (dans chaque fenêtre temporelle), pour le DT dans le scénario Gisement.

$freq_i$, dans l'équation (29) est le nombre d'occurrences des ensembles CP de taille t_i . Par exemple, la classe de taille $i_a = [3050,3100]$ possède $freq_{[3050,3100]a} = 14$ ensembles.

L'équation (29) est utilisée pour calculer les T_i dans le cadre des motifs autres que le DT, pour lesquels les données sont fournies en nombre d'ensembles et non pas en nombre de trajets dans ces ensembles. En effet, la donnée d'entrée pour les motifs autres que le DT est la distribution des communes par classe de taille (Figure 60), et non pas celle du nombre d'habitants total par classe de taille de commune : $T_{[3050,3100]} = 14 * 3075 = 43\,050 traj$.

VP_i représente le nombre total de voitures couvrant les T_i trajets des ensembles de taille t_i , τ_i le taux de remplissage moyen pour les CP et f la fonction donnant le taux de remplissage en fonction de la taille des ensembles de covoiturages potentiels (Figure 62, avec AC=10 %). Par exemple, pour les ensembles de covoiturages pour motifs autres que le DT de 3050 à 3100 trajets CP :

$$\tau_{[3050,3100]} = f(t_{[3050,3100]-1}) = f(3050) = 4,0 traj/VP \quad (33)$$

$$VP_{[3050,3100]} = \frac{T_{[3050,3100]}}{f(t_{[3050,3100]-1})} = \frac{43\,400}{4,0} = 10\,850 VP \quad (34)$$

τ_{moy} représente *in fine* également le taux de remplissage moyen pour les TC. En effet, nous avons supposé que ce taux se maintient au cours du temps, dans la fenêtre temporelle dans laquelle tous les TC sont effectués.

7.2. Calculs pour le scénario Gisement

7.2.1. Motivation et chaînage

Le scénario Gisement, suppose que tout le monde est motivé pour covoiturer. Autrement dit, dans l'équation (15), et sans distinction de motif : $P_{mot,Gi} = 100\%$.

Pour tous les motifs, la part des p.km parcourus dans les ZMD sur des trajets non-chaînés, est fixée à $P_{ch} = 52\%$, en cohérence avec les données de l'ENTD (CGDD, 2008). Un calcul plus précis pourrait

discriminer cette part de manière différenciée par motif (par exemple, la part des p.km fait pour le motif DT et inclus dans un chaînage, puis faire de même pour le reste des motifs). Cette valeur est indépendante des scénarios et sera donc utilisée dans les scénarios « Développement » également.

Pour le scénario « Gi » donc :

$$P_{TC,Gi} = P_{mot} * P_{ch} = 100\% * 52\% = 52\% \quad (35)$$

7.2.2. Compatibilité temporelle

Le scénario Gisement suppose que la fenêtre temporelle pour les déplacements DT comme pour les autres motifs est de 1 heure. Les individus sont donc prêts à changer leur mode d'organisation de 30 minutes pour chacun de leur trajet.

Déplacements DT : la communauté de covoitureurs est composée de personnes effectuant un trajet le matin pour aller travailler et un trajet le soir pour rentrer, chaque jour ouvré. On suppose de plus que la plage temporelle de ces trajets est de 3 heures le matin (de 7h00 à 10h00) et de 3 heures l'après-midi (de 17h00 à 20h00) (CGDD, 2014). On obtient le même nombre de covoiturages potentiels dans chaque fenêtre temporelle FT pour le trajet du matin et du soir :

$$\begin{aligned} Traj_{CP,DT,Gi} &= Pop_{DT} * T_{CC,\Delta t,DT,Gi}(motif, jr) * P_{TC,Gi} * \left(\frac{FT}{\Delta t}\right)_{DT} \\ &= Pop_{DT} * 1 * 0,52 * \frac{1}{3} = Pop_{DT} * 0,17 \end{aligned} \quad (36)$$

Dans une même fenêtre temporelle, on peut donc considérer pour les déplacements DT que le nombre de CP est égal à 0,17 fois la taille de la communauté initiale.

Pour les autres motifs, on suppose que la communauté est composée de personnes effectuant en moyenne 1,85 trajet par jour, tous les jours de la semaine (basé sur les données ENT-D dans les communes polarisées et multipolarisées (CGDD, 2008)), sur une plage horaire de 14 heures (de 7h00 à 21h00). Ces données permettent de calculer le nombre de covoiturages potentiels selon l'équation suivante :

$$\begin{aligned} Traj_{CP,A,Gi} &= Pop_A * T_{CC,\Delta t,A,Gi}(motif, jr) * P_{TC,Gi} * \left(\frac{FT}{\Delta t}\right)_A \\ &= Pop_A * 1,85 * 0,52 * \frac{1}{14} = 0,069 * Pop_A \end{aligned} \quad (37)$$

Pour les autres motifs, on peut donc considérer que le nombre de CP est égal à 0,069 fois la taille de la communauté initiale

7.2.3. Compatibilité géographique

Pour les déplacements DT, le taux de 0,17 CP/pers est appliqué à la distribution du nombre de salariés par taille de regroupements d'établissements, présentée en Figure 59, afin de calculer le taux de remplissage en s'appuyant sur l'équation (30). Compte tenu de l'absence de données précises sur les entreprises de plus de 500 salariés, nous avons été conservatifs en considérant que tous les sites de plus de 500 salariés ont exactement 500 salariés. Pour les autres catégories de taille de communauté,

nous supposons que la taille de la communauté considérée est le centre de la catégorie. On obtient ainsi la distribution représentée en Figure 63.

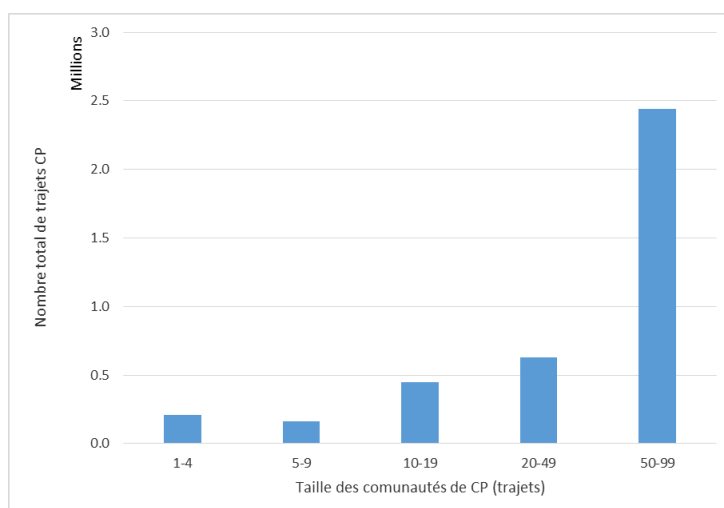


Figure 63 : Distribution des trajets CP par taille d'ensemble, pour le scénario gisement et pour le DT.

Les communautés considérées sont toutes inférieures à 200 CP. On interprète donc les résultats du modèle Monte Carlo comme une augmentation du taux de remplissage observé (équation (25)). L'équation (30) donne ensuite l'augmentation du taux de remplissage observé moyen pour la communauté de TC (ie 52 % des p.km dans ce scénario) : 0,8 p.km/v.km.

Pour les autres motifs, le taux de 0,069 CP/pers est appliqué à la distribution présentée en Figure 60, afin de calculer le taux de remplissage (voir Figure 64). Les calculs sont détaillés dans l'annexe 10.3 (équations (29) et (30)). Les communautés de CP considérées ici sont en majorité supérieures à 200 CP, les résultats de la simulation Monte Carlo sont donc interprétés comme le taux de remplissage. Le taux de remplissage moyen obtenu pour la communauté de TC (ie 52 % des p.km dans ce scénario) pour les autres motifs, est de 3,6 p.km/v.km.

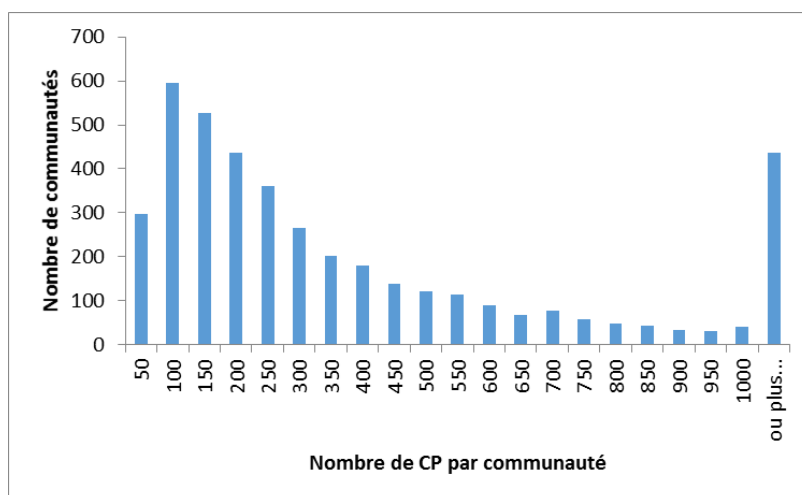


Figure 64 : Distribution des communautés de covoiturages potentiels pour les motifs autres que le DT (qui est la distribution de la Figure 60 multipliée par 0,069 CP/pers). On observe que la majorité (55 %) des communautés de CP est plus grande que 200 trajets.

7.3. Calculs pour les scénarios Développement

Pour les scénarios « Développement », une partie de la population est motivée par l'utilisation du nouveau système de covoiturage.

7.3.1. Motivation et chaînage

La motivation des individus à utiliser le nouveau système de mobilité n'est pas de 100 %, comme dans le scénario Gi, mais est une valeur déterminée par un jugement d'experts. Ce jugement d'experts est cadré par une grille analytique permettant d'explorer différentes dimensions de la probabilité qu'un trajet initial TI soit covoiturable (TC). Pour le covoiturage, les indicateurs pris en compte dans cette étude, qui permettent de qualifier un trajet covoiturable, sont les suivants : **accès à la VP** de la personne effectuant le trajet, **distance** du trajet, **motif** du trajet, **type de ménage** de la personne effectuant le trajet et si la personne effectuant le covoiturage est **conducteur ou passager**.

En se basant sur ces cinq facteurs, trois experts impliqués dans le covoiturage (Clem', OuiHop et Ecosyst'M) se sont prononcés sur la probabilité de covoiturage d'un trajet. Par simplification, les facteurs distance et motifs sont décorrélés des facteurs ménage x accès VP x conducteur/passager. Les experts ont apporté une réponse collégiale, excepté sur le facteur distance, pour lequel subsistent des désaccords. Pour ce cas particulier, nous avons établi une estimation basée sur la moyenne de celles proposées par chaque expert.

Par ailleurs, la distinction conducteur/passager a donné lieu à une moyenne sur la prédisposition à covoiturer soit en tant que passager soit en tant que conducteur. Ainsi, la probabilité que des trajets soient covoiturables (TC) au sein d'une communauté de TI ne tient pas compte des déséquilibres entre le volume de conducteurs et le volume de passagers.

Les résultats obtenus ont été normalisés sous forme de pourcentages afin d'obtenir des probabilités de covoiturage par catégorie de trajets (voir Figure 65). Les résultats bruts ainsi que la méthode de traitement des résultats pour aboutir à ces probabilités est décrite en annexe 10.2.

Accès VP (VP/ adulte du ménage)	Type de ménage					
	Célibataire +65 ans	Célibataire - 65 ans	Couple +65 ans sans enfants	Couple -65 ans sans enfants	Ménage monoparental	Couple avec enfants
0	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.5	X	X	33%	67%	X	67%
+1	33%	92%	33%	92%	75%	75%

Plage de distance (km)	Note
< 7	17%
7 à 15	29%
15 à 30	33%
30 à 50	71%
50 à 80	100%

Motif	Note (%)
Travail	100
Etudes	40
Visites	20
Professionnel	60
Achats de proximité	0
Achats hypermarché	20
Administratif	20
Santé	20
Restaurant	0
Loisirs	40

Figure 65 : Probabilités, pour différents paramètres d'un trajet, que ce trajet soit covoituré. Ces probabilités sont issues de jugements d'experts sur le comportement des individus dans le cadre du système de covoiturage proposé.

Ces probabilités ont été utilisées pour déterminer la part des trajets initiaux qui sont covoiturables. Dans un effort de simplification, certaines catégories ont été agrégées, par similarité quant à leur probabilité de covoiturage :

- Les motifs ont été agrégés par probabilité allouée : catégories « 0 », « 20 », « 40 », « 60 » et « 100 »,
- Les distances ont été agrégées en 2 catégories :
 - les trajets courte distance (CD) de 30 km ou moins (probabilité moyenne de 25),
 - les trajets longue distance (LD) supérieurs à 30 km (probabilité moyenne de 80).
- Enfin, les catégories de ménage et de possession de VP ont été agrégées en 3 catégories :
 - la catégorie « 0 VP » regroupant les ménages n'ayant pas de VP (note moyenne de 100),
 - la catégorie « VP covoit fort », qui regroupe les ménages dont les adultes ont moins de 65 ans et qui possèdent au moins une VP par adulte du ménage,
 - la catégorie « VP covoit faible », qui regroupe les ménages dont les adultes ont plus de 65 ans ou qui ont des enfants, et qui possèdent au moins une VP par adulte du ménage.

Pour chaque combinaison de ces différentes dimensions, le coefficient de motivation P_{mot} a été estimé en tenant compte des probabilités de chaque catégorie.

On obtient ainsi la table des $P_{mot,DH}$, indiqués en %, en fonction des catégories agrégées de motif, de type de ménage et de distance (Figure 66).

Motifs de trajet ↓	Type mén →	0 VP		VP covoit fort		VP covoit faible	
0		CD = 25	0	CD = 25	0	CD = 25	0
		LD = 80	0	LD = 80	0	LD = 80	0
20		CD = 25	25	CD = 25	20	CD = 25	9
		LD = 80	30	LD = 80	24	LD = 80	11
40		CD = 25	35	CD = 25	28	CD = 25	12
		LD = 80	60	LD = 80	48	LD = 80	21
60		CD = 25	50	CD = 25	40	CD = 25	18
		LD = 80	75	LD = 80	60	LD = 80	26
100		CD = 25	60	CD = 25	48	CD = 25	21
		LD = 80	90	LD = 80	72	LD = 80	32

Figure 66 : Table des P_{mot} pour le scénario Développement haut. Lecture : la probabilité qu'un trajet pour le motif « études » (catégorie 40%), de moins de 30km (catégorie CD) réalisé par un membre d'une famille constituée par un couple avec enfants, possédant une seule VP (catégorie « covoit fort ») est de 28%

D'autre part, tout comme dans le scénario Gi, les p.km parcourus pour des trajets chaînés ne sont pas considérés comme covoiturables. On prend donc $P_{ch} = 52\%$, pour tous les motifs.

Par conséquent, la table des $P_{TC,DH}$ utilisée est 0,52 fois la table des $P_{mot,DH}$, soit :

Motifs de trajet ↓	Type mén →	0 VP		VP covoit fort		VP covoit faible	
0		CD = 25	0	CD = 25	0	CD = 25	0
		LD = 80	0	LD = 80	0	LD = 80	0
20		CD = 25	13	CD = 25	10	CD = 25	5
		LD = 80	16	LD = 80	12	LD = 80	5
40		CD = 25	18	CD = 25	15	CD = 25	6
		LD = 80	31	LD = 80	25	LD = 80	11
60		CD = 25	26	CD = 25	21	CD = 25	9
		LD = 80	39	LD = 80	31	LD = 80	14
100		CD = 25	31	CD = 25	25	CD = 25	11
		LD = 80	47	LD = 80	37	LD = 80	16

Figure 67 : Part des TC pour le scénario Dév, tenant compte de la motivation à covoiturer **et** du chaînage.

Ces valeurs sont utilisées :

- en tant que multiplicateurs des p.km au sein de chaque catégorie de trajets pour déterminer le nombre de p.km dont le taux de remplissage sera modifié ;
- en tant que donnée d'entrée pour calculer ledit taux de remplissage qui leur sera appliqué. C'est l'objet de la section suivante.

7.3.2. Compatibilité temporelle

Pour les scénarios Développement, les hypothèses faites dans le cadre du scénario Gi à propos ses plages temporelles et des fenêtres de compatibilité sont conservées, et ce pour le motif DT comme pour les autres motifs.

7.3.2.1 Motif Domicile Travail

La probabilité moyenne $P_{TC,DT,Dév}$ pour le DT et pour le scénario Dév est calculée selon l'équation suivante :

$$P_{TC,DT,Dév} = \left[\sum_{i,j,k,l}^{j=1..2, l=1..3} (Est_{j,l} * (STVP * SD_{DT})_{j,l}) * M_1 \right] \quad (38)$$

$$STVP = [0,07; 0,70; 0,23] \quad (39)$$

$$SD_{DT} = [0,75; 0,25]^t \quad (40)$$

$Est_{j,l}$ représente la matrice de part des trajets covoiturables extraite pour le motif « 100 » (dernière ligne de la Figure 67), le motif DT constituant cette catégorie

$STVP$ représente le vecteur ligne des parts de ménages respectivement dans les catégories « 0VP », « covoit fort » et « covoit faible » (ces pondérations sont issues de calculs sur l'ENTD 2008 et sur les données démographiques de l'INSEE (CGDD, 2008; INSEE, 2007)).

SD_{DT} représente le vecteur colonne des parts des trajets pour les deux classes de distance pour le motif DT (« courtes distances » et « longues distances »).

$M_1 = 1$, car le motif travail a une probabilité de 100 %.

L'équation (38) permet d'intégrer les probabilités estimées par les experts, qui ont raisonné sur des cas particuliers, en tenant compte de la représentativité de chaque cas particulier pour établir la probabilité moyenne qu'un trajet soit covoiturable.

On obtient alors (voir détail des calculs dans l'annexe 10.4) :

$$P_{TC,DT,DH} = 25\% \quad (41)$$

Pour chaque communauté d'employés composée de Pop_{DT} personnes, le nombre de covoiturages potentiels pour le motif DT et dans le scénario Dév est donc (cf. équation (13) et (14) avec 1,0 trajet/pers dans la fenêtre considérée de 3 heures) :

$$\begin{aligned} Traj_{CP,DT,Dév} &= Pop_{DT} * T_{CC,\Delta t,DT,Dév}(motif, jr) * P_{TC,DT,Dév} * \frac{FT}{\Delta t} \bigg)_A \\ &= Pop_{DT} * 1,0 * 0,25 * \frac{1}{3} = 0,083 * Pop_{DT} \end{aligned} \quad (42)$$

Ce raisonnement sur chaque communauté de salariés peut être étendu à la distribution de ces communautés. Ainsi, on obtient la communauté de CP correspondante en multipliant la taille de chaque communauté de la distribution représentée en Figure 59 par 0,083 CP/pers. La distribution obtenue est en Figure 68.

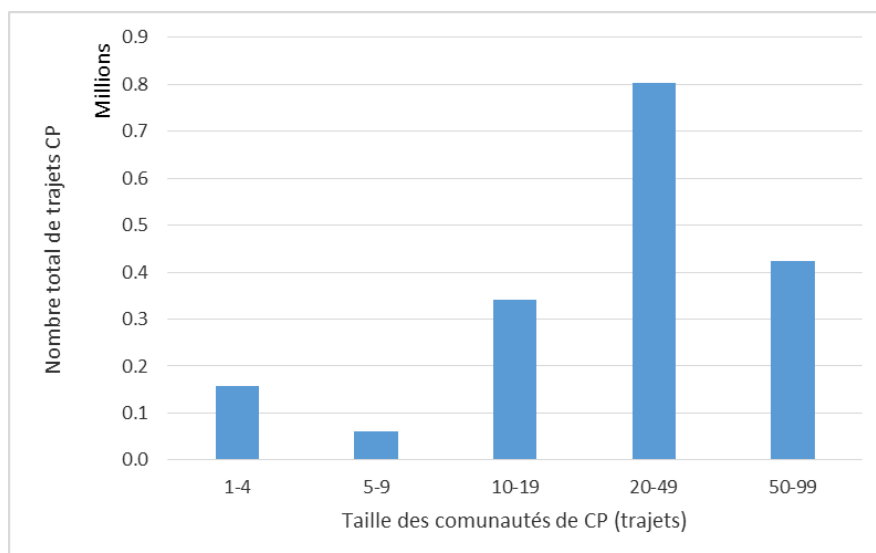


Figure 68 : Distribution des CP par taille des communautés de CP, pour le motif DT et dans le scénario Dév.

Le scénario « Développement Bas » suppose que le nombre de trajets considéré est divisé par 2, soit :

$$Traj_{CP,DT,DB} = 0,041 * Pop_{DT} \quad (43)$$

De même que dans le scénario Dév, on obtient la communauté de CP correspondante en multipliant la taille de chaque communauté par 0,041 CP/pers (voir Figure 69).

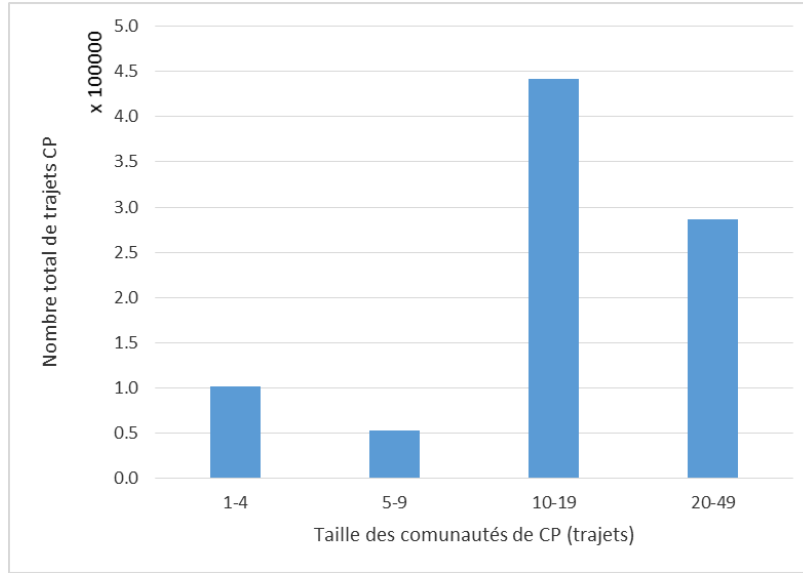


Figure 69 : Distribution des CP par taille des communautés de CP, pour le motif DT et dans le scénario Dév-B.

7.3.2.2 Autres motifs

Le nombre de covoiturages potentiels pour les autres motifs est la somme des covoiturages potentiels pour chacun de ces motifs, étant donné que plusieurs voyageurs ayant des motifs différents peuvent partager leurs trajets ensemble (c'est-à-dire, un trajet pour aller faire des courses peut être covoituré avec un trajet pour des loisirs, par exemple).

Ainsi, une probabilité moyennée sur tous les motifs autres que le motif DT a été établie sur la base des jugements d'experts et de la distribution des trajets par catégorie de distance dans le périurbain, et selon une estimation de la possession de voitures dans le périurbain, selon une équation similaire à l'équation (38) mais adaptée aux motifs autres que le DT (k balayant les 9 motifs numérotés de 2 à 10) :

$$P_{TC,A,DH} = \left[\sum_{\substack{i=1..4 \\ j=1..2 \\ k=1..3 \\ i,j,k}} \left(\frac{Prop_{i,j,k}}{6} * M_i * D_{A,j} * T_k \right) \right] \quad (44)$$

$$M = [0,10; 0,48; 0,31; 0,12] \quad (45)$$

$$D_A = [0,75; 0,25] \quad (46)$$

$$T = [0,07; 0,70; 0,23] \quad (47)$$

M représente les parts des p.km par classe de motifs notés par les experts, hors classe « 100 », qui représente le DT (c'est-à-dire les classes « 0 », « 20 », « 40 » et « 60 », voir Figure 67).

D_A représente les parts des p.km par classe de distance (CD ou LD) pour les motifs autres que les DT. SVP est définie comme dans l'équation (38).

T représente les parts des ménages parmi les types de ménage considérés (0 VP, VP covoit fort et VP covoit faible).

L'application numérique donne une part moyenne des TI covoiturables pour les motifs autres que le DT, pour le scénario Dév, de :

$$P_{TC,A,DH} = 23\% \quad (48)$$

Pour chaque communauté d'habitants composée de Pop_A personnes, le nombre de covoitages potentiels pour les motifs autres que le DT, dans le scénario Dév est donc (cf. équation (13) et (14)), avec 1,85 traj/pers dans la fenêtre de 14 heures considérée pour les motifs autres que le DT) :

$$\begin{aligned} Traj_{CP,A,Dév} &= Pop_A * T_{CC,\Delta t,A,Dév}(motif, jr) * P_{TC,A,Dév} * \frac{FT}{\Delta t})_A \\ &= Pop_A * 1,85 * 0,23 * \frac{1}{14} = 0,030 * Pop_A \end{aligned} \quad (49)$$

Ce raisonnement à chaque commune peut être étendu à la distribution de l'ensemble des communes. On obtient ainsi la communauté de CP correspondante en multipliant la taille de chaque commune de la distribution représentée Figure 60, par 0,030 CP/pers. La distribution obtenue est illustrée Figure 70.

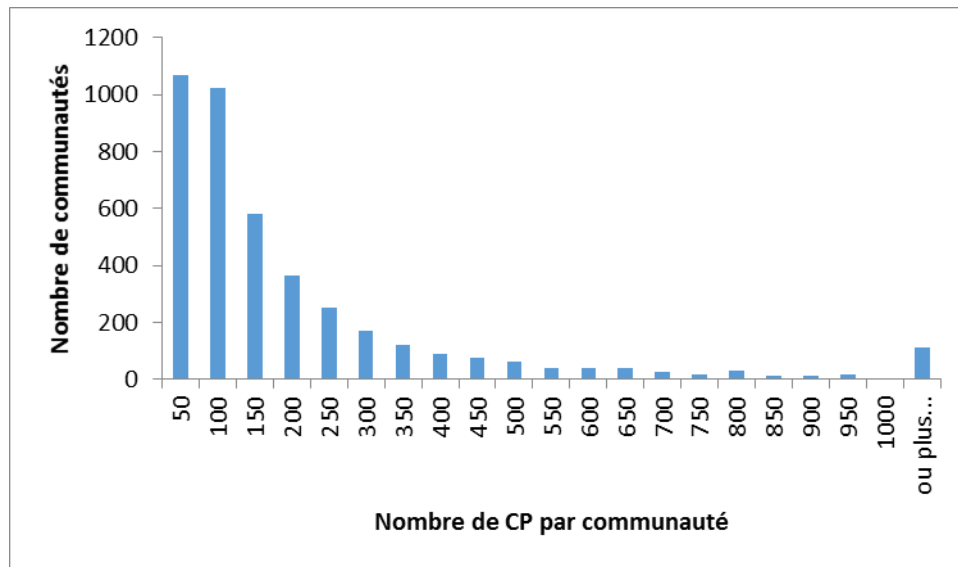


Figure 70 : Distribution des CP par taille des communautés de CP, pour les motifs autres que le DT, dans le scénario Dév.

Le scénario « Développement Bas » s'appuie sur le nombre de trajets du scénario Dév divisé par 2, soit :

$$Traj_{CP,A,DB} = 0,015 * Pop_A \quad (50)$$

On obtient ainsi la communauté de CP correspondante en multipliant la taille de chaque commune par 0,015 CP/pers (voir Figure 71).

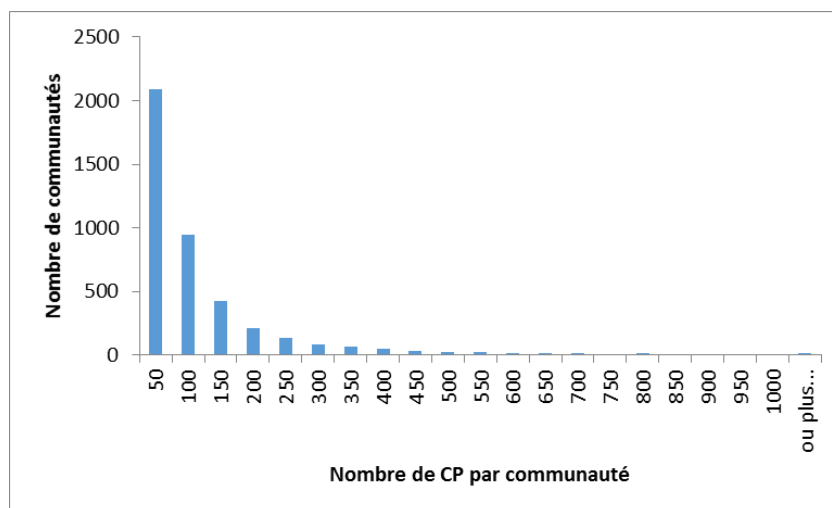


Figure 71 : Distribution des CP par taille des communautés de CP, pour les motifs autres que le DT et dans le scénario DB.

7.3.3. Compatibilité géographique

En appliquant les équations (29) et (30) :

- Le taux de remplissage moyen obtenu pour le DT du scénario Développement est de 1,4 traj/VP, soit 0,4 traj/VP supplémentaire grâce au système de partage de trajets selon l'équation (25) (communautés toutes plus petites que 200 CP).
- Le taux de remplissage obtenu pour le DT du scénario Développement Bas est de 1,3 traj/VP soit 0,3 traj/VP supplémentaire grâce au système de partage de trajets selon l'équation (25) (communautés toutes plus petites que 200 CP).
- Le taux de remplissage obtenu pour les autres motifs du scénario Développement est de 3,0 traj/VP. 27 % des communautés étant plus grandes que 200 CP, les résultats ne peuvent pas être interprétés ici par application de l'équation (25). On considèrera donc un taux de remplissage moyen sur les TC de 3,0 traj/VP.
- Le taux de remplissage obtenu pour les autres motifs du scénario Développement Bas est de 2,3 traj/VP. 12 % des communautés étant plus grandes que 200 CP, les résultats ne peuvent pas être ici non plus, interprétés avec l'équation (25). On considèrera donc un taux de remplissage moyen sur les TC de 2,3 traj/VP.

7.4. Synthèse des hypothèses sur les nouveaux comportements de mobilité

Le Tableau 38 résume les hypothèses prises pour obtenir les comportements d'entrée du modèle IMMOVE, selon les 3 scénarios considérés dans cette étude. Les entrées du modèle IMMOVE sont surlignées en orange.

Tableau 38 : Synthèse des comportements de mobilité en présence du système de covoiturage proposé

	Scénario Gisement	Scénario Développement	Scénario Développement Bas
Communautés initiales	- DT : Employés territoire France, par groupes d'établissement - Autres : Habitants du périurbain, par commune	- DT : Employés territoire France, par groupes d'établissement - Autres : Habitants du périurbain, par commune	- DT : Employés territoire France, par groupes d'établissement - Autres : Habitants du périurbain, par commune
Trajets initiaux TI	- DT : 2 trajets/hab/jour ouvré, chacun réparti sur 3 heures - Autres : 1,85 trajets/hab /jour, répartis sur 14 heures	- DT : 2 trajets/hab/jour ouvré, chacun réparti sur 3 heures - Autres : 1,85 trajets/hab /jour, répartis sur 14 heures	- DT : 2 trajets/hab/jour ouvré, chacun réparti sur 3 heures - Autres : 1,85 trajets/hab /jour, répartis sur 14 heures
Trajets covoiturables TC	- DT : 52 % des pkm - Autres : 52% des pkm	f(distance, type de ménage, motif), sur 52 % des p.km	f(distance, type de ménage, motif)/2, sur 52 % des p.km
Fenêtre temporelle	- DT : 1 heure - Autres : 1 heure	- DT : 1 heure - Autres : 1 heure	- DT : 1 heure - Autres : 1 heure
CP/membre de communauté	- DT : 0,17 traj/p - Autres : 0,069 traj/p	- DT : 0,083 traj/p - Autres : 0,030 traj/p	- DT : 0,041 traj/p - Autres : 0,015 traj/p
Angle de covoiturage	- DT : 10 % - Autres : 10 %	- DT : 10 % - Autres : 10 %	- DT : 10 % - Autres : 10 %
Taux de remplissage (pkm/vkm)	+0,8 pour le DT 3,6 pour les autres motifs	+0,4 pour le DT 3,0 pour les autres motifs	+0,3 pour le DT 2,3 pour les autres motifs

7.5. Résultats

Le covoiturage tel qu'il a été modélisé, c'est-à-dire en supposant que sa mise en place ne génère pas de report modal vers la VP ni de création de demande en mobilité, ne joue que sur le taux de remplissage des voitures.

Le Tableau 39 expose les résultats obtenus par le modèle IMMOVE sous les hypothèses précédemment décrites.

Tableau 39 : Synthèse des résultats des scénarios covoiturage, en 2026 comparativement au scénario « Référence »

	Scénario Gisement	Scénario Développement	Scénario Développement Bas
Réduction de la mobilité (pkm)	Inchangée	Inchangée	Inchangée
Parts modales (p.km)	Inchangées	Inchangées	Inchangées
Taux de remplissage (p.km/v.km)	1,88 (+41 %)	1,44 (+7,1 %)	1,37 (+2,6 %)
Réduction des émissions CO ₂ (Mt/an)	4,3	1,0	0,39
idem (%)	27 %	6,4 %	2,5 %

Le covoiturage modélisé permet d'augmenter le taux de remplissage des VP dans les ZMD (Figure 72).

Le scénario Gisement conduit à une augmentation du taux de remplissage de 41 % à l'horizon 2026 tandis que le scénario Dév mène à une augmentation de 7,1 % à la même échéance.

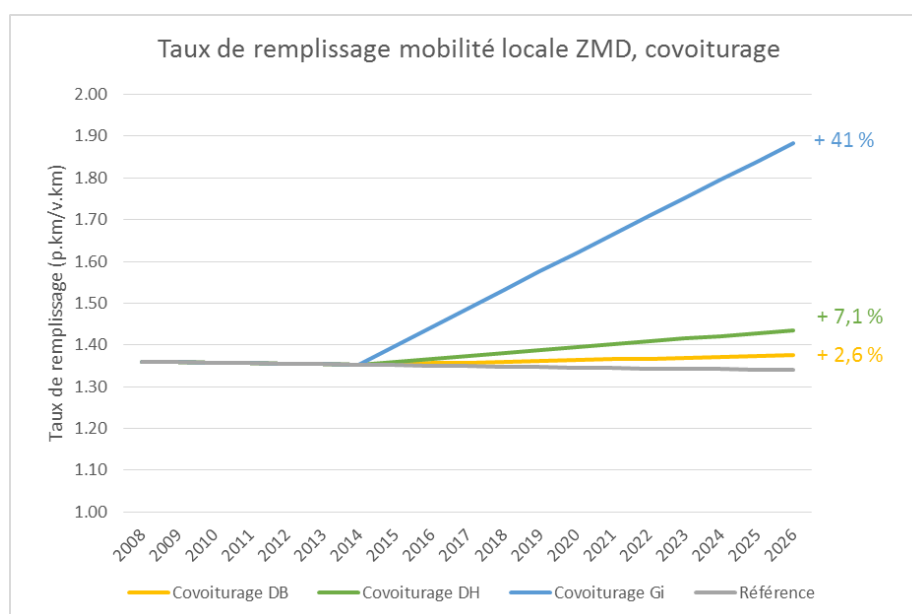


Figure 72 : Evolution du taux de remplissage (p.km/v.km) pour la mobilité locale des ZMD entre 2008 et 2026, pour le scénario Référence et pour les 3 scénarios covoiturage.

L'augmentation du taux de remplissage correspond, à mobilité augmentant légèrement selon le scénario Référence, à une baisse du trafic VP (diminution du nombre global de v.km dans les ZMD), résultant en une baisse des émissions de CO₂. Ainsi, **le scénario Gisement correspond à une réduction des émissions de 27 % et le scénario Développement à une réduction de 6,4 %** (Figure 73).

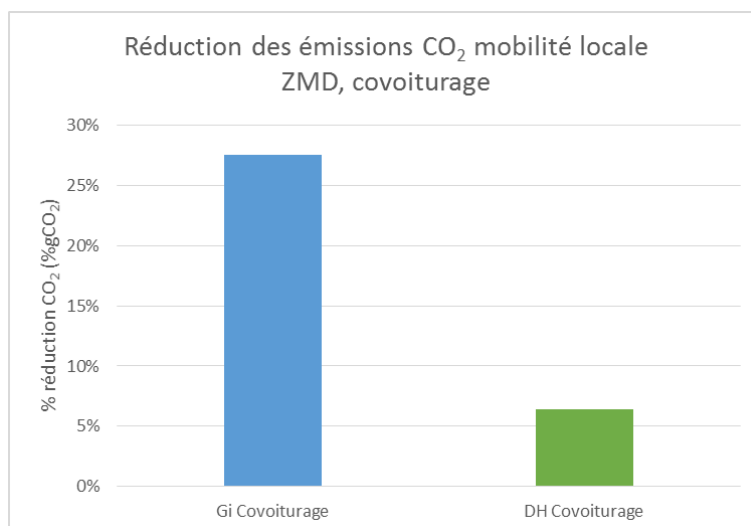


Figure 73 : Réduction des émissions CO₂, pour les scénarios Gi Covoiturage, et Dév Covoiturage en pourcentage par rapport au scénario Référence en 2026.

7.6. Interprétation

Pour mieux comprendre les ordres de grandeur obtenus, nous nous sommes basés sur la situation observée en 2008, et avons supposé la mise en place du système de covoiturage, et son usage, dès cette année-ci. En comparant la situation initiale (l'observé en 2008) et la situation finale (le système de covoiturage est mis en place en 2008), nous avons obtenu la baisse des émissions CO₂ qui peut être raisonnablement attendue si la structure de la mobilité des ZMD ne change pas radicalement entre 2008 et 2026. La baisse attendue est effectivement très proche des résultats fournis par le modèle IMMOVE pour chaque scénario (Tableau 40 pour le scénario Gisement).

Tableau 40 : Calcul de la baisse des émissions CO₂ attendue si le système de covoiturage était mis en place en 2008, pour le scénario Gisement.

Année 2008	Travail	Autres motifs	Total
Trafic VP initial (v.km)	36	81	117
Taux remplissage initial (p.km/v.km)	1.35	1.36	-
Mobilité VP initiale (p.km)	49	110	158
Assiette de mobilité (p.km) concernée par le covoiturage	52%	52%	-
Mobilité VP concernée par le covoiturage (p.km)	25	57	82
Mobilité VP non concernée par le covoiturage (p.km)	23	53	76
Taux remplissage covoiturage, appliqué à la mobilité concernée (p.km/v.km)	2.15	3.6	-
Trafic VP généré par la mobilité concernée (v.km)	12	16	28
Trafic VP généré par la mobilité non concernée (v.km)	17	39	56
Trafic VP final (v.km)	29	55	84

Taux de remplissage initial (p.km/v.km)	1.36
Taux de remplissage final (p.km/v.km)	1.89

Baisse du trafic (%v.km)	28%	
Part VP dans émissions CO ₂ en 2026 (%v.km)	95%	
Diminution CO ₂ attendue (%gCO ₂)	27%	
Diminution CO ₂ obtenue IMMOVE (%gCO ₂)	27%	OK

Le scénario Gi mène à une réduction de 27 % des émissions CO₂, tandis que le scénario Dév mène à une réduction de 6,4 %. L'écart entre les deux scénarios est grand (la réduction est 4 fois plus grande pour le scénario Gi). Le gisement lié au covoiturage est grand, mais son évolution possible sur 10 ans semble limitée (augmentation du taux de remplissage global dans les ZMD de 1,34 p.km/v.km à 1,44 p.km/v.km, soit 7,1 % d'augmentation en 10 ans, ou encore 0,7 %/an d'augmentation).

On observe d'autre part une grande sensibilité des résultats à la motivation à covoiturer, qui joue à la fois sur l'assiette d'application du covoiturage (les trajets concernés), et sur les chances, au sein de cette assiette, de pouvoir en partager les trajets. Une analyse de sensibilité démontre cet effet, qui mène à réduire de 62 % la baisse des émissions pour une réduction de 50 % les hypothèses de motivation des habitants (sensibilité de 1,25). Autrement dit, une augmentation du nombre de trajets covoiturbables mène à une augmentation plus grande de la réduction des émissions CO₂. Cet effet participe à l'effet de « masse critique », souvent incriminé dans l'échec du covoiturage courte distance actuel. L'effet de masse critique prend aussi en compte une dimension « business », car il désigne également le morcellement des communautés de covoiturage du à la multiplicité des offres de covoiturage dans certaines zones.

Comme le montrent les résultats des simulations, le morcellement des communautés a un effet négatif sur le nombre total de trajets covoiturés, à nombre total de covoitureurs constant, car le taux de remplissage au sein de chaque communauté est plus faible que si les communautés pouvaient partager leurs trajets entre elles.

Le même raisonnement montre qu'une hypothèse de chaînage plus favorable au covoiturage mènerait à une augmentation de l'assiette des trajets covoiturés et des taux de remplissage, et donc aurait un effet doublement positif sur la réduction des émissions de CO₂. Ici, tous les trajets chaînés ont été exclus. Certains pourraient être covoiturés dans le cas où les communautés sont suffisamment grandes pour pouvoir assurer des trajets qui n'aient pas trop de décalage entre les horaires du conducteur et

des covoiturés. Ainsi, plus le covoiturage concerne une part importante de la mobilité, plus les trajets chaînés pourraient aussi être covoiturés.

Ces analyses expliquent pourquoi l'efficacité du covoiturage est très sensible à la densité de trajets, et donc pourquoi le covoiturage est plus efficace, en ce qui concerne la mobilité locale, dans les zones denses.

7.7. Bilan économique

Nous avons identifié les postes de dépenses qui diffèrent entre le scénario Référence et les scénarios Covoiturage, dans lesquels le système de covoiturage a été mis en place dans les ZMD.

7.7.1. Les postes d'augmentation des dépenses

Les postes décrits dans cette section sont les postes de dépenses supplémentaires par rapport aux postes de dépenses du scénario Référence :

- **Stations de covoiturage** plus ou moins grandes en fonction de la route qui les accueille, incluant quelques places de parking pour les VP, et de nombreuses places de stationnement pour les vélos. Les hypothèses prises sont les suivantes :
 - Présence régulière de stations de covoiturage le long des autoroutes, du réseau de routes nationales et du réseau de routes départementales. Les stations proposent des places de VP et des places de vélo (Tableau 41).
 - Coût des stations de covoiturage équivalent à celui d'un parking, soit 80 €/m² HT (Bu, 2016), avec une durée de vie de 20 ans.
 - Une place VP (25 m² en incluant la place et son accès (DGALN, 2013)) équivaut en surface à 12 places vélo.
 - Le réseau routier communal est constitué de 680 000 km de route (ADEME, 2015), dont 11 % dans les ZMD (ces dernières couvrant 11 % du territoire)
 - Le réseau routier départemental est constitué de 383 000 km de route (ADEME, 2015), dont 11 % dans les ZMD
 - Le réseau routier national est constitué de 11 800 km de route (MEEM, 2014), dont 11 % dans les ZMD
 - Le réseau autoroutier est constitué de 7 850 km d'autoroutes (MEEM, 2014), dont 11 % dans les ZMD

Ces hypothèses offrent :

- 3,1 millions de places de stationnement dans le scénario Gi, qui mène à 12,1 millions de trajets covoiturés par jour dans les ZMD
- 735 000 places de stationnement dans le scénario Dév, qui mène à 2,8 millions de trajets covoiturés par jour dans les ZMD
- Ces nombres de places correspondent à environ un quart du nombre de trajets journaliers qui sont covoiturés selon le scénario. Nous supposons en effet que les trois quarts des trajets en covoiturage se feront en porte à porte (retour d'expérience WayzUp).

Tableau 41 : Hypothèses de fréquence spatiale des stations de covoiturage, et du nombre de places de stationnement VP et vélo qu'elles contiennent, sur les différents réseaux routiers.

	Gi			Dév		
	Nb stations par 10 km de route	Nb places VP/station	Nb places vélo/station	Nb stations par 10 km de route	Nb places VP/station	Nb places vélo/station
Route départementale	4	5	150	2	5	70
Route nationale	3	5	200	2	5	100
Autoroutes	1	20	3000	1	10	500

- Mise en place et maintenance/mise-à-jour d'une **plate-forme** Internet et smartphone permettant la gestion en ligne des calendriers partagés par les différentes communautés. Nous supposons une gestion nationale de cette application, par 450 employés (c'est le nombre d'employés chez Blablacar), payés au double du SMIC (SMIC net = 13 800 €/an). Cette plate-forme est développée à une échelle nationale, si bien que la dépense affectée aux ZMD est calculée au prorata de la population des ZMD.
- Mise en place d'un **service de planification** des trajets pour les individus n'ayant pas accès à Internet (plate-forme d'appels qui gère les demandes et proposition de trajets, et confirme les trajets). Nous supposons que les employés de ce service sont payés au SMIC et que leur nombre est proportionnel aux nombre de trajets faits en covoiturage, donc dépend du scénario : environ 1 700 employés pour le scénario Dév et 7 200 pour le scénario Gi. Les hypothèses prises pour déterminer ce nombre sont :
 - Un employé peut gérer une réservation toutes les 3 minutes
 - 5 % des covoitureurs n'ont pas accès à Internet
 - Le service est assuré tous les jours de l'année pendant 7 h
 - Chaque employé travaille 220 jours/an pendant 7 h

7.7.2. Les postes de réduction des dépenses¹²

- Moindre usage moyen de la VP, d'où une augmentation moyenne de la **durée de vie des VP** dans les ZMD.
 - La durée de vie est calculée à partir de la durée de vie kilométrique moyenne, supposée égale à 150 000 km (Kolli, 2011), et de l'usage moyen annuel (13 000 km/an dans le scénario Référence (MTES, 2017)) modifié par le système de covoiturage en fonction du scénario. Dans le scénario Référence, la durée de vie moyenne des VP est donc égale à 150 000/13 000 = 11,5 ans. Dans les scénarios Covoiturage, le trafic VP est réduit, donc l'usage annuel de la VP est supposé diminué d'autant, affectant la durée de vie moyenne des VP, selon la formule suivante :

$$DV_{t,C} = \frac{DV_{km}}{U_{an,C}} \quad (51)$$

$$U_{an,C} = U_{an,Ref} * (1 - \Delta T_{Ref \rightarrow C}) \quad (52)$$

Avec $DV_{t,C}$ la durée de vie temporelle moyenne des voitures dans le parc en 2026 dans le scénario Covoiturage (en années), DV_{km} la durée de vie kilométrique moyenne (en km) des voitures dans le parc en 2026 (supposée être la même dans tous les scénarios, les domaines d'action étant supposés ne pas jouer sur cette durée de vie), $U_{an,C}$ l'usage

¹² La méthode décrite dans cette section est utilisée dans le bilan économique de chaque domaine d'action.

annuel moyen des voitures du parc en 2026 dans le scénario Covoiturage (en km/an), $U_{an,Ref}$ l'usage annuel moyen des voitures du parc en 2026 dans le scénario de Référence, et $\Delta T_{Ref \rightarrow C}$ l'écart relatif de trafic entre le scénario Covoiturage et le scénario de Référence. Ainsi, on calcule la durée de vie temporelle dans le scénario Covoiturage via la formule :

$$DV_{t,C} = \frac{DV_{km}}{U_{an,Ref} * (1 - \Delta T_{Ref \rightarrow C})} = \frac{DV_{t,Ref}}{1 - \Delta T_{Ref \rightarrow C}} \quad (53)$$

Avec $DV_{t,Ref}$ la durée de vie temporelle moyenne des voitures dans le parc en 2026 dans le scénario de Référence. L'écart relatif de trafic global entre les deux scénarios, $\Delta T_{Ref \rightarrow C}$, tient compte de l'usage longue distance comme de l'usage local de la voiture, l'usage longue distance des voitures étant constant entre les différents scénarios.

Dans le scénario Dév par exemple, le trafic VP local est réduit de 6,7 %, soit une réduction du trafic global (local + longue distance) de 4,8 %, augmentant la durée de vie moyenne des VP de 11,5 ans à 12,1 ans. Le passage du trafic local au trafic global se fait selon la formule, qui tient compte du fait que la réduction de trafic global provient uniquement d'une réduction du trafic local :

$$\Delta T_{Ref \rightarrow C} = \Delta T_{loc,Ref \rightarrow C} * \frac{T_{Ref,loc}}{T_{Ref,glo}} = 0,72 * \Delta T_{loc,Ref \rightarrow C} \quad (54)$$

Avec $\Delta T_{loc,Ref \rightarrow C}$ la réduction relative de trafic local entre le scénario covoiturage et le scénario Référence ;

$T_{Ref,loc}$ le trafic annuel local par les habitants des ZMD, de 122 Gv.km/an

$T_{Ref,glo}$ le trafic annuel global par les habitants des ZMD, de 169 Gv.km/an

- Le prix d'une VP neuve est supposé être de 21 000 € HT (France Info, 2016).
- Les ménages des ZMD possèdent en moyenne 1,5 VP (CGDD, 2010).
- Moindre usage moyen de la VP, d'où une réduction moyenne de la **consommation de carburant**. Les hypothèses que nous prenons ici sont :
 - Une consommation moyenne du parc en 2026 de 4,7 L/100 km (il s'agit du résultat de la simulation par IMMOVE du scénario Référence)
 - Un prix du carburant de 0,94 €/L HT
 - La consommation du parc pour la mobilité locale dans les ZMD est proportionnelle au trafic, qui dépend du scénario. Dans les scénarios covoiturage, elle est calculée ainsi :

$$\begin{aligned} C_C &= T_{an,C} * CU = T_{an,Ref} * (1 - \Delta T_{Loc,Ref \rightarrow C}) * CU \\ &= C_{Ref} * (1 - \Delta T_{Loc,Ref \rightarrow C}) \end{aligned} \quad (55)$$

Avec C_C la consommation du parc de voitures pour la mobilité locale en 2026 dans le scénario Covoiturage, $T_{an,C}$ le trafic annuel local en 2026 dans le scénario Covoiturage, CU la consommation unitaire moyenne du parc en 2026 (supposée, par mesure de simplification, égale entre les différents scénarios), $T_{an,Ref}$ le trafic annuel local en 2026 dans le scénario de Référence, $\Delta T_{Loc,Ref \rightarrow C}$ l'écart relatif de trafic local entre le scénario Covoiturage et le scénario de Référence et C_{Ref} la consommation du parc de voitures pour la mobilité locale en 2026 dans le scénario de Référence.

Dans le scénario Dév par exemple, le trafic VP local est réduit de $\Delta T_{Loc,Ref \rightarrow C} = 6,7\%$, d'où une consommation pour la mobilité locale réduite de 6,7 % par rapport au scénario Référence.

Dans le scénario Référence, le trafic local annuel étant de 122 Gv.km/an, la consommation annuelle pour la mobilité locale est de $4,7 \cdot 122 \cdot 10^7 = 5,72 \text{ GL/an}$, pour un coût HT de $5,72 \cdot 0,94 \cdot 10^3 = 5363 \text{ M€/an}$.

- Moindre usage de la VP, d'où une moindre maintenance de la **voirie**, communale et départementale (Baaj, 2012). Cependant, l'effet du trafic VP sur l'état de la voirie a été considéré comme négligeable dans cette étude, cet état étant supposé principalement déterminé par les aléas climatiques et la circulation des poids lourds.

7.7.3. Résultats

Le covoiturage, en scénario Développement, permet d'économiser environ 1,8 milliards € chaque année dans les ZMD. En scénario Gisement, cette économie atteint 7,8 milliards €.

Les résultats des calculs sont détaillés dans les Tableau 42 et Tableau 43.

On constate que les postes de dépenses créés spécifiquement pour mettre en place le covoiturage représentent des augmentations de dépenses annualisées négligeables devant les réduction de dépenses réalisées par l'augmentation de la durée de vie des VP et par le moindre usage de carburant. Ainsi, les paramètres les plus importants dans la détermination du coût complet du système de covoiturage sont :

- Le prix du carburant : sans surprise, plus il est élevé, plus le système de covoiturage est bénéficiaire. Une analyse de sensibilité révèle que lorsque le prix du carburant augmente de 1 %, les économies réalisées augmentent de 0,17 %, soit une sensibilité de 0,17, pour les deux scénarios.
- La consommation unitaire des VP dans le parc : plus elle est élevée, plus le système de covoiturage est bénéficiaire. Les hypothèses prises quant à la consommation des VP d'ici 2026, issues du scénario Vision 2030 de l'ADEME sont optimistes et tendent à diminuer les économies réalisées par le système de covoiturage. La sensibilité des économies réalisées à la consommation unitaire des VP est d'environ 0.18, pour les deux scénarios.
- Le prix des VP neuves : plus ce dernier est élevé, plus le système de covoiturage est bénéficiaire
- Plus le trafic évité par le covoiturage est grand, plus le système est bénéficiaire. Le scénario Gi, qui évite 28,8 % du trafic local, permet d'économiser environ 7,9 milliards €/an à la société, tandis que le scénario Dév, qui évite 6,7 % du trafic local, permet d'économiser environ 1,8 milliards €/an.

Le covoiturage n'induit que très peu de création d'infrastructures car le réseau routier français, l'un des plus denses au monde, existe déjà. Cela explique le faible nombre et la valeur négligeable des postes de dépense du système covoiturage. Dans l'absolu, l'un des vecteurs nécessaires au covoiturage est le réseau routier existant. Nous ne comptons pas les dépenses associées au maintien de ce réseau car nous raisonnons en termes d'écart au scénario Référence, et non pas en termes de dépense absolue de mise en place du système de covoiturage par rapport à un monde qui ne posséderait pas d'infrastructures.

Les dépenses supplémentaires en infrastructures bénéficient de l'interaction avec le système vélo, étant donné que le stationnement vélo prend 12 fois moins de place que le stationnement voiture. Ainsi, ces dépenses sont multipliées par un facteur 10 environ si on suppose que les aires de covoiturage ne sont équipées qu'en stationnement voiture.

Tableau 42 : Les différents postes de dépenses du covoiturage, pour le scénario Gi. La colonne « Coût total S' (M€) » est calculée en multipliant la colonne « Coût unitaire (€) » par la colonne « Nombre d'unités dans S' ». Le coût total S' est ensuite divisé par la durée de vie pour obtenir le coût à l'année de S'. Pour les types de modification « Modif » (deuxième colonne), le coût à l'année de Sref est calculé tel que décrit dans la section 7.7.2. Pour les types de modification « Création », le coût à l'année de Sref est nul, ce poste de dépense n'existant pas dans le scénario de Référence.

Élément différent entre S' et Sref	Type de modification	Coût unitaire HT (€)	Unité	Nombre d'unités dans S'	Unité	Coût total S' (M€)	Durée de vie (an)	Coût à l'année S' (M€)	Coût à l'année Sref (M€)
Stations de covoiturage autoroute	Création	562 500	€/station	141	station	79	20	4	-
Stations de covoiturage routes nationales	Création	45 139	€/station	366	station	17	20	1	-
Stations de covoiturage routes départementales	Création	36 458	€/station	17 007	station	620	20	31	-
Application Internet/smartphone	Création	59 592	€/an	180	pers	10,7	1	11	-
Ressources humaines pour aider à planifier des trajets pour ceux qui ont des difficultés d'accès à Internet	Création	29 796	€/pers/an	7 189	pers	214	1	214	-
Augmentation durée de vie VP	Modif	20 833	€/VP	17 465 281	VP	363 860	14,6	25 002	31 535
Moins de carburant pour les ménages	Modif	0,94	€/L	5 720 076 996	L	3 816	1	3 816	5 363
						Total annuel (M€)		30 500	38 318
						Surcoût total annuel (M€)		- 7 818	

Tableau 43 : Les différents postes de dépenses du covoiturage, pour le scénario Dév. La colonne « Coût total S' (M€) » est calculée en multipliant la colonne « Coût unitaire (€) » par la colonne « Nombre d'unités dans S' ». Le coût total S' est ensuite divisé par la durée de vie pour obtenir le coût à l'année de S'. Pour les types de modification « Modif » (deuxième colonne), le coût à l'année de Sref est calculé tel que décrit dans la section 7.7.2. Pour les types de modification « Création », le coût à l'année de Sref est nul, ce poste de dépense n'existant pas dans le scénario de Référence.

Élément différent entre S' et Sref	Type de modification	Coût unitaire HT (€)	Unité	Nombre d'unités dans S'	Unité	Coût total S' (M€)	Durée de vie (an)	Coût à l'année S' (M€)	Coût à l'année Sref (M€)
Stations de covoiturage autoroute	Création	107 639	€/station	141	station	15	20	1	-
Stations de covoiturage routes nationales	Création	27 778	€/station	244	station	7	20	0	-
Stations de covoiturage routes départementales	Création	22 569	€/station	8 503	station	192	20	10	-
Application Internet/smartphone	Création	59 592	€/an	180	pers	10,7	1	11	-
Ressources humaines pour aider à planifier des trajets pour ceux qui ont des difficultés d'accès à Internet	Création	29 796	€/pers/an	1 660	pers	49	1	49	-
Augmentation durée de vie VP	Modif	20 833	€/VP	17 465 281	VP	363 860	12,1	30 027	31 535
Moins de carburant pour les ménages	Modif	0,94	€/L	5 720 076 996	L	5 006	1	5 006	5 363
						Total annuel (M€)		36 524	38 318
						Surcoût total annuel (M€)		- 1 794	

Chapitre 8 - Système de mobilité combiné

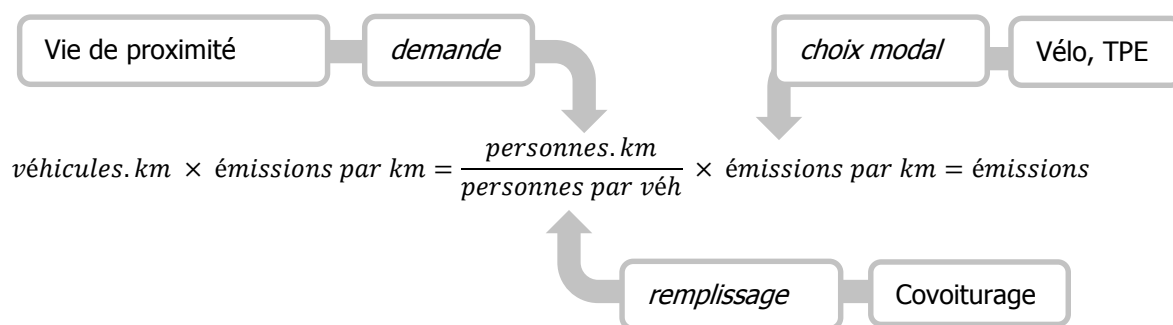
Cette section analyse un système de mobilité combinant les différents domaines d'action traités dans cette note, et présente les résultats obtenus par sa mise en place, selon les différents scénarios.

8.1. Hypothèses

Le système combiné agrège le télétravail, le système de distribution des achats, le système vélo, les TPE, et le système de covoiturage communautaire. Différentes interactions existent entre ces domaines. Nous déterminons dans un premier temps la nature de ces interactions pour voir si les hypothèses d'entrée du modèle IMMOVE doivent être modifiées en conséquence.

Les différents domaines d'action agissent sur des leviers différents de la mobilité :

- La vie de proximité (distribution des achats et télétravail) joue sur la demande en mobilité
- Le système vélo et les TPE jouent sur le mode emprunté une fois que la demande en mobilité existe
- Le covoiturage joue sur le taux de remplissage moyen des VP



8.1.1. Priorisation des domaines d'action

Ainsi, dans le modèle IMMOVE, il est possible d'entrer les hypothèses des différents domaines d'action selon ces trois leviers. Ce faisant, on joue d'abord sur la demande, puis, sur la demande en mobilité restante, sur le mode sélectionné, puis, au sein de la mobilité restante pour le mode VP, sur son taux de remplissage. Les priorités sous-entendues dans cette manière de faire sont donc : (1) vie de proximité, (2) vélo, (3) TPE, (4) covoiturage (c'est-à-dire, partage de trajets), (5) business as usual (BAU, c'est-à-dire aucun changement de comportement de mobilité par rapport au scénario Référence).

Ces priorités pourraient être définies autrement, et cela aurait des incidences sur les émissions de CO₂ finales. Imaginons par exemple les priorités suivantes : (1) TPE ou covoiturage, (2) vélo, (3) vie de proximité, (4) BAU. Par un raisonnement micro-comportemental (au niveau de la personne), on met en scène une personne voulant aller au travail (et supposée faire le trajet en VP seule en BAU). Elle a dans un premier temps deux options : partager son trajet ou non (en TPE ou covoiturage) ; si elle le fait, alors elle évite au moins ses propres émissions, et peut-être plus si elle permet à deux personnes de covoiturer ; si elle ne partage pas son trajet, la personne est à nouveau face à deux options : faire le déplacement en vélo ou non ; si elle le fait en vélo, elle évite ses émissions ; sinon, elle est confrontée au dernier choix : télétravailler ou non ; si elle télétravaille elle évite ses émissions ; sinon (BAU), elle émet la même quantité de CO₂ que dans le scénario Référence. Ce raisonnement suggère que mettre

la priorité sur le covoiturage ou les TPE crée une communauté de partage de trajets plus grande et donc optimise le système de partage (qu'il soit fait en TPE ou en covoiturage), réduisant potentiellement le nombre de VP requises au total.

Un raisonnement macro-comportemental (au niveau d'une communauté) contredit cette conclusion : comme indiqué par la courbe du nombre de VP requises en fonction du nombre de trajets à transporter (Figure 74), moins il y a de trajets à transporter, moins le nombre de VP requises est grand (la fonction obtenue par le modèle Monte Carlo, représentant donc une fonction moyennée sur un grand nombre de situations, est strictement croissante). Le raisonnement est le même avec les TPE : moins il y a de trajets à transporter, moins le nombre de bus express ou de train requis est grand. Il est donc bénéfique *au global* de mettre la priorité sur la vie de proximité, puis sur le vélo, qui tous deux permettent d'éviter des trajets à partager, et donc de réduire le nombre de VP et de TPE global, la VP étant responsable de 96 % des émissions de CO₂ dans la mobilité locale des ZMD, et les TPE émettant plus par passager.kilomètre que le vélo (mais moins que la VP s'ils sont suffisamment remplis, donc prioritaires sur la VP dans ce cas).

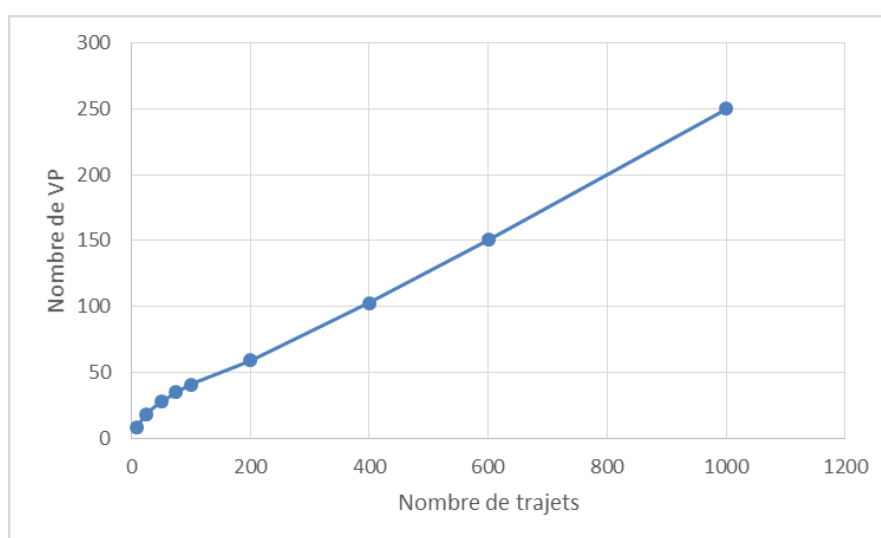


Figure 74 : Nombre de VP requises en fonction du nombre de trajets à covoiturer. La pente de cette courbe tend vers 1/4 VP/traj, car le taux de remplissage maximum a été fixé à 4 trajets/VP. L'efficacité du covoiturage est décroissante avec le nombre de trajets (la pente de la courbe diminue continuellement jusqu'à atteindre 1/4), mais la courbe est toujours croissante, signifiant qu'en moyenne sur de nombreuses situations, plus il y a de trajets à transporter, plus le nombre de VP requises est grand. On peut cependant imaginer des cas ponctuels où ajouter un trajet permet de réduire le nombre de VP requises.

On conservera donc les priorités naturellement embarquées dans le modèle IMMOVE. On accepte ainsi que la vie de proximité « prenne des parts » au vélo, et que lui-même prenne des parts au partage de trajets. Au sein du partage de trajets, on met la priorité sur l'usage des TPE par rapport à la VP, ces premiers étant plus efficaces en termes d'émissions par p.km (s'ils sont suffisamment remplis). Ainsi, chaque trajet non éligible à la Vie de Proximité ou au Vélo, mais néanmoins faisant partie d'un flux important (donc éligible aux TPE et au covoiturage), est fait en TPE. Les trajets faits en TPE sont donc directement pris à la mobilité qui aurait été covoiturée en absence des TPE. En effet, si un trajet est faisable en TPE, c'est qu'il fait partie d'un flux important, et qu'il est fait en VP (voir section TPE), donc qu'il est aussi inclus dans la mobilité qui peut être covoiturée.

8.1.2. Interactions entre les domaines d'action

Certaines interactions ont déjà été prises en compte dans les hypothèses des différents domaines d'action :

- Il a été supposé que les trajets covoiturés font la même distance que le trajet du conducteur seul, alors que les covoitureurs doivent se retrouver en un point et donc faire des distances supplémentaires. Les distances supplémentaires parcourues par chaque covoitureur sont cependant inférieures à 10 % de la distance totale du trajet. Tout se passe comme si les trajets supplémentaires pour que les covoitureurs se rejoignent sont faits sans émissions de CO₂. Cette hypothèse est d'autant plus vraie que le système vélo est développé, car alors les passagers peuvent rejoindre le trajet du conducteur en vélo. Nous avons supposé un grand nombre de places de stationnement vélo sur les aires de covoiturage, en cohérence avec cette interaction.
- Il a été supposé, dans le scénario Gi TPE, que l'ensemble du trajet est fait en TPE, alors que le premier segment peut être fait en VP, rendant notre estimation de réduction des émissions un peu trop élevée. En interaction avec le Système Vélo, le premier segment peut être fait en vélo, ce qui mènerait notre estimation à être plus faible que la réalité si l'usage du vélo se développe sur ce premier segment.
- Il a été supposé dans le scénario Covoiturage Gi que tous les trajets hors chaînage sont éligibles au covoiturage. Cependant, il ne semble pas réaliste de faire un covoiturage pour de courtes distances. Ce manque de réalisme est couvert par la priorité donnée au système vélo sur le covoiturage : le système vélo couvre les courtes et moyennes distances, qui ne peuvent donc pas être couvertes en covoiturage.
- Il a été supposé dans le scénario Gi « livraison par tournées » que les consommateurs n'avaient aucune distance à parcourir pour récupérer leurs courses. Or les courses peuvent être livrées dans un point-relais (commerçant local, consigne automatique, voisin), ce qui nécessite un trajet. Tout se passe donc comme si les trajets pour aller récupérer ses courses étaient décarbonés. L'hypothèse est d'autant plus vraie que le réseau de point-relais est dense et que le système vélo est développé, car alors les consommateurs peuvent aller chercher leurs courses en vélo ou vélo-cargo facilement.
- Il a été supposé dans les scénarios Télétravail, que les actifs pouvaient joindre leur lieu de télétravail sans émettre de CO₂. Cette hypothèse est d'autant plus vraie que le système vélo est développé, et que le nombre de tiers-lieux est grand.

D'autres interactions positives ne sont pas prises en compte dans la modélisation mais pourraient jouer dans la réalité (Figure 75) :

- Le covoiturage et la livraison collaborative des achats auront certainement une interaction positive car ils créent tous deux du lien entre les habitants d'une localité. Les liens se faisant, les services mutuels rendus seront favorisés, tels le covoiturage et la livraison collaborative. Les communautés de covoiturage seront renforcées par ces liens.
- Le développement d'un système vélo et celui d'un système de covoiturage jouent potentiellement sur le même espace (la voirie). Ainsi, la prise d'espace de voirie par le système vélo pourrait favoriser (par contrainte d'espace) le covoiturage. Réciproquement, le développement du covoiturage permettrait de libérer de l'espace de voirie qui pourrait être alloué au vélo.
- De même, la prise d'espace de voirie en faveur du vélo sur les axes communaux et départementaux réduirait les vitesses pour les VP, ce qui pourrait favoriser l'usage des lignes de TC existantes notamment via une intermodalité avec le vélo sur les trajets les plus longs, ainsi qu'un usage du télétravail et de la distribution des achats à domicile.

- Le développement d'un système de livraison par tournées des achats traditionnellement faits en grande surface permettrait de favoriser les commerces locaux « de dépannage » ce qui pourrait mener à redynamiser certains centre-bourgs. Le télétravail pourrait avoir le même effet, car les télétravailleurs pourraient consommer localement pendant leurs journées de télétravail et redynamiser le centre-bourg dans lequel ils travaillent. La redynamisation du local pourrait alors réduire les distances de déplacement des habitants de la localité (recentrage des loisirs, des visites aux amis, de la consommation, offre locale plus importante). La réduction des distances parcourues permet par elle-même une réduction des émissions CO₂, mais permet de plus un usage plus grand du vélo et de la marche, annulant ainsi les émissions des trajets concernés.
- Le système de livraison des achats et le télétravail constituerait un gain de temps pour tous les ménages, temps qui pourrait bénéficier à l'usage des modes alternatifs à la VP, et souvent plus lents que cette dernière, tels que le vélo (seul ou intermodalité) et le covoiturage.
- La combinaison des systèmes de mobilité et du recentrage de la vie sur le local pourrait avoir le double effet de réduire les besoins en mobilité sur les distances les plus longues de la mobilité locale ainsi que de permettre une mobilité sans VP sur une grande proportion des trajets dans les ZMD (notamment les trajets les plus longs grâce aux TPE et au covoiturage, en intermodalité avec le vélo). Ce non-usage de la VP la rendrait moins rentable pour les ménages, qui pourraient alors se passer de la possession de la VP pour aller vers un modèle de location de mobilité lorsque le besoin ponctuel arrive. Certains ménages pourraient aussi vouloir louer leur VP pour la rentabiliser, augmentant l'offre d'autopartage. Or ce passage à l'autopartage sans possession de VP est accompagné d'un changement de mode de penser la mobilité. La VP devient alors un mode parmi un bouquet de modes qui chacun répondent à des besoins spécifiques pour un coût spécifique. Ce changement culturel de mobilité pourrait aussi favoriser l'usage des lignes de TC existantes.

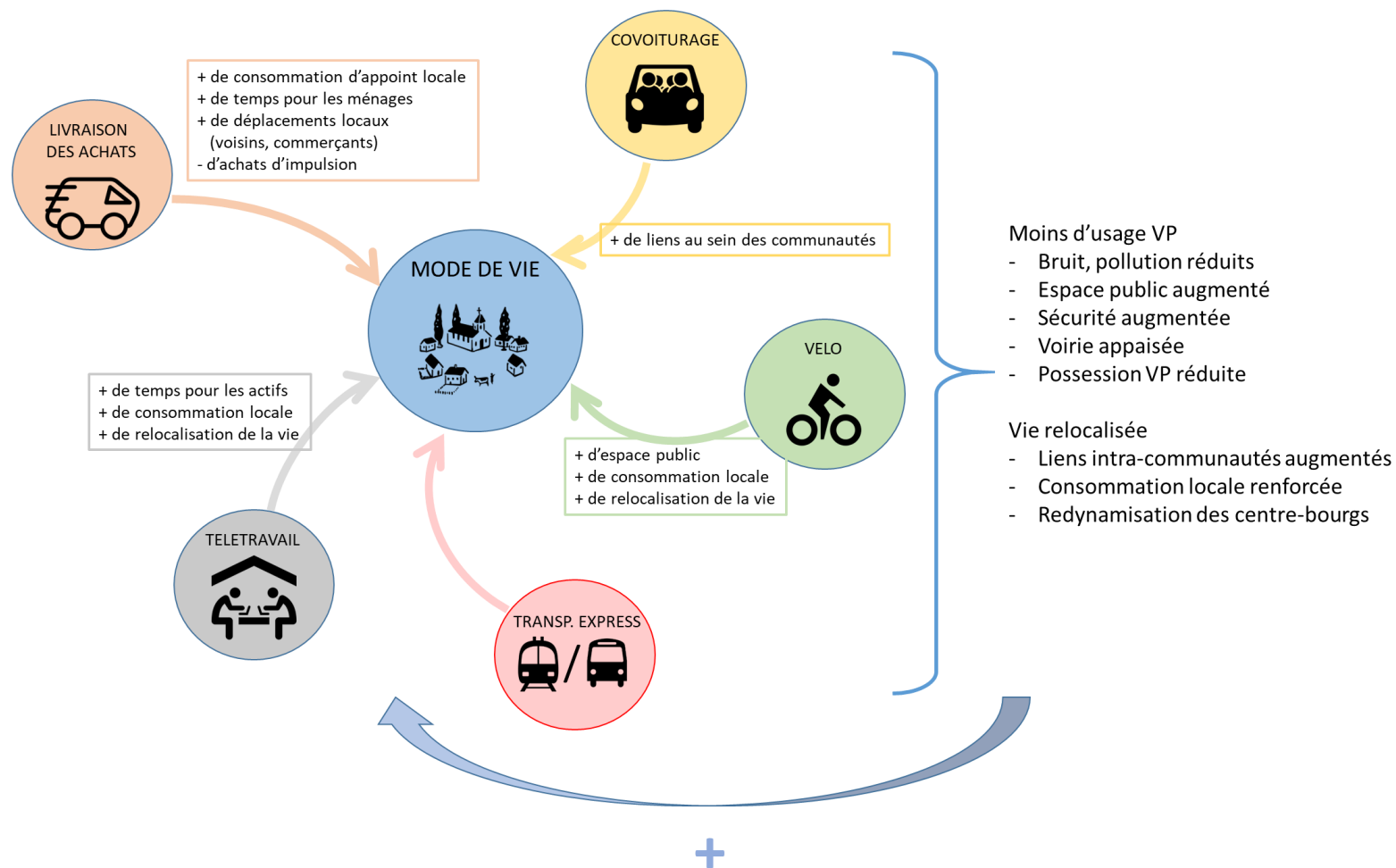


Figure 75 : Schématisation des interactions entre les différents domaines d'actions et le mode de vie des habitants des ZMD, non modélisées dans IMMOVE. Les domaines d'actions influent sur le mode de vie global des habitants des ZMD, réduisant globalement le besoin d'utiliser et de posséder une VP, et participant à la relocalisation des activités et des liens entre habitants. En retour, ces changements culturels et organisationnels, associés à la perception de leurs externalités positives, jouent positivement sur le développement des domaines d'actions.

8.1.3. Synthèse des hypothèses

Pour le calcul des émissions CO₂ combinées (scénario Gi Combiné), on conserve les hypothèses des scénarios Gi covoiturage, Gi TPE, Gi télétravail, Gi « distribution par tournées » (qui produit la plus grande réduction des émissions CO₂ parmi les deux scénarios Gi concernant la distribution des achats) et Gi vélo. Il s'agit du scénario qui combine tous les scénarios Gisement individuels.

Le scénario Développement combiné (scénario Dév Combiné) prend quant à lui les hypothèses des scénarios Dév covoiturage, Dév télétravail, Gi « livraison collaborative » (qui produit une réduction des émissions plus faibles que la livraison par tournées) et Dév vélo.

Voici donc les hypothèses qu'on retient :

	Scénario Gisement	Scénario Développement
Modification mobilité	Application des hypothèses des scénarios Gi « distribution par tournées » et Gi télétravail (voir sections 3 et 4) : Réduction de 78 % des pkm vers les achats en grande surface Réduction de 19 % des pkm vers le travail	Application des hypothèses des scénarios Gi « livraison collaborative » et Dév télétravail (voir sections 3 et 4) : Réduction de 36 % des pkm vers les achats en grande surface Réduction de 4,8 % des pkm vers le travail
Modification mode	Sur la mobilité restante, application des hypothèses du scénario Gi vélo (voir section 5.1.1) : Les trajets de plus de 20 km ne changent pas de mode ; parmi les pkm restants, des coefficients fonction du motif sont appliqués pour exclure les trajets transportant des charges trop grandes, trop de personnes, et les trajets chaînés. Les trajets restants sont faits en vélo. Sur la mobilité VP restante, on applique les hypothèses du scénario Gi TPE : 9,2 % de la mobilité est reportée sur le Bus Express et 1,0 % est reportée sur le train.	Sur la mobilité restante, application des hypothèses du scénario Dév vélo (voir section 5.1.2) : Report modal vers le vélo d'une part des trajets jugés favorables au vélo, en fonction de la distance, de la CSP de la personne parcourant le trajet et du motif.
Modification taux de remplissage	Sur la mobilité VP restante, on applique les hypothèses du scénario Gi covoiturage (voir section 7.2) : 52 % des p.km pour le motif DT voient leur taux de remplissage augmenté de 0,8 p.km/v.km 52 % des p.km pour les motifs autres que le DT voient leur taux de remplissage passé à 3,6 p.km/v.km Le taux de remplissage du reste des p.km est inchangé	Parmi les trajets restants qui sont faits en VP, on applique les hypothèses du scénario Dév covoiturage (voir section 7.3) : Les trajets jugés favorables au covoiturage en fonction de leur distance, leur motif, le type de ménage et l'accès à la VP de la personne parcourant le trajet voient leur taux de remplissage modifié ainsi : Pour les trajets DT, augmentation de +0,4 p.km/v.km. Pour les autres motifs, taux de remplissage de 3,0 p.km/v.km. Le taux de remplissage du reste des p.km est inchangé

8.2. Résultats

Dans le scénario Combiné, trois leviers ont été actionnés : une baisse de la mobilité pour les motifs DT et « achats en grandes surfaces », un report modal vers le vélo, puis *parmi la mobilité VP*, un report modal vers les TPE, et enfin une augmentation du taux de remplissage parmi la mobilité VP restante, via le covoiturage.

La mobilité est réduite de 5,0 % et de 12 % pour le scénario Dév et Gi respectivement, par rapport au scénario Référence en 2026 (Figure 76). Ces valeurs correspondent exactement à la somme des baisses de mobilité obtenues sur le motif DT par le télétravail et sur le motif « achats en grandes surfaces » par la livraison des achats. Cela s'explique par le fait que ces motifs sont exclusifs.

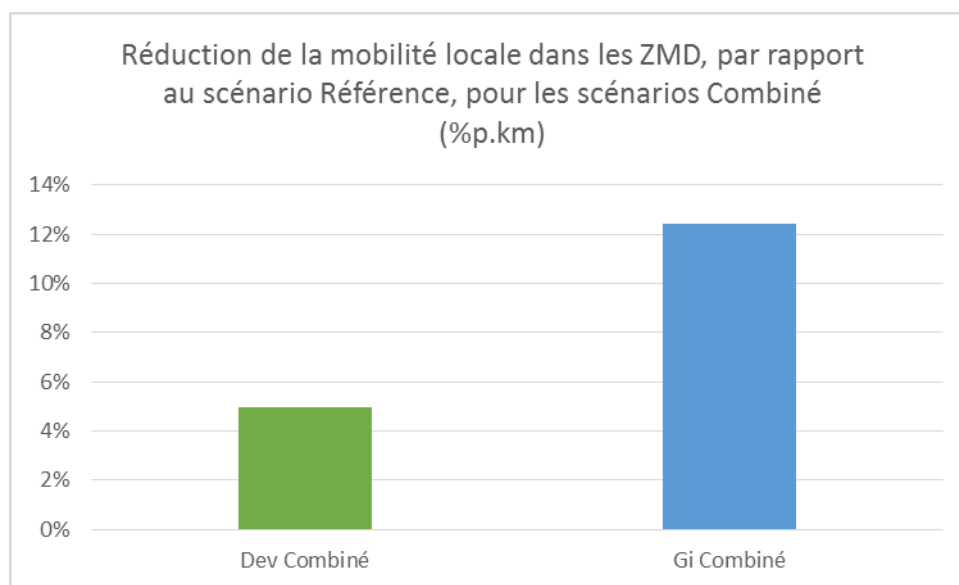


Figure 76 : Réduction de la mobilité locale dans les ZMD en 2026 par rapport au scénario Référence, pour les scénarios Combiné.

Les parts modales sont ensuite modifiées, sur la mobilité restante, en faveur du vélo. La part modale des modes vélo+marche atteint 36 % et 18 % pour le scénario Gi et Dév respectivement (Figure 77). Ces valeurs sont très légèrement supérieures à la part modale obtenue dans les scénarios Vélo. En effet, la réduction de mobilité consécutive à la mise en place du télétravail et de la livraison des achats touche des trajets plus longs que la moyenne, donc la mobilité restante est légèrement plus propice au vélo et à la marche, qui affecte les trajets de courte ou moyenne distance.

Au sein de la mobilité VP restante, pour le scénario Gi uniquement, une part est affectée au Bus Express (9,2 %) et une autre est affectée au train (1,0 %), augmentant les parts modales restantes des TC route et des TC rail. Ainsi, la part modale des TC route passe de 4,4 % (Référence) à 8,0 % (Gi), et celle du train passe de 4,6 % (Référence) à 3,8 % (Gi). Notons que la part modale globale du TC rail baisse car une part est ôtée par le télétravail, et une part est prise par le vélo, et malgré le fait qu'une partie de la mobilité VP soit reportée sur le TC rail dans le cadre des TPE. Les TPE ne sont pas mis en place dans le scénario Combiné Dév.

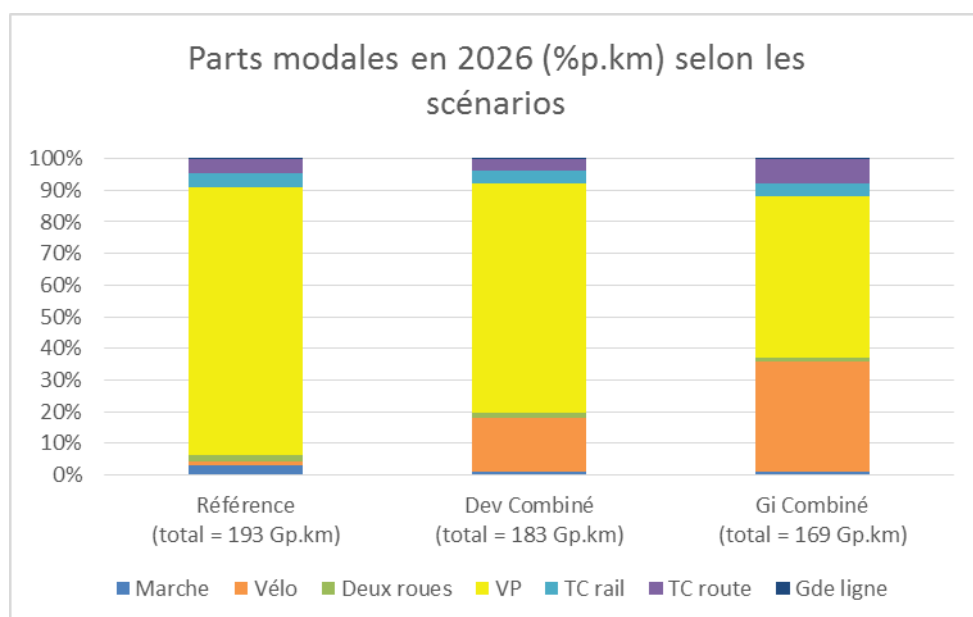


Figure 77 : Parts modales en 2026 selon les scénarios Référence, « Gi Combiné » et « Dév Combiné ». La catégorie TC route inclus le Bus Express, tandis que la catégorie TC rail inclus le train.

Enfin, le taux de remplissage est augmenté par le covoiturage sur la mobilité VP restante. Le taux de remplissage augmente de 7,6 % et 33 % pour les scénarios Dév et Gi respectivement.

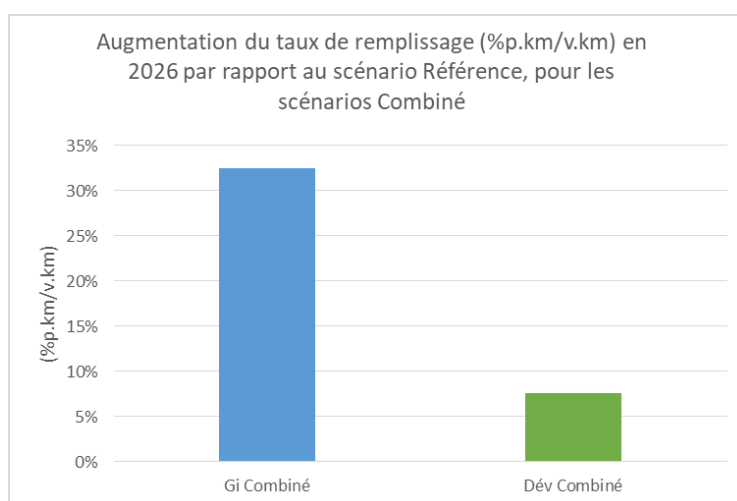


Figure 78 : Evolution du taux de remplissage moyen dans les ZMD entre 2008 et 2026, pour les scénarios Référence, « Gi Combiné » et « Dév Combine ».

L'augmentation du taux de remplissage du scénario « Dév Combiné » est légèrement plus grande que celle du scénario « Covoiturage Dév ». Cet effet est dû au facteur motivation estimé par les experts, qui ont jugé que les trajets longue distance sont plus propices au covoiturage que les trajets courte ou moyenne distance, et que les trajets pour le motif DT sont plus propices au covoiturage que les autres motifs. Comme le vélo prend de la mobilité à courte distance et que l'impact du télétravail dans le scénario Covoiturage Dév est très faible, les p.km restants sont plus longs, et le motif DT est plus présent (car ses trajets sont en moyenne plus longs), et donc plus propices au covoiturage, si bien qu'on y observe un taux de remplissage plus élevé.

A l'inverse, le taux de remplissage du scénario « Gi Combiné » est inférieur à celui du scénario « Covoiturage Gi » (33 % contre 41 %). En effet, le vélo laisse en moyenne une mobilité dans laquelle les trajets longs sont surreprésentés, et donc dans laquelle les trajets pour le motif DT sont surreprésentés. Or, le motif DT et le motif qui est associé à la plus faible augmentation de taux de remplissage (+0,8 p.km/v.km, pour environ +2,2 p.km/v.km pour les autres motifs). Le fait d'augmenter la représentation du motif DT dans les trajets concernés par la VP réduit ainsi le taux de remplissage moyen. L'une des hypothèses du scénario Gi covoiturage est que les trajets même courts peuvent être covoiturés : la longueur du trajet ne joue pas sur la probabilité de covoiturage, annulant l'effet observé dans le scénario Dév.

Dans le scénario « Gi Combiné », le vélo et les TPE prennent une grande part de la mobilité qui est allouée à la VP dans le scénario Référence. Cela réduit la taille des communautés de trajets covoiturables, ce qui joue sur le taux de remplissage au sein de ces communautés. Cet effet n'est pas pris en compte dans le scénario « Gi Combiné », qui suppose les mêmes taux de remplissage sur l'assiette concernée. Cet effet, s'il était pris en compte, mènerait à un taux de remplissage global moins grand que celui obtenu par la simulation, et donc une réduction des émissions légèrement plus faible.

La réduction des émissions obtenue est de 25 % pour le scénario Dév, et de 60 % pour le scénario Gi (Figure 79).

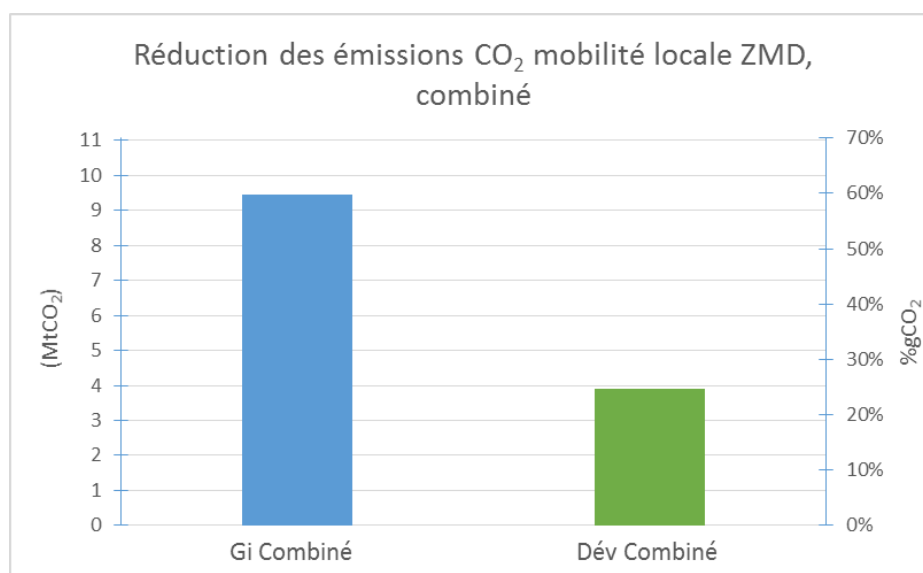
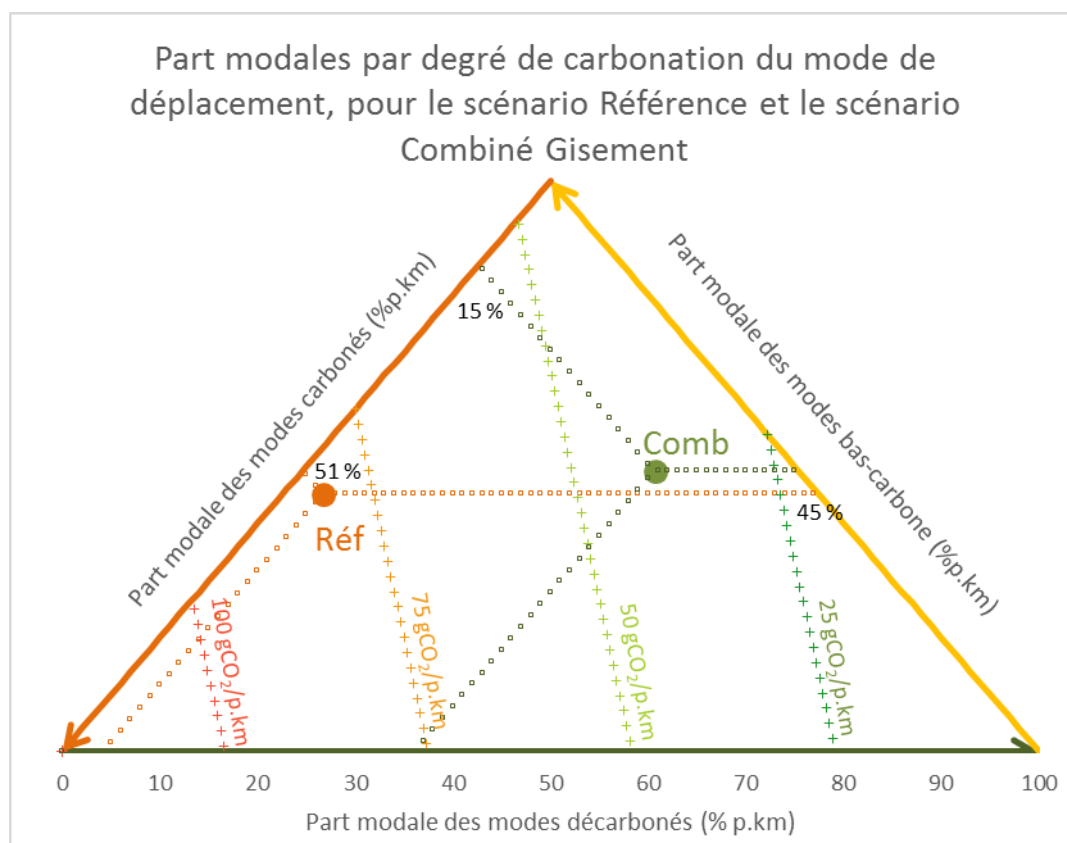


Figure 79 : Réduction des émissions CO₂ pour la mobilité locale dans les ZMD, pour les scénarios Gi et Dév Combiné, par rapport au scénario Référence en 2026.

Tableau 44 : Principaux résultats des scénarios « Combiné » en 2026, comparé au scénario Référence.

	Scénario Gisement Combiné	Scénario Développement Combiné
Réduction de la mobilité (pkm)	12 %	5,0 %
Parts modales (%p.km)	Part vélo = 35 % Part TC rail = 3,8 % Part TC route = 8,0 %	Part vélo = 17 % Part TC rail = 4,1 % Part TC route = 3,7 %
Taux de remplissage (p.km/v.km)	1,77 (+33 %)	1,44 (+7,6 %)
Réduction des émissions CO ₂ (Mt/an)	9,5	3,9
Réduction des émissions CO ₂ (%)	60 %	25 %

Il est possible de représenter l'évolution de la décarbonation de la mobilité par passager.kilomètre (p.km), due à la mise en place de l'ensemble des domaines d'action (sauf la vie de proximité, qui réduit le nombre de passager.kilomètres et non pas les émissions par p.km).



Ce schéma représente les parts modales (en % de p.km) des différents modes, catégorisés ainsi :

- les modes « décarbonés », c'est-à-dire dont les émissions sont nulles à l'usage (le vélo et la marche). La part modale (de 0 à 100 %) de ces modes est représentée selon l'axe vert.
- les modes « bas-carbone », dont les émissions sont non-nulles mais inférieures à 70 gCO₂/p.km (en 2026), regroupant les transports en commun (dont les Transports Publics Express) et le

covoiturage (à deux personnes ou plus). La part modale de ces modes est représentée selon l'axe jaune.

- les modes carbonés, dont les émissions sont supérieures à 70 gCO₂/p.km, regroupant la voiture en autosolisme et la moto. La part modale de ces modes est représentée selon l'axe orange.

La somme des parts modales est nécessairement égale à 100 %. Ainsi les trois axes sont liés : connaître les coordonnées d'un point selon deux axes donne sa coordonnée selon le troisième axe.

Sur ce schéma sont représentés deux situations de la mobilité : le scénario de Référence (point orange), et le scénario Gisement Combiné (point vert). On observe que la part modale des modes décarbonés augmente de 4 % à 36 % entre le scénario Référence et le scénario Combiné. Cette évolution s'accompagne d'une baisse de 51 % à 15 % de la part des modes carbonés. La part des modes bas-carbone reste globalement stable, mais traduit en fait un report modal des transports publics vers la marche et le vélo, contrebalancé par un report de la voiture en autosolisme vers le covoiturage et les Transports Publics Express. Le report modal direct de la voiture en autosolisme vers la marche et le vélo reste cependant prépondérant.

Sur les lignes d'iso-émission (lignes 25 gCO₂/p.km, 50 gCO₂/p.km, 75 gCO₂/p.km, et 100 gCO₂/p.km), la valeur globale des émissions par p.km du mix de mobilité est constante. Ces lignes permettent de situer chaque point du diagramme en termes de valeur des émissions par p.km du mix de mobilité qu'il représente. Ainsi, dans le scénario de Référence, les émissions sont d'environ 80 gCO₂/p.km, tandis que dans le scénario Gisement Combiné, elles sont d'environ 40 gCO₂/p.km.

Ce diagramme a été réalisé en prenant les hypothèses suivantes :

- Les résultats des scénarios Combiné Gisement et Référence en termes de parts modales ont été utilisés.
- Les émissions par p.km suivantes ont été utilisées (en 2026)
 - Marche et vélo : 0 gCO₂/p.km
 - Deux-roues motorisées : 90 gCO₂/p.km, soit environ 30 % d'amélioration par rapport au parc actuel (136 gCO₂/p.km selon la Base Carbone de l'ADEME)
 - Voiture : 124 gCO₂/v.km, qu'on divise par le nombre d'occupants pour obtenir les émissions par p.km. Les hypothèses de la répartition du nombre d'occupants sont illustrées dans la Figure 80.
 - Transports en commun ferroviaires : 9 gCO₂/p.km.
 - Transports en commun routiers : 44 gCO₂/p.km.
- Pour les trois catégories de modes (décarbonés, bas-carbone, et carbonés), les émissions moyennes suivantes ont été calculées :
 - 0 gCO₂/p.km pour les modes décarbonés (marche et vélo)
 - 45 gCO₂/p.km pour les modes bas-carbone (Transports en commun ferroviaires et routiers, ainsi que voitures contenant deux personnes ou plus)
 - 120 gCO₂/p.km pour les modes carbonés (deux-roues motorisés et voiture contenant une personne)

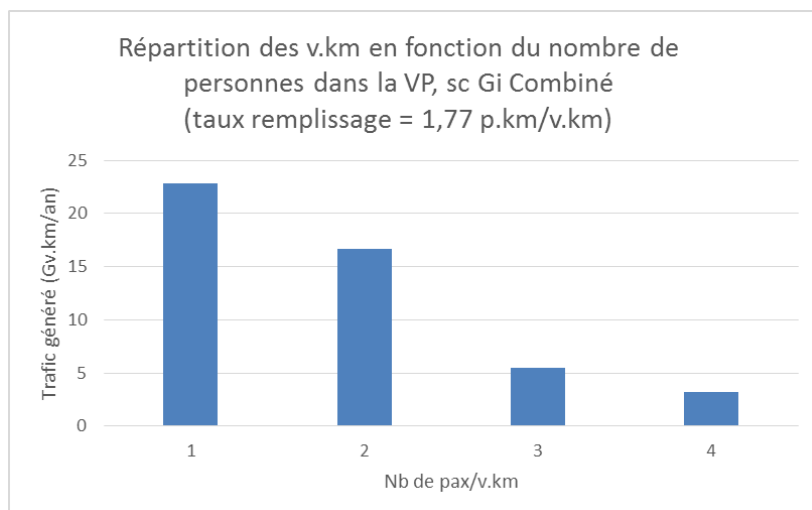


Figure 80 : Répartition du trafic dans le scénario Gisement Combiné en fonction du nombre de passager par voiture. Ainsi, la plus grande part du trafic (23 Gv.km/an) est composée de voiture.km faits seul dans la voiture. 16 Gv.km sont effectués à deux dans la voiture. Cette répartition correspond au taux de remplissage global observé dans le scénario Gisement Combiné (1,77 p.km/v.km).

8.3. Interprétation

Pour mieux comprendre les ordres de grandeur obtenus, nous nous sommes basés sur la situation observée en 2008, et avons supposé la mise en place de tous les domaines d'action (système Combiné), et leur usage, dès cette année-ci. En comparant la situation initiale (l'observé en 2008) et la situation finale (le système Combiné est mis en place en 2008), nous avons obtenu la baisse des émissions CO₂ qui peut être raisonnablement attendue si la structure de la mobilité des ZMD ne change pas radicalement entre 2008 et 2026. La baisse attendue est proche des résultats fournis par le modèle IMMOVE pour chaque scénario. Le léger écart s'explique par le fait que seule la baisse due à la réduction de trafic VP est prise en compte, alors que les autres modes subissent également une réduction de trafic et donc des réductions d'émissions. Cette simplification est d'autant plus sensible que la réduction des émissions est grande.

Une méthodologie similaire à celle pour les autres domaines d'action a été utilisée (Figure 81 pour l'application du domaine « Vie de Proximité », Figure 82 pour le domaine « Vélo » et « TPE » et Figure 83 pour le domaine « Covoiturage »).

Trafic VP 2008		total	<7 km	7-15 km	15-30 km	30-80 km
Travail	(vkm)	36	5	8	11	11
Pro	(vkm)	6	0	1	2	2
Etudes	(vkm)	4	1	1	1	1
Achats proxi	(vkm)	7	3	2	2	0
Grande surface	(vkm)	13	4	4	3	2
Admin/Soins	(vkm)	6	2	2	1	1
Loisirs	(vkm)	20	4	5	6	6
Visites/Vacances	(vkm)	25	3	4	6	11
Total	(vkm)	117	23	27	32	34

Trafic VP restant après VDP		total	<7km	7-15km	15-30	30-80
Travail	(vkm)	29.2	4.2	6.7	9.1	9.1
Pro	(vkm)	5.7	0.4	0.9	2.3	2.1
Etudes	(vkm)	3.7	1.4	0.9	0.9	0.6
Achats proxi	(vkm)	7.2	3.3	2.0	1.5	0.4
Grande surface	(vkm)	2.8	0.9	0.9	0.6	0.4
Admin/Soins	(vkm)	6.4	1.9	2.2	1.2	1.0
Loisirs	(vkm)	19.9	3.5	4.7	5.7	6.0
Visites/Vacances	(vkm)	25.1	3.4	4.0	6.4	11.3
Total	(vkm)	100.0	19.1	22.3	27.7	30.9

Réduction Mobilité VDP	
DT	19%
Grande surface	78%
Autres motifs	0

Figure 81 : Effet du domaine d'action « Vie de Proximité » sur le trafic VP en 2008 dans les ZMD dans le cadre du scénario « Combiné Gi ». Le trafic est décomposé par motif et par classe de distance pour application du domaine d'action. Les motifs « Travail » (DT) et « Grande Surface » sont affectés par la « Vie de Proximité ».

Trafic VP restant après Vélo + TPE		total	<7km	7-15km	15-30	30-80					
Travail	(Gv.km)	19.9	1.0	2.5	7.2	9.1					
Pro	(Gv.km)	4.3	0.1	0.3	1.8	2.1					
Etudes	(Gv.km)	2.0	0.3	0.3	0.7	0.6					
Achats proxi	(Gv.km)	3.4	0.9	0.9	1.2	0.4		PKM pris par le vélo			
Grande surface	(Gv.km)	1.9	0.4	0.6	0.6	0.4		Distance	Achats proximité	Grande surface	Autres motifs
Admin/Soins	(Gv.km)	3.3	0.4	0.8	1.0	1.0		< 7km	73%	60%	77%
Loisirs	(Gv.km)	13.2	0.8	1.8	4.5	6.0		7 – 20 km	56%	30%	62%
Visites/Vacances	(Gv.km)	18.6	0.8	1.5	5.0	11.3		>20 km	0%	0%	0%
Total sans TPE	(Gv.km)	66.6	4.8	8.8	22.1	30.9			Report VP - Bus	Report VP -Train	
Total avec TPE	(Gv.km)	59.9						Mobilité reportée ZMD (%p.km)	9.2%	1.0%	

Figure 82 : Effet des domaines d'action « Vélo » et « TPE » sur le trafic VP restant après application du domaine « Vie de Proximité », en 2008 dans les ZMD dans le cadre du scénario « Combiné Gi ». Le trafic est décomposé par motif et par classe de distance pour application du domaine d'action. Les motifs « Achats de proximité », « Grande Surface », et l'ensemble des autres motifs sont affectés par le domaine « Vélo », en fonction de la classe de distance des trajets. Le reste du trafic VP est amputé de la part reportée vers les TPE, égale à la part de mobilité VP reportée vers les TPE, cette part étant uniformément répartie vis-à-vis des taux de remplissage.

Année 2008	Travail	Autres motifs	Total
Trafic VP initial (Gv.km)	18	42	60
Taux remplissage initial (p.km/v.km)	1.35	1.36	-
Mobilité VP initiale (Gp.km)	24	57	81
Assiette de mobilité (Gp.km) concernée par le	52%	52%	-
Mobilité VP concernée par le covoiturage	13	30	42
Mobilité VP non concernée par le covoiturage	12	27	39
Taux remplissage covoiturage, appliqué à la mobilité concernée (p.km/v.km)	2.15	3.6	-
Trafic VP généré par la mobilité concernée	6	8	14
Trafic VP généré par la mobilité non concernée (Gv.km)	9	20	29
Trafic VP final (Gv.km)	14	28	43
Taux de remplissage initial (p.km/v.km)	1.36		
Taux de remplissage final (p.km/v.km)	1.90		
Baisse du trafic (%v.km)	63%		
Part VP dans émissions CO ₂ en 2026 (%v.km)	95%		
Diminution CO ₂ VP attendue (%gCO ₂)	60%		
Augmentation CO ₂ TPE	2.5%		
Diminution CO ₂ attendue (%gCO ₂)	58%		
Diminution CO ₂ obtenue IMMOVE (%gCO ₂)	60%	OK	

Figure 83 : Effet du domaine d'action « Covoiturage » sur le trafic VP restant après application des domaines « Vie de Proximité », « Vélo » et « TPE », en 2008 dans les ZMD dans le cadre du scénario « Combiné Gi ». Les motifs « Travail » et l'ensemble des autres motifs sont affectés par le domaine « Covoiturage » de manière différenciée. Les résultats finaux en termes d'émissions CO₂ sont présentés, et sont très proches des résultats obtenus par IMMOVE en 2026 par rapport au scénario Référence. Un écart significatif est observé entre le taux de remplissage obtenu par IMMOVE (1,77 p.km/v.km) et celui obtenu par cette reconstitution (1,90 p.km/v.km). Les hypothèses simplificatrices prises pour cette reconstitution génèrent de faibles écarts sur le trafic VP final, induisant un écart significatif entre les taux de remplissage car le trafic est diviseur de la mobilité pour obtenir le taux de remplissage. Ainsi un trafic VP final de 46 Gv.km/an au lieu des 43 obtenus ici mènerait à un taux de remplissage de 1,77 p.km/v.km.

Le scénario Dév Combiné mène à une réduction de 25 % des émissions de CO₂ par rapport au scénario Référence, ce qui correspond à une réduction de 44 % par rapport aux émissions de l'année 2008. C'est au-delà de l'objectif de 29 % de réduction fixé par la SNBC en 2028 (par rapport à 2013) pour le secteur des transports. Cet objectif serait également atteint avec un progrès technologique beaucoup plus faible que celui supposé dans le scénario Référence.

Ce résultat, considéré comme une étape intermédiaire vers le scénario Gi Combiné, est compatible avec une trajectoire de division par 4 des émissions d'ici 2050 : le scénario Gi Combiné mène à 60 % de réductions des émissions par rapport au scénario Référence en 2026, ce qui correspond à une réduction de 70 % des émissions par rapport à l'année 2008, très proche de l'objectif « facteur 4 », à 75 %.

8.4. Bilan économique

Les postes de dépenses qui diffèrent entre les scénarios Combiné et le scénario Référence sont l'ensemble des postes listés dans chaque domaine d'actions. Les dépenses ne changent pas car la mise en place de chaque domaine d'action requiert des dépenses indépendantes de celles des autres domaines d'action. Au contraire, les économies réalisées par le système Combiné ne se somment pas, car la baisse de trafic VP observée dans le système Combiné n'est pas égale à la somme des baisses de trafic des autres systèmes étant données les interactions entre les différents systèmes.

Les calculs sont détaillés dans les Tableau 45 et Tableau 46.

Le système Combiné, en scénario Développement, induit des augmentations de dépenses qui ne sont pas complètement compensées par les réductions de dépense qu'il permet : ce système coûte environ 1,2 milliard €/an de plus que le scénario Référence. En scénario Gisement, le système Combiné génère un bénéfice par rapport au scénario Référence de 1,9 milliards € annuellement.

Les postes de dépenses significatifs (qui pourraient faire varier le bilan de plus de 50 % en variant de 100 %) pour le scénario Combiné Gisement sont les espaces de coworking, les ressources humaines pour les tournées de livraison des achats, et les vélos de différents types pour équiper les ménages, et la main d'œuvre pour l'exploitation des flottes de bus express. La sensibilité du résultat net au prix du carburant est de 0,8 (si le prix du carburant augmente de 1 %, alors le résultat net (l'économie nette réalisée) augmente de 0,8 %); celle au prix de la VP neuve est de 2,6.

Pour le scénario Combiné Développement, les postes qui pourraient faire varier le bilan de plus de 100 % en variant de 100 % sont les ressources humaines pour la préparation et la finalisation des achats dans les grandes surfaces, les vélos de différents types pour équiper les ménages. Dans ce scénario, les dépenses relatives à l'équipement des ménages en véhicules et équipements « vélo » représentent 50 % des dépenses. La sensibilité du bilan global au prix de ce poste agrégé est de -2,5. En comparaison, sa sensibilité au prix du carburant est de 1,8, et sa sensibilité au prix des VP neuves de 4,5.

Les économies réalisées en moindre consommation de carburant et en moindre usage de la VP font plus que compenser les dépenses. Les analyses de sensibilité montrent que c'est le prix de la VP neuve qui est le facteur le plus important dans la constitution du bilan économique.

En termes d'augmentation des dépenses annuelles par habitant, le scénario Gisement requiert 550 €/hab/an (et permet de réduire les dépenses de 720 €/hab/an) tandis que le scénario Développement requiert 270 €/hab/an (et permet de réduire les dépenses de 290 €/hab/an).

Tableau 45 : Les différents postes de dépenses pour le scénario Combiné Gisement.

Élément différent entre S' et Sref	Coût unitaire HT (€)	Unité	Nombre d'unités dans S'	Unité	Coût total S' (M€)	Durée de vie (an)	Coût à l'année S' (M€)	Coût à l'année Sref (M€)
Espaces de coworking	5 000	€/m2	12 876 273	m2	64 381	50	1 288	-
Matériel dans les espaces de coworking	20	€/m2/an	12 876 273	m2	261	1	261	-
Ressources humaines pour la gestion des espaces de coworking, ménage	29 796	€/pers/an	19 510	pers	581	1	581	-
Bâtiments (grande surface dans Sref et entrepôt drive dans S')	N/A	€/magasin	N/A	magasin	-	50	-	-
Ressources humaines préparation et finalisation de l'achat	N/A	€/pers/an	N/A	pers	-	1	-	-
Equipements logistiques	N/A	€/magasin	N/A	magasin	-	50	-	-
Flotte de véhicules de livraison	20 833	€/veh	45 544	véh	949	5,1	187	-
Carburant utilisé par la livraison	0,94	€/L	64 280 890	L	60	1,0	60	-
Ressources humaines pour la livraison	29 796	€/pers/an	51 755	pers	1 542	1	1 542	-
Consignes de dépôt/retrait des achats	16 667	/bloc consigne	116 435	bloc consignes	1 941	50	39	-
Ressources humaines gardiennage des achats	2	€/achat	551 768 166	achat	828	1	828	-
Equipements frigorifiques /congélation pour le gardiennage des achats	16 667	unité frigorifique	232 870	unité frigorifique	3 881	10	388	-
Ressources humaines pour aide à la commande sans Internet	29 796	€/pers/an	3 583	pers	107	1	107	-
VAE, s-pedelecs, tricycles	1 250	€/véhicule	18 736 056	véhicule	23 420	9,4	2 496	-
Cargo bikes, e cargo bike, trailers	1 667	€/véhicule	11 643 521	véhicule	19 406	9,4	2 068	-
Cadenas + vélos classiques	354	€/équipement	11 643 521	équipement	4 124	9,4	440	-
Equipements vestimentaires	83	€/adulte	18 736 056	adulte	1 561	3	520	-
Autoroutes vélo	333 333	€/km	45 149	km	15 050	30	502	-
Routes vélo (=2 bandes cyclables)	5 833	€/km	75 412	km	440	15	29	-
Signalisation vélo	2 500	€/km	120 561	km	301	15	20	-
Zones 30 dans les agglomérations	-	€/agglo	2 864	agglo	-	15	-	-
Transformation stationnement VP en stationnement vélo	300	€/place	150 824	place	45	15	3	3
Ouvrages d'art, ponts anti-coupure	833 333	€/ouvrage	573	ouvrage	477	30	16	-
Ressources humaines Vélo-école + maison d'info	59 592	€/pers/an	2 864	pers	171	1	171	-
Applis, sites web d'infos	-	€/appli	-	appli	-	1	-	-

Élément différent entre S' et Sref	Coût unitaire HT (€)	Unité	Nombre d'unités dans S'	Unité	Coût total S' (M€)	Durée de vie (an)	Coût à l'année S' (M€)	Coût à l'année Sref (M€)
Pôles intermodaux autour des grandes agglomérations	125 000 000	€/pôle	34	pôles	4 250	30	142	-
Aménagement des voies rapides autour des grandes agglomérations	5 833 333	€/km	136	km	793	30	26	-
Gares autoroutières	25 000 000	€/gare	136	gares	3 400	30	113	-
Parc de bus	208 333	€/car	13 160	cars	2 742	10	274	-
Centres de maintenance	35 000 000	€/centre	34	centres	1 190	15	79	-
Ressources humaines gestion bus	51 820	€/an/salarié	29 910	salariés	1 550	1	1 550	-
Consommation en essence des bus	0,94	€/L	355 330 450	L/an	333	1	333	-
Renouvellement du parc de trains périurbains	12 254 902	€/rame	1 260	rames	15 441	30	515	-
Stations de covoiturage autoroute	562 500	€/station	141	station	79	20	4	-
Stations de covoiturage routes nationales	45 139	€/station	366	station	17	20	1	-
Stations de covoiturage routes départementales	36 458	€/station	17 007	station	620	20	31	-
Application Internet/smartphone	59 592	€/an	18000%	pers	11	1	11	-
Ressources humaines pour aider à planifier des trajets pour ceux qui ont des difficultés d'accès à Internet	29 796	€/pers/an	7 189	pers	214	1	214	-
Augmentation durée de vie VP	20 833	€/VP	17 465 281	VP	363 860	20,2	18 001	31 535
Moins de carburant achat pour les ménages	0,94	€/L	5 720 076 996	L	2 158	1	2 158	5 363
					Total annuel (M€)		34 999	36 900
					Surcoût total annuel (M€)		- 1 901	

Tableau 46 : Les différents postes de dépenses pour le scénario Combiné Développement.

Élément différent entre S' et Sref	Coût unitaire (€)	Unité	Nombre d'unités dans S'	Unité	Coût total S' (M€)	Durée de vie (an)	Coût à l'année S' (M€)	Coût à l'année Sref (M€)
Stations de covoiturage autoroute	107 639	€/station	141	station	15	20	1	-
Stations de covoiturage routes nationales	27 778	€/station	244	station	7	20	0	-
Stations de covoiturage routes départementales	22 569	€/station	8 503	station	192	20	10	-
Application Internet/smartphone	59 592	€/an	18000%	pers	11	1	11	-
Ressources humaines pour aider à planifier des trajets pour ceux qui ont des difficultés d'accès à Internet	29 796	€/pers/an	1 660	pers	49	1	49	-
Espaces de coworking	5 000	€/m2	3 252 953	m2	16 265	50	325	-
Matériel dans les espaces de coworking	20	€/m2/an	3 252 953	m2	66	1	66	-
Ressources humaines pour la gestion des espaces de coworking, ménage	29 796	€/pers/an	4 929	pers	147	1	147	-
Ressources humaines préparation et finalisation de l'achat	29 796	€/pers/an	96 739	pers	2 882	1	2 882	-
Ressources humaines pour la livraison	3	€/achat livré	297 954 810	achat livré	894	1	894	-
VAE, s-pedelegs, tricycles	1 250	€/véhicule	18 736 056	véhicule	23 420	19,7	1 187	-
Cargo bikes, e cargo bike, trailers	1 667	€/véhicule	11 643 521	véhicule	19 406	19,7	984	-
Cadenas + vélos classiques	354	€/équipement	11 643 521	équipement	4 124	19,7	209	-
Equipements vestimentaires	83	€/adulte	18 736 056	adulte	1 561	3	520	-
Autoroutes vélo	333 333	€/km	45 149	km	15 050	30	502	-
Routes vélo (=2 bandes cyclables)	5 833	€/km	75 412	km	440	15	29	-
Signalisation vélo	2 500	€/km	120 561	km	301	15	20	-
Zones 30 dans les agglomérations	-	€/agglo	2 864	agglo	-	15	-	-
Transformation stationnement VP en stationnement vélo	300	€/place	150 824	place	45	15	3	3
Ouvrages d'art, ponts anti-coupure	833 333	€/ouvrage	573	ouvrage	477	30	16	-
Ressources humaines Vélo-école + maison d'info	59 592	€/pers/an	2 864	pers	171	1	171	-
Applis, sites web d'infos	-	€/appli	-	appli	-	1	-	-
Augmentation durée de vie VP	20 833	€/VP	17 465 281	VP	363 860	14,0	26 015	31 535
Moins de carburant achat pour les ménages	0,94	€/L	5 720 076 996	L	4 056	1	4 056	5 363
					Total annuel (M€)		38 097	36 900
					Surcoût total annuel (M€)		1 196	

Chapitre 9 - Bibliographie

- ADEME. (2012). *Information CO2 des prestations de transport*. Récupéré sur <http://www.ademe.fr/information-co2-prestations-transport-guide-methodologique>
- ADEME. (2013). *L'exercice de prospective de l'ADEME "Vision 2030-2050"*. ADEME. Récupéré sur <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>
- ADEME. (2014). *Base Carbone*. Récupéré sur <http://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/basecarbone/donnees-consulter/liste-element/categorie/164>
- ADEME. (2015). *Etude nationale sur le covoiturage de courte distance*. Récupéré sur http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/etude_nationale_covoiturage_courte_distance-aies_de_covoiturage.pdf
- ADEME. (2015). *Un mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations*.
- ADEME. (2016). *Etude d'évaluation sur les services vélos - Enquête sur le stationnement sécurisé intermodal*. Récupéré sur <http://www.ademe.fr/etude-devaluation-services-velos>
- ADEME, Deloitte. (2008). *Efficacité énergétique, émissions de CO2 et autres émissions gazeuses spécifiques des modes de transport*.
- Aguilera, A., Lethiais, V., Rallet, A., & Proulhac, L. (2016). Home-based telework in France: Characteristics, barriers and perspectives. *Transportation Research Part A*, 92, 1-11.
- Baaj, H. (2012). Dégradation et usure des revêtements routiers souples. *Techniques de l'Ingénieur*. Récupéré sur <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/materiaux-et-tribologie-42467210/degradation-et-usure-des-revetements-routiers-souples-tri4620/>
- Bu, L. (2016). *Construction durable et bilan carbone - L'outil PDE*. Récupéré sur http://www.constructiondurable.com/docs/M+Construction%20durable_et_PDE-160107.pdf
- Carbone 4 / La Fabrique de la Cité. (2015). *Optimiser l'offre de mobilité dans les périphéries des villes - Proposition de méthode d'évaluation d'impact*.
- Centraal Bureau voor de Statistiek. (2015). *Factsheet - The Netherlands : cycling country*. Récupéré sur https://www.cbs.nl/NR/rdonlyres/9F9F3F71-9324-46D3-AD7E-076C59F8392D/0/2015factsheetnederlandfietsland_ENG.pdf
- CGDD. (2008). *Fichiers détail de l'Enquête nationale transports et déplacements 2008*. Récupéré sur OBSERVATION ET STATISTIQUES - Fichiers détail: http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/transports/r/transport-voyageurs-deplacements.html?tx_ttnews%5Btt_news%5D=20552&cHash=e390720644fd50123285cd8f6fc4d008
- CGDD. (2010). La mobilité des Français - Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008. *La Revue du CGDD*.
- CGDD. (2014). *Le covoiturage pour les déplacements domicile-travail : quel potentiel ?*
- CGDD. (2015). *Comptes des transports en 2015*. Récupéré sur OBSERVATION ET STATISTIQUES: <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/references/comptes-transports-2015.html>
-

- CGDD. (2015). *Les comptes des transports en 2015*. Récupéré sur http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/References/2015/comptes-transports-2014/rapport-comptes-transports-edition-2015-b.pdf
- CGDD. (2016). *L'intermodalité vélo-train : une évaluation socio-économique des bénéfices*. Récupéré sur http://isidoredd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/Temis/0085/Temis-0085704/THEMA_14.pdf
- CGET. (2016). *Espace Cartographique*. Récupéré sur L'observatoire des Territoires: <http://carto.observatoire-des-territoires.gouv.fr/>
- Conseil général économique et financier, Conseil général des ponts et chaussées. (2006). *Rapport sur la comparaison au niveau européen des coûts de construction, d'entretien et d'exploitation des routes*. Récupéré sur <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/074000038.pdf>
- CREDOC. (2009). *Les différences de modes de vie selon le lieu de résidence*. Paris.
- CREDOC. (2012). *Enquête commerce 2012 - Comportements et attitudes des consommateurs à l'égard du commerce alimentaire*. Récupéré sur <http://www.credoc.fr/pdf/Rech/C301.pdf>
- CREDOC. (2014). *La diffusion des technologies de l'information et de la communication dans la société française*. Centre de Recherche pour l'Etude et l'Observation des Conditions de vie. Récupéré sur http://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/etude-CREDOC-diffusion-TIC-2014.pdf
- CVTC. (2004). *Le coût des aménagements cyclables*. Récupéré sur http://www.villes-cyclables.org/modules/kameleon/upload/1le_cou--770-t_des_ame--769-nagements_cyclables.pdf
- Del Duce, A. (2011). Life Cycle Assessment of conventional and electric bicycles. *Eurobike*. Friedrichshafen.
- DGALN. (2013). *Stationnement des vélos dans les espaces privés : dimensions et caractéristiques*. Récupéré sur http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN_referentiel_stationnement_des_velos_decembre_2013.pdf
- DGCCRF. (2012). *Grande distribution et croissance économique en France*. Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes. Récupéré sur http://www.economie.gouv.fr/files/directions_services/dgccrf/documentation/dgccrf_eco/dgccrf_eco11.pdf
- France Info. (2016, Avril). Une voiture neuve coûte en moyenne 25 108 euros en France, un record. *France Info*. Récupéré sur http://www.francetvinfo.fr/economie/une-voiture-neuve-coute-en-moyenne-25108euros-en-france-un-record_1713169.html
- GreenWorking. (2012). *Le télétravail dans les grandes entreprises françaises*. Récupéré sur http://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/cns/ressources/Teletravail_Rapport_du_ministere_de_Mai2012.pdf
- IAU. (2016). *Nouveaux modes de travail et enjeux de mobilité*. Paris.
- IAU IDF. (2006). *Transports en commun sur les voies rapides en Ile-de-France*. Récupéré sur <https://www.iau-idf.fr/savoir-faire/nos-travaux/edition/transports-en-commun-sur-les-voies-rapides-en-ile-de-france.html>

- IAU IDF. (2010). *La circulation routière en Ile-de-France en 2010*. Récupéré sur http://www.omnil.fr/IMG/pdf/la_circulation_routiere_en_idf_en_2010.pdf
- INSEE. (2007). *Données détaillées des projections de ménages pour la France métropolitaine, à l'horizon 2030*. Récupéré sur Institut national de la statistique et des études économiques: http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?ref_id=ir-projmen2030
- INSEE. (2010). *La population des régions en 2040*. Récupéré sur Institut national de la statistique et des études économiques: http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref_id=ip1326
- INSEE. (2010). *Projections de population à l'horizon 2060*. Récupéré sur Institut national de la statistique et des études économiques: http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref_id=ip1320
- INSEE. (2010). *Projections de population à l'horizon 2060*. Récupéré sur <http://www.insee.fr/fr/ffc/ipweb/ip1320/ip1320.pdf>
- INSEE. (2013). *Mobilités professionnelles en 2013 : déplacements domicile - lieu de travail*. Récupéré sur <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2022109>
- INSEE. (2014). *L'emploi dans la fonction publique en 2014*. Récupéré sur http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=0&ref_id=ip1586
- INSEE. (2014). *Les catégories d'entreprise en France : de la microentreprise à la grande entreprise*. Récupéré sur http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=0&ref_id=if4
- INSEE. (2015). *Emploi salarié et non salarié par activité en 2015*. Récupéré sur INSEE: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2424696#tableau-Donnes>
- INSEE. (2015, Décembre). *Nombre d'établissements et effectifs salariés par secteur d'activité détaillé et tranche d'effectifs salariés détaillés au 31 décembre 2013*. Récupéré sur http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?reg_id=99&ref_id=etab-eff-sal-par-sates
- INSEE. (2016, January). *Pyramide des âges au 1er janvier 2016*. Récupéré sur Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques: http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?ref_id=ccc
- Kolli, Z. (2011). Cars longévité: a biometric approach. *Young Researchers Seminar 2011*, (pp. 1-24). Denmark. Récupéré sur http://www.ectri.org/YRS11/Documents/YRS11Book%20of%20papers_final.pdf
- La Centrale.fr. (2016). *Toutes les fiches techniques voiture*. Récupéré sur La Centrale: www.lacentrale.fr/fiche-technique-auto.php
- La Fabrique de la Cité. (2015). *Optimiser l'offre de mobilité dans les périphéries des villes*. Récupéré sur [https://www.lafabriquedelacite.com/fabrique-de-la-cite/data.nsf/619FF6D8586A1FC7C1257DD30036B1D2/\\$file/note_carbone4_v8_def.pdf](https://www.lafabriquedelacite.com/fabrique-de-la-cite/data.nsf/619FF6D8586A1FC7C1257DD30036B1D2/$file/note_carbone4_v8_def.pdf)
- Le Parisien. (2016, Mars). *Roissy : Aéroville a le sourire avec 8,5 millions de visites en 2015*. Récupéré sur leparisien.fr: <http://www.leparisien.fr/roissy-en-france-95700/roissy-aeroville-a-le-sourire-avec-8-5-millions-de-visiteurs-en-2015-24-03-2016-5656903.php>
- MEEM. (2014). *L'ouverture des données du réseau routier national*. Récupéré sur <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-reseau-routier-national.html>
- Megnin, J.-M. (2013). *Les chiffres clés du drive et picking en infographie par Keyneosoft*. Récupéré sur le-furet-du-retail: <http://www.le-furet-du-retail.com/article-les-chiffres-cles-du-drive-et-picking-en-infographie-par-keyneosoft-116523149.html>

- Métropole Aix-Marseille Provence. (2016). *Mobilité métropolitaine : l'agenda*. Récupéré sur http://www.agam.org/fileadmin/ressources/agam.org/etudes/DEPLACEMENTS/deplacements/MeP_Agenda_Mobilit%C3%A9_Final_2016.pdf
- Morgan, J. (2015, May 4). Five Things You Need To Know About Telecommuting. *Forbes*. Récupéré sur <http://www.forbes.com/sites/jacobmorgan/2015/05/04/5-things-you-need-to-know-about-telecommuting/#252c8ac412a0>
- MTES. (2017). *Analyse coûts bénéfiques des véhicules électriques*. Récupéré sur <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Analyse%20co%C3%BAts%20b%C3%A9n%C3%A9fices%20des%20v%C3%A9hicules%20%C3%A9lectriques.pdf>
- Observatoires des mobilités actives - CVTC. (2013). *Les français et le vélo en 2012*. Club des Villes et Territoires Cyclables. Récupéré sur http://www.villes-cyclables.org/modules/kameleon/upload/1LesFrancaisetLeVelo_v3.pdf
- Projet PREDIT PORT-VERT. (2011). *Plusieurs Options de Rabattement ou Transfert Vélo et Réseaux de Transport - Approche multi-aspect des diverses formules d'intermodalité*.
- RAC-F, FNH. (2014). *Les solutions de mobilité soutenable en milieu rural et périurbain*.
- Région Ile-de-France. (2017). *Révolutionner les transports en Ile-de-France*. Récupéré sur <http://www.prefectures-regions.gouv.fr/content/download/29870/204269/file/Dossier%20R%C3%A9volutionner%20les%20transport%20en%20%C3%84le-de-France.pdf>
- Roland Berger firm, CAS. (2009). *Le développement du télétravail dans la société numérique de demain*. Récupéré sur <http://archives.strategie.gouv.fr/cas/system/files/588dcf00d01.pdf>
- Unibail Rodamco. (2016, Décembre). *Centres commerciaux*. Récupéré sur [unibail-rodamco.fr: http://www.unibail-rodamco.fr/W/do/centre/france](http://www.unibail-rodamco.fr/W/do/centre/france)

Chapitre 10 - Annexes

10.1. Annexe 1 : Calcul du taux de remplissage avec système de covoiturage tenant compte du taux de remplissage observé sans système de covoiturage

La démonstration est la suivante :

On considère la loi f_{CG} décrite en Figure 62, obtenue par la simulation Monte Carlo (7.1.4).

La loi f_{CG} a été obtenue en tirant des trajets.personne aléatoirement et en comptant le nombre de VP dans lesquels ces covoiturages potentiels CP pouvaient être partagés, pour en déduire le taux de remplissage obtenu parmi les CP. La même loi aurait été obtenue en raisonnant sur des trajets.VP et non plus des trajets.personne. Autrement dit, les tirages aléatoires de la simulation Monte Carlo auraient pu représenter des VP se déplaçant de l'origine à la destination, et non plus des personnes se déplaçant. L'algorithme aurait alors compté un taux de regroupement entre VP qui pourraient rouler ensemble sur une partie du trajet.

Gardant les deux interprétations possibles de cette loi, considérons un nombre quelconque de trajets, $t < 200 \text{ traj}$. Supposons de plus que le taux de remplissage moyen des VP transportant ces trajets sans que le covoiturage ne soit mis en place est τ_{obs} , $\tau_{obs} > 1$. Le nombre de VP Nb_{VP} couvrant ces trajets est donc $Nb_{VP} = t/\tau_{obs}$. Nb_{VP} est inférieur à 200 voitures.

Sur la plage $Nb_{CP} \in [0, 200]$ CP, la loi $f_{CG}(Nb_{CP})$ est supposée affine d'origine 1,0 traj/VP. Cette hypothèse est validée par le coefficient R^2 de la régression linéaire sur cette loi (d'équation $y = 0.0129x + 1.0$): $R^2=0,95$.

Considérons la fonction $g(Nb_{CP}) = f_{CG}(Nb_{CP}) - 1$. Cette loi est donc linéaire sur la plage $[0, 200]$ trajets.

On a donc, par linéarité de g :

$$f_{CG}(Nb_{VP}) = g(Nb_{VP}) + 1 = g\left(\frac{t}{\tau_{obs}}\right) + 1 \approx \frac{g(t)}{\tau_{obs}} + 1 = \frac{f_{CG}(t) - 1}{\tau_{obs}} + 1 \quad (56)$$

$f_{CG}(Nb_{VP})$ représente le nombre moyen de VP (qui contiennent en moyenne τ_{obs} traj/véh) qu'on pourrait regrouper car leurs trajets sont compatibles géographiquement. Il ne s'agit pas d'un taux de remplissage, mais d'un taux de regroupement de VP (mesuré en VP). $f_{CG}(t)$ représente le taux de remplissage en trajets/VP obtenu en tirant aléatoirement t trajets dans la simulation Monte Carlo.

Par exemple, pour $t = 100 \text{ traj}$ et $\tau_{obs} = 1,5 \text{ traj/VP}$, on a $Nb_{VP} = 67 \text{ VP}$; $f_{CG}(Nb_{VP}) = f_{CG}(67) = 2,05 \text{ VP/regroupement}$ et $f_{CG}(t) = f_{CG}(100) = 2,47 \text{ traj/VP}$. On vérifie donc l'équation (avec une marge d'erreur de 3% due à la non linéarité parfaite de g) :

$$\frac{f_{CG}(t) - 1}{\tau_{obs}} + 1 = \frac{2,47 - 1}{1,5} + 1 = 1,98 \approx 2,05 \quad (57)$$

Appelons τ_{reg} le taux d'occupation obtenu en imaginant qu'à chaque fois que plusieurs VP font un trajet compatible géographiquement (partagent le même angle de covoiturage), les trajets qu'elles transportent (en moyenne τ_{obs} traj/véh) se regroupent dans la même VP. En moyenne, $\tau_{reg} = f_{CG}(Nb_{VP}) * \tau_{obs}$. En reprenant l'exemple précédant, on pourrait regrouper en moyenne $\tau_{reg} = 2,05 *$

1,5 = 3,08 traj/VP, alors qu'en raisonnant seulement sur les trajets, le modèle nous donne $f_{CG}(100) = 2,47 \text{ traj/VP}$. Cet écart provient du fait que le raisonnement par trajets néglige les trajets qui étaient déjà covoiturés.

Appelons de plus $\Delta\tau_{MC} = f_{CG}(t) - 1$, la différence entre le taux de covoiturage obtenu par la simulation en considérant t comme un nombre de trajets et 1. On a alors :

$$\tau_{reg} = f_{CG}(Nb_{VP}) * \tau_{obs} = f_{CG}(t) - 1 + \tau_{obs} = \tau_{obs} + \Delta\tau_{MC} \quad (58)$$

Poursuivant notre exemple, $\Delta\tau_{MC} = f_{CG}(100) - 1 = 2,47 - 1 = 1,47 \text{ traj/VP}$. On a donc $\tau_{reg} = 1,5 + 1,47 = 2,97 \approx 3,08 \text{ traj/VP}$, avec 4% d'erreur. Tout se passe donc comme si la simulation de Monte Carlo calculait, pour les petites communautés de trajets covoiturables, un *surplus* de taux de remplissage permis par la mise en place d'un système de covoiturage (ici, +1,47 traj/VP).

10.2. Annexe 2 : Traitement des estimations brutes des experts covoiturages, pour le scénario Dév

Les estimations obtenues à l'issue de la concertation avec les experts sur le covoiturage sont représentées en Figure 84, Figure 86 et Figure 87. A partir de ces estimations, des calculs ont été effectués afin d'interpréter ces estimations sous forme de probabilité indépendantes de covoiturer. Ces calculs sont détaillés dans les sections suivantes :

10.2.1. Type de ménage, accès à la VP, et rôle dans le covoiturage (conducteur ou passager)

Les estimations brutes obtenues pour définir la probabilité qu'un trajet soit covoituré en fonction des 2 dimensions « type de ménage auquel appartient la personne faisant le trajet », « accès à la VP de cette personne », et en fonction de l'offre de covoiturage disponible « un covoiturage en tant que passager est disponible » et « un covoiturage en tant que conducteur est disponible », sont illustrées Figure 84. L'interprétation suivante a été effectuée : pour chaque case, un couple (C, P) est déterminé ainsi :

- Pas de lettre signifie 0%
- La lettre est présente mais 0 « + » signifie 25%
- 1 « + » signifie 50%
- 2 « + » signifie 75%
- 3 « + » signifie 100%
- On associe enfin la lettre à son pourcentage (voir Figure 85)

Accès VP (VP/ adulte du ménage)	Type de ménage					
	Célibataire +65 ans	Célibataire 65 ans	Couple +65 ans sans enfants	Couple -65 ans sans enfants	Ménage monoparent al	Couple avec enfants
0	P +++	P +++	P +++	P +++	P +++	P +++
0.5	X	X	P C	P + C +	X	P + C +
+1	P C	P + C ++	P C	P + C ++	C ++	C ++
		Catégorie négligeable en nombre pour le motif travail				
		Catégorie inexistante				

Figure 84 : Estimation des experts sur la probabilité qu'un trajet soit covoituré en fonction des 2 dimensions « type de ménage auquel appartient la personne faisant le trajet », « accès à la VP de cette personne », et en fonction de l'offre de covoiturage disponible « un covoiturage en tant que passager est disponible » et « un covoiturage en tant que conducteur est disponible ». La lettre P désigne la probabilité que l'offre de covoiturage en tant que passager soit acceptée. La lettre C désigne la probabilité que l'offre de covoiturage en tant que conducteur soit acceptée. Aucun symbole « C » ou « P » représente le fait que la probabilité de covoiturage est nulle. Lorsque le symbole est présent, la probabilité est non nulle, et plus il y a de « + », plus cette probabilité est grande.

Accès VP (VP/ adulte du ménage)	Type de ménage					
	Célibataire +65 ans	Célibataire 65 ans	Couple +65 ans sans enfants	Couple -65 ans sans enfants	Ménage monoparent al	Couple avec enfants
0	P 100 C 0	P 100 C 0	P 100 C 0	P 100 C 0	P 100 C 0	P 100 C 0
0.5	X	X	P 25 C 25	P 50 C 50	X	P 50 C 50
+1	P 25 C 25	P 50 C 75	P 25 C 25	P 50 C 75	P 0 C 75	P 0 C 75

Figure 85 : Première étape d'interprétation des estimations brutes des experts sur la probabilité qu'un trajet soit covoituré en fonction des 2 dimensions « type de ménage auquel appartient la personne faisant le trajet », « accès à la VP de cette personne ».

Ensuite, par simplification, les dimensions conducteur et passager ont été agrégées pour obtenir une probabilité unique de covoiturage soit en tant que conducteur soit en tant que passager. Cette simplification néglige le fait qu'un équilibre conducteur/passager doit être globalement respecté pour que les covoiturages aient lieu. Elle mène donc à une surrestimation du covoiturage et mériterait d'être affinée. L'équation suivante est utilisée pour obtenir la probabilité unique de covoiturage en fonction de ces 2 dimensions :

$$\text{probabilité (\%)} = \min(\max(P, C) + \frac{1}{3} * \min(P, C), 100) \quad (59)$$

Cette équation permet de prendre en compte le fait que certains trajets peuvent être faits en tant que passager ET en tant que conducteur alors que d'autres ne peuvent l'être qu'en tant que passager OU

(exclusif) en tant que conducteur. Par exemple, imaginons un ensemble de 100 personnes vivant dans un couple de moins de 65 ans sans enfants, avec une VP à la maison (soit 0.5 VP/adulte du ménage). Ce cas correspond à (P 50, C 50). On sait donc qu'au moins 50 trajets sont covoiturables soit en tant que passager soit en tant que conducteur. Dans le pire des cas, les 50 trajets en tant que conducteurs sont aussi ceux qui peuvent être faits en tant que passagers. Les 50 autres ne peuvent pas être covoiturés. Ainsi, exactement 50 trajets sont covoiturables. Dans le meilleur des cas, les 50 trajets covoiturables en tant que passagers sont disjoints des 50 trajets covoiturables en tant que conducteur. Par conséquent, sur les 100 trajets, 100 sont covoiturables soit en tant que passager, soit en tant que conducteur. Une valeur intermédiaire entre ces deux cas extrêmes, et plus proche de la valeur basse, a été gardée dans cette étude (la formule donne pour ce cas 67%).

Cette formule permet d'obtenir les résultats utilisés pour les calculs de taille de communautés de TC (voir Figure 65).

10.2.2. Motif du trajet

Les estimations brutes obtenues pour définir la probabilité qu'un trajet soit covoituré en fonction de la dimension « motif du trajet » sont représentées en Figure 86, deuxième colonne « Intérêt ». L'interprétation qui en a été faite pour obtenir une probabilité indépendante de covoiturage est une loi linéaire permettant d'obtenir une probabilité sur 100 en fonction des notes données par les experts :

$$\text{Probabilité (\%)} = 20 * \text{Intérêt} \quad (60)$$

Ainsi, le motif « travail » a une probabilité indépendante d'être covoiturable de 100%. Le motif « visites » a une probabilité de 20%. Les résultats finaux sont indiqués dans la Figure 86, troisième colonne « Note (%) ».

Motif	Intérêt (sur 5)	Note (%)
Travail	5	100
Etudes	2	40
Visites	1	20
Professionnel	3	60
Achats de proximité	0	0
Achats hypermarché	1	20
Administratif	1	20
Santé	1	20
Restaurant	0	0
Loisirs	2	40

Figure 86 : Estimation des experts sur la probabilité qu'un trajet soit covoituré en fonction de la dimension « motif du trajet ». Les experts ont donné une note sur 5, représentant cette probabilité, 0 représentant une probabilité nulle et 5 une probabilité maximale.

10.2.3. Distance du trajet

Les estimations brutes obtenues pour définir la probabilité qu'un trajet soit covoituré en fonction de la dimension « distance du trajet » sont représentées en Figure 87. A partir de la moyenne obtenue pour chaque classe de distance, une probabilité indépendante de covoiturage en fonction de la classe de distance a été calculée en divisant la valeur obtenue par la valeur la plus élevée (obtenue pour les

distances de 50 à 100 km). Les valeurs obtenues pour calculer la part des TC parmi les TI sont décrites Figure 65.

Plage de distance (km)	Nombre de trajets (%)			Moyenne
	Expert 1 (Ecosyst'M)	Expert 2 (OuiHop)	Expert 3 (MopEasy)	
< 7	0.0	10.0	10.0	6.7
7 à 15	5.0	20.0	10.0	11.7
15 à 30	10.0	20.0	10.0	13.3
30 à 50	35.0	20.0	30.0	28.3
50 à 100	50.0	30.0	40.0	40.0
Total	100.0	100.0	100.0	100.0

Figure 87 : Estimation des experts sur la probabilité qu'un trajet soit covoituré en fonction de la dimension « distance du trajet ». Les experts ayant des avis légèrement divergents sur la question, chacun a affecté 100 points à chaque classe de distance, en fonction de la probabilité que cette distance soit parcourue en covoiturage. La moyenne des notes obtenues pour chaque classe de distance a été calculée.

10.3. Annexe 3 : Calcul du taux de remplissage moyen à partir des communautés de CP pour les motifs autres que le DT, dans le scénario Gisement

Tableau 47 : Feuille de calculs du taux de remplissage moyen pour les motifs autres que le DT, dans le scénario Gisement.

Borne sup taille communauté CP	Nombre de communautés (freq _i)	Taille considérée pour les calculs (t _i)	Taux remplissage pour la taille de communauté considérée (τ _i)	Nombre total de CP (T _i)	Nb total VP (VP _i)
50	329	0	1.0	8 225	8 225
100	642	50	1.8	48 150	26 629
150	523	100	2.5	65 375	26 463
200	466	150	2.9	81 550	27 880
250	339	200	3.4	76 275	22 569
300	270	250	3.5	74 250	21 140
350	207	300	3.6	67 275	18 457
400	172	350	3.8	64 500	17 074
450	135	350	3.8	57 375	15 188
500	115	350	3.8	54 625	14 460
550	112	350	3.8	58 800	15 565
600	71	350	3.8	40 825	10 807
650	86	600	4.0	53 750	13 473
700	63	600	4.0	42 525	10 659
750	52	600	4.0	37 700	9 450
800	43	600	4.0	33 325	8 353
850	40	600	4.0	33 000	8 272
900	32	600	4.0	28 000	7 019
950	41	600	4.0	37 925	9 506
1000	26	600	4.0	25 350	6 354
ou plus...	402	1000	4.0	769 968	192 492
			Total	1 758 768	490 036

Part des communautés > 200 CP 53%	Taux remplissage τ _{moy} (traj/VP) 3.6
--------------------------------------	--

10.4. Annexe 4 : Calcul de la probabilité qu'un trajet initial TI pour le motif DT soit covoiturable

Tableau 48 : Feuille de calcul de la probabilité qu'un trajet initial TI pour le motif DT soit covoiturable, $P_{TC,DT}$

STVP =	0.07	0.7	0.23
SD _{DT} =	0.75		
	0.25		
SD _{DT} *STVP =	0.0525	0.525	0.1725
	0.0175	0.175	0.0575
Est =	31	25	11
	47	37	16
Est*SD _{DT} *STVP =	1.638	13.104	1.8837
	0.819	6.552	0.94185
P _{TC} =	25		

10.5. Annexe 5 : Traitement des estimations vélo

Motifs de trajet ↓	CSP →	Scolaire	Etudiant	Employé/ouvrier	Cadre/intermédiaire	Personne au foyer	Chômeur	Retraité
Achats grande surface	0-3km	1	4	2	2	3	3	1
	3-7km	0	3	1	1	1	1	0
	7-15km	0	1	0	0	0	0	0
Achats proximité	0-3km	4	5	4	4	5	5	3.5
	3-7km	3	4	3.5	3.5	3	4	1
	7-15km	1	2	2.5	2.5	2	1	0
Soins/démarches	0-3km	1	2	1	1	1	2	1
	3-7km	0	1	1	1	1	1	0
	7-15km	0	0	0	0	0	0	0
Visites amis/famille	0-3km	5	5	5	5	5	5	3
	3-7km	3	4	3	3	3	4	0
	7-15km	1	2	1	1	1	2	0
Accompagner/aller chercher	0-3km	1	1	0	0	2	2	0
	3-7km	0	0	0	0	0	0	0
	7-15km	0	0	0	0	0	0	0
Loisirs	0-3km	5	5	4	4	4	4	4
	3-7km	3	4	3	3	3	3	2
	7-15km	0	2	2	2	2	2	1
Domicile Travail	0-3km	5	5	5	5			
	3-7km	4	5	3	3			
	7-15km	0	2	1	1			
Autres professionnels	0-3km		5	5	5	5	5	
	3-7km		5	3	3	3	3	
	7-15km		2	1	1	1	1	

Figure 88 : Estimations des experts du groupe A, recueillies suite à la question suivante : en imaginant que le système vélo que vous avez défini est complètement mis en place d'ici 2026, quelle part des trajets serait faite en vélo en 2026, pour les catégories de trajets suivantes ? Veuillez répondre par une note de 0 à 5 pour chaque catégorie. Les cases vides ou grisées représentent des catégories qui n'existent pas, selon les experts. Les notes indiquées pour la catégorie de distance 0-3 km correspondent au vélo et à la marche à pieds.

Motifs de trajet ↓	CSP →		Scolaire		Etudiant		Employé/ouvrier		Cadre/intermédiaire		Personne au foyer		Chômeur		Retraité	
Achats grande surface	0-3km	/	0-3km	5	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	3
	3-7km	/	3-7km	4	3-7km	2	3-7km	1	3-7km	2	3-7km	2	3-7km	3	3-7km	3
	7-15km	/	7-15km	2	7-15km	1	7-15km	1	7-15km	1	7-15km	1	7-15km	2	7-15km	2
Achats proximité	0-3km	5	0-3km	5	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	3
	3-7km	3	3-7km	4	3-7km	3	3-7km	2	3-7km	3	3-7km	3	3-7km	4	3-7km	3
	7-15km	/	7-15km	/	7-15km	/	7-15km	/	7-15km	/	7-15km	/	7-15km	/	7-15km	/
Soins/démarches	0-3km	5	0-3km	5	0-3km	5	0-3km	5	0-3km	4	0-3km	5	0-3km	5	0-3km	3
	3-7km	4	3-7km	4	3-7km	4	3-7km	4	3-7km	3	3-7km	4	3-7km	4	3-7km	2
	7-15km	3	7-15km	3	7-15km	2	7-15km	2	7-15km	2	7-15km	2	7-15km	2	7-15km	1
Visites amis/famille	0-3km	5	0-3km	3	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	5	0-3km	4
	3-7km	5	3-7km	2	3-7km	3	3-7km	3	3-7km	3	3-7km	3	3-7km	4	3-7km	3
	7-15km	2	7-15km	1	7-15km	2	7-15km	2	7-15km	2	7-15km	2	7-15km	2	7-15km	2
Accompagner/aller chercher	0-3km	1	0-3km	3	0-3km	3	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4
	3-7km	0	3-7km	2	3-7km	2	3-7km	3	3-7km	3	3-7km	3	3-7km	3	3-7km	3
	7-15km	0	7-15km	1	7-15km	1	7-15km	1	7-15km	1	7-15km	1	7-15km	1	7-15km	1
Loisirs	0-3km	5	0-3km	5	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4
	3-7km	4	3-7km	4	3-7km	3	3-7km	3	3-7km	3	3-7km	4	3-7km	4	3-7km	3
	7-15km	2	7-15km	3	7-15km	3	7-15km	3	7-15km	3	7-15km	3	7-15km	3	7-15km	2
Domicile Travail	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	5	0-3km	5	0-3km	/	0-3km	/	0-3km	/	0-3km	/
	3-7km	3	3-7km	4	3-7km	4	3-7km	4	3-7km	/	3-7km	/	3-7km	/	3-7km	/
	7-15km	2	7-15km	3	7-15km	2	7-15km	3	7-15km	/	7-15km	/	7-15km	/	7-15km	/
Autres professionnels	0-3km	/	0-3km	5	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	/	0-3km	/	0-3km	/	0-3km	/
	3-7km	/	3-7km	4	3-7km	4	3-7km	4	3-7km	/	3-7km	/	3-7km	/	3-7km	/
	7-15km	/	7-15km	2	7-15km	3	7-15km	3	7-15km	/	7-15km	/	7-15km	/	7-15km	/

Figure 89 : Estimations des experts du groupe A, recueillies suite à la question suivante : en imaginant que le système vélo que vous avez défini est complètement mis en place d'ici 2026, quelle part des trajets serait faite en vélo en 2026, pour les catégories de trajets suivantes ? Veuillez répondre par une note de 0 à 5 pour chaque catégorie. Les cases remplies d'un « / » représentent des catégories qui n'existent pas, selon les experts. Les notes indiquées pour la catégorie de distance 0-3 km correspondent au vélo et à la marche à pieds.

Motifs de trajet ↓	CSP →	Scolaire		Etudiant		Employé/ouvrier		Cadre/intermédiaire		Personne au foyer		Chômeur		Retraité	
		0-3km		0-3km		0-3km		0-3km		0-3km		0-3km		0-3km	
Achats grande surface		0-3km	0.5	0-3km	4.5	0-3km	3	0-3km	3	0-3km	3.5	0-3km	3.5	0-3km	2
		3-7km	0	3-7km	3.5	3-7km	1.5	3-7km	1	3-7km	1.5	3-7km	2	3-7km	1.5
		7-15km	0	7-15km	1.5	7-15km	0.5	7-15km	0.5	7-15km	0.5	7-15km	1	7-15km	1
Achats proximité		0-3km	4.5	0-3km	5	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4.5	0-3km	4.5	0-3km	3.25
		3-7km	3	3-7km	4	3-7km	3.25	3-7km	2.75	3-7km	3	3-7km	4	3-7km	2
		7-15km	0.5	7-15km	1	7-15km	1.25	7-15km	1.25	7-15km	1	7-15km	0.5	7-15km	0
Soins/démarches		0-3km	3	0-3km	3.5	0-3km	3	0-3km	3	0-3km	2.5	0-3km	3.5	0-3km	2
		3-7km	2	3-7km	2.5	3-7km	2.5	3-7km	2.5	3-7km	2	3-7km	2.5	3-7km	1
		7-15km	1.5	7-15km	1.5	7-15km	1	7-15km	1	7-15km	1	7-15km	1	7-15km	0.5
Visites amis/famille		0-3km	5	0-3km	4	0-3km	4.5	0-3km	4.5	0-3km	4.5	0-3km	5	0-3km	3.5
		3-7km	4	3-7km	3	3-7km	3	3-7km	3	3-7km	3	3-7km	4	3-7km	1.5
		7-15km	1.5	7-15km	1.5	7-15km	1.5	7-15km	1.5	7-15km	1.5	7-15km	2	7-15km	1
Accompagner/aller chercher		0-3km	1	0-3km	2	0-3km	1.5	0-3km	2	0-3km	3	0-3km	3	0-3km	2
		3-7km	0	3-7km	1	3-7km	1	3-7km	1.5	3-7km	1.5	3-7km	1.5	3-7km	1.5
		7-15km	0	7-15km	0.5	7-15km	0.5	7-15km	0.5	7-15km	0.5	7-15km	0.5	7-15km	0.5
Loisirs		0-3km	5	0-3km	5	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4	0-3km	4
		3-7km	3.5	3-7km	4	3-7km	3	3-7km	3	3-7km	3.5	3-7km	3.5	3-7km	2.5
		7-15km	1	7-15km	2.5	7-15km	2.5	7-15km	2.5	7-15km	2.5	7-15km	2.5	7-15km	1.5
Domicile Travail		0-3km	4.5	0-3km	4.5	0-3km	5	0-3km	5	0-3km	0	0-3km	0	0-3km	0
		3-7km	3.5	3-7km	4.5	3-7km	3.5	3-7km	3.5	3-7km	0	3-7km	0	3-7km	0
		7-15km	1	7-15km	2.5	7-15km	1.5	7-15km	2	7-15km	0	7-15km	0	7-15km	0
Autres professionnels		0-3km	0	0-3km	5	0-3km	4.5	0-3km	4.5	0-3km	0	0-3km	0	0-3km	0
		3-7km	0	3-7km	4.5	3-7km	3.5	3-7km	3.5	3-7km	0	3-7km	0	3-7km	0
		7-15km	0	7-15km	2	7-15km	2	7-15km	2	7-15km	0	7-15km	0	7-15km	0

Figure 90 : Moyenne (arithmétique) des résultats obtenus par les deux groupes. En vert, les catégories de trajets dont l'écart de note entre les 2 groupes est inférieur à 1. En rouge, les catégories de trajets dont l'écart de note entre les 2 groupes est supérieur à 3. L'estimation finale (voir Tableau 16 Figure 24) a été obtenue en multipliant pour chaque catégorie de trajets la note moyenne par 20%, afin d'obtenir une probabilité sur 100%.

10.6. Annexe 6 : Calculs pour le scénario gisement TPE

Tableau 49 : Calcul de la part des pkm « allouables au Bus Express » qui est « allouée au Bus Express ».

Plage de distance (km)	Distribution des pkm fort flux	% pkm alloués au Bus Express en fonction de la distance du trajet (hypothèse)	Part pkm allouée au Bus Express
0-10	20%	10%	2%
10-20	26%	100%	26%
>20	54%	100%	54%
Total	100%	-	82%

Tableau 50 : Calcul de la part des pkm « allouables au train » qui est « potentiellement allouée au Train ».

Plage de distance (km)	Distribution des pkm fort flux	% pkm alloués au Train en fonction de la distance du trajet (hypothèse)	Part pkm potentiellement allouée au Train
0-5	3%	10%	0%
5-10	17%	100%	17%
>10	80%	100%	80%
Total	100%	-	97%

Tableau 51 : Calcul de la mobilité allouée au Bus Express et au Train. En partant de la mobilité de fort flux, on calcule, pour le bus puis le train, la mobilité reportable selon le critère géographique de proximité audit mode, puis la mobilité allouée selon les critères de distances minimales. Enfin, le critère d'absorption maximale de mobilité par le Train est appliqué (au plus 38,5 Mp.km/sem, dernière ligne du tableau). La mobilité allouable au Train mais non absorbable est alors considérée comme reportable sur le Bus Express, dans la limite du critère géographique (182 Mp.km/sem au plus, dont l'origine est proche d'une autoroute, Cf. troisième ligne du tableau). Les parts des distances sont exprimées en pourcentage de la mobilité locale en France métropolitaine (et non pas en ZMD).

Mobilité	Taux allocation	Distances (p.km/sem)	Part des distances (%p.km)
Locale, jour ouvré, heure pointe, zonage choisi	-	506 336 113	5,5%
Reportable Bus Express (critère géographique)	47%	239 589 530	2,6%
Non absorbable Train (critère absorption)	-	181 812 685	2,0%
Total	-	421 402 215	4,6%
Allouée Bus Express (critère distance)	82%	346 019 898	3,8%
Reportable Train (critère géographique)	46%	234 187 758	2,6%
Allouable Train (critère distance)	97%	227 793 731	2,5%
Absorbable Train (critère absorption)	-	38 492 327	0,4%

Tableau 52 : Calcul des impacts en termes de trafic et émissions CO₂ du report modal de la VP vers le Bus Express, et du report modal de la VP vers le Train, dans le scénario gisement TPE.

	Report VP - Bus	Report VP -Train	Source
Mobilité reportée (p.km/sem)	346 019 898	38 492 327	-
<i>Part de cette mobilité par les habitants des ZMD</i>	<i>0,93</i>	<i>0,93</i>	<i>ENTD</i>
Mobilité reportée ZMD (p.km/sem)	321 798 505	35 797 864	
Mobilité reportée ZMD (%p.km)	9,0%	1,0%	
<i>Taux de remplissage (p.km/v.km)</i>	<i>1,18</i>	<i>1,18</i>	<i>ENTD</i>
Trafic VP évité dans les ZMD (v.km/sem)	272 686 232	30 334 463	-
Trafic VP évité dans les ZMD (%v.km)	12,2%	1,4%	
<i>Emissions VP par v.km en 2026 (gCO₂/v.km)</i>	<i>124</i>	<i>124</i>	<i>IMMOVE</i>
Emissions CO ₂ du trafic VP évité ZMD (MtCO ₂ /an)	1,76	0,20	-
Emissions CO ₂ du trafic VP évité ZMD (%MtCO ₂)	11,2%	1,2%	
<i>Emissions TPE par v.km (gCO₂/v.km)</i>	<i>750</i>	<i>-</i>	<i>ADEME 2008</i>
<i>Taux de remplissage moyen TPE (p.km/v.km)</i>	<i>17</i>	<i>-</i>	<i>La Fabrique de la Cité</i>
<i>Emissions TPE par p.km (gCO₂/p.km)</i>	<i>44</i>	<i>9</i>	<i>Base Carbone ADEME</i>
Emissions du trafic TPE ZMD additionnel (MtCO ₂ /an)	0,74	0,02	-
Emissions nettes évitées ZMD (MtCO ₂ /an)	1,02	0,18	-
Emissions nettes évitées ZMD (%tCO ₂)	6,5%	1,1%	-

10.7. Annexe 7 : Pourquoi nous n'avons pas approfondi certaines pistes de la vie de proximité

Les dispositifs qui permettent de réduire les déplacements tout en conservant l'accès à une activité sont variés. Toutefois, **ils ne conduisent pas tous à des réductions significatives des émissions de CO₂**, bien qu'ils puissent être fort intéressants par rapport à d'autres objectifs. Nous citons dans cette section quelques-uns des domaines d'action que nous n'avons pas approfondis dans notre étude.

10.7.1. Les drives

Si on constate une évolution globale du e-commerce (8 % du commerce de détail aujourd'hui en Europe [FEVAD 2016]), seule sa composante "drive" (7 % du e-commerce) s'est développée dans le périurbain pour les courses habituelles (pas de distribution à domicile) [CREDOC 2013]. Le e-commerce généralisé ne s'est pas développé dans le périurbain car les grands distributeurs n'y organisent pas de tournées. Seuls les drives y sont accessibles.

Depuis 10 ans, **2800 drives** se sont installés en France, surtout dans les zones périurbaines. Il existe deux modèles de drive : le drive par la grande distribution, et le drive « fermier » (ie en circuit-court par les producteurs). Le drive dans la grande distribution est un mode d'achat qui prend de plus en plus d'importance. S'il n'évite pas les déplacements, il est à **60-70 % chaîné** avec le motif retour du travail¹³. Cependant, même si on constate que le volume d'achat par visite en drive est en moyenne deux fois celui du volume en supermarché, le drive n'est pas rentable pour les entreprises, compte tenu des coûts de main d'œuvre supplémentaires qu'il engendre. Seuls les modèles d'affaire de type « drive solo », en entrepôt robotisé et optimisé informatiquement, directement conçu pour le drive, seraient rentables¹⁴.

10.7.2. Les circuits courts

Le transport final du produit par le consommateur est rarement pris en compte dans les études, mais peut représenter jusqu'à **94 % des émissions de CO₂** dans les circuits courts¹⁵. La majorité des émissions dues au transport des marchandises ne provient pas des gros flux mais plutôt des derniers kilomètres : plus la quantité de produits transportée est faible, plus l'impact est important. Les circuits locaux ne sont pas toujours les moins émetteurs en CO₂ car la **distribution des marchandises est moins optimisée**.

Agir sur les circuits courts constitue donc également un enjeu important, quoique difficile à appréhender. Une des pistes à approfondir pourrait être la relocalisation de l'agriculture à proximité des logements, en créant des exploitations plus petites afin de disposer d'une diversité de produits localement (ce qui est incompatible avec les grandes monocultures).

10.7.3. L'autoproduction alimentaire

La question des circuits courts rejoint directement celle de l'autoproduction alimentaire. On peut imaginer un report de motif, de la grande surface vers les magasins de proximité, report d'autant plus grand que l'autonomie en fruits/légumes/protéines est grande : les ménages pourraient limiter leurs déplacements en grande surface à des denrées non périssables, et donc concentrer ces achats en un

¹³ D'après l'expert en logistique urbaine interrogé.

¹⁴ Ibid.

¹⁵ Cas de la vente directe de pommes en Limousin [IAU 2017].

nombre limité de trajets. **58 % des ménages** possèdent un jardin et/ou un potager, donc un espace permettant d'autoproduire, et seraient donc concernés [MEEDDM 2010]. Il faut cependant nuancer ce chiffre avec les disponibilités temporelles de chacun et les inégalités de savoir-faire/volonté.

Ce sujet mériterait une étude approfondie à part entière qui prendrait en compte la réduction des émissions CO₂ dans les phases amont de la production alimentaire, et non pas seulement son transport. Seulement 11 % des émissions CO₂ du secteur alimentaire sont produites par la distribution sur le dernier kilomètre [IAU 2016, p54].

10.7.4. L'e-santé, une évolution naturelle

Les politiques européennes ainsi que les intérêts industriels dans le domaine de l'e-santé sont principalement destinés au suivi des personnes âgées. On ne parle pas de la consultation classique mais du suivi sur le long terme de données médicales provenant de capteurs connectés. Ces évolutions toucheront a priori la mobilité des personnes âgées et celle des médecins qui les suivent. Ce secteur, agrégé avec les soins personnels (coiffeur, kinésithérapie etc.) représente **moins de 3 % des p.km** parcourus dans les ZMD. Ce gisement a été jugé trop faible pour faire l'objet d'une étude approfondie dans le présent rapport.

Contact

Francisco LUCIANO

francisco.luciano@theshiftproject.org

Nicolas RAILLARD

nicolas.raillard@theshiftproject.org

Contact presse

Clémence VORREUX

clemence.vorreau@theshiftproject.org

THE SHIFT
PROJECT

THE CARBON TRANSITION THINK TANK