

# Décarboner la mobilité en Vallée de la Seine

« Moins de carbone, plus de lien »

NOTE MÉTHODOLOGIQUE

JANVIER 2021

GRANDE COURONNE D'ILE-DE-FRANCE,  
NORMANDIE, CALVADOS, ROUEN, LE HAVRE





# Acronymes

---

ACV	Analyse de cycle de vie
deuxrm	Deux-roues motorisé
CD	Courte distance
CO <sub>2</sub> eq	Gaz à effet de serre mesuré en équivalent dioxyde de carbone (selon le pouvoir de réchauffement global)
CSP	Catégorie socio-professionnelle
DT	Domicile-travail
EMD	Enquête Ménages Déplacements
ETP	Emploi à Temps Plein
GES	Gaz à effet de serre
HT	Hors taxe
GC-IDF	Grande couronne d'Ile-de-France
LD	Longue distance
p.km	Personne.kilomètre
PM <sub>10</sub>	Particulate Matter (Particules en suspension de taille inférieure à 10µm)
PM <sub>2.5</sub>	Particulate Matter (Particules en suspension de taille inférieure à 2,5µm)
PM	(Scénario) Potentiel Max
PME	Petites et Moyennes Entreprises
SNBC	Stratégie nationale bas carbone
TC	Transports en Commun
TIC	Technologies de l'information et de la communication
TPE	Transports Publics Express
VAE	Vélo à Assistance Electrique
VCAE	Vélo-Cargo à Assistance Electrique
Vol	(Scénario) Volontariste
v.km	Voiture.kilomètre
VP	Voiture Particulière
WTW	Well to wheel : du puits à la roue

Les unités utilisés sont déclinées par puissance de 10 selon la nomenclature suivante : k = kilo = 10<sup>3</sup> ; M = méga = 10<sup>6</sup> ; G = giga = 10<sup>9</sup>

# Table des matières

---

<b>Chapitre 1 - Introduction</b> .....	<b>7</b>
1.1. Composition du comité de suivi du projet.....	7
1.2. Les étapes de travail du projet.....	7
1.3. Les scénarios utilisés.....	10
1.4. Structure du document.....	13
<b>Chapitre 2 - Modélisation</b> .....	<b>15</b>
2.1. Données de départ.....	15
2.2. Modèle PES.....	19
2.3. Méthodologie de calcul des dépenses.....	28
2.4. Méthodologie de calcul du temps passé à se déplacer.....	30
<b>Chapitre 3 - Télétravail</b> .....	<b>32</b>
3.1. Hypothèses et calculs pour le télétravail.....	32
3.2. Résultats.....	36
<b>Chapitre 4 - Distribution des achats de grande surface</b> .....	<b>47</b>
4.1. Hypothèses pour la distribution des achats de grandes surfaces.....	47
4.2. Résultats.....	54
<b>Chapitre 5 - Système vélo</b> .....	<b>69</b>
5.1. Scénario Potentiel Max.....	69
5.2. Scénario Volontariste.....	75
5.3. Résultats.....	81
<b>Chapitre 6 - Transports Publics Express (TPE)</b> .....	<b>96</b>
6.1. Méthode générale.....	96
6.2. Résultats.....	116
<b>Chapitre 7 - Covoiturage</b> .....	<b>124</b>
7.1. Vue d'ensemble.....	124
7.2. Scénario Potentiel Max.....	125
7.3. Scénario Vol.....	136
7.4. Résultats.....	143

<b>Chapitre 8 - Bibliographie</b> .....	Erreur ! Signet non défini.
<b>Chapitre 9 - Annexes</b> .....	<b>161</b>
9.1. Estimations des experts à l'atelier covoiturage .....	161
9.2. Estimations des experts à l'atelier vélo.....	162

# Chapitre 1 - Introduction

---

Cette Note Méthodologique accompagne le Rapport principal de l'étude « Décarboner la mobilité en Vallée de la Seine », publiée en décembre 2020. Elle contient une description détaillée de la manière dont la modélisation a été réalisée.

Elle a été préparée par Paul Boosz (*The Shift Project*), et pour les bilans économiques par Nicolas Raillard (*The Shift Project*) et Nolwenn Brossier (*The Shift Project*). Elle a été relue par Nicolas Raillard, et par Laura Foglia (Experte mobilité), que nous remercions.

## 1.1. Composition du comité de suivi du projet

Un comité de suivi s'est réuni régulièrement autour du projet, afin de l'accompagner dans ses grandes orientations, dans ses questionnements territoriaux, et dans les mises en contact avec des acteurs de la mobilité sur les territoires. Il se compose de professionnels de la mobilité et d'acteurs des territoires :

Anne-Claire Bideault (Région Normandie)  
Aurélien Cagnard (Métropole Rouen)  
Wilfried Dehenry (DREAL Normandie)  
Ivan Derré (DRIEA)  
Nicolas Foubert (Le Havre Seine Métropole)  
Jean-Marc Gohier (ADEME Normandie)  
Isabelle Lefavrais-Godart (Région Normandie)  
Francisco Luciano (Citec)  
Patrice Nogues (EDF R&D)  
Adèle Olivier-Genestar (Caen Normandie Métropole)  
Mathieu Philippot (Le Cotentin)  
Geneviève Quemeneur (DREAL Normandie)  
Hadjira Schmitt-Foudhil (MTES)  
Thomas Schneider (DREAL Normandie)

## 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 :

### 1 – Etat des lieux

Nous avons dressé l'état des lieux des pratiques relatives à chaque domaine. Dans le cadre du covoiturage par exemple, nous avons fait une mise à jour de notre revue de la littérature sur le covoiturage courte distance et analysé les données des Enquêtes Ménages Déplacement sur le taux d'occupation des voitures.

### 2 – Identification d'une évolution prometteuse

Pour ce projet, nous avons conservé la philosophie sous-jacente aux scénarios de notre étude précédente (Luciano 2017), pour établir les scénarios à l'horizon 2030 potentiellement intéressants en termes de réduction du CO<sub>2</sub>.

Ainsi, nous avons conservé, 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 en Vallée de la Seine.

### **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, par retour d'expérience de notre étude précédente avec les experts du covoiturage, nous avons retenu trois dimensions explicatives des comportements de covoiturage (la catégorie socio-professionnel, la distance à parcourir et le motif du déplacement). Puis nous avons à nouveau sollicité des experts de ce domaine et leur avons demandé d'estimer la probabilité qu'un trajet correspondant à une combinaison de ces trois 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 différents impacts non mobilité**

Nous avons calculé les impacts de ce changement de pratique de mobilité sur différents indicateurs (consommation d'énergie, émissions de GES (mesurées en CO<sub>2</sub>eq) à l'usage, en analyse de cycle de vie (ACV), NO<sub>x</sub>, particules fines et temps) en utilisant le modèle PES (modèle conçu et opéré par le Groupe Prospective Energétique et Appui Stratégique d'EDF). Les valeurs de ces indicateurs dans les différents scénarios ont été comparées à celles du scénario « *Référence* ». Le scénario *Référence* se base notamment sur la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) 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 2030) se matérialise.

### **6 – Bilan économique**

Pour chaque trajectoire nous avons chiffré les différentes actions en termes de dépenses à faire par l'ensemble de la société, et alloué ces différents postes de dépense aux différents acteurs de la société. Nous avons comparé ces dépenses à celles induites par le scénario *Référence*, afin d'estimer les dépenses supplémentaires ou économies pour les différents acteurs dans chacun de nos scénarios, en comparaison au scénario *Référence*.



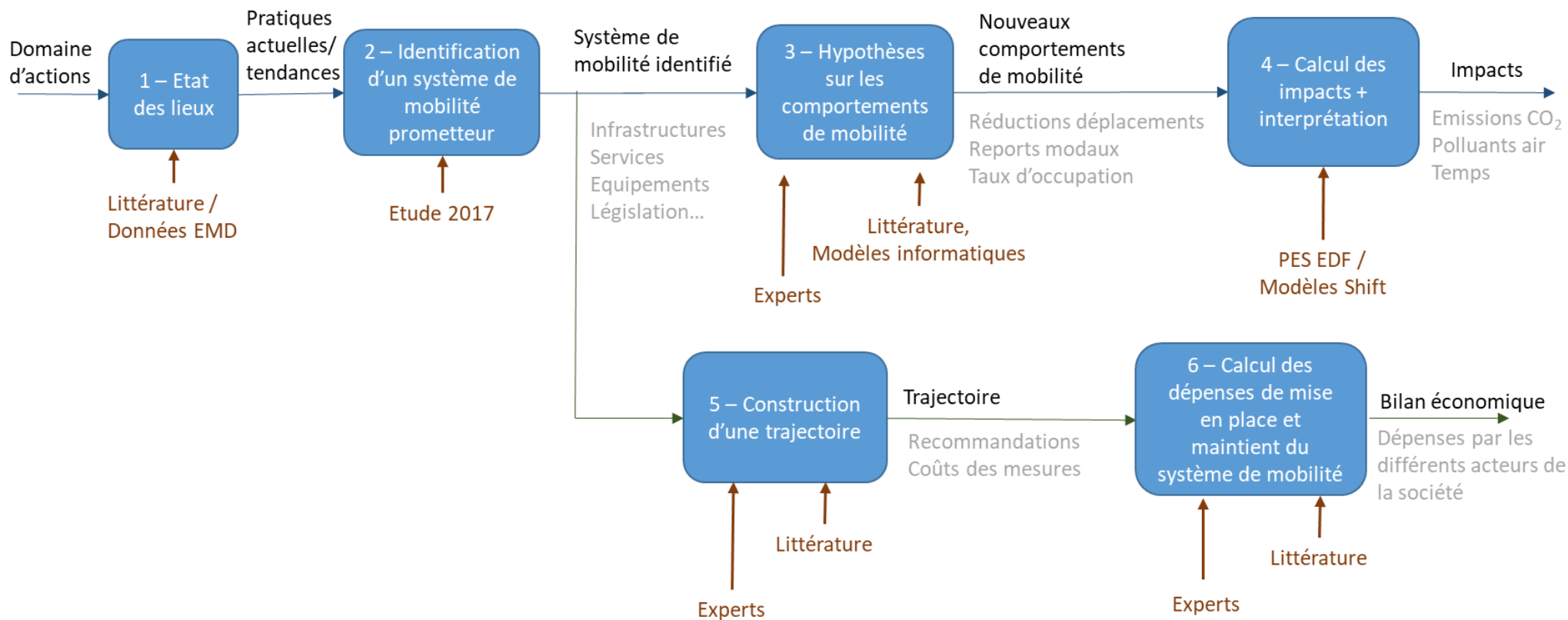


Figure 1 : Etapes de travail du projet, effectuées pour chaque domaine d'action et pour chaque zone d'étude.

Ce document a pour objectif d'expliquer plus précisément les phases 3 (*Analyse d'impacts sur la mobilité locale*), 4 (*Calcul des impacts*), et 6 (*Bilan économique*) 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 CO<sub>2</sub>, il détaille les hypothèses retenues afin d'évaluer son impact sur les comportements de mobilité et donc sur les émissions de CO<sub>2</sub> associées, d'ici 2030. L'impact sur les comportements a été estimé selon deux scénarios différents (1.3).

### 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 actuelles de la population considérée, qui ont une certaine inertie : les habitants du périurbain, dont le mode de vie est hautement dépendant de la possession et de l'usage d'une (ou plusieurs) voiture(s) particulière(s), modifieraient-ils leurs pratiques de mobilité, et à quel horizon temporel, en présence d'offres alternatives à la voiture ?

Ces éléments d'incertitude sont pris en compte dans la présente étude via la construction de deux scénarios différents, dont l'horizon de temps est 2030 :

- le scénario « Potentiel Max » (PM) ;
- le scénario « Volontariste » (Vol).

Ces deux scénarios représentent deux états « motivationnels » de la population de nos différentes zones d'étude. Pour chacun de nos cinq domaines d'action, nous avons établi un scénario Potentiel Max, qui permet d'estimer les impacts de l'alternative sur la mobilité et sur les émissions de CO<sub>2</sub>. Pour certains domaines d'action, nous avons également développé un scénario Volontariste.

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

#### 1.3.1. Scénario « Volontariste » (Vol)

Dans le **scénario « Volontariste »**, 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 réglementation (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 (beaucoup<sup>1</sup>) changé par ailleurs.

---

<sup>1</sup> Voir le scénario *Référence* utilisé, décrit dans la section 2.2.6.

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 Potentiel Max (PM)

Dans le scénario « Potentiel Max » (PM), on suppose que **tous les habitants de Vallée de la Seine sont prêts à modifier leurs comportements de mobilité dans le sens de la solution proposée.** Par exemple, pour le domaine du covoiturage, le scénario « Potentiel Max » prend pour hypothèse que tout le monde *veut* covoiturer pour ses besoins de mobilité (sans forcément trouver d'opportunité de covoiturage). Le scénario n'explique pas la nature de la motivation (le « pourquoi » derrière cette motivation) mais en mesure les effets. Le scénario « Potentiel Max » permet ainsi de mesurer les effets maximum en termes d'émissions CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub> grâce à cette solution ? ». La mise en évidence du gisement de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> évitée). **Le gisement permet donc de faire le tri entre les solutions qui mènent à des réductions significatives d'émissions CO<sub>2</sub> 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 « Potentiel Max » 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.

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 économique-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 CO<sub>2</sub> évitées. On obtient ainsi une gradation en termes d'émissions CO<sub>2</sub> 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).

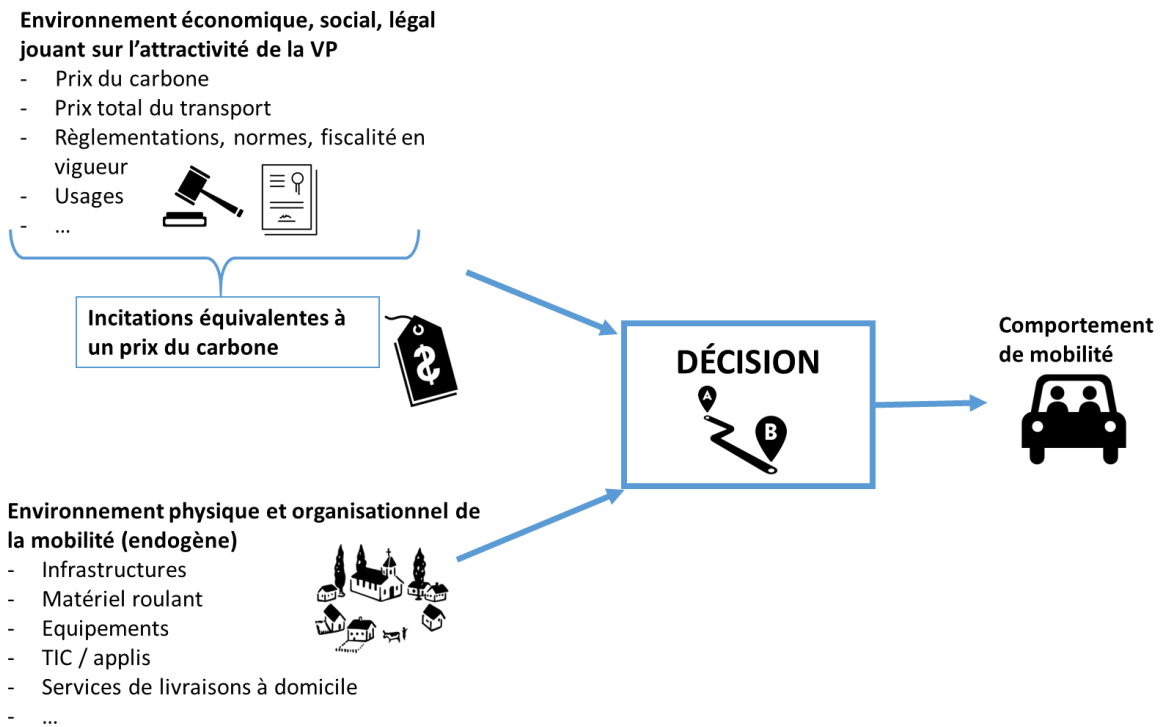


Figure 2 : Modalité de prise de décision sur les comportements de mobilité, qui dépend d'incitations endogènes au système de mobilité existant et d'incitations exogènes.

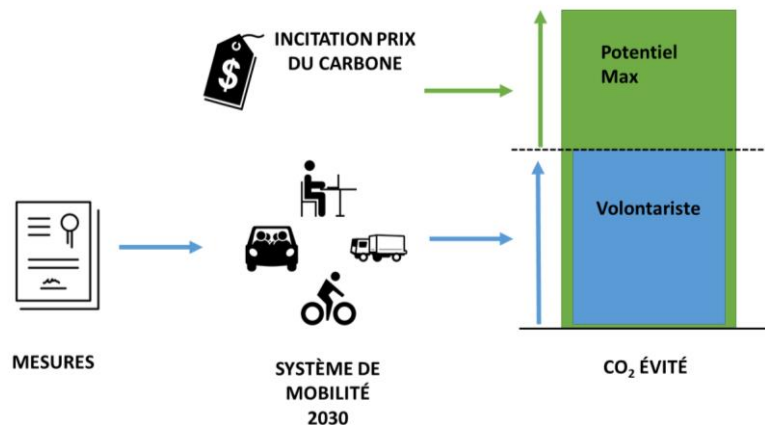
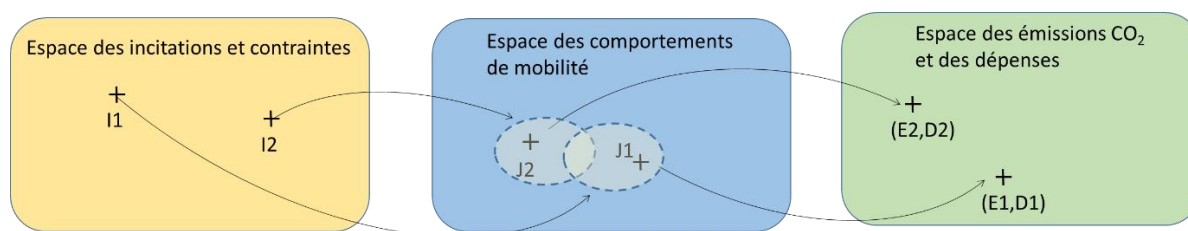


Figure 3 : Définition des scénarios Volontariste et Potentiel Max, pour chacun des domaines d'action considérés. Les incitations endogènes constituées par les systèmes de mobilité mis en place en 2030 mènent à éviter les émissions CO<sub>2</sub> qui seront calculées par le scénario Vol. Lorsque des incitations exogènes fortes s'additionnent aux incitations endogènes, la quantité de CO<sub>2</sub> évitée est plus grande, et est calculée par le scénario Potentiel Max (PM).

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 CO<sub>2</sub> 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 ( $J_i$ , dans la Figure 4), donnant lieu à des points de mesure dans les espaces des émissions  $\text{CO}_2$  et des dépenses ( $(E_i, D_i)$  dans la Figure 4). On peut relier les comportements à la mise en place de mesures préalables destinées à modifier les comportements ( $I_i$  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  $J_i$  testé. En soi, le calcul de la réduction des émissions de  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ .



*Figure 4 : A un jeu d'incitations et de contraintes  $I_1$  (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,  $J_1$  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  $\text{CO}_2$  associée (par exemple  $E_1$ ), et les dépenses de mise en place des mesures (par exemple  $D_1$ ). On peut en conclure que pour obtenir une réduction des émissions  $E_1$ , il faut une magnitude de changement de comportements  $J_1$ . Pour espérer obtenir le changement de comportement  $J_1$ , la mise en place de tout ou partie des trajectoires proposées est nécessaire.*

## 1.4. Structure du document

Le document se compose d'une première partie expliquant le fonctionnement de la modélisation utilisée pour calculer les impacts 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 les zones d'études.

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 PES.

- **Les résultats, en termes de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>** (en usage et en ACV) obtenus via le modèle PES en partant de ces hypothèses, sont présentés.
- **Les résultats sur la consommation d'énergie et les émissions de polluants de l'air** sont détaillés.
- **L'impact sur le temps passé à se déplacer** est présenté.
- **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** du domaine d'action pour différents acteurs est présenté.

# Chapitre 2 - Modélisation

---

## 2.1. Données de départ

### 2.1.1. Sources de données

Afin de décrire et étudier la mobilité en Vallée de la Seine, nos sources de données principales sont cinq Enquêtes Ménages Déplacements (EMD) et l'Enquête Globale Transport (EGT) pour l'Ile-de-France :

Zone	Année d'enquête	Nombre de déplacements décrits	Nombre d'interrogés	Nombre de communes
Ile-de-France	2010	124 k	30 k	950
EMD Caen Calvados	2011	43 k	10 k	517
EMD Cotentin <sup>2</sup>	2016	19 k	4 k	154
EMD Rouen	2017	38 k	9 k	289
EMD Sud Manche-Orne <sup>2</sup>	2017	29 k	6 k	474
EMD Havre	2018	28 k	6 k	253
Normandie	2011-2018	155 k	35 k	1 640

*Tableau 1 : Principales sources de données de mobilité utilisées. Pour la Normandie nous avons utilisé l'association des enquêtes de Caen Calvados, Cotentin, Rouen, Sud Manche-Orne et le Havre*

Sur ces données nous utilisons les déplacements et non les trajets<sup>3</sup>. Nous parlons parfois de « trajets » par abus de langage, mais il s'agit bien d'un déplacement au sens de la méthodologie d'enquête. Un déplacement peut être multimodal (par ex : vélo + train) et dans ce cas nous utilisons le mode principal dans nos analyses modales, c'est-à-dire le mode le plus lourd (dans notre exemple, le train).

Après avoir harmonisé les données des différentes enquêtes, nous travaillons principalement à partir d'une base unifiée qui contient des informations (sur les déplacements et les personnes qui les effectuent) de toutes les enquêtes.

---

<sup>2</sup> Les Enquêtes Ménages Déplacements du Cotentin et de Sud Manche-Orne n'ont pas été étudiées en tant que zones à part. Elles ont été utilisées pour l'étude des aires urbaines normandes.

<sup>3</sup> Dans la méthodologie de l'enquête un *trajet* est une portion de déplacement effectuée avec un mode (par ex : le vélo), tandis qu'un *déplacement* est une séquence de trajets effectuée pour atteindre un motif (par ex : aller au travail).

Personne								Déplacement				
id_pers	zone	tissu	code_commune	age	occupation	pcs	poids	motif	distan	mode	temps_depart	duree
XXX	caen	[100-200[-B-pole	14327	69	Retraite	Employe/O	32,0	achat_gra	4.67	metro_tran	17,00	25
XXX	caen	[100-200[-B-pole	14327	69	Retraite	Employe/O	32,0	loisirs	4.67	metro_tran	19,00	10
ZZZ	idf	[2-20[-polarisee	14341	24	Travail a pl	Employe/O	39,2	travail	1.0	marche	13,67	15

*Tableau 2 : Illustration de la forme de la base unifiée utilisée*

Cette base unifiée associe un déplacement donné à la personne l'ayant effectué. La personne est identifiée selon un identifiant unique. La base contient des informations sur son lieu de vie (zone, tissu, commune), sur sa sociologie (âge, occupation, PCS), et un poids qui donne la représentativité de cette personne dans la zone d'étude. Concernant les déplacements, la base contient des informations sur le motif de déplacement, sa distance, le mode principal, l'heure de départ et la durée du déplacement.

### 2.1.2. Tissus

Chacune de nos zones d'étude est composée de communes que nous classons par type de « tissu ». Un tissu est un ensemble de communes partageant certaines caractéristiques de la nomenclature INSEE déterminantes pour la mobilité. Nous définissons le tissu d'une commune par trois critères :

- La taille de l'unité urbaine dont elle fait partie. Une unité urbaine est un ensemble de communes avec continuité de bâti contenant au moins 2 000 habitants. Par exemple pour une unité urbaine qui contient entre 100 000 et 200 000 habitants on notera «[100-200[» dans la désignation du tissu correspondant.
- Sa position dans l'unité urbaine : est-ce que cette commune représente plus de 50% de la population de l'unité urbaine ? Si oui, elle est la seule ville-centre. Sinon toutes les communes qui ont une population supérieure à 50% de celle de la commune la plus peuplée sont villes-centres (noté «C»). Les communes de l'unité urbaine qui ne sont pas villes-centre constituent la banlieue (noté «B»). Enfin les communes qui ne sont pas dans une unité urbaine, c'est-à-dire les communes (ou ensembles de communes) dont la continuité du bâti contient moins de 2 000 habitants sont dites rurales (noté «R»)
- Finalement sa position par rapport au pôle. Un pôle est une unité urbaine offrant au moins 1500 emplois et qui n'est pas elle-même dans la couronne d'un pôle. Si une commune fait partie d'un pôle, alors on la note « pôle ». Si une commune n'est pas dans un pôle et que plus de 40% des actifs vont travailler dans un pôle voisin, elle est dite polarisée (noté « polarisée »). L'ensemble des communes polarisées d'un pôle forment sa couronne. Enfin si une commune n'est ni dans un pôle, ni polarisée, elle est hors de l'aire urbaine (noté « hors-AU »)

En rassemblant ces trois critères, on aboutit à une classification des différents tissus. Par exemple le tissu "[100-200[-B-pôle" correspond aux communes faisant partie d'une unité urbaine peuplée d'entre 100 000 et 200 000 habitants, étant en banlieue de cette unité urbaine, unité urbaine qui est un pôle.



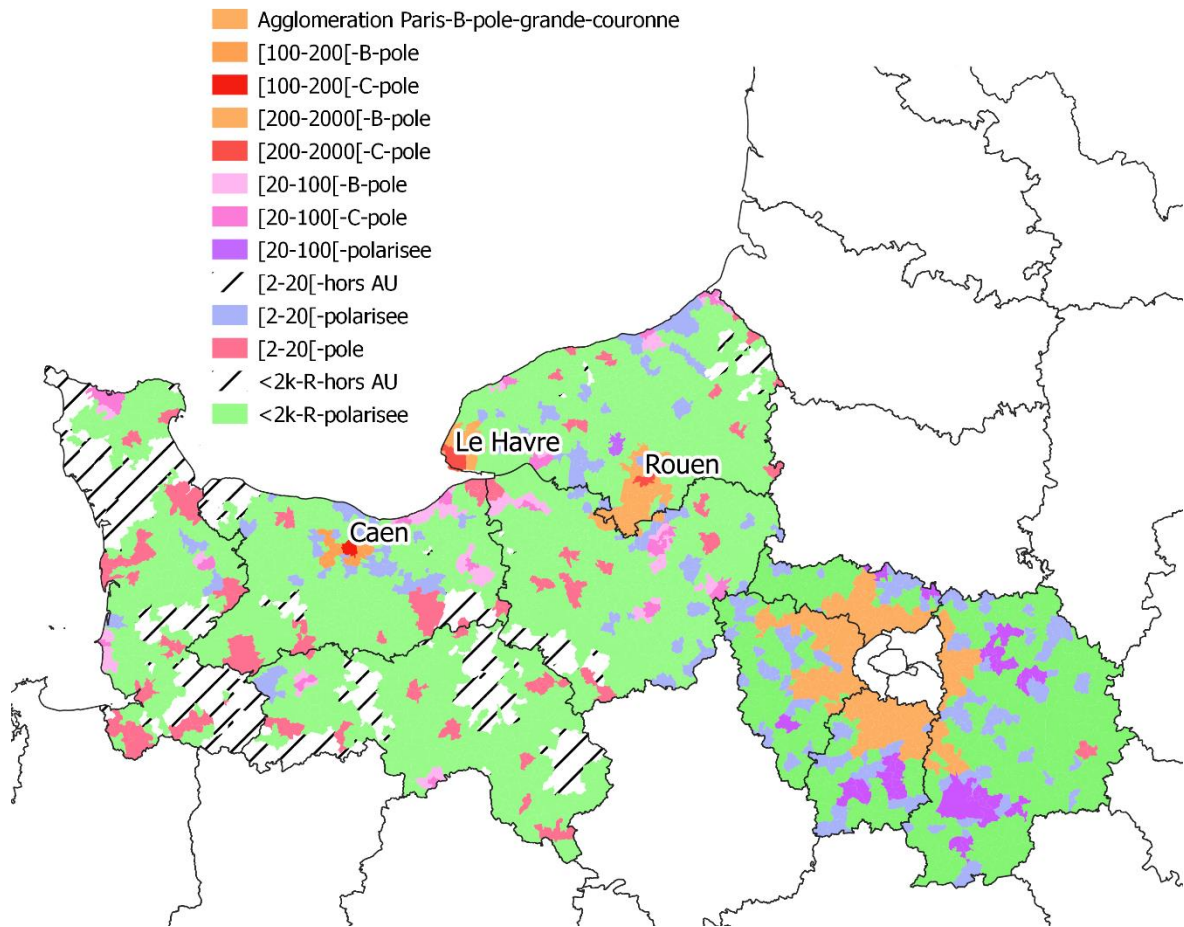


Figure 5 : Carte des différents tissus composant les zones étudiées de Vallée de la Seine. Les zones hachurées sont en Normandie mais ne sont pas dans nos zones d'études car hors Aire Urbaine.

### 2.1.3. Zones

Notre périmètre d'étude est composé de cinq zones.

Nous étudions deux zones de niveau régional :

- Les aires urbaines de Normandie, notées **AU Normandie** par la suite.
- La grande couronne d'Ile-de-France, composée des 4 départements de grande couronne : 77, 78, 91, 95. On la notera **Grande couronne IDF** par la suite (**GC-IDF** en abrégé)

Et nous étudions trois zones, chacune centrée sur une agglomération normande, correspondant au périmètre de l'enquête ménage déplacements la plus récente de chacune de ces agglomérations :

- L'aire urbaine du Calvados, notée **AU Calvados** par la suite. Cela correspond au périmètre de l'Enquête Ménage Déplacement Caen Calvados de 2011.
- Le périmètre de l'Enquête Ménage Déplacement de Rouen de 2017, noté **EMD Rouen** par la suite. Ce périmètre est composé de la Métropole Rouen Normandie et de l'Agglomération Seine-Eure.
- Le périmètre de l'Enquête Déplacement du Havre-Estuaire de la Seine de 2018, noté **EMD Havre** par la suite.

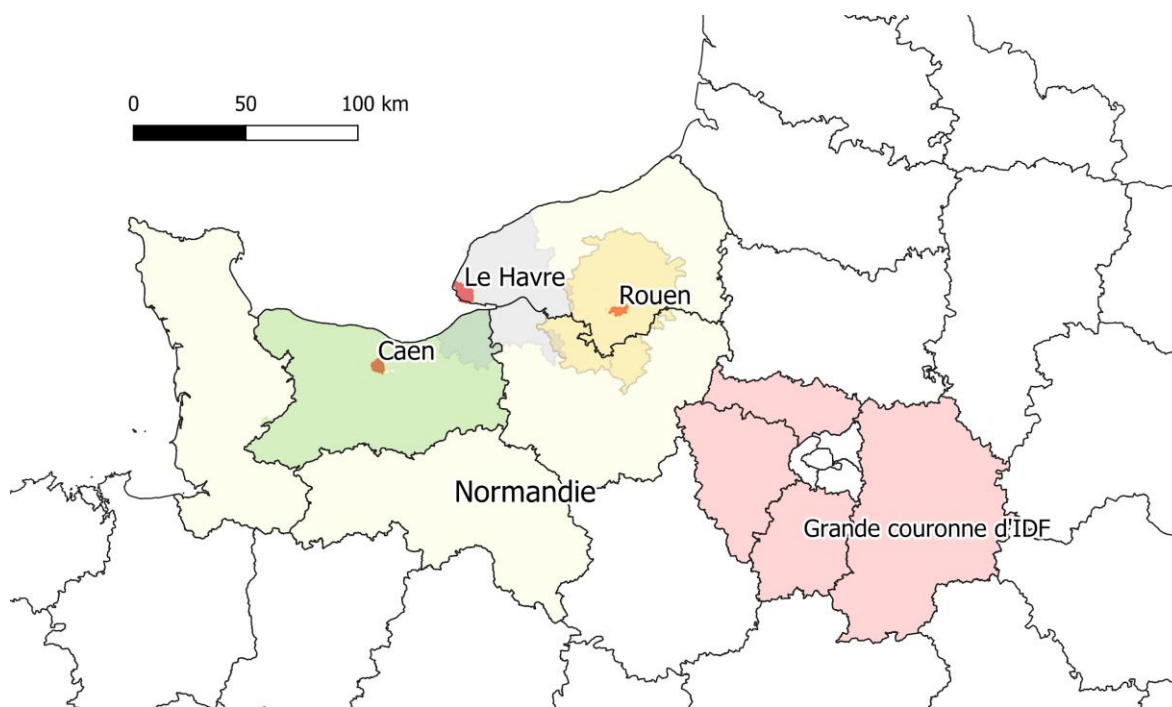


Figure 6 : Carte des cinq zones étudiées : La Normandie, la grande couronne d'Île-de-France, l'aire urbaine du Calvados et les périmètres des enquêtes déplacements de Rouen et Le Havre

**Au sein de chaque zone, nous nous concentrons sur les communes qui appartiennent à une aire urbaine (AU)**, au sens de la typologie fonctionnelle des territoires de l'INSEE. L'aire urbaine est définie par l'ensemble des zones dont la mobilité est « attirée » par un pôle urbain, tout en incluant le pôle urbain lui-même.

Nous n'étudions donc pas les communes hors aires urbaines :

- Les communes rurales qui ne sont attirées par aucun pôle urbain
- Les petites unités urbaines qui ne sont attirées par aucun pôle urbain

Les seules communes hors aires urbaines de la Vallée de la Seine sont situées en Normandie. En effet, toutes les communes de la grande couronne d'Île-de-France sont situées dans l'aire urbaine francilienne.

Enfin, nous excluons de l'étude Paris et sa première couronne, qui sont des territoires très denses et à la mobilité spécifique moins dépendante de la voiture individuelle.

#### 2.1.4. Modes

Dans les enquêtes, un déplacement est une séquence de trajets en vue d'un motif donné ayant chacun un mode (par exemple, prendre le train (trajet n°1) puis un vélo (trajet n°2) pour aller travailler). Nous attribuons cependant un unique mode à chaque déplacement en sélectionnant le mode principal, c'est-à-dire le mode le plus lourd de la séquence de trajets (dans notre exemple, le train). Nous utilisons la classification en 7 modes :

- VP : Voiture Particulière
- deuxrm : Deux-roues motorisés (moto, scooter)
- bus\_car : bus ou car
- metro\_tram : métro ou tram
- train : train périurbain (TER, Transilien et RER en IDF)

- vélo : cycles (vélo, VAE, vélo-cargo, ...)
- marche

## 2.2. Modèle PES

### 2.2.1. Description générale du modèle PES

#### 2.2.1.1. Input

L'input du modèle PES est composé de 2 parties : le profil de mobilité d'un habitant d'une {Zone x Tissu}<sup>4</sup> et le taux d'occupation moyen des voitures d'une {Zone x Tissu}.

#### Profil de mobilité

Les données d'entrée sont constituées d'un premier fichier contenant le « profil de mobilité » moyen d'un habitant pour toute combinaison d'un tissu et d'une zone. Ce profil de mobilité est composé de 2 indicateurs : le nombre de déplacements par jour pour chaque mode et la distance moyenne (en km) pour un déplacement de chaque mode. Ce profil de mobilité est décliné sur tous les tissus de toutes les zones, pour tous les scénarios (Référence, Volontariste, Potentiel Max) de tous les domaines d'action.

Chaque zone comporte environ 10 tissus (cela varie selon les zones), soit environ 50 doublets {Zone x Tissu}. Il y a de plus 5 domaines d'action avec environ 2 scénarios par domaine d'action, soit environ 10 doublets {Domaine d'action x Scénario}. Il y a donc 500 quadruplets {Zone x Tissu x Domaine d'action x Scénario}, c'est-à-dire 500 profils de mobilité à définir en entrée de PES pour calculer l'ensemble de nos résultats. Avec 2 indicateurs par profil de mobilité, le fichier d'input du modèle contient environ 1000 lignes de cette forme :

Scénario	Indicateurs	Zone	Tissu	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche
velo_potentiel_max	distance_moyenne	caen	<2k-R-polarisee	16,4	10,7	16,3	21,0	58,0	7,5	1,8
velo_potentiel_max	nb_depl_par_pers	caen	<2k-R-polarisee	1,8	0,0	0,1	0,0	0,0	1,6	0,7
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
teletravail_volontariste	distance_moyenne	rouen	[100-200[-B-pole	10,9	8,4	6,8	6,9	8,7	5,4	0,9
teletravail_volontariste	nb_depl_par_pers	rouen	[100-200[-B-pole	1,0	0,0	0,1	0,0	0,0	2,3	1,0

*Tableau 3 : Exemple illustratif de lignes du fichier d'input du modèle PES. Ce fichier contient le profil de mobilité de chaque habitant de chaque tissu, de chaque zone, pour chaque scénario*

En multipliant la distance moyenne par le nombre de déplacements on peut obtenir le nombre de km parcourus par personne pour chaque mode (p.km). Néanmoins dans le cas de la VP, le nombre

<sup>4</sup> L'écriture {Zone x Tissu} signifie que la phrase est vraie pour chaque combinaison (« doublet ») d'un tissu et d'une zone d'étude (si cette combinaison existe pour notre étude).

de km parcourus par des voitures (le « trafic », exprimé en v.km) ne peut se déduire directement. Pour cela il faut passer par le taux d'occupation des voitures, la 2<sup>ème</sup> partie de l'input PES.

### Taux d'occupation des voitures

Le taux d'occupation est le rapport du nombre de p.km sur le nombre de v.km<sup>5</sup> pour un déplacement donné. L'input du modèle contient, dans sa deuxième partie, le taux d'occupation par personne pour chaque {Zone x Tissu}. Entre nos différents scénarios, le taux d'occupation varie principalement sur le domaine d'action covoiturage. Mais il peut aussi varier légèrement sur d'autres domaines d'action. Par exemple sur le domaine d'action « Livraison des achats » on évite des déplacements en grande surface qui ont un taux d'occupation plus élevé que la moyenne, donc le taux d'occupation moyen diminue légèrement.

Scénario	Zone	Tissu	Taux d'occupation (p.km/v.km)
reference	caen	[100-200[-C-pole	1,24
covoiturage_potentiel_max	caen	[100-200[-C-pole	1,55
...	...	...	...
livraison_tournee_potentiel_max	rouen	[20-100[-B-pole	1,29
livraison_collaborative_potentiel_max	normandie	[200-2000[-B-pole	1,26
livraison_tournee_potentiel_max	normandie	[200-2000[-B-pole	1,25
reference	caen	<2k-R-polarisee	1,18

*Tableau 4 : Exemple illustratif de la partie taux d'occupation du fichier d'input du modèle PES*

#### 2.2.1.2. Modèle PES

Le modèle PES est un modèle de type bottom-up. A partir de l'input décrit dans la partie précédente, de la démographie dans chaque {Zone x Tissu} et de données techniques sur les consommations unitaires, et émissions unitaires par mode et par vecteur énergétique, on en déduit les impacts sur la consommation d'énergie et les émissions de divers polluants.

---

<sup>5</sup> Pour plus de précision sur la méthode de calcul du taux d'occupation voir l'encadré « Comment calculer le taux d'occupation ? » dans le chapitre Covoiturage.



Figure 7 : Description du modèle PES

Pour calculer les différents impacts globaux (consommation d'énergie, CO<sub>2</sub>, PM, NO<sub>x</sub>) on multiplie le profil de mobilité d'un habitant moyen d'une {Zone x Tissu} par la population de la {Zone x Tissu} projetée en 2030, puis par des valeurs d'impacts unitaires (consommation, émissions par kilomètre parcouru). Les projections de population à 2030 sont faites à partir de celles de l'INSEE (INSEE 2017b). Ce faisant on prend bien en compte la dynamique du nombre d'habitants dans chaque {Zone x Tissu} mais on néglige les effets démographiques comme le vieillissement de la population.

### 2.2.1.3. Output du modèle PES

En sortie du modèle PES nous obtenons, pour chaque quadruplet de départ {Zone x Tissu x Domaine d'action x Scénario} :

- Les distances totales parcourus par mode par tous les habitants d'un doublet {Zone x Tissu}
- Les consommations d'énergie totales par mode et vecteur énergétique pour tous les habitants d'un doublet {Zone x Tissu}
- Les émissions de GES (en kgCO<sub>2</sub>eq) à l'usage par mode et vecteur pour tous les habitants d'un doublet {Zone x Tissu}
- Les émissions de GES (en kgCO<sub>2</sub>eq) en ACV par mode et vecteur pour tous les habitants d'un doublet {Zone x Tissu}
- Les émissions de PM<sub>2.5</sub> à l'usage par mode et vecteur pour tous les habitants d'un doublet {Zone x Tissu}
- Les émissions de PM<sub>10</sub> à l'usage par mode et vecteur pour tous les habitants d'un doublet {Zone x Tissu}
- Les émissions de NO<sub>x</sub> à l'usage par mode et vecteur pour tous les habitants d'un doublet {Zone x Tissu}

### 2.2.2. Paramétrage des facteurs d'émissions de GES à l'usage, dans PES

Tous les facteurs d'émissions de GES à l'usage sont dits « du puit à la roue » (well to wheel, WTW en anglais). Ces facteurs d'émissions reflètent un périmètre de comptage des émissions de GES plus large que celles « du réservoir à la roue » (tank to wheel, TTW en anglais). Les émissions « du puit à la roue » correspondent aux émissions dues au processus de transformation de l'énergie finale

alimentant le moteur (essence, diesel, électricité...), en énergie mécanique de rotation des roues, auxquelles on ajoute les émissions liées aux activités de production de l'énergie finale et de son transport jusqu'au réservoir. Par exemple, pour l'essence, les activités d'extraction du carburant, son raffinage, son transport, sa distribution puis sa combustion. **Par abus de langage, on parlera par la suite d'émissions de CO<sub>2</sub>, ce GES représentant la très grande majorité des émissions de GES de ces activités.**

### 2.2.2.1. VP

#### Evolution des motorisations du parc de voiture

Pour prendre en compte l'évolution des motorisations du parc de voitures nous nous appuyons sur la SNBC, qui suppose 35% de voitures électriques dans les immatriculations de voitures neuves en 2030 (Direction Générale de l'Energie et du Climat 2019). A partir d'un modèle de parc, nous en déduisons pour 2030 une part des v.km parcourus en voiture électrique de 15 %.

	Part des v.km par vecteur	
	2020	2030
Diesel	58,0%	22,0%
Essence	41,0%	63,0%
Electrique	1,0%	15,0%
GNV	0,1%	0,3%

*Tableau 5 : Hypothèse de répartition des v.km VP par vecteur énergétique en 2030, comparées à la situation en 2020*

#### Evolution des consommations unitaires par vecteur

Nous suivons les hypothèses d'évolution de consommation des véhicules thermiques et électriques de la SNBC entre 2020 et 2030 (Direction Générale de l'Energie et du Climat 2019) :

	Consommations unitaires par vecteur	
	2020	2030
Diesel (l/100km)	5,9	4,3
Essence (l/100km)	7,1	5,2
Electrique (kWh/100km)	17,8	15,7
GNV (kWh/100km)	50,0	37,0

*Tableau 6 : Consommations unitaires du parc de PV, par vecteur, en 2020 et 2030.*

Nous utilisons ensuite la projection de l'intensité carbone de l'électricité de la SNBC (Voir Tableau 7) (Direction Générale de l'Energie et du Climat 2019), et les facteurs d'émissions du diesel, de l'essence et du GNV pour en déduire des émissions unitaires.

	2014	2020	2030
Intensité carbone de l'électricité (gCO <sub>2</sub> eq/kWh)	42	34	21

Tableau 7 : Intensité carbone de l'électricité. Les données viennent de la base carbone ADEME (ADEME 2020) et d'une projection à partir de la SNBC (Direction Générale de l'Énergie et du Climat 2019)

Ces facteurs d'émissions unitaires sont ensuite différenciés selon le type de tissu (centre, banlieue, rural) afin de prendre en compte que la consommation des véhicules varie selon les conditions de circulation.

Finalement on a les facteurs d'émissions suivants pour la VP dans nos 5 zones :

	Émissions de CO <sub>2</sub> à l'usage par v.km				
	GC-IDF	Normandie	Caen	Rouen	Havre
gCO <sub>2</sub> eq/v.km	117	112	112	115	114

Tableau 8 : Facteurs d'émissions de CO<sub>2</sub> à l'usage pour la VP en 2030 selon les zones

#### 2.2.2.2. Bus /car

Nous prenons les projections en 2030 des facteurs d'émissions de CO<sub>2</sub> à l'usage des bus urbains de la base HBEFA<sup>6</sup> (HBEFA 2019). Faute d'avoir trouvé des données sur le taux d'occupation des bus urbains, nous faisons l'hypothèse présente dans la base carbone ADEME (ADEME 2020) d'un taux d'occupation de 10 personnes par bus.

D'autre part, l'IDF se fixant des objectifs ambitieux dans le développement de bus électriques (Le Monde 2020), nous différencions l'IDF et la Normandie sur la part des km faits par des bus à motorisation électrique en 2030 : 10% en Normandie et 30% en IDF.

Au final, nos hypothèses de facteurs d'émissions de CO<sub>2</sub> à l'usage des bus urbains en 2030 sont de 63 gCO<sub>2</sub>eq/p.km en IDF et de 80 gCO<sub>2</sub>eq/p.km en Normandie.

#### 2.2.2.3. Bus express

Parmi nos domaines d'action, nous étudions le potentiel des Transports Publics Express, c'est-à-dire du train et des bus express. Bien que désigné par le mot « bus », les bus express sont en réalité assez différents des bus urbains. Ce sont des autocars qui circulent sur les voies rapides en effectuant peu d'arrêts afin de relier rapidement la périphérie au centre des agglomérations. Étant donné ces conditions de circulations, les bus express consomment moins de carburant que les bus urbains et donc émettent moins de CO<sub>2</sub> à l'usage (600 g/vehicule.km vs 800 g/vehicule.km pour un bus urbain d'après HBEFA (HBEFA 2019)). De plus le taux de remplissage moyen des bus express est supposé être de 17 passagers (The Shift Project 2020). Finalement le facteur d'émission de CO<sub>2</sub> à l'usage en 2030 des bus express est de 35 gCO<sub>2</sub>eq/p.km.

<sup>6</sup> Le Manuel des facteurs d'émission pour le transport routier (HBEFA) a été élaboré à l'origine pour le compte des agences de protection de l'environnement d'Allemagne, de Suisse et d'Autriche. Depuis, d'autres pays (Suède, Norvège, France) ainsi que le CCR (Centre de recherche européen de la Commission européenne) soutiennent la démarche. Ce manuel fournit des facteurs d'émission, ainsi que la consommation de carburant et d'énergie pour toutes les catégories de véhicules actuels (VP, VUL, bus et motos), chacune divisée en différentes catégories, pour une grande variété de situations de circulation, pour des années allant de 1990 à 2050 intégrant la composition réelle du parc automobile.



#### 2.2.2.4. Vélo

Nos scénarios Système vélo supposent un fort développement du vélo et un allongement des distances moyennes parcourues avec ce mode. Pour être conservateur sur les impacts du vélo, on suppose que tous les déplacements faits à vélo sont faits en VAE. Les émissions à l'usage correspondent à l'électricité utilisée pour parcourir 1 km : 6 Wh (The Shift Project 2020) multiplié par l'intensité carbone de l'électricité en 2030 (Voir Tableau 7), soit environ 0,1 gCO<sub>2</sub>eq/km.

#### Facteurs d'émissions des modes actifs

Les modes actifs (la marche et le vélo) entraînent une consommation d'énergie et donc des émissions dues au surcroît de nourriture nécessaire. Cet impact varie grandement selon le régime de la personne et selon la manière de produire la nourriture, en effet il peut exister un facteur 10 entre un régime très carboné et un régime bas-carbone. Pour une personne moyenne et avec les modes production alimentaire actuels, le facteur d'émissions de ces modes est de 26 gCO<sub>2</sub>eq/km pour le vélo classique et de 55 gCO<sub>2</sub>eq/km pour la marche (The Shift Project 2020). Afin de garder notre étude centrée sur les leviers d'évolution des mobilités, nous en excluons les considérations sur les choix de modes de production alimentaires et de régimes alimentaires, et donc nous n'intégrons pas ces émissions dans notre périmètre de comptage<sup>7</sup>.

D'autre part, l'utilisation de ces modes a aussi d'autres effets. Par exemple la pratique du vélo ou de la marche entraîne une meilleure forme physique et donc de moindre dépense de santé estimée à 0,57€/km pour le vélo et 2,09€/km pour la marche (PAPON 2012).

La base carbone ADEME estime que chaque euro de dépense de santé émet 120gCO<sub>2</sub>eq (ADEME 2020). Ceci suggère que la moindre dépense de santé entraîne des émissions négatives de 68 gCO<sub>2</sub>eq/km pour le vélo et de 251 gCO<sub>2</sub>eq/km pour la marche. Ainsi, ces émissions négatives compenseraient largement les émissions liées au surcroît d'alimentation due à ces modes.

#### 2.2.2.5. Marche

Pour les mêmes raisons que pour le vélo, on fait l'hypothèse que la marche a un facteur d'émissions de CO<sub>2</sub> de 0 gCO<sub>2</sub>eq/km.

#### 2.2.2.6. Train

Pour les émissions à l'usage, les données proviennent du Transilien pour l'IDF et du TER pour la Normandie (ADEME 2018b). Par un raisonnement conservatif et en l'absence de données prospectives sur ces technologies, on ne suppose pas de réduction des facteurs d'émission entre 2020 et 2030.

#### 2.2.2.7. Métro, tram

Les émissions à l'usage proviennent de (ADEME 2018b).

Toutes nos hypothèses d'émissions à l'usage pour les différents modes sont explicitées dans le Tableau 9.

---

<sup>7</sup> Les émissions des véhicules thermiques à l'usage, en amont du réservoir, sont au contraire intégrées dans nos périmètres de comptage car on considère ces émissions comme largement immuables (les industries concernées cherchant à optimiser leurs procédés depuis plusieurs décennies).



		Facteurs d'émission à l'usage (gCO <sub>2</sub> eq/km)				
		GC-IDF	Normandie	Caen	Rouen	Havre
V.km	vp (motorisation moyenne)	117	112	112	115	114
P.km	deuxrm	147	147	147	147	147
	bus (motorisation moyenne)	63	80	80	80	80
	bus_express	35	35	35	35	35
	metro_tram	3	3	3	3	3
	train	6	26	26	26	26
	vélo <sup>8</sup>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	marche	0	0	0	0	0

Tableau 9 : Nos hypothèses de facteurs d'émissions de CO<sub>2</sub> à l'usage pour chaque mode en 2030, par zone et sur un périmètre de type WTW

### 2.2.3. Paramétrage des facteurs d'émissions de GES pour la production et la fin de vie des véhicules

Les émissions dues à la production et à la fin de vie des véhicules proviennent de (The Shift Project 2020) sauf mention contraire.

	Mode	Propulsion	Emission à la production et fin de vie des véhicules (gCO <sub>2</sub> eq/km)
V.km	vp	Thermique	25
		Electrique	53
P.km	deuxrm	Thermique	10
	bus_car	Thermique	7 <sup>9</sup>
		Electrique	15 (ADEME 2018a)
	metro_tram		Supposé négligeable
	train		Supposé négligeable
	vélo		12

Tableau 10 : Facteurs d'émission pour la production et la fin de vie des véhicules en 2030

<sup>8</sup> Etant donné que l'on fait l'hypothèse que tous les déplacements à vélo sont faits en vélo à assistance électrique, les facteurs d'émissions sont ceux du vélo à assistance électrique

<sup>9</sup> (ADEME 2018a)

## 2.2.4. Paramétrage des consommations unitaires d'énergie à l'usage

Pour obtenir les émissions de CO<sub>2</sub> à l'usage, nous avons eu pour résultat intermédiaire la consommation d'énergie à l'usage :

		Consommation d'énergie par km (Wh/km)				
		GC-IDF	Normandie	Caen	Rouen	Havre
V.km	vp	410	396	395	404	401
P.km	deuxrm	499	499	499	499	499
	bus_car	269	277	277	277	277
	metro_tram	140	140	140	140	140
	train	264	291	291	291	291
	vélo	5	5	5	5	5
	marche	-	-	-	-	-

Tableau 11 : Facteurs de consommation d'énergie par mode, par zone (motorisation moyenne sur la zone) en 2030

## 2.2.5. Paramétrages des facteurs d'émission de polluants de l'air

Les facteurs d'émissions pour les NO<sub>x</sub>, les PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub> (pot et hors pot)<sup>10</sup> sont issus de la base HBEFA (HBEFA 2019) :

			Facteurs d'émissions en g/km en 2030		
	Mode	Vecteur énergétique	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	NO <sub>x</sub>
V.km	VP	diesel	0,032	0,013	0,420
		essence	0,032	0,013	0,080
		électricité	0,031	0,012	-
		gnv	0,033	0,014	0,020
P.km	deuxrm	essence	0,044	0,039	0,040
	bus	diesel	0,054	0,009	0,100
		électricité	0,052	0,006	-
		gnv	0,053	0,007	0,100
	Bus express	Diesel	0,016	0,004	0,02
metro_tram	électricité	-	-	-	

<sup>10</sup> Pour les particules en suspension (PM : Particulate Matter) il existe deux sources d'émissions : les gaz d'échappement par le pot d'échappement (pot) et le reste (hors pot). Le hors pot provient principalement de l'usure des freins et des pneus.

	train	diesel	0,107 <sup>11</sup>	0,001 <sup>11</sup>	0,500 <sup>12</sup>
	train	électricité	0,010 <sup>13</sup>	-	-
	vélo	électricité	-	-	-
	marche		-	-	-

Tableau 12 : Facteurs d'émission des polluants de l'air en 2030, issus de la base HBEFA

On peut observer que les facteurs d'émissions de PM<sub>2.5</sub> et PM<sub>10</sub> ne sont pas significativement différents entre la voiture électrique et la voiture thermique. En effet 98% des PM<sub>10</sub> (92% des PM<sub>2.5</sub>) ne proviennent pas du pot d'échappement mais des pneus et des freins et ne diffèrent donc pas significativement entre une voiture électrique et thermique. Les émissions de NO<sub>x</sub> sont par contre éliminées dans le cas de la voiture électrique.

Il est à noter que les NO<sub>x</sub>, les PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub> sont des polluants de l'air locaux. Leur impact sur la santé dépend du lieu où ils sont émis : ils sont plus nocifs lorsqu'ils sont émis en zone dense qu'en zone moins dense. Nous ne prenons pas en compte la dimension géographique de ces émissions pour des raisons de complexité.

### 2.2.6. Description du scénario *Référence*

Le scénario *Référence* a été fait avec les hypothèses suivantes :

- Nous supposons que l'habitant moyen de chaque {Zone x Tissu} se déplace de la même façon entre 2020 et 2030. C'est-à-dire qu'un habitant moyen de la banlieue du Havre va faire le même nombre de km en VP, bus, etc... en 2030 qu'en 2020<sup>14</sup>. Ainsi on ne prend pas en compte des tendances existantes.
- Nous supposons que le nombre d'habitants évolue selon les projections de population de l'INSEE (INSEE 2017b) extrapolé pour chaque {Zone x Tissu}.
- Nous prenons en compte une évolution des motorisations (par exemple : électrification des VP) et de l'efficacité des différents modes selon les modalités décrites en : 2.2.2, 2.2.3, 2.2.4 et 2.2.5.

Voici les grandes caractéristiques du scénario *Référence* :

Scénarios <i>Référence</i> en 2030	Grande couronne IDF	Normandie	Calvados	Rouen	Havre
Population (hab)	5 660 000	3 300 000	719 000	771 000	505 000
Mobilité (Mp.km)	45 500	21 900	5 300	4 100	3 100
Trafic voiture (Mv.km)	22 900	15 900	3 900	2 800	2 100
Consommation carburant fossile (MWh)	9 600 000	6 300 000	1 500 000	1 100 000	860 000
CO <sub>2</sub> à l'usage (tCO <sub>2</sub> )	3 000 000	1 900 000	460 000	340 000	260 000

<sup>11</sup> Pour les émissions du train diesel hors pot, on prend le facteur d'émission du train électrique. Pour les émissions du train diesel pot, faute de données on les extrapole au prorata de la consommation de carburant à partir de la VP diesel

<sup>12</sup> Faute de données, on extrapole au prorata de la consommation de carburant à partir des émissions de NO<sub>x</sub> de la VP diesel (CITEPA 2017)

<sup>14</sup> Dans les faits, à la date de l'enquête d'où proviennent les données, 2018 pour le Havre.

CO <sub>2</sub> en ACV (tCO <sub>2</sub> )	3 700 000	2 400 000	580 000	430 000	320 000
NO <sub>x</sub> (tNO <sub>x</sub> )	3 300	2 300	560	420	310
PM <sub>2.5</sub> (tPM)	860	580	140	100	80
PM <sub>10</sub> (tPM)	340	220	53	38	29
Temps passé à se déplacer (min/jr/pers)	99	70	73	70	70

Tableau 13 : Principaux résultats du scénario Référence sur les jours de semaine de 2030 sur nos zones d'études

## 2.3. 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 2030 (Figure 8). 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 2030, 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 certaines dépenses en lien avec la voiture à disparaître complètement (cela n'est le cas dans aucun de nos scénarios cependant).

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

- Quels éléments matériels (infrastructures, équipements...) sont différents entre les deux systèmes ? En quoi leur maintenance/réparation est-elle différente ?
- Quelle différence y a-t-il entre les quantités de carburant consommées par les systèmes ?
- Quels usages sont différents ?
- Quelles activités professionnelles de services autour de la mobilité sont différentes entre les deux systèmes ?

Nous avons supposé dans un premier temps 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 supérieurs à ceux de Sref représentent une **augmentation des dépenses**. Au contraire, ceux sur lesquels les dépenses de S' sont inférieurs 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 S' par rapport à Sref. Dans le cas contraire, on parlera de **déficit** causé par le système de mobilité S' par rapport à Sref.

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.

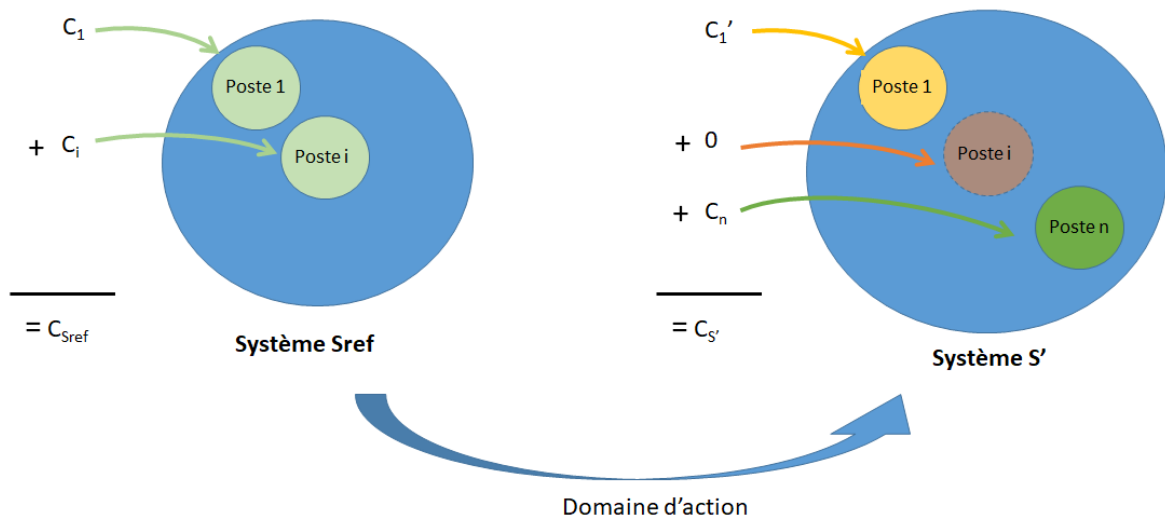


Figure 8 : Différents postes de dépenses en 2030 (D<sub>i</sub>) dans le système de mobilité du scénario Référence (S<sub>ref</sub>), et dans un système de mobilité modifié par la mise en place de différentes actions (Système S'). En passant de S<sub>ref</sub> et S', le poste 1 est modifié, le poste i est supprimé, et le poste n est apparu. La différence entre D<sub>S'</sub> et D<sub>S<sub>ref</sub></sub> représente le bénéfice, ou le déficit, apporté par la mise en place de S' par rapport à S<sub>ref</sub>.

Dans un second temps, nous avons alloué les différents postes de dépenses sur la catégorie d'acteurs qui supporterait la dépense dans le scénario considéré. Notre approche considère que seuls les ménages, ou la collectivité (via l'Etat ou les collectivités territoriales), peuvent porter une dépense en dernier ressort, les dépenses du secteur privé étant supposées répercutées dans le prix des biens/ services vendus, et donc portés *in fine* par les ménages ou la collectivité. Nos hypothèses d'allocation des postes de coût sont des hypothèses dédiées, qui peuvent par nature se discuter. Par exemple, nous avons considéré que le coût de production et mise sur le marché des vélos serait porté par les ménages (à 100 %), alors qu'on aurait aussi pu imaginer que la collectivité en porterait tout ou partie (via des subventions à l'achat par exemple).

## 2.4. Méthodologie de calcul du temps passé à se déplacer

La méthode pour calculer le temps passé à se déplacer dans nos différents scénarios varie légèrement selon les domaines d'action, mais l'idée générale est la suivante. Pour chaque mode on détermine la vitesse moyenne des déplacements sur ce mode sur une unité géographique à partir des données d'enquêtes. Cette unité géographique est la {Zone x Tissu}, sauf si l'échantillon de déplacements de ce mode sur cette {Zone x Tissu} n'est pas assez grand. Dans ce cas là, on pourra calculer la vitesse moyenne de ce mode au niveau d'un Tissu, ou au niveau de la Vallée de la Seine.

On obtient pour chaque {Zone x Tissu}, un tableau de ce type :

	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche
Vitesse moyenne (km/h)	32	35	21	-	32	13	4

Tableau 14 : Vitesses moyennes par mode pour un habitant du tissu [20-100]-B-pole de Normandie

D'autre part on connaît pour chaque scénario la distance parcourue (en km/jr) par mode pour un habitant de la {Zone x Tissu}. Par exemple pour nos scénarios Télétravail :

Scénario	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche	total
Référence	27,9	0,1	1,2	-	0,7	0,2	0,9	31,0
Télétravail Potentiel Max	26,1	0,1	1,2	-	0,7	0,2	0,9	29,0
Télétravail Volontariste	27,5	0,1	1,2	-	0,7	0,2	0,9	30,5

*Tableau 15 : Distances parcourues (en km par jour) pour un habitant du tissu [20-100]-B-pole de Normandie selon les scénarios*

Ainsi en divisant les km parcourus par mode par les vitesses moyennes, on obtient le temps passé en moyenne par un habitant de la {Zone x Tissu} à se déplacer pour chaque mode :

Scénario	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche	total
Référence	0,88	0,00	0,06	-	0,02	0,01	0,21	1,19
Télétravail Potentiel Max	0,82	0,00	0,06	-	0,02	0,01	0,21	1,12
Télétravail Volontariste	0,87	0,00	0,06	-	0,02	0,01	0,21	1,17

*Tableau 16 : Temps de déplacement (en heures par jour) pour un habitant du tissu [20-100]-B-pole de Normandie*

Il est à noter qu'en raisonnant ainsi, on fait l'hypothèse que les km qui ont été effacés ou reportés dans nos scénarios sont parcourus avec la même vitesse que la vitesse moyenne des déplacements du mode. Ceci n'est pas nécessairement vrai, par exemple on pourrait imaginer que la vitesse moyenne de la VP sur le motif « Travail » est plus faible que la vitesse moyenne de la VP tous motifs, parce que les déplacements pour aller et rentrer du travail ont lieu en heures de pointe lorsque le trafic est congestionné. C'est pourquoi on adaptera cette méthode en fonction du domaine d'action.

# Chapitre 3 - Télétravail

---

Le télétravail réduit les déplacements domicile travail, et donc les besoins de mobilité en Vallée de la Seine. Notre objectif est d'établir l'impact du télétravail sur les déplacements, selon les différents scénarios motivationnels, et de calculer la réduction des émissions CO<sub>2</sub> évitées par l'application de chacun d'eux.

## 3.1. Hypothèses et calculs pour le télétravail

### 3.1.1. Hypothèses

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

**Le scénario Potentiel Max** 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 en Vallée de la Seine

47 % des emplois pourraient bénéficier d'aménagement en télétravail, 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 (Cabinet Roland Berger/ Centre d'Analyse Stratégique 2009). Nous conservons cette hypothèse pour nos calculs dans ce scénario, hypothèse légèrement optimiste pour le télétravail en région Normandie car la part d'employés et d'ouvriers y est plus élevée qu'en moyenne nationale alors que leurs emplois sont moins aménageables pour le télétravail.

D'autre part, le temps de travail optimum admis pour le télétravail serait de 2 jours par semaine, selon deux études (Cabinet Roland Berger/ Centre d'Analyse Stratégique 2009). 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 Volontariste**, 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 sont moins prêtes à développer le télétravail que les plus grandes entreprises (Aguilera et al. 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 (Forbes 2015). Notons que la crise de la COVID-19 a certainement fait évoluer les pratiques dans ce sens, par la force des choses.

Concrètement, le scénario **Volontariste** 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 2030. Note : 30 % d’emplois télétravaillés est le taux observé en France en 2019, bien que sur une fréquence de télétravail occasionnelle (environ la moitié des télétravailleurs télétravaillent moins d’une fois par semaine).

- 68 % (respectivement 71%) des emplois sont publics ou issus d’entreprises de grande taille et de taille intermédiaire, et 32 % (respectivement 29%) sont des emplois issus de petites entreprises en Normandie (respectivement en Ile-de-France) ((INSEE 2018, 2020a)).
- 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 tertiarisées. 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 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 2030, définit le taux de réduction des trajets grâce au télétravail. L’application numérique pour la Normandie est la suivante:

Scénario Potentiel Max pour la Normandie :

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

Scénario Volontariste pour la Normandie :

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

Récapitulatif pour la Normandie et l’Ile-de-France :

Scénario	Région	%jrs <sub>TW,PME</sub>	%jobs <sub>TW,PME</sub>	%jobs <sub>PME,tot</sub>	%jrs <sub>TW,GIE</sub>	%jobs <sub>TW,GIE</sub>	%jobs <sub>GIE,tot</sub>	%traj <sub>TW,tot</sub>
PM	Normandie	2/5	0,47	0,32	2/5	0,47	0,68	0,19
PM	IDF	2/5	0,47	0,29	2/5	0,47	0,71	0,19
Vol	Normandie	1/5	0,10	0,32	1/5	0,30	0,68	0,047
Vol	IDF	1/5	0,10	0,29	1/5	0,30	0,71	0,048

Tableau 17 : Calcul de la part des trajets évités grâce au télétravail selon le scénario et la région

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

	Scénario Potentiel Max	Scénario Volontariste
Communautés initiales	Habitants des aires urbaines	Habitants des aires urbaines
Trajets générés	Trajets DT	Trajets DT
Assiette (trajets concernés)	19 % des déplacements DT	4,7-4,8 % des déplacements DT
Effet sur la mobilité	DT : effacement des trajets	DT : effacement des trajets

Tableau 18 : Récapitulatif des hypothèses du domaine d'action Télétravail

### 3.1.2. Adaptation à l'input PES

On effectue ensuite les mêmes étapes de calcul pour tous les tissus de toutes les zones. Afin de limiter la taille des tableaux, on ne les détaillera que pour le tissu [20-100]-B-pole de la zone Normandie.

Le tableau suivant fournit les distances parcourues (en km par jour) pour le motif Travail pour une personne habitant le tissu [20-100]-B-pole de la zone Normandie, dans chaque scénario :

Scénario	Motif	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche	total
Référence	Travail	10,0	0,05	0,17	-	0,17	0,04	0,03	10,5
Potentiel Max	Travail	8,1	0,04	0,14	-	0,13	0,03	0,03	8,5
Volontariste	Travail	9,5	0,04	0,16	-	0,16	0,03	0,03	10,0

Tableau 19 : Distances parcourues (en km/jr) pour le motif Travail pour un habitant du tissu [20-100]-B-pole de la zone Normandie, selon le mode et le scénario

En faisant la somme de tous les motifs on aboutit au tableau suivant :

Scénario	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche	total
Référence	27,9	0,1	1,2	-	0,7	0,2	0,9	31,0
Potentiel Max	26,1	0,1	1,2	-	0,7	0,2	0,9	29,0
Volontariste	27,5	0,1	1,2	-	0,7	0,2	0,9	30,5

*Tableau 20 : Distances parcourues (en km/jr) tous motifs confondus pour un habitant du tissu [20-100]-B-pole de la zone Normandie, selon le mode et le scénario*

Pour en déduire l'évolution du trafic VP (en v.km) tous motifs confondus, il faut utiliser le taux d'occupation par motif. En effet le taux d'occupation des voitures sur le motif «Travail » est très bas : 1,06 p.km par v.km contre 1,21 p.km par v.km en moyenne sur toute la Vallée de la Seine. Ainsi les p.km évités pour le motif travail représentent plus de v.km évitées que s'ils étaient évités pour un autre motif. Pour prendre en compte cet effet, on calcule le nouveau taux d'occupation tous motifs confondus,  $tx\_occ_{scén}$ , pour les scénarios Volontariste et Potentiel Max.

L'expression générale du taux d'occupation est la suivante :

$$tx\_occ = \frac{pkm}{vkm} \quad (4)$$

On exprime alors le taux d'occupation tous motifs confondus dans le scénario (Volontariste ou Potentiel Max), par rapport au scénario Référence (indice *Réf*) :

$$tx\_occ_{scén} = \frac{pkm_{scén}}{vkm_{Réf} - vkm_{évit\acute{e}\_t\acute{e}l\acute{e}travail}} \quad (5)$$

$$tx\_occ_{après} = \frac{pkm_{scén}}{\frac{pkm_{Réf}}{tx\_occ_{Réf}} - \frac{pkm_{Réf} - pkm_{scén}}{tx\_occ_{travail}}} \quad (6)$$

Finalement pour un habitant de Normandie dans le tissu [20-100]-B-pole, on obtient les p.km et v.km suivants (tous motifs confondus):

Scénario	V.km	P.km						
	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche	total
Référence	22,6	0,1	1,2	-	0,7	0,2	0,9	31,0
Potentiel Max	20,8	0,1	1,2	-	0,7	0,2	0,9	29,0

Volontariste	22,2	0,1	1,2	-	0,7	0,2	0,9	30,5
--------------	------	-----	-----	---	-----	-----	-----	------

Tableau 21 : Nombre de v.km et p.km parcourus par jour pour un habitant du tissu [20-100]-B-pole de la zone Normandie (tous motifs confondus)

## 3.2. Résultats

Il faut noter que les résultats suivants ont été calculés pour un jour de semaine, car les données de déplacement du week-end ne sont pas dans les enquêtes (sauf pour l'EGT sur l'IDF). Le nombre de déplacement avec pour motif travail étant moindre le week-end, le potentiel de réduction des impacts serait aussi moindre.

### 3.2.1. Résultats généraux

Voici la synthèse des résultats obtenus pour les scénarios relatifs au télétravail, sur l'ensemble de la population normande, pour l'année 2030 en comparaison avec le scénario Référence :

	Normandie		
	Référence	Vol	PM
Distances parcourues par an (Mp.km/an)	21 900	21 600	20 500
Distances parcourues par an (% diff par rapport à Référence)		-1,7%	-6,7%
Taux de remplissage (p.km/v.km)	1,22	1,23	1,24
Taux de remplissage (% diff par rapport à Référence)		0,3%	1,2%
Trafic voiture annuel (Mv.km/an)	15 900	15 600	14 600
Trafic voiture annuel (% diff par rapport à Référence)		-2,1%	-8,3%
CO <sub>2</sub> ACV (tCO <sub>2</sub> )	2 380 000	2 330 000	2 190 000
CO <sub>2</sub> ACV (% diff par rapport à Référence)		-2,0%	-8,0%

Tableau 22 : Principaux résultats des scénarios Télétravail en 2030, pour la zone Normandie

En Normandie on observe dans les scénarios Télétravail une baisse des km parcourus (-1,7% en Vol, -6,7% en PM) ainsi qu'une légère augmentation du taux de remplissage (des déplacements peu remplis étant évités). Ceci entraîne une réduction des distances parcourues par les voitures (-2,1% en Vol, -8,3% en PM).

On trouve que les impacts du scénario PM sont quatre fois plus importants que ceux du scénario Vol. C'est bien ce qui est suggéré par nos hypothèses, car dans le scénario Vol on efface 4,7% des p.km « Travail » tandis qu'on en efface 18,8% dans le scénario PM (soit 4 fois plus).

Cette linéarité permet de facilement déduire les résultats de scénarios alternatifs. Par exemple un scénario similaire au scénario PM mais avec une fréquence de télétravail de 1 jour par semaine au lieu de 2, aurait les mêmes résultats du scénario PM mais divisés par 2.

On observe des résultats similaires sur les 5 zones d'études (Voir Tableau 23).

	GC-IDF		Normandie		Calvados		Rouen		Havre	
	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM
Distances parcourues (p.km)	-2%	-8%	-2%	-7%	-2%	-7%	-2%	-7%	-2%	-6%
Trafic voiture (v.km)	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%
CO <sub>2</sub> ACV	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%

Tableau 23 : Résultats généraux du télétravail sur les 5 zones

### 3.2.2. Interprétation des résultats mobilité

Tentons de mieux comprendre les résultats du scénario Télétravail PM. On observe que la part des v.km réalisé pour le motif travail est de 43% dans les AU de Normandie. Sur ces 43% de v.km, 53% (soit 23% des v.km) sont réalisés pour des emplois non télétravaillables par hypothèse. Parmi les 20% de v.km restant, 3/5 (soit 12% des v.km) sont réalisés sur des jours non télétravaillés, les 2/5 (soit 8% des v.km) restants sont réalisés sur des jours télétravaillés. On retrouve bien la réduction de 8% des v.km observée.

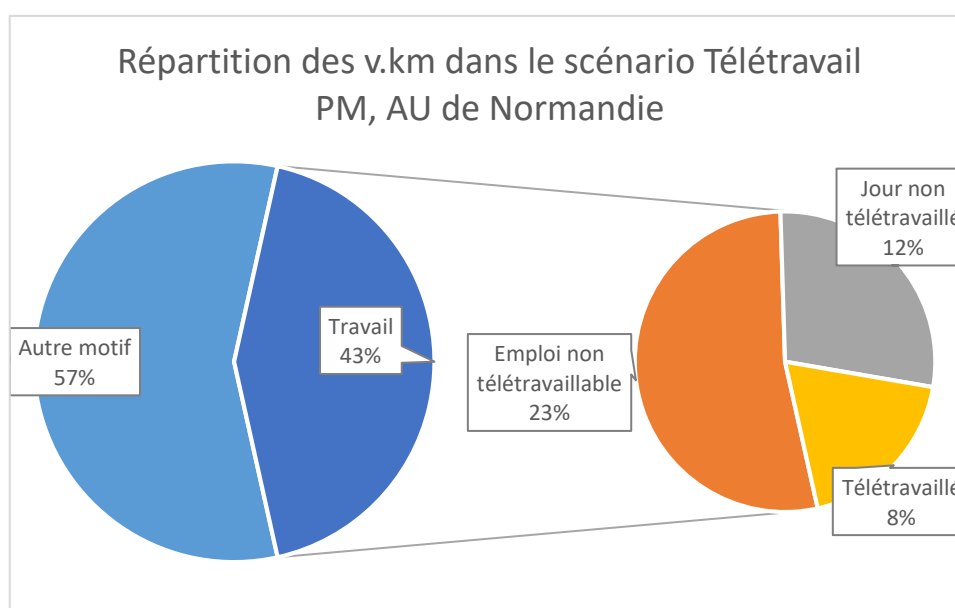


Figure 9 : Répartition des v.km dans le scénario Télétravail PM sur les AU de Normandie

Qu'en est-il des autres zones ? Comme on peut le voir sur la Figure 10, la part des v.km réalisée pour le motif travail est stable parmi les zones. Les émissions de CO<sub>2</sub> et d'autres polluants étant principalement lié à l'utilisation de la voiture, on observe une baisse d'environ 8% de ces impacts sur toutes les zones.

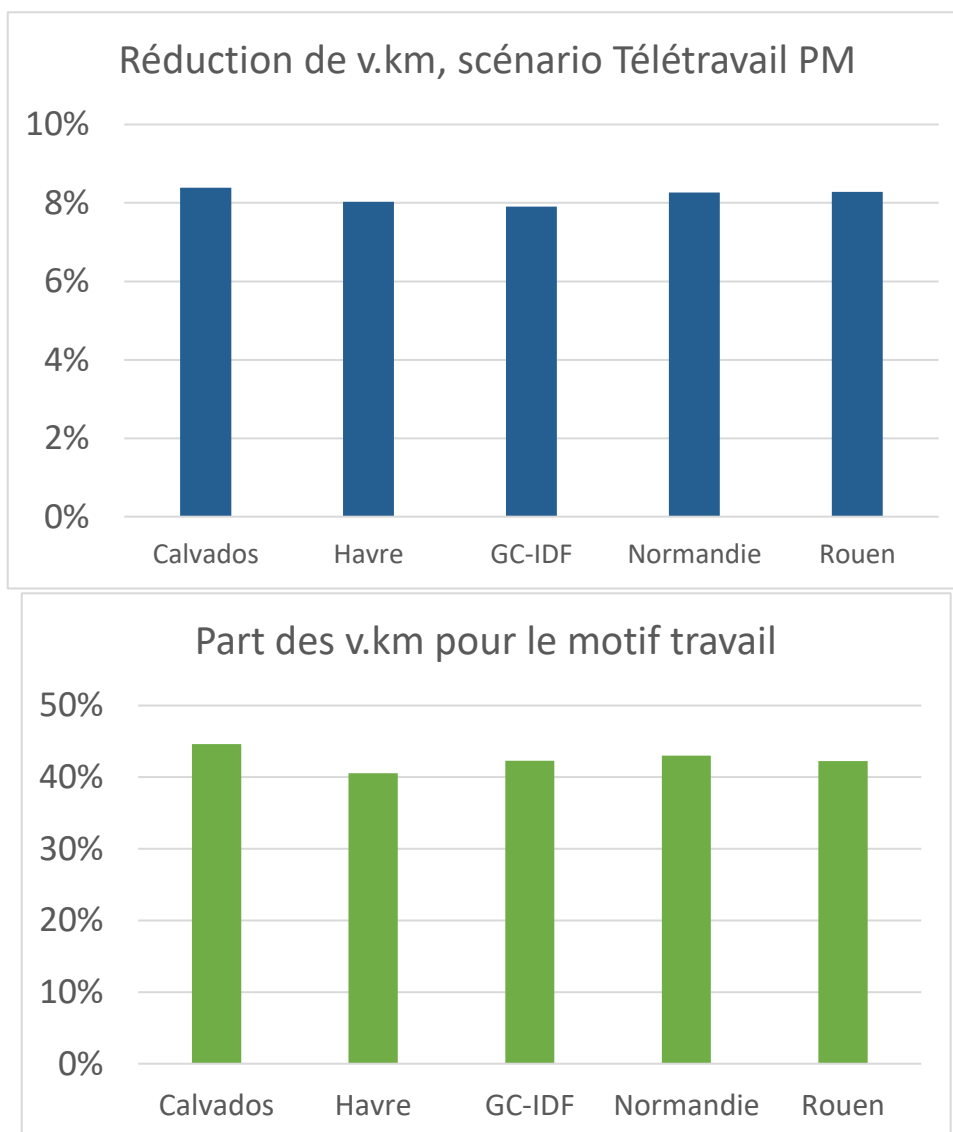


Figure 10 : Part des v.km pour le motif travail (en bas) et réduction de v.km dans le scénario PM télétravail pour chaque zone.

### 3.2.3. Résultats sur la consommation d'énergie et les émissions

Les différentes émissions étant principalement déterminées par le trafic voiture, on observe une baisse similaire sur les différents impacts : -2% dans le scénario Volontariste, -8% dans le scénario Potentiel Max dans toutes les zones (Voir Tableau 24).

Tableau 24 : Résultats sur la consommation d'énergie et sur les émissions du télétravail sur les 5 zones

	GC-IDF		Normandie		Calvados		Rouen		Havre	
	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM
Distances parcourues (p.km)	-2%	-8%	-2%	-7%	-2%	-7%	-2%	-7%	-2%	-6%
Trafic voiture (v.km)	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%
Consommation énergétique	-2%	-9%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%
CO <sub>2</sub> à l'usage	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%
CO <sub>2</sub> ACV	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%
NO <sub>x</sub>	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%
PM <sub>10</sub>	-2%	-7%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-7%
PM <sub>2.5</sub>	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%	-2%	-8%

### 3.2.4. Résultats sur le temps passé à se déplacer

Pour évaluer l'impact sur le temps passé à se déplacer, on repart des distances parcourues par mode selon le scénario (on garde ici l'exemple d'un habitant de Normandie pour le tissu [20-100]-B-pole, les calculs étant effectués de manière similaire pour les autres tissus).

Scénario	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche	total
Référence	27,9	0,1	1,2	-	0,7	0,2	0,9	31,0
Potentiel Max	26,1	0,1	1,2	-	0,7	0,2	0,9	29,0
Volontariste	27,5	0,1	1,2	-	0,7	0,2	0,9	30,5

Tableau 25 : Distances parcourues (en km par jour) pour un habitant du tissu [20-100]-B-pole de Normandie selon les scénarios

D'autre part, à partir des déplacements observés dans ce tissu et des temps de déplacements déclarés, on déduit les vitesses moyennes pour chaque mode sur ce tissu :

	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche
Vitesse moyenne (km/h)	32	35	21	0	32	13	4

Tableau 26 : Vitesses moyennes par mode pour un habitant du tissu [20-100]-B-pole de Normandie

En divisant les distances parcourues par les vitesses on obtient le temps de déplacement pour chaque mode dans chaque scénario. On obtient pour l'habitant de notre tissu, en heure par jour :

Scénario	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche	total
Référence	0,88	0,00	0,06	-	0,02	0,01	0,21	1,19
Potentiel Max	0,82	0,00	0,06	-	0,02	0,01	0,21	1,12
Volontariste	0,87	0,00	0,06	-	0,02	0,01	0,21	1,17

Tableau 27 : Temps de déplacement (en heures par jour) pour un habitant du tissu [20-100]-B-pole de Normandie

En multipliant ces résultats par le nombre d'habitants du tissu, et en sommant tous les tissus de chaque zone, on en déduit le résultat pour les 5 zones :

	GC-IDF		Normandie		Calvados		Rouen		Havre	
	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM
Temps passé à se déplacer (h par personne)	1,62	1,5	1,16	1,11	1,2	1,14	1,16	1,11	1,15	1,11
Temps passé à se déplacer (% diff / Réf)	-2%	-9%	-1%	-5%	-1%	-6%	-1%	-5%	-2%	-5%

Tableau 28 : Temps de déplacement (en heures par jour) pour un habitant de chaque zone

Ainsi le télétravail permet de réduire le temps dans les transports de 1% à 2% dans le scénario Volontariste et de 5% à 9% dans le scénario Potentiel Max.

### 3.2.5. 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 pour chaque zone étudiée. Les dépenses sont exprimées hors taxe.

- Les **lieux** de télétravail sont supposés être bâtis, pour chaque zone d'étude, spécifiquement pour permettre le télétravail, en fonction du besoin d'accueil d'actifs (qui dépend du scénario). Ce bilan économique explicite les hypothèses pour les AU de Normandie. Les hypothèses pour les quatre autres zones sont indiquées dans le Tableau 32.
- La surface globale nécessaire à l'accueil des actifs est calculée en se basant :
  - sur une estimation du nombre d'actifs en France pour l'année 2018 (INSEE 2020b), à partir de laquelle on estime le nombre d'actifs dans la zone (au prorata de la part de la population française dans les AU de Normandie, soit 5%).
  - 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 télécentres existent en fonction des jours).
  - Pour obtenir le nombre de télétravailleurs allant travailler dans un télécentre, nous supposons que 50 % des télétravailleurs travaillent de chez eux, donc que 50 % des télétravailleurs travaillent d'un tiers-lieux. Actuellement, entre 10 % et 40 % des télétravailleurs travaillent d'un tiers-lieux (Epitalon 2016; LBMG Worklabs, Seine et Marne Développement 2020). D'après une enquête de préférences déclarées, le domicile constitue le lieu de travail idéal pour 25 % des Français (Forum Vie Mobiles/l'Obsoco 2016).



- Enfin, la surface à bâtir nécessaire au télétravail est déduite de la surface nécessaire par salarié dans les télécentres (supposée égale à 9 m<sup>2</sup> par travailleur). Les calculs sont effectués dans le Tableau 29.
- Nous supposons un coût de construction du mètre carré de télécentre pour chaque zone de 1 200 € TTC/m<sup>2</sup>, pour une durée de vie de 50 ans (d'après les retours d'expérience de Dominique Valentin, fondateur de Relais d'Entreprises, notamment la réhabilitation d'un bâtiment en télécentre à Fonsorbes (31) et la construction du premier Relais d'Entreprises à Rieux Volvestre).

Surface tiers lieux	PM	Vol
Nombre d'actifs en France	28 115 500	28 115 500
Nb travailleurs dans la zone/jour	1 161 363	1 161 363
Part des télétravailleurs dans la zone chaque jour ouvré (%travailleurs/jour)	19%	4,80%
Nombre de télétravailleurs dans la zone chaque jour ouvré (travailleurs)	220 659	55 745
Part des télétravailleurs à la maison	50%	50%
Nb télétravailleurs dans lieux de coworking chaque jour (travailleurs)	110 330	27 873
Surface nécessaire par télétravailleur en télécentre (m <sup>2</sup> /travailleur)	9	9
Espace nécessaire de télécentre (m <sup>2</sup> )	992 966	250 854

Tableau 29 : Estimation de la surface de télécentre nécessaire au fonctionnement du système de télétravail, pour les AU de Normandie

- Le **matériel** dans les télécentres (mobiliers, imprimantes, consommation d'électricité et de chauffage) est estimé à 24 €/m<sup>2</sup>/an (hypothèse basée sur 6 000 € de mobilier qui dure 10 ans et 1 300 € de frais d'électricité pour 100 m<sup>2</sup>, ainsi qu'une imprimante à 1 600 €/an pour 300 m<sup>2</sup>, le tout exprimé hors taxe. Le matériel consommable autre (feuilles, cahiers, stylos), était déjà consommé dans le système de référence, donc non compté ici.)
- Les **ressources humaines** nécessaires au bon fonctionnement des télécentres (nettoyage, gestion) : le nombre d'employés est déterminé en fonction de la surface de télécentre (donc en fonction du scénario). On suppose un employé « concierge » à temps-plein proche du SMIC (hypothèse de 23 000 €/an charges comprises) pour gérer 10 télécentres moyens de 200 m<sup>2</sup>, soit 2000 m<sup>2</sup> d'espace. On suppose d'autre part 200 € de service de ménage par mois pour 100 m<sup>2</sup> de télécentre (hypothèses basées sur le retour d'expérience de D. Valentin, fondateur de Relais d'Entreprises). Ces estimations mènent à un coût annuel de ressources humaines de 23 000/2000 + 200/100\*12 = 35 €/an/m<sup>2</sup>.
- Le moindre usage des VP, le moindre besoin d'entretien et la moindre consommation de carburant, par les individus (qu'ils se déplacent en tant que membre d'un ménage ou en tant que professionnels) sont comptabilisés comme pour les scénarios Covoiturage (section 0), avec les valeurs de réduction du trafic local 2030 suivantes, obtenues par la simulation :
  - 8,3 % de trafic local évité pour le scénario *Potentiel maximal*
  - 2,1% de trafic local évité tous motifs pour le scénario *volontariste*

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

Tous les coûts de ce domaine d'action sont réputés pris en charge par les ménages, par le biais des paiements effectués pour l'usage de ces tiers-lieux gérés par le secteur privé. Par conséquent aucune dépense n'est engagée par l'Etat.

Les résultats des calculs sont détaillés dans le Tableau 30 et le Tableau 31.

**Dans le scénario *volontariste*, le télétravail est globalement bénéficiaire** (74 M€), les dépenses annualisées à engager pour que le système fonctionne étant plus que compensées par les économies faites sur l'usage de la VP et la consommation de carburant. Pour l'AU Normandie, les ménages font une économie de l'ordre de 49€ par an. **Dans le scénario *Potentiel Max*, le télétravail est plus largement bénéficiaire par rapport au scénario *Référence*** (231M€).

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.

Élément différent entre S' et Sref	Type de modification	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€)	Surcoût à l'année S'/Sref (M€)	Hypothèse d'allocation des coûts
Espaces de coworking	Création	1 200	€/m2	992 966	m2	993	50	20	-	20	Ménages
Matériel dans les espaces de coworking	Création	24	€/m2/an	992 966	m2	20	1	20	-	20	Ménages
Ressources humaines pour la gestion des espaces de coworking, ménage	Création	35	€/m2/an	992 966	m2	35	1	35	-	35	Ménages
Usage de la voiture - achat véhicule	Modif	0,17	€/vkm	18	Gvkm	2 603	1	2 603	2 838	- 235	Ménages
Usage de la voiture - achat carburant	Modif	0,07	€/vkm	18	Gvkm	798	1	798	870	- 72	Ménages
Usage de la voiture - entretien et réparation	Modif	0,05	€/vkm	18	Gvkm	746	1	746	813	- 67	Ménages
								Total annuel (M€)	3 477	3 708	
								Surcoût total annuel (M€)	- 231		

Tableau 30 : Les différents postes de dépenses du télétravail, pour le scénario PM, détaillés pour les AU de Normandie. 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 7.4.5.2. 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 (€)	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€)	Surcoût à l'année S'/Sref (M€)	Hypothèse d'allocation des coûts
Espaces de coworking	Création	1 200	€/m2	250 854	m2	251	50	5	-	5	Ménages
Matériel dans les espaces de coworking	Création	24	€/m2/an	250 854	m2	5	1	5	-	5	Ménages
Ressources humaines pour la gestion des espaces de coworking, ménage	Création	35	€/m2/an	250 854	m2	9	1	9	-	9	Ménages
Usage de la voiture - achat véhicule	Modif	0,17	€/vkm	19	Gvkm	2 779	1	2 779	2 838	- 59	Ménages
Usage de la voiture - achat carburant	Modif	0,07	€/vkm	19	Gvkm	852	1	852	870	- 18	Ménages
Usage de la voiture - entretien et réparation	Modif	0,05	€/vkm	19	Gvkm	796	1	796	813	- 17	Ménages
Total annuel (M€)								4 447	4 521		
Surcoût total annuel (M€)								-	74		

Tableau 31 : Les différents postes de dépenses du télétravail, pour le scénario Vol, détaillés pour les AU de Normandie. 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 7.4.5.2. 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.

Le tableau suivant donne les entrées des calculs pour l'ensemble de nos zones d'étude :

	Grande couronne IdF	AU Normandie	EMD Rouen	AU Calvados	EMD Havre
Part de la population dans la zone	8%	5%	1%	1%	1%
Trafic local évité tout motifs PM	7,9%	8,3%	8,3%	8,4%	8%
Trafic local évité tout motifs Vol	2%	2,1%	2,1%	2,1%	2%

Tableau 32 : Hypothèses pour les scénarios télétravail différenciés par zone (chiffres arrondis).

Les tableaux suivants fournissent un résumé des résultats sur le télétravail, pour l'ensemble des zones d'étude, pour le scénario PM puis le scénario Vol :

<b>Télétravail PM</b>	<b>Grande couronne IdF</b>	<b>AU Normandie</b>	<b>EMD Rouen</b>	<b>AU Calvados</b>	<b>EMD Havre</b>
<b>Augmentation des dépenses ménages (M€/an)</b> Construction de télécentres Matériel et dépenses courantes des espaces Gestion/nettoyage des espaces	130	80	20	20	10
<b>Augmentation des dépenses collectivités territoriales (M€/an)</b>	-	-	-	-	-
<b>Réduction des dépenses ménages (M€/an)</b> Consommation carburant réduite Fréquence d'achat VP réduite Besoins d'entretien/réparation/assurance VP réduits	520	370	70	90	50
<b>Surcoût total annuel (M€/an)</b>	-390	-230	-50	-80	-40

*Tableau 33 : Résultats généraux de coûts pour le scénario Télétravail PM, dans chaque zone (chiffres arrondis).*

<b>Télétravail Vol</b>	<b>Grande couronne IdF</b>	<b>AU Normandie</b>	<b>EMD Rouen</b>	<b>AU Calvados</b>	<b>EMD Havre</b>
<b>Augmentation des dépenses ménages (M€/an)</b> Construction de télécentres Matériel et dépenses courantes des espaces Gestion/nettoyage des espaces	30	20	5	5	5
<b>Augmentation des dépenses collectivités territoriales (M€/an)</b>	-	-	-	-	-
<b>Réduction des dépenses ménages (M€/an)</b> Consommation carburant réduite Fréquence d'achat VP réduite Besoins d'entretien/réparation/assurance VP réduits	130	90	20	20	10
<b>Surcoût total annuel (M€/an)</b>	-100	-70	-10	-20	-10

*Tableau 34 : Résultats généraux de coûts pour le scénario Télétravail Vol, dans chaque zone (chiffres arrondis).*

# 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 nos zones d'étude. Notre objectif est de quantifier cette baisse pour estimer les émissions CO<sub>2</sub> qui pourraient être évitées en conséquence.

## 4.1. Hypothèses pour la distribution des achats de grandes surfaces

Dans le cadre du scénario Potentiel Max, 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 sur la Vallée de la Seine. 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 (en logistique) lors du projet « Décarboner la mobilité en zones de moyenne densité » (Luciano 2017), le système de distribution proposé dans le cadre du scénario Potentiel Max ne serait pas rentable, donc ne se développerait pas sans incitation réglementaire ou fiscale. Nous avons donc décidé de ne pas associer de scénario Volontariste 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 Potentiel Max, basé sur un système de livraison collaborative entre voisins, a été proposé et évalué.

### 4.1.1. Etapes de calcul pour le scénario Potentiel Max « distribution par tournées » (PM Tournées)

Hypothèse : le système de distribution par tournées remplace les trajets pour aller faire des achats grandes surfaces mais pas les trajets pour faire des achats de proximité. De plus, il ne remplace que les trajets effectués en VP<sup>15</sup>.

Le calcul menant aux changements de comportements induits par le système de distribution proposé est composé des étapes suivantes (Figure 11) :

- la fréquentation des différentes grandes surfaces a été évaluée. En associant cette fréquentation à la fréquence des tournées, on obtient le nombre de trajets à remplacer par les tournées pour chaque grande surface.

---

<sup>15</sup> On suppose donc que les trajets en bus, train, vélo, etc, effectués en grandes surfaces sont toujours effectués (par exemple pour aller chercher les achats en click and collect ou à point relais). Si on avait supposé que ces trajets étaient également remplacés par des tournées, alors le résultat sur les émissions carbone aurait été légèrement supérieur au résultat affiché, étant donné qu'il aurait fallu un peu plus de camionnettes pour couvrir ces trajets.

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

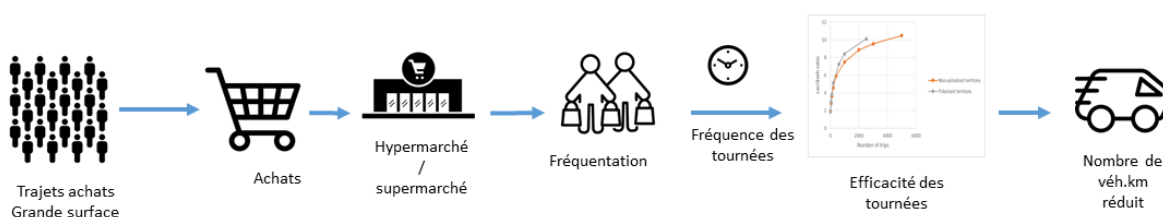


Figure 11 : Etapes de calcul pour déterminer le nombre de véh.km évités par le système de distribution proposé.

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

#### 4.1.1.1. Part du trafic, et fréquentation moyenne des supermarchés et hypermarchés

L'étude (CREDOC 2012) nous indique que **46 % des v.km sont faits vers des hypermarchés et 54 % le sont vers les supermarchés**, la distance moyenne parcourue vers les supermarchés et vers les hypermarchés étant supposée équivalente.

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 (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 35), 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**.

	Centre commerciaux	Hypermarchés	Supermarché
Surface (m <sup>2</sup> )	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

Tableau 35 : Hypothèses de fréquentation des hypermarchés et supermarchés, reconstruite par linéarité supposée entre la fréquentation et la surface des magasins.

#### 4.1.1.2. 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 la Vallée de la Seine pour le motif achats en grande surface, comme illustré sur le panneau gauche de la Figure 12.
- 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 m<sup>3</sup>.
  - 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 de la Figure 12).
  - 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 moyenniser 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.

Les résultats sont synthétisés sur la Figure 13, 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.

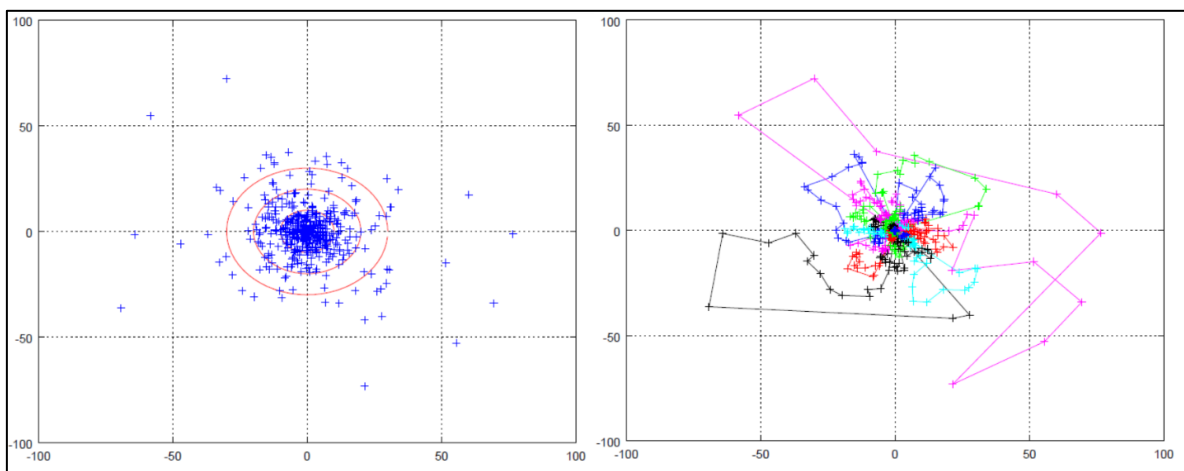


Figure 12 : Exemple de tirage aléatoire de 500 trajets en Vallée de la Seine (gauche), et les (34) tournées associées (droite). La grande surface est située au centre de la figure. Les points représentent les origines des trajets achats générés par la population. L'échelle est en km.

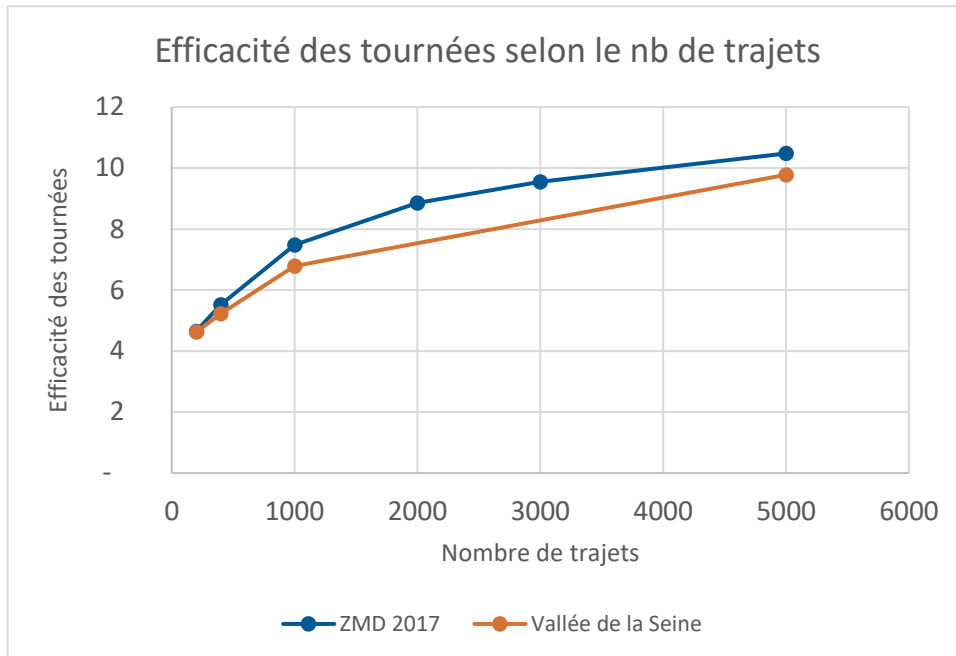


Figure 13 : Efficacité des tournées : Ratio v.km (classique)/v.km (tournées) en fonction du nombre de trajets. Une comparaison est faite entre l'efficacité sur la Vallée de la Seine et celle sur les ZMD du rapport de 2017. On remarque que l'efficacité sur les ZMD en 2017 est légèrement plus grande que sur la Vallée de la Seine. Cette différence est due à une plus grande dispersion des distances pour aller faire ses achats en grande surface en Vallée de la Seine.

#### 4.1.1.3. 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 en grandes surfaces pendant une période de 3 jours. On peut alors estimer l'efficacité globale du nouveau système de distribution,  $\eta$ , en utilisant l'équation suivante :

$$\eta = \frac{vkm_{st}}{vkm_{cla}} = \frac{f(NT_{hyp,3jr})^{-1} * vkm_{hyp} + f(NT_{sup,3jr})^{-1} * vkm_{sup}}{vkm_{cla}} \quad (7)$$

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

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,

- $\tau_{hyp} = \frac{vkm_{hyp}}{vkm_{cla}}$  : 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 13
- $NT_{hyp,3jr}$  : 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 :

$$NT_{hyp,3jr} = 3 * 1480 = 4440 \sim 5000 \text{ traj} \quad (8)$$

$$NT_{sup,3jr} = 3 * 360 = 1080 \sim 1000 \text{ traj} \quad (9)$$

$$\tau_{hyp} = 54\% \text{ v. km} \quad (10)$$

$$\tau_{sup} = 46\% \text{ v. km} \quad (11)$$

On a donc

$$\eta^{-1} = \frac{0,54}{9,8} + \frac{0,46}{6,8} = 0,12 = \frac{1}{8,1} \quad (12)$$

On obtient finalement une efficacité moyenne  $\eta$  de 12%. Dans le scénario PM Tournées, plus personne ne se déplace pour le motif « achats en grande surface » en voiture, d'où une réduction des v.km et des p.km VP du motif « achats en grande surface » de 100%. Mais les véhicules de livraison parcourent 12% des v.km initialement parcourus par ces voitures pour le motif « achats en grande surface ». D'autre part on suppose ici que les véhicules de livraison utilisés (des petits utilitaires neufs) ont les mêmes caractéristiques que le parc de VP moyen utilisé pour faire les courses. Ils émettent donc la même quantité de CO<sub>2</sub>/km (et de NO<sub>x</sub>, PM10, PM2.5).

Ainsi pour le calcul des impacts, effacer 100% des v.km « achats en grande surface » et ajouter 12% des v.km « achats en grande surface » pour les véhicules de livraison est équivalent à effacer 88% des v.km « achats en grande surface », qui est équivalent à effacer 88% des p.km VP « achats en grande surface ».

Pour simplifier les calculs on appliquera cette dernière hypothèse : on efface 88% des p.km VP « achats en grande surface ».

#### 4.1.2. Hypothèses pour le scénario Potentiel Max « livraison collaborative » (PM Collab)

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 en groupe de 2, l'un allant faire les courses et livrant, et l'autre se faisant livrer ses courses<sup>16</sup>.

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 2030 :

- 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 2016), on suppose ici que les plus de 65 ans représenteront 30 % de la population de plus de 20 ans (en âge de conduire), les 70 % restants ayant entre 20 et 65 ans.

On suppose de plus que le système de livraison collaborative ne remplace que les trajets effectués en VP<sup>17</sup>.

La part des distances VP pour le motif « achats grandes surfaces » qui est remplacée par la livraison collaborative,  $\%p.km_{liv}$  se calcule alors :

$$\%p.km_{liv} = 0,40 * 0,95 * 0,70 + 0,40 * 0,75 * 0,30 = 36\% \quad (13)$$

Le scénario PM Collab génère donc **une réduction de 36% des p.km VP** du motif « achats en grande surface ».

#### 4.1.1. Synthèse des hypothèses

	<b>Scénario Potentiel Max « distribution par tournées »</b>	<b>Scénario Potentiel Max « livraison collaborative » (Collab)</b>
Communautés concernées	Habitants de Vallée de la Seine	Habitants de Vallée de la Seine
Assiette (trajets concernés)	Au sein du motif « achats grandes surfaces » : 88 % des p.km	Au sein du motif « achats grandes surfaces » : 36 % des p.km
Effet sur la mobilité	Effacement des p.km	Effacement des p.km

*Tableau 36 : Synthèse des hypothèses sur les comportements de mobilité en présence des systèmes de distribution d'achats proposés*

<sup>16</sup> On pourrait aussi imaginer des groupes de ménages de taille plus grande : par exemple, une personne qui ramènerait les courses de deux ménages voisins en rentrant de ses propres courses. Dans ce cas, la part des achats livrés peut atteindre 66%.

<sup>17</sup> On suppose donc que les trajets en bus, train, vélo, etc, effectués en grandes surfaces ne sont pas remplacés par la livraison par un voisin. Si on avait supposé que ces trajets étaient également remplacés par des tournées, alors le résultat sur les émissions carbone aurait été légèrement supérieur au résultat affiché, étant donné qu'il aurait fallu que certains voisins se mettent à livrer en voiture alors qu'ils allaient jusqu'ici faire leurs courses sans voiture.

#### 4.1.2. Adaptation aux inputs PES

Pour simplifier les tableaux, on prendra dans la suite l'exemple d'un habitant du tissu [2-20]-polarisée du Havre. Les calculs sont menés de cette manière pour tous les tissus.

En effaçant respectivement 36% (PM Collab) et 88% (PM Tournées) des p.km VP du motif «achat en grandes surfaces », on obtient les distances parcourues suivantes, tous motifs confondus :

Scénario	P.km par personne par jour							
	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche	total
Référence	32,7	0,1	3,4	0,0	1,0	0,3	0,7	38,2
PM Collab	31,5	0,1	3,4	0,0	1,0	0,3	0,7	37,0
PM Tournées	29,8	0,1	3,4	0,0	1,0	0,3	0,7	35,3

*Tableau 37 : P.km par personne par jour par mode pour un habitant du tissu [2-20]-polarisée du Havre selon les scénarios. On voit que seule la mobilité en VP est affectée par les systèmes de livraison, ce qui correspond à notre hypothèse.*

Pour en déduire l'évolution des v.km VP tous motifs confondus il faut utiliser le taux d'occupation par motif. En effet le taux d'occupation des voitures sur le motif «achats en grande surface» est plus haut que le moyenne : 1,34 p.km/v.km contre 1,21 en moyenne, sur toute la Vallée de la Seine. Ainsi ces p.km évités pour le motif «achats en grande surface » représentent moins de voitures évitées que s'ils l'étaient pour un autre motif. On calcule ainsi un nouveau taux d'occupation tous motifs confondus,  $tx\_occ_{scén}$ , pour le scénario Volontariste et Potentiel Max.

L'expression générale du taux d'occupation est la suivante :

$$tx\_occ = \frac{pkm}{vkm} \quad (14)$$

On exprime alors le taux d'occupation tous motifs confondus dans le scénario (Volontariste ou Potentiel Max), par rapport au scénario Référence (indice *Réf*) :

$$tx\_occ_{scén} = \frac{pkm_{scén}}{vkm_{Réf} - vkm_{évit\acute{e}, livraison}} \quad (15)$$

$$tx\_occ_{scén} = \frac{pkm_{scén}}{\frac{pkm_{Réf}}{tx\_occ_{Réf}} - \frac{pkm_{Réf} - pkm_{scén}}{tx\_occ_{achat grande surface}}} \quad (16)$$

Ainsi, au Havre pour le tissu [2-20]-polarisée, le taux d'occupation est de 1,23 p.km/v.km dans le scénario Référence, 1,23 dans le scénario PM Collab et 1,22 dans le scénario PM tournées. On peut donc en déduire les v.km parcourus dans les différents scénarios :

Scénario	V.km	Variation par rapport à Réf
Référence	26,6	
PM Collab	25,7	-3,4%
PM Tournées	24,4	-8,3%

Tableau 38 : p.km et v.km par personne par jour par mode pour un habitant du tissu [2-20]-polarisée du Havre selon les scénarios.

## 4.2. Résultats

Le Tableau 39 résume les principaux résultats obtenus pour les deux scénarios (Potentiel Max) considérés pour la distribution des achats.

### 4.2.1. Résultats généraux

On obtient les résultats suivants en relatif par rapport au scénario Référence en 2030 :

	GC_IDF		Normandie		Calvados		Rouen		Havre	
	Collab	Tournées	Collab	Tournées	Collab	Tournées	Collab	Tournées	Collab	Tournées
Distances parcourues (p.km)	-2%	-4%	-3%	-8%	-3%	-8%	-4%	-9%	-3%	-8%
Trafic voiture (v.km)	-2%	-5%	-3%	-7%	-3%	-7%	-4%	-9%	-3%	-8%
CO <sub>2</sub> ACV	-2%	-5%	-3%	-7%	-3%	-7%	-3%	-8%	-3%	-7%

Tableau 39 : Résultats généraux des scénarios distribution des achats pour les 5 zones

On observe que le développement de la livraison des achats mène à une baisse des p.km de 2 à 3% dans le scénario Collab et de 4 à 8% dans le scénario Tournées. Cette baisse des distances parcourues entraîne une baisse des distances parcourues par les voitures (-2 à -4% en Collab, -5 à -9% en Tournées). Et donc une réduction des émissions de 2 à 3% en Collab et de 5 à 7% en Tournées.

### 4.2.2. Interprétation des résultats

Dans le scénario PM Tournées on observe une réduction des v.km de 7 à 9 % dans les agglomérations normandes (5% en grande couronne d'IDF). Pour mieux comprendre cette baisse intéressons-nous à la répartition des v.km sur l'EMD de Rouen.

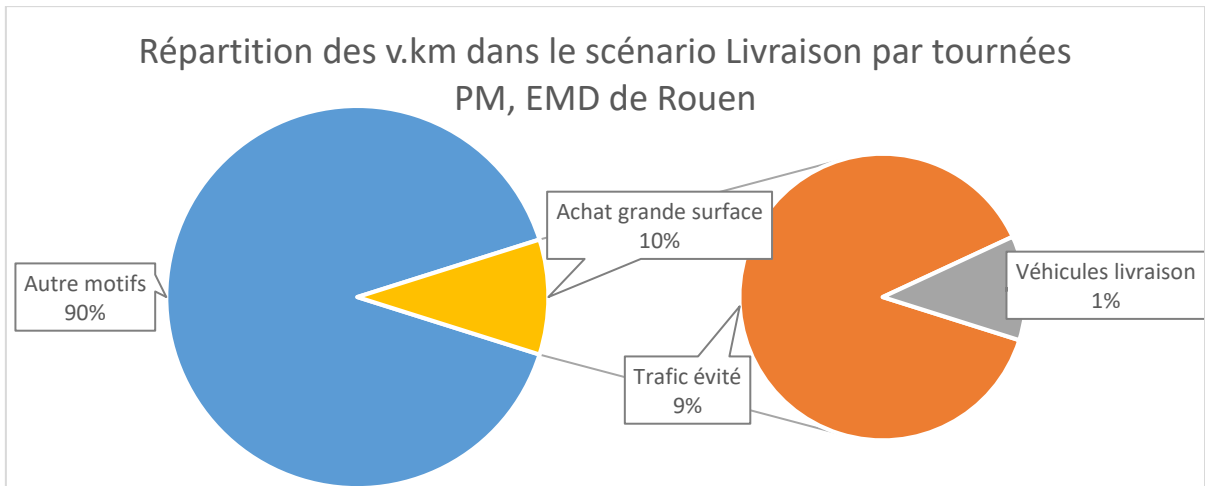
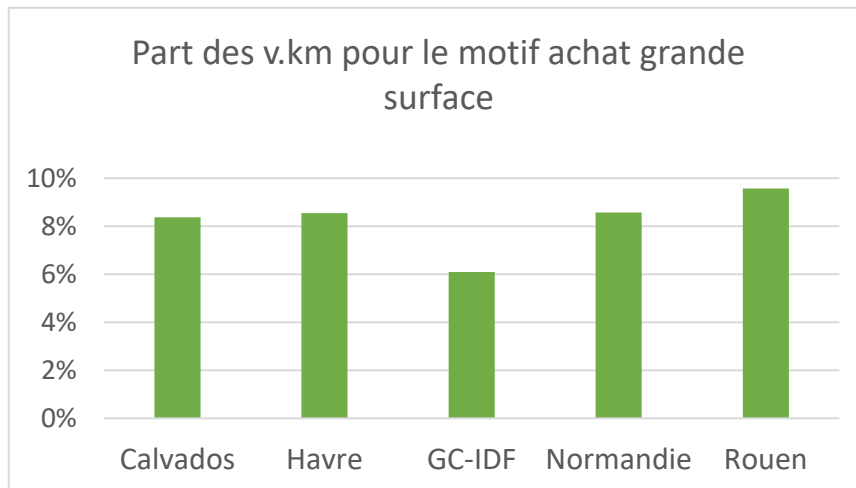


Figure 14 : Répartition des v.km dans le scénario PM Tournées sur l'EMD de Rouen

10% des v.km voitures sont faits pour le motif « Achats grande surface ». Dans ces 10%, 9% sont évités et 1% est effectué pour livrer les achats par tournées. D'où une réduction des v.km de 9%.

Tentons maintenant de mieux comprendre les différences de résultats entre les zones. Etant donné que l'assiette du domaine d'action « livraisons des achats » ne concerne que les déplacements en VP ayant pour motif « achats grande surface », le facteur déterminant va être la part des v.km faits pour le motif « achats grande surface ». Ainsi plus la part des v.km effectué pour le motif « achats grande surface » est grande sur la zone, plus la réduction de v.km du scénario PM Tournées sur la zone devrait être grande. C'est bien la dynamique que l'on observe (voir Figure 12).



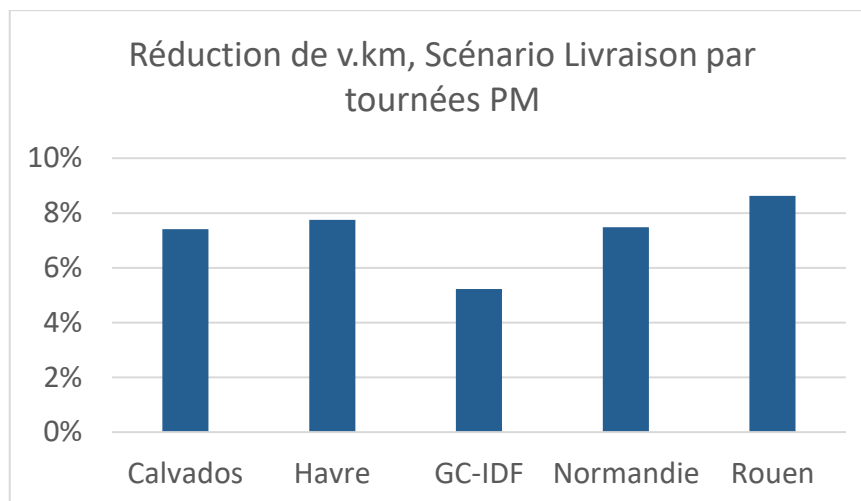


Figure 15 : Part des v.km pour le motif grande surface et réduction de v.km dans le scénario PM Tournées pour chaque zone.

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.

#### 4.2.3. Résultats sur la consommation d'énergie et les émissions

Le modèle PES nous fournit les résultats sur la consommation d'énergie et les émissions suivants, en relatif par rapport au scénario Référence 2030 :

	GC_IDF		Normandie		Calvados		Rouen		Havre	
	Collab	Tournées	Collab	Tournées	Collab	Tournées	Collab	Tournées	Collab	Tournées
Trafic voiture : v.km	-2%	-5%	-3%	-7%	-3%	-7%	-4%	-9%	-3%	-8%
Consommation énergétique	-2%	-4%	-3%	-7%	-3%	-7%	-3%	-8%	-3%	-7%
Consommation carburant fossile	-2%	-5%	-3%	-7%	-3%	-7%	-3%	-8%	-3%	-7%



CO <sub>2</sub> à l'usage	-2%	-5%	-3%	-7%	-3%	-7%	-3%	-8%	-3%	-7%
CO <sub>2</sub> ACV (incluant l'usage et la fabrication des véhicules)	-2%	-5%	-3%	-7%	-3%	-7%	-3%	-8%	-3%	-7%
NO <sub>x</sub>	-2%	-5%	-3%	-7%	-3%	-7%	-3%	-8%	-3%	-7%
PM <sub>10</sub>	-2%	-5%	-3%	-7%	-3%	-7%	-3%	-8%	-3%	-7%
PM <sub>2.5</sub>	-2%	-5%	-3%	-7%	-3%	-7%	-3%	-8%	-3%	-7%

Tableau 40 : Récapitulatif des résultats sur la consommation d'énergie et sur les émissions pour nos 5 zones d'études

On observe que les réductions de consommation d'énergie et d'émissions sont proches de la réduction du trafic voiture : entre 2 et 3% de baisse de consommation de carburant fossile, d'émissions de CO<sub>2</sub>, de NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub> pour le scénario PM Collab et entre 5 et 8% de baisse de ces mêmes impacts pour le scénario PM Tournées, par rapport au scénario Référence. Cela n'est pas surprenant puisque le mode voiture génère la majeure partie de ces impacts.

#### 4.2.4. Résultats sur le temps passé à se déplacer

Pour évaluer l'impact sur le temps passé à se déplacer, on repart du nombre de p.km parcourus par mode selon le scénario (on garde ici l'exemple d'un habitant du tissu [2-20]-polarisée du Havre, les calculs étant effectués de manière similaire pour les autres tissus) :

Scénario	P.km par personne par jour							
	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche	total
Référence	32,7	0,1	3,4	0,0	1,0	0,3	0,7	38,2
PM Collab	31,5	0,1	3,4	0,0	1,0	0,3	0,7	37,0
PM Tournées	29,8	0,1	3,4	0,0	1,0	0,3	0,7	35,3

Tableau 41 : P.km par personne par jour par mode pour un habitant du tissu [2-20]-polarisée du Havre selon les scénarios.

Pour le scénario PM Tournées, on avait conservé 12% des p.km du motif « achats grande surface » dus aux livraisons en camionnette. Or ces p.km sont des déplacements de livraison qui rentre dans le fret et non dans la mobilité quotidienne. Il ne faut pas les prendre en compte pour le calcul du temps passé à se déplacer. En corrigeant on obtient :

Scénario	P.km par personne par jour							
	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche	total
Référence	32,7	0,1	3,4	0,0	1,0	0,3	0,7	38,2
PM Collab	31,5	0,1	3,4	0,0	1,0	0,3	0,7	37,0

PM									
Tournées	29,4	0,1	3,4	0,0	1,0	0,3	0,7	35,3	

Tableau 42 : P.km par personne par jour par mode pour un habitant du tissu [2-20]-polarisée du Havre en excluant les p.km de livraison en camionnettes pour le scénario PM Tournées

On divise ces p.km par la vitesse moyenne observée par mode sur notre tissu pour en déduire le temps passé à se déplacer par un habitant du tissu chaque jour.

Scénario	Heures de transport par personne par jour							
	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche	total
Référence	0,82	0,00	0,17	0,00	0,01	0,02	0,18	1,21
PM Collab	0,79	0,00	0,17	0,00	0,01	0,02	0,18	1,18
PM Tournées	0,73	0,00	0,17	0,00	0,01	0,02	0,18	1,13

Tableau 43 : Heures de transport par personne par jour par mode pour un habitant du tissu [2-20]-polarisée du Havre

Puis en agrégeant les tissus pour revenir à nos 5 zones, on a les résultats suivants :

	GC_IDF		Normandie		Calvados		Rouen		Havre	
	Collab	Tournées	Collab	Tournées	Collab	Tournées	Collab	Tournées	Collab	Tournées
Temps passé à se déplacer (h par personne)	1,62	1,59	1,14	1,10	1,18	1,14	1,14	1,09	1,13	1,10
Temps passé à se déplacer (% diff / Réf)	-2%	-3%	-3%	-6%	-3%	-6%	-3%	-7%	-3%	-6%

Tableau 44 : Temps passé à se déplacer par jour pour les 5 zones selon les scénarios Livraison

On observe une réduction du temps passé à se déplacer entre -2% et -3% dans le scénario PM Collab (soit environ 2 minutes de moins par jour) et -3% et -7% dans le scénario PM Tournées (soit environ 3 à 5 minutes de moins par jour).

## 4.2.5. Bilan économique

### 4.2.5.1. 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 chacune des zones. 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, illustrée pour la zone d'étude de l'EMD du Havre :

- 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 des produits 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 faits en voiture pour le motif « achats en grande surface » (hors achats loisirs « lèche-vitrine ») mesuré à 230 000 trajets dans l'EMD Havre (correspondant à 19M achats/an sur la zone). Ainsi, on suppose que 230 000 trajets en VP 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 consommateurs. Ces trajets font 6 km en moyenne dans l'EMD Havre.
  - 60% des colis sont livrés directement à domicile, le reste est livré dans des points relais. C'est équivalent à supposer que dans 40 % des cas, les consommateurs ne sont pas disponibles chez eux au moment de la livraison. La distribution des colis vers les points relais est négligée dans ces calculs. Cela peut se justifier par le fait qu'elle est beaucoup plus massifiée (d'au moins 2 ordres de grandeur) par rapport à la distribution diffuse auprès de chaque domicile, et peut donc se faire en très peu de trajets avec des véhicules plus lourds type camions. Les déplacements des ménages vers les points relais sont supposés faits à pieds ou en vélo cargo et sont donc supposés décarbonés.
  - Selon le modèle de mobilité de type Monte Carlo que nous avons établi, le système de tournée réduit en moyenne de 88 % les kilomètres parcourus des trajets aller-retour.
  - Donc chaque tournée parcourt en moyenne  $15 \times 2 \times 6 \times (1 - 0,88) = 21,6$  km.
  - Les véhicules de livraison roulent à une vitesse moyenne égale à celle des voitures dans la zone, soit 34 km/h dans l'EMD du Havre ; chaque livraison prend 3 minutes (on suppose des livraisons rapides car une personne est toujours présente pour les réceptionner au domicile), et le chargement des 15 paniers prend 5 minutes.
  - Donc chaque tournée dure 5 min + 15 livraisons \* 3 min + 21,6 km / 34 km/h \* 60 min/h = 88 min, soit 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  $3 \times 4,8 \times 15 = 215$  livraisons sont effectuées tous les 3 jours ouvrés par véhicule.
  - Pour couvrir la demande en livraison évoquée ci-dessus (230 000 tous les 3 jours), il faut donc  $230\ 000 / 215 = 1\ 070$  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 21,6 km chacune, pendant 250 jours ouvrés) est de  $250 * 4,8 * 21,6 = 25\ 800$  km environ.
- La consommation unitaire moyenne de la flotte de véhicules de livraison en 2030 est supposée être de 4,6 L/100 km, tout comme la consommation unitaire du parc de VP à 2030.
- La consommation agrégée annuelle (1 070 véhicules roulant chacun 25 800 km, à 4,6 L/100 km) est donc de  $1070 * 25\ 800 * 4,6 / 100 = 1,3$  ML de carburant.
- Le prix du carburant, comme pour les autres domaines d'action, est de 0,97 €/L (HT).
- Chaque tournée est effectuée par une personne. Le nombre d'emplois à temps plein (ETP) requis pour assurer l'ensemble des tournées est déterminé ainsi :
  - 1 070 véhicules doivent être conduits chaque jour ouvré (250 jours/an), ce qui requiert environ 270 000 millions de personnes.jour
  - Chaque ETP travaille 220 jours par an. Donc  $270\ 000 / 220 = 1\ 200$  ETP environ sont requis pour assurer les tournées dans l'EMD du Havre.
  - Chaque livreur a un salaire légèrement supérieur au SMIC (hypothèse de 23 000€/an chargé).
- Le volume de course par jour ouvré dans l'EMD Havre est estimé ainsi :
  - On suppose que les personnes qui se déplacent en VP pour leurs achats en grandes surfaces remplissent l'équivalent d'un caddie de course, soit 180L. Ces achats représentent 19 millions de déplacements aller-retour en VP par an.
  - Les personnes qui se déplacent par d'autres modes remplissent l'équivalent en volume d'un grand sac de courses, soit 25L. Ces achats représentent 6 millions de déplacements aller-retour par d'autres modes que la VP chaque année.
  - On obtient  $((19\text{M achats/an} * 180\text{ L} + 6\text{M achats/an} * 25\text{ L}) / 1000\text{ L/m}^3) / 250\text{ jr ouvrés/an} = 14\ 400\text{ m}^3/\text{jour ouvré}$
- Calcul de la rémunération du gardiennage des achats dans les points relais :
  - Au total 25M de paniers sont achetés par an dans la zone. Parmi ceux-là, 40% sont directement distribués dans les points relais ou dans les consignes.
  - De ces 40%, 75% vont vers les points relais, le reste (25%) est placé dans les consignes.
  - Ce sont ainsi  $25\text{M} * 0,40 * 0,75 = 7,5\text{M}$  colis/an qui sont à stocker par les points relais
  - Le gardiennage des achats par les voisins ou les points-relais est supposé être rémunéré par une commission de 1,50 €/colis, soit au total sur l'année une rémunération de  $7,5\text{M colis/an} * 1,5\text{ €/colis} = 11\text{ M€/an}$ .
  - A titre indicatif (cela n'entre pas en compte dans le bilan économique), si on suppose un point-relais pour 1000 habitants (soit  $504\ 700 / 1000 = 505$  points relais pour l'EMD du Havre), chaque point-relais gardienne en moyenne  $7,5\text{M colis/an} / 505\text{ points-relais} = 19\ 800\text{ colis/an/point-relais}$ , générant un revenu annuel supplémentaire  $19\ 800 * 1,5\text{€} = 29\ 700\text{€/an}$  par point-relais.
- 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. Le coût de stockage des colis dans les consignes a été estimé comme suit :
  - Parmi le nombre total de course par jour ouvré, 40% sont emmenés vers les points relais ou les consignes. De ces 40%, 25% sont mis en consignes. Soit  $14\ 400\text{ m}^3/\text{jour ouvré} * 0,40 * (1 - 0,75) = 1400\text{ m}^3/\text{jour ouvré}$  à stocker en consigne. On suppose que les colis sont récupérés dans les 24 h par les ménages,

ce qui évite une accumulation des colis et donc un espace de stockage nécessaire supplémentaire.

- Il a été supposé qu'un bloc de consignes revient à 8 200€ HT/m<sup>3</sup>, en se basant sur les prix et volumes constatés pour les consignes de type Amazon locker. Ce coût est potentiellement amené à décroître avec le développement de l'usage de ces consignes.
- Enfin, on suppose que les blocs de consignes ont une durée de vie de 50 ans.
- Pour conserver les produits frais, les points relais s'équipent d'armoires de réfrigération et de congélation, et certaines consignes peuvent également en être équipées. Nous avons estimé le coût induit par ces besoins de stocker le frais de la manière suivante :
  - La part de frais dans les courses alimentaires a été définie comme suit :
  - Les consommations d'aliments par grande catégorie en kg/personne/an sont issues de (AgriMer 2012), voir Tableau 45.
  - Parmi les fruits et légumes, 20% sont considérés comme ayant besoin d'être conservés en réfrigérateur.
  - Cette part s'élève à la moitié pour les produits laitiers et à la totalité pour les viandes et poissons.

<b>Courses alimentaires</b>		
	kg/personne/an	Part de frais
Fruits et légumes	186,72	20%
Céréales, pdt	152,2	-
Lait, produits laitiers	132,22	50%
Viande	90,19	100%
Poisson	23,04	100%
<b>Total</b>	<b>584,37</b>	<b>37%</b>

*Tableau 45 : Part de frais dans les courses alimentaires*

- Nous considérons enfin que 15% du total du volume (en m<sup>3</sup>) d'achats sont des produits non-alimentaires. La part de frais s'élève donc à 30%.
- Ainsi, ce sont 14 400 m<sup>3</sup>/jour ouvré\*0,40\*0,30 = 1700 m<sup>3</sup>/jour ouvré qui sont à stocker dans des espaces réfrigérés. On suppose que les colis sont récupérés dans les 24 h par les ménages, ce qui évite une accumulation des colis et donc un espace de stockage nécessaire supplémentaire.
- La moyenne agrégée des prix pour les congélateurs et les réfrigérateurs a été estimée à environ 2800 €TTC/m<sup>3</sup>, sur la base de prix constatés sur le marché en 2020, et on suppose leur durée de vie moyenne de 10 ans.
- 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. Le coût de ce service est estimé ainsi :
  - Les employés de la centrale sont supposés être payés à un salaire légèrement supérieur au SMIC (hypothèse de 23 000 €/an chargé).
  - Le nombre d'ETP permettant d'assurer un tel service est calculé ainsi :
    - On suppose que 5 % de la population de chaque zone n'a pas accès à Internet d'ici 2030.

- Cela représente chaque jour ouvré 25M (achats/an) /250 (jour ouvré/an)\* 0,05 = 5 000 achats environ : c'est le nombre de commandes à gérer journalièrement par le service téléphonique.
- On suppose que le temps de prendre une commande avec un client est de 8 min. Ainsi, chaque jour.personne permet de traiter  $7 \text{ (h/jour.personne)} * 60 \text{ (min/h)} / 8 \text{ (min/commande)} = 53$  commandes, la journée de travail étant supposée être de 7 h.
- Par conséquent, le nombre de jour.personne requis annuellement pour traiter les commandes est de  $5\,000/53*250 = 24\,000$  environ, ce qui est équivalent à 108 ETP travaillant 220 jours/an.
- Le moindre usage des VP et la moindre consommation de carburant, par les individus (qu'ils se déplacent en tant que membre d'un ménage ou en tant que professionnels) sont comptabilisés comme pour les scénarios Covoiturage (voir section 0), avec une valeur de réduction du trafic VP local 2030 obtenue par la simulation de 7,7 % 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).

Tous les frais liés à ce système de distribution des achats sont supposés à la charge des ménages, par répercussion dans les prix des services proposés (livraisons, gardiennage, stockage, etc). Par conséquent aucune dépense n'est engagée par l'Etat.

Les résultats du calcul sont détaillés dans le Tableau 46.

**Le scénario « distribution par tournées » induit des augmentations de dépenses qui se compensent par la réduction des dépenses qu'il permet : ce scénario appliqué à la EMD Havre correspond à une économie de 5 M€/an par rapport au scénario *Référence*. Rapporté au niveau des ménages, ceci correspond à une économie de 23€/an, donc à un équilibre entre surcoût et économie.**

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). 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 5 M€ contre une réduction des dépenses annuelles de 53 M€).

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.

Élément différent entre S' et Sref	Type de modification	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€)	Surcoût à l'année S'/Sref (M€)	Hypothèse d'allocation des coûts
Bâtiments (grande surface dans Sref et entrepôt drive dans S')	Modif	2 000 000	€/magasin	8 819	magasin	14 698	50	294	294	-	Ménages
Ressources humaines préparation et finalisation de l'achat	Modif	0	€/pers/an	0	pers	-	1	-	-	-	Ménages
Equipements logistiques	Modif	0	€/magasin	8 819	magasin	-	50	-	-	-	Ménages
Flotte de véhicules de livraison	Création	25 000	€/veh	1 071	véh	22	6	4	-	4	Ménages
Carburant utilisé par la livraison	Création	1,50	€/L	1,4	ML	1	1	1	-	1	Ménages
Ressources humaines pour la livraison	Création	22 981	€/pers/an	1 217	pers	28	1	28	-	28	Ménages
Consignes de dépôt/retrait des achats	Création	9 889	€/m3 consignes	1 441	m3 de consigne	12	50	0	-	0	Ménages
Ressources humaines gardiennage des achats	Création	1,50	€/panier	7	M achats/an	11	1	11	-	11	Ménages
Equipements frigorifiques /congélation pour le gardiennage des achats	Création	2 817	€/m3 unité frigorifique	1 730	m3 unité frigorifique	4	10	0	-	0	Ménages
Ressources humaines pour aide à la commande sans Internet	Création	22 981	€/pers/an	108	pers	2	1	2	-	2	Ménages
Usage de la voiture - achat véhicule	Modif	0,17	€/vkm	2,4	Gvkm	345	1	345	378	- 33	Ménages
Usage de la voiture - achat carburant	Modif	0,07	€/vkm	2,4	Gvkm	106	1	106	116	- 10	Ménages
Usage de la voiture - entretien et réparation	Modif	0,05	€/vkm	2,4	Gvkm	99	1	99	108	- 10	Ménages
						Total annuel (M€)		891	897		
						Surcoût total annuel (M€)		- 5			

Tableau 46 : Les différents postes de dépenses du scénario « distribution par tournées » pour l'EMD du Havre. 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 7.4.5.2. 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.

Le tableau suivant fournit l'ensemble des données d'entrée pour les calculs du scénario distribution par tournées PM, pour les différentes zones :

	Grande couronne IdF	AU Normandie	EMD Rouen	AU Calvados	EMD Havre
Trafic local évité tous motifs	5,2%	7,5%	8,6%	7%	7,7%
Nb de livraisons à effectuer Zone/jr ouvré	570 000	600 000	120 000	140 000	77 000
Distance moyenne trajet achat grande surface (km)	7,4	7,4	5,6	6,3	6
Nb traj Zone GS/an en VP	142 549 489	150 000 000	30 000 000	35 000 000	19 000 000
Nb traj Zone GS/an autres modes	32 000 000	37 000 000	8 500 000	8 000 000	5 800 000

Tableau 47 : Hypothèses pour le scénario distribution par tournées PM, différenciées par zone (chiffres arrondis).

Et voici les résultats correspondants :

Distribution par tournées	Grande couronne IdF	AU Normandie	EMD Rouen	AU Calvados	EMD Havre
<b>Augmentation des dépenses ménages (M€/an)</b>					
Véhicules de livraison et carburant					
Ressources humaines livraison					
Transition grandes surfaces -> entrepôts drives					
Consignes automatisées	370	400	70	90	50
Ressources humaines gardiennage					
Equipements frigorifiques					
Centres d'appel commandes sans internet					
<b>Augmentation des dépenses collectivités territoriales (M€/an)</b>	-	-	-	-	-
<b>Réduction des dépenses ménages (M€/an)</b>					
Consommation carburant réduite					
Fréquence d'achat VP réduite	390	380	80	90	50
Besoins d'entretien/réparation/assurance VP réduits					
<b>Surcoût total annuel (M€/an)</b>	-10	10	-10	-10	-10

Tableau 48 : Résultats généraux de coûts pour le scénario Distribution par tournées PM, dans chaque zone (chiffres arrondis).



#### 4.2.5.2. Scénario « livraison collaborative des achats »

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 chaque zone. Les calculs sont ici illustrés pour l'EMD du Havre.

- 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. Le coût de ce service est estimé ainsi :
  - Les employés sont supposés être rémunérés légèrement au dessus du SMIC (23 k€/an chargé).
  - Leur nombre pour préparer les achats est déterminé ainsi :
    - Seuls les achats effectués en VP sont couverts par le nouveau service de livraison collaborative, soit 230 000 achats pour 3 jours ouvrés.
    - 36 % des achats sont livrés par un voisin, ce qui représente  $230\,000/3*0,36 = 28\,000$  achats par jour ouvré.
    - Le temps de préparation du panier moyen est supposé être de 30 minutes (LSA 2017), si bien qu'un employé peut préparer 7 (h/jour.homme) / 0,5 (h/panier) = 14 paniers par jour travaillé.
    - Donc  $28\,000$  paniers / 14 paniers/jour.homme = 2 000 jour.hommes sont requis pour préparer les paniers, soit environ  $2\,000*250/220 = 2\,250$  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 28 000 environ. Ainsi, annuellement (250 jours ouvrés), cela représente 7 millions de livraisons.
- Le moindre usage des VP et la moindre consommation de carburant, par les individus (qu'ils se déplacent en tant que membre d'un ménage ou en tant que professionnels) sont comptabilisés comme pour les scénarios Covoiturage (voir section 0), avec une valeur de réduction du trafic local 2030 obtenue par la simulation de 3,2 %.
- La réduction de l'entretien de la voirie induite par le moindre trafic VP est considérée comme négligeable dans cette étude (Baaj 2012).

Tous les frais liés à ce système de livraison des achats sont supposés à la charge des ménages, par répercussion dans les prix des services proposés (préparation des achats et livraisons par les voisins). Par conséquent aucune dépense n'est engagée par l'Etat.

Le Tableau 49 fournit les résultats de ce bilan économique pour l'EMD du Havre. **Le système de livraison collaborative représente un surcoût annuel pour l'EMD du Havre de 43 M€/an par rapport au scénario *Référence*. Pour chaque ménage, la dépense supplémentaire est de l'ordre de 183 € par an.**

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.

Élément différent entre S' et Sref	Type de modification	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€)	Surcoût à l'année S'/Sref (M€)	Hypothèse d'allocation des coûts
Ressources humaines préparation et finalisation de l'achat	Création	22 981	€/pers/an	2 246	pers	52	1	52	-	52	Ménages
Ressources humaines pour la livraison	Création	3	€/achat livré	7	M achats livrés	21	1	21	-	21	Ménages
Usage de la voiture - achat véhicule	Modif	0,17	€/vkm	3	Gvkm	366	1	366	378	- 12	Ménages
Usage de la voiture - achat carburant	Modif	0,07	€/vkm	3	Gvkm	112	1	112	116	- 4	Ménages
Usage de la voiture - entretien et réparation	Modif	0,05	€/vkm	3	Gvkm	105	1	105	108	- 3	Ménages
						Total annuel (M€)		656	603		
						Surcoût total annuel (M€)		53			

Tableau 49 : Les différents postes de dépenses du scénario « Livraison collaborative des achats » pour l'EMD du Havre. 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 7.4.5.2. 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.

Les hypothèses pour chaque zones sont détaillées dans le tableau suivant :

	Grande couronne IdF	AU Normandie	EMD Rouen	AU Calvados	EMD Havre
Trafic local évité tous motifs	2,2%	3%	3,5%	3%	3,2%
Nb de livraisons à effectuer Zone/jr ouvré	570 000	600 000	120 000	140 000	77 000
Nb traj collaboratif	205 000	216 000	43 000	50 000	28 000

*Tableau 50 : Hypothèses livraison collaborative des achats PM, différenciées pour chaque zone (chiffres arrondis)*

Et les résultats correspondant sont fournis ci-dessous :

Livraison collaborative des achats	Grande couronne IdF	AU Normandie	EMD Rouen	AU Calvados	EMD Havre
<b>Augmentation des dépenses ménages (M€/an)</b> Ressources humaines préparation et finalisation de l'achat Ressources humaines pour la livraison	540	570	110	130	70
<b>Augmentation des dépenses collectivités territoriales (M€/an)</b>	-	-	-	-	-
<b>Réduction des dépenses ménages (M€/an)</b> Consommation carburant réduite Fréquence d'achat VP réduite Besoins d'entretien/réparation/assurance VP réduits	140	140	30	30	20
<b>Surcoût total annuel (M€/an)</b>	400	430	80	100	50

*Tableau 51 : Résultats généraux de coûts pour le scénario Livraison collaborative PM, dans chaque zone (chiffres arrondis).*

# 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 ses différents impacts. Dans ce chapitre les reports modaux sont supposés être effectués vers le mode vélo.

## 5.1. Scénario Potentiel Max

### 5.1.1. Hypothèse de report modal

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 se faisait au prorata des parts modales observées au sein des autres modes, à l’exception de la marche dont la part modale reste stable. Ainsi par exemple, si la part modale du vélo évolue de 0 à 9 % de 2020 à 2030 et qu’au départ le partage modale était de 80 % en VP, 10 % en train et 10 % en marche en 2020, alors les parts modales seront en 2030 de :

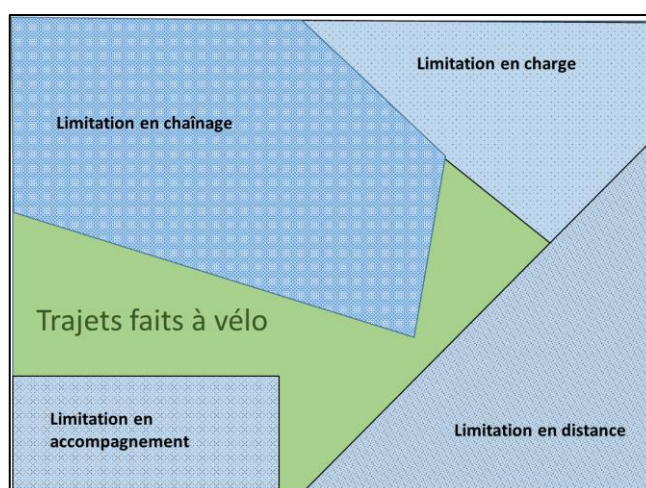
	Vélo	VP	Train	Marche
Fictif 2020 <sup>18</sup>	0 %	80 %	10 %	10 %
2030	9 %	72 %	9 %	10 %

Tableau 52 : Exemple fictif du mécanisme de report modal vers le vélo

Ainsi le Vélo n’a pas pris à la Marche, mais à la VP et au Train, au prorata de leur usage.

### 5.1.2. Limites d’usage du vélo

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 16).



<sup>18</sup> 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 16 : Schématisation de l'ensemble des trajets de Vallée de la Seine, et des limites excluant certains de ces trajets de l'usage du vélo (dans le cadre du scénario Potentiel Max). Les trajets qui ne sont exclus par aucune des limites sont réputés pouvoir se faire à vélo (zone verte restante).

### 5.1.2.1. Distances

Le système vélo en place à l'horizon 2030 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 Potentiel Max, le temps maximum passé à vélo par déplacement 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 à minima un VAE.

### 5.1.2.2. Charge

En termes de transport de charges (pour les achats), nous supposons que 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 carrioles peuvent transporter des volumes équivalents à un caddie de supermarché. Toujours selon nos hypothèses, les volumes dépassant celui d'un caddie ne peuvent pas être transportés à vélo.

Nous ne disposons pas d'informations, dans les données des enquêtes de nos périmètres, sur le volume de biens transporté. Nous nous basons donc sur les données de l'ENTD 2008 (CGDD 2008) pour établir les résultats intermédiaires du Tableau 53, à partir de nos hypothèses de transport de charge énoncées, concernant la part des trajets pouvant être faits à vélo si on ne tient compte que de la charge. Pour simplifier, on fait l'approximation que la part des trajets est égale à la part des p.km<sup>19</sup>.

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

Tableau 53 : Part des p.km faisables en vélo selon le critère de charge.

Lecture : 79 % des p.km 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).

### 5.1.2.3. 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

<sup>19</sup> Cette hypothèse simplificatrice est équivalente à supposer que le volume de charge transportée ne dépend statistiquement pas de la distance parcourue.

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 Potentiel Max suppose que :

- Pour les trajets inférieurs à 7 km, les trajets avec un passager peuvent être faits en vélo-cargo. On suppose que les trajets avec deux passagers ou plus (10 % des p.km) ne peuvent pas être faits en vélo. Cela revient à faire l'hypothèse conservatrice que les passagers ne savent pas faire de vélo seuls<sup>20</sup>.
- Pour les trajets supérieurs à 7 km, on suppose que tout trajet fait à 2 ou plus n'est pas fait en vélo.

Les données sur le nombre de passagers par véhicule ne sont pas dans notre exploitation standard des enquêtes normandes. Par manque de temps, nous nous reposons donc sur les chiffres de l'exploitation de l'ENTD 2008 dans les zones de moyenne densité. Cependant le nombre de passagers par véhicule est bien présent dans notre exploitation standard de l'EGT 2010 d'Ile-de-France et après vérification, on retrouve bien les mêmes chiffres que sur l'ENTD : 10% des p.km faits avec deux passagers ou plus et 27% des p.km faits avec un passager ou plus.

Distance	Part des p.km faisables en vélo selon le critère nombre de personnes transporté
< 7km	90%
7 – 20 km	73%

*Tableau 54 : Hypothèse sur la part des p.km faisables en vélo par classe de distance selon le critère de transport de passager(s).*

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

Le scénario Potentiel Max 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 se baser sur la mobilité de 2008 a donc des limites notamment sur les trajets d'accompagnement, où elle est conservatrice (elle minimise le Potentiel du vélo).

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).

#### *5.1.2.4. Intégration des hypothèses de charge, nombre de personnes transportables*

En faisant l'hypothèse que les variables motifs et nombre de personnes transportées sont indépendantes, on peut en déduire les hypothèses combinées suivantes pour le scénario Potentiel Max, en part modale (%p.km) pour le vélo/marche :

---

<sup>20</sup> 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 %. L'hypothèse retenue est donc bien conservatrice (minimisatrice des résultats) vis-à-vis de ce facteur.

Distance	Achats proximité	Achats grande surface	Autres motifs
< 7km	0,95*0,90 = 86 %	0,79*0,90 = 71 %	90%
7 – 20 km	0,91*0,73 = 66%	0,49*0,73 = 36%	73%
>20 km	0%	0%	0%

Tableau 55 : Part des p.km faisables en vélo/marche selon le motif et la classe de distance, en tenant compte des critères de charge et de transport de passager(s).

### 5.1.2.5. Chaînage<sup>21</sup>

Nous avons aussi ajouté une contrainte sur le chaînage : l'hypothèse a été prise que les p.km faisant partie d'une boucle de chaînage de plus de 40 km ne seront pas faits à vélo. 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 pour chaque tissu de Vallée de la Seine. Elle varie entre 7 et 22% des p.km selon les tissus.

Tissu	Part des p.km de déplacements < 20 km ne faisant pas partie d'une boucle de chaînage > 40 km
[200-2000[-C-pole	93%
[100-200[-B-pole	90%
...	...
[20-100[-polarisee	79%
<2k-R-polarisee	78%

Tableau 56 : Part des p.km de trajets <20 km ne faisant pas partie de boucle de chaînage trop longue

### 5.1.3. Calculs du report modal

A partir du Tableau 55 et du Tableau 56, en faisant l'hypothèse de l'indépendance des variables motif, nombre de personnes transportées et chaînage, et en agrégeant les résultats sur les motifs, on en déduit :

Tissu	Distance	Part des p.km vélo/marche
[200-2000[-C-pole	< 7km	84%
[200-2000[-C-pole	7 – 20 km	65%
[200-2000[-C-pole	>20 km	0%
...	...	...
<2k-R-polarisee	< 7km	70%
<2k-R-polarisee	7 – 20 km	55%
<2k-R-polarisee	>20 km	0%

<sup>21</sup> 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).



*Tableau 57: Part des p.km faits en vélo/marche par tissu*

Dans la suite, la plus petite unité géographique à laquelle nos paramètres de calcul seront différenciés sera le tissu d'une zone. Afin de simplifier les tableaux, détaillons les calculs pour le tissu *Agglomération Paris-B-pole-grande-couronne*, qui appartient à la zone grande couronne d'Ile-de-France, et est composé de la banlieue de l'unité urbaine parisienne en grande couronne. Les calculs pour les autres tissus sont similaires.

Sur le tissu *Agglomération Paris-B-pole-grande-couronne*, nos hypothèses sur la part des p.km faits à vélo/marche sont les suivantes :

Distance	Vélo/marche
0-7	75%
7-20	58%
>20	0%

*Tableau 58 : Part des p.km faits en vélo/marche dans le tissu Paris-B-pole-grande-couronne dans le scénario Potentiel Max*

En notant « pm\_nb\_depl » la part modale en nombre de déplacements et « pm\_pkm » la part modale en p.km, on observe les parts modales suivantes sur ce tissu (Paris-B-pole-grande-couronne) dans le scénario Référence :

Distance	Variable	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche
0-7	pm_nb_depl	48%	1%	5%	1%	1%	2%	43%
0-7	pm_pkm	71%	1%	8%	1%	2%	1%	15%
7-20	pm_nb_depl	75%	2%	4%	1%	17%	1%	0%
7-20	pm_pkm	72%	2%	4%	1%	20%	1%	0%
>20	pm_nb_depl	45%	2%	2%	0%	51%	0%	0%
>20	pm_pkm	43%	2%	2%	0%	52%	0%	0%

*Tableau 59 : Parts modales en nombre de déplacements et en p.km pour le tissu Agglomération Paris-B-pole-grande-couronne dans le scénario Référence*

A partir du Tableau 58 et du Tableau 59 et en faisant l'hypothèse que le report vers le système vélo se fait depuis tous les modes sauf la marche, on obtient les nouvelles parts modales suivantes pour le vélo (la marche restant inchangée par hypothèse) :

Distance	Variable	new_vélo	marche (inchangé)
0-7	pm_nb_depl	32%	43%
0-7	pm_pkm	60%	15%
7-20	pm_nb_depl	58%	0%
7-20	pm_pkm	58%	0%
>20	pm_nb_depl	0%	0%
>20	pm_pkm	0%	0%

*Tableau 60 : Nouvelles parts modales pour le vélo et la marche. Le mode marche est inchangé.*

Finalement en reportant les déplacements de chacun des modes (hors marche) au prorata de son usage vers le vélo (en utilisant la méthode décrite en I.A) on obtient les partages modaux suivants :

Distance	Variable	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche
0-7	pm_nb_depl	22%	0%	2%	0%	0%	32%	43%
0-7	pm_pkm	21%	0%	2%	0%	1%	60%	15%
7-20	pm_nb_depl	31%	1%	2%	1%	7%	58%	0%
7-20	pm_pkm	30%	1%	2%	1%	8%	58%	0%
>20	pm_nb_depl	45%	2%	2%	0%	51%	0%	0%
>20	pm_pkm	43%	2%	2%	0%	53%	0%	0%

Tableau 61 : Nouvelles parts modales dans le scénario PM

#### 5.1.4. Calcul du profil de mobilité pour le modèle PES

Le résultat final que nous utilisons en input du modèle PES est le «profil de mobilité » d'un habitant mobile de plus de 5 ans d'un tissu. Ce profil est constitué de deux indicateurs : la distance moyenne et le nombre de déplacement par jour. Chaque indicateur est décliné sur les 7 modes.

Le profil de mobilité dans le scénario Référence d'un habitant du tissu Agglomération Paris-B-pole-grande-couronne de grande couronne d'Ile-de-France est le suivant :

Variable	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche	total
distance_moyenne	7,8	13,3	6,0	8,5	27,1	2,6	0,6	
nb_depl_par_pers	2,2	0,0	0,2	0,0	0,4	0,1	1,3	4,2

Tableau 62: Profil de mobilité Référence d'un habitant du tissu Agglomération Paris-B-pole-grande-couronne de grande couronne d'Ile-de-France

Dans le scénario Potentiel Max système vélo son profil de mobilité est le suivant :

Variable	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche	total
distance_moyenne	10,1	16,9	7,0	9,9	30,5	5,8	0,6	
nb_depl_par_pers	1,1	0,0	0,1	0,0	0,3	1,3	1,3	4,2

Tableau 63: Profil de mobilité dans le scénario PM vélo d'un habitant du tissu Agglomération Paris-B-pole-grande-couronne de grande couronne d'Ile-de-France

On observe que le nombre de déplacements par personne total reste le même. Mais des déplacements ont été reportés des autres modes vers le vélo.

De plus dans nos hypothèses le nombre de km parcourus par personne est aussi invariant. C'est pourquoi les distances moyennes de chaque mode ont évolué entre le scénario Référence et le scénario PM vélo.

## 5.2. Scénario Volontariste

### 5.2.1. Estimation d'experts

Des experts vélo ont été consultés dans le cadre du projet pour contribuer à l'élaboration du scénario Volontariste. Les changements de comportements relatifs à la mise en place de ce système vélo ont été évalués pour les différentes catégories de trajets. Ces catégories ont été définies en croisant la distance, la CSP de la personne faisant le trajet, et le motif du trajet. Pour chacune des combinaisons possibles de ces trois variables (Voir Tableau 64), les experts ont évalué la probabilité qu'un tel trajet soit fait à vélo ou à pied en 2030, en supposant le système vélo proposé mis en place. Deux équipes d'experts ont fait cet exercice. Les estimations des deux groupes sont visibles en Annexe B.

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 de travail et de loisirs, alors que le motif « achats en grandes surfaces » est celui le moins propice.

Deux désaccords ressortent du travail des experts : le motif « soin/administratif » a été jugé plus propice au vélo/marche que par l'autre. Dans ce cas, le groupe suggérant que le motif était moins propice au vélo/marche avait en tête des déplacements médicaux, mais il semble que ce motif « soin » fasse principalement référence à des motifs de type coiffure, *etc.*

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 (Voir 9.2, en annexe). 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 64: Probabilités associées à différentes catégories de trajets pour que les trajets de ladite catégorie soient faits à vélo ou à pied en 2030 en Vallée de la Seine, en supposant que le système vélo proposé soit mis en place, d'après les experts vélo interrogés dans le cadre de ce projet.

Motifs de trajet ↓	CSP →		Cadre/ Profession intermédiaire	Employé/ Ouvrier	Retraité	Scolaire	Etudiant	Inactif
Travail/ Etudes		0-3km	85%	80%	0%	95%	90%	0%
		3-7km	35%	30%	0%	50%	55%	0%
		7-15km	13%	8%	0%	10%	23%	0%
Loisirs		0-3km	85%	80%	75%	95%	90%	85%
		3-7km	35%	30%	25%	50%	30%	40%
		7-15km	13%	8%	3%	10%	23%	23%
Achats		0-3km	80%	80%	80%	80%	90%	90%
		3-7km	20%	20%	15%	20%	25%	40%
		7-15km	8%	3%	3%	8%	13%	13%
Soins/ démarches		0-3km	85%	85%	75%	90%	90%	90%
		3-7km	20%	20%	15%	35%	20%	40%
		7-15km	10%	5%	0%	10%	20%	20%
Accompagner/ aller chercher		0-3km	65%	65%	65%	75%	75%	75%
		3-7km	8%	8%	3%	23%	23%	23%
		7-15km	0%	0%	0%	0%	5%	5%
Visites amis/ famille		0-3km	85%	85%	80%	90%	90%	90%
		3-7km	30%	30%	25%	45%	30%	40%
		7-15km	13%	8%	3%	13%	23%	23%
Autres trajets professionnels		0-3km	40%	50%	0%	0%	0%	0%
		3-7km	13%	13%	0%	0%	0%	0%
		7-15km	10%	0%	0%	0%	0%	0%

## 5.2.2. Estimations d'experts ramenées à la zone et au tissu

Pour exploiter ces hypothèses il faut que nous les appliquions à nos unités géographiques, qui sont les tissus des zones. Néanmoins ces hypothèses sont difficilement applicables telles quelles puisqu'elles concernent les déplacements d'une CSP, pour un motif, pour une classe de distance. Or l'échantillon de déplacements que nous avons sur chaque zone ne permet pas de faire un découpage aussi précis tout en restant statistiquement significatif. Nous allons donc simplifier ces hypothèses en retirant les variables Motif et CSP.

Ce tableau d'hypothèse peut aussi s'écrire sous cette forme :

CSP	Motif	Distance	Part modale vélo/marche en nombre de déplacements
Cadre/Intermédiaire	Travail/Etudes	0-3	85%
Cadre/Intermédiaire	Travail/Etudes	3-7	35%
Cadre/Intermédiaire	Travail/Etudes	7-15	13%
Cadre/Intermédiaire	Loisirs	0-3	85%
Cadre/Intermédiaire	Loisirs	3-7	35%
Cadre/Intermédiaire	Loisirs	7-15	13%
...	...	...	...
Employé/Ouvrier	Travail/Etudes	0-3	80%
Employé/Ouvrier	Travail/Etudes	3-7	30%
Employé/Ouvrier	Travail/Etudes	7-15	8%
Employé/Ouvrier	Loisirs	0-3	80%
Employé/Ouvrier	Loisirs	3-7	30%
Employé/Ouvrier	Loisirs	7-15	8%
...	...	...	...

Tableau 65 : Hypothèses sur la part des déplacements faits à marche/vélo selon la CSP, le motif et la distance

On observe que la variable motif, ie le part des déplacements faits selon chaque motif, est largement invariante entre les zones de Vallée de la Seine, avec ces proportions en Vallée de la Seine :

Motif	Part des déplacements par motif
Soins/démarches	7%
Visites amis/famille	7%
Achats	21%
Autres professionnels	3%
Accompagner/aller chercher	15%
Loisirs	19%
Travail/Etudes	28%

Tableau 66 : Part des déplacements faits pour chaque motif en Vallée de la Seine (invariante entre nos différentes zones d'étude). Par exemple 21% des déplacements ont pour motif « Achats » quelle que soit la zone d'étude de Vallée de la Seine.

Ainsi puisque la variable motif est invariante on peut la retirer en faisant la somme, sur l'ensemble des motifs, des produits de la part modale vélo/marche pour un motif par la part des déplacements pour ce motif pour un couple {CSP,Distance} :

$$PM_{\{CSP,Dist\}} = PM_{\{CSP,Dist,Soins/démarches\}} * Part_{Soins/démarches} + \dots \\ + PM_{\{CSP,Dist,Travail/Etudes\}} * Part_{Travail/Etudes}$$

On en déduit le tableau suivant :

CSP	Distance	Part modale en nombre de déplacements
Cadre/Intermediaire	0-3	80%
Cadre/Intermediaire	3-7	26%
Cadre/Intermediaire	7-15	9%
Cadre/Intermediaire	>15	0%
...	...	...
Employe/Ouvrier	0-3	78%
Employe/Ouvrier	3-7	23%
Employe/Ouvrier	7-15	5%
Employe/Ouvrier	>15	0%
...	...	...

Tableau 67 : Hypothèses de part modale vélo/marche en nombre de déplacements en Vallée de la Seine pour le scénario Volontariste Vélo

Intéressons-nous maintenant à la variable CSP. On observe que la part de déplacements fait par chaque CSP est largement invariante selon les tissus de nos zones d'étude :

Zone	Tissu	CSP	Part des déplacements faits par les membres de la CSP
idf	<2k-R-polarisee	Cadre/Intermédiaire	38%
idf	<2k-R-polarisee	Employé/Ouvrier	26%
idf	<2k-R-polarisee	Etudiant	2%
idf	<2k-R-polarisee	Retraité	16%
idf	<2k-R-polarisee	Scolaire	18%
idf	Agglomeration Paris-B-pole-grande-couronne	Cadre/Intermédiaire	34%
idf	Agglomeration Paris-B-pole-grande-couronne	Employé/Ouvrier	27%
idf	Agglomeration Paris-B-pole-grande-couronne	Etudiant	3%
idf	Agglomeration Paris-B-pole-grande-couronne	Retraité	16%
idf	Agglomeration Paris-B-pole-grande-couronne	Scolaire	19%

Tableau 68 : Part du nombre de déplacements faits par chaque CSP selon la zone et le tissu. Par exemple, en grande couronne d'IDF, sur le tissu <2k-R-polarisee, les « Cadre/Intermediaire » représentent 38% des déplacements.

En fixant le couple {Zone-tissu, Distance}, on obtient la part modale vélo/marche sur ce couple en faisant la somme des produits des parts modales de la CSP par la part des déplacements de cette CSP :

$$PM_{\{Zone-Tissu,Dist\}} = PM_{\{Cadre,Dist\}} * Part_{\{Zone-Tissu,Cadre\}} + \dots + PM_{\{Employe,Dist\}} * Part_{\{Zone-Tissu,Employe\}}$$

A partir du Tableau 67 et du Tableau 68, on en déduit les hypothèses régionalisées suivantes :

Zone	Tissu	Distance	Part des déplacements vélo/marche
idf	<2k-R-polarisee	0-3	76%
idf	<2k-R-polarisee	3-7	25%
Idf	<2k-R-polarisee	7-15	7%
idf	<2k-R-polarisee	>15	0%
...	...	...	...
idf	Agglomeration Paris-B-pole-grande-couronne	0-3	76%
idf	Agglomeration Paris-B-pole-grande-couronne	3-7	25%
idf	Agglomeration Paris-B-pole-grande-couronne	7-15	7%
idf	Agglomeration Paris-B-pole-grande-couronne	>15	0%

Tableau 69: Hypothèses de part modale du vélo/marche en fonction de la zone, du tissu, de la distance dans le scénario Volontariste Vélo

### 5.2.3. Calcul du report modal

On peut maintenant reporter les déplacements de chacun des modes (hors marche) au prorata de son usage vers le vélo (en utilisant la méthode décrite en I.A.1) pour obtenir les nouveaux nombres de déplacements par personne chaque jour. Pour passer de la variation du nombre de déplacements par jour à la variation en km/jr, on multiplie par la distance moyenne d'un déplacement sur ce mode. Sauf pour le mode marche\_vélo où l'on déduit la variation des distances parcourues chaque jour (les km/jr) en sommant la variation des km/jr sur les autres modes. On s'assure ainsi que le nombre de km/jr est constant entre le scénario Volontariste et le scénario Référence.

Par exemple voici le détail des calculs pour un habitant du tissu Agglomération Paris-B-grande-couronne de la zone grande couronne d'Île-de-France pour les déplacements entre 3 et 7 km :

Variable	deuxrm	marche_vélo	train	metro_tram	bus_car	VP
Nb depl/jr Ref	0,01	0,02	0,02	0,01	0,06	0,48
Nb depl/jr Vol	0,01	0,15	0,02	0,01	0,05	0,37
Variation nb depl	- 0,00	0,13	- 0,01	- 0,00	- 0,01	- 0,11
Distance moyenne (km)	4,87	4,11	5,06	4,84	4,53	4,64
Variation km/jr	- 0,01	0,62	- 0,03	- 0,01	- 0,06	- 0,51
Km/jr Ref	0,04	0,07	0,11	0,04	0,28	2,24
Km/jr Vol	0,03	0,69	0,09	0,03	0,22	1,73

*Tableau 70 : Etapes de calcul des distances parcourues entre 3 et 7 km par personne et par jour pour chaque mode pour un habitant du tissu Agglomération Paris-B-pole-grande-couronne, dans le scénario Volontariste, par écart au scénario Référence.*

*Dans le scénario Référence, un habitant de ce tissu effectue 0,48 déplacements en VP par jour entre 3 et 7 km, pour 2,24 km parcourus en moyenne. Dans le scénario Volontariste vélo un habitant de ce tissu effectue 0,37 déplacements en VP par jour entre 3 et 7 km, pour 1,73 km parcourus en moyenne, soit une réduction de 0,51 km sur ces trajets.*

## 5.2.4. Calcul du profil de mobilité pour le modèle PES

Finalement on aboutit à l'input de notre modèle : le profil de mobilité d'un habitant.

Pour rappel, le profil d'un habitant de Paris-B-pole-grande-couronne dans le scénario Référence est le suivant :

Variable	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche	total
Distance moyenne	7,8	13,3	6,0	8,5	27,1	2,6	0,6	
Nb depl par pers	2,2	0,0	0,2	0,0	0,4	0,1	1,3	4,2

*Tableau 71 : Profil de mobilité initial d'un habitant du tissu Agglomération Paris-B-pole-grande-couronne de grande couronne d'Ile-de-France dans le scénario Référence*

Dans le scénario Volontariste, voilà le nouveau profil de mobilité d'un habitant de Paris-B-pole-grande-couronne :

Variable	VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche	total
Distance moyenne	9,8	15,2	7,3	10,0	27,7	2,5	0,6	
Nb depl par pers	1,6	0,0	0,1	0,0	0,4	0,7	1,3	4,2

*Tableau 72 : Profil de mobilité dans le scénario Volontariste vélo d'un habitant du tissu Agglomération Paris-B-pole-grande-couronne de grande couronne d'Ile-de-France dans le scénario Volontariste vélo*

On remarque que seule la marche est invariante (par hypothèse). Le vélo passe de 0,1 à 0,7 déplacement par jour et par personne. Tandis que les autres modes perdent en nombre de déplacement au prorata de leur usage initial.

On remarque aussi que les distances moyennes de la plupart des modes sur lesquels le vélo prend augmentent. Prenons l'exemple de la VP. Sur chaque catégorie de distance (par exemple entre 3 et 7 km), la distance moyenne de la VP est constante. Cependant, nous avons reporté des déplacements des catégories de distance courtes (inférieures à 20 km) vers le vélo. A l'inverse, nous n'avons pas reporté de déplacements de la catégorie de distances supérieures à 20 km vers le vélo. Ces derniers restent donc parcourus en VP alors qu'une partie des premiers (plus courts) sont reportés vers le vélo et ne sont plus parcourus en VP. Ainsi au global la distance moyenne des trajets parcourus en VP augmente.



## 5.3. Résultats

### 5.3.1. Résultats généraux

Le report modal des autres modes vers le vélo entraîne une augmentation de la part modale du vélo. Le vélo étant un mode moins émetteur, cela s'accompagne d'une réduction des émissions de CO<sub>2eq</sub> en ACV. Le système vélo ne modifie que les parts modales (ici exprimées en p.km). Ainsi, le nombre de kilomètre parcourus par jour par personne ne varie pas.

Scénario	GC-IDF			Normandie			Calvados			Rouen			Le Havre		
	Réf	Vol	PM	Réf	Vol	PM	Réf	Vol	PM	Réf	Vol	PM	Réf	Vol	PM
Km parcourus	Inchangée														
Vélo (%p.km)	0,3%	5%	22%	0,5%	7%	33%	0,6%	6%	31%	0,3%	8%	39%	0,6%	7%	34%
Réduction d'émissions en ACV par rapport au scénario Référence		-6%	-24%		-6%	-28%		-5%	-27%		-7%	-34%		-5%	-28%

Tableau 73 : Résultats généraux du domaine d'action Vélo sur chaque zone

### 5.3.2. Résultats sur la mobilité

#### 5.3.2.1. Résultats

On peut visualiser les changements de part modale pour la grande couronne d'IDF et l'EMD de Rouen par les Figures suivantes :

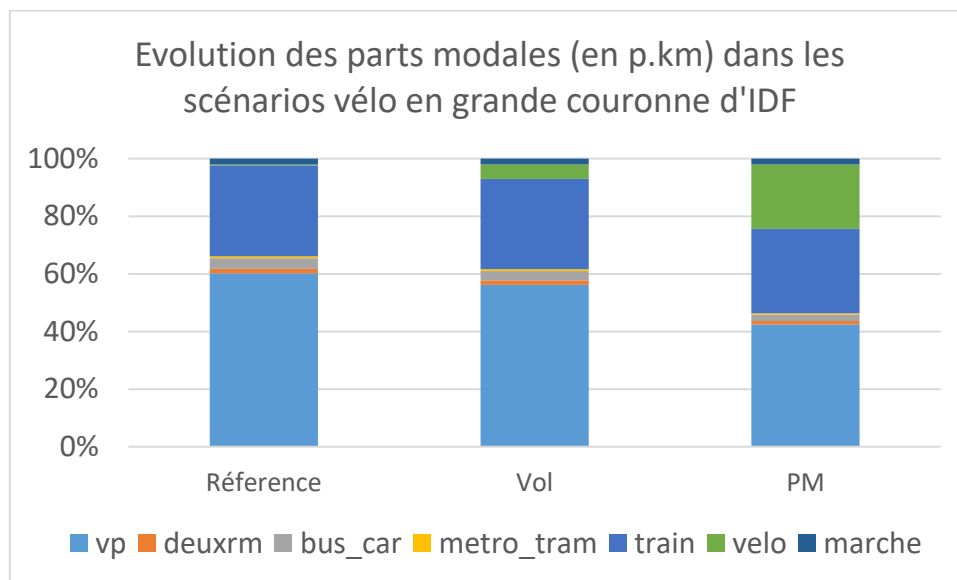


Figure 17 : Evolution des parts modales (en p.km) dans les scénarios vélo en grande couronne d'IDF

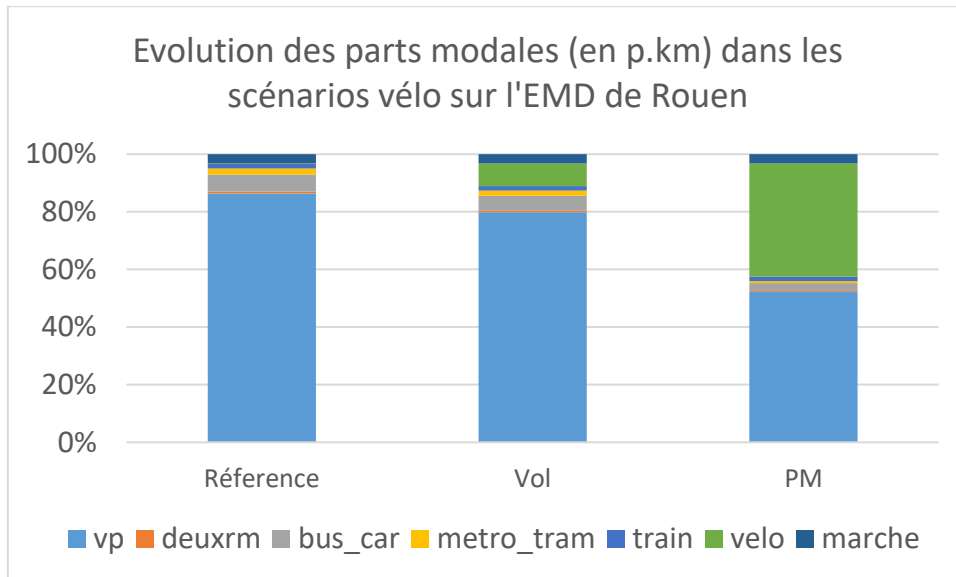


Figure 18 : Evolution des parts modales (en p.km) dans les scénarios vélo sur l'EMD de Rouen

On observe un report modal considérable. La part modale en p.km du vélo (en vert) passe de moins de 1% dans le scénario Référence à entre 5 et 8% dans le scénario Volontariste. Dans le scénario PM la part du vélo atteint entre 25 et 39% selon les zones. Cette augmentation de la part modale du vélo se fait principalement au détriment de la voiture.

#### 5.3.2.2. Interprétation

Sur la Figure 19, nous avons reconstitué, pour la zone de Rouen, les segments de mobilité reportés sur le vélo, par catégorie de distance. Ainsi, on fait apparaître (dans cet ordre) les distances qui sont trop longues pour être parcourues en cycle (en bleu clair), les distances qui ne sont pas parcourues en cycles car elles font partie d'un trajet chaîné trop long (en orange), celles qui ne sont pas parcourues en cycles pour cause de transport de charge (en gris), celles qui ne sont pas parcourues en cycles pour cause de transport de personnes (en jaune), celles qui sont parcourues en marchant (en bleu foncé) et enfin celles qui sont parcourues en cycles. On remarque que 71 % des distances sont parcourues en vélo ou marche sur les trajets inférieurs à 7 km et 60 % des distances sont parcourues en cycles sur les trajets compris entre 7 et 20 km.

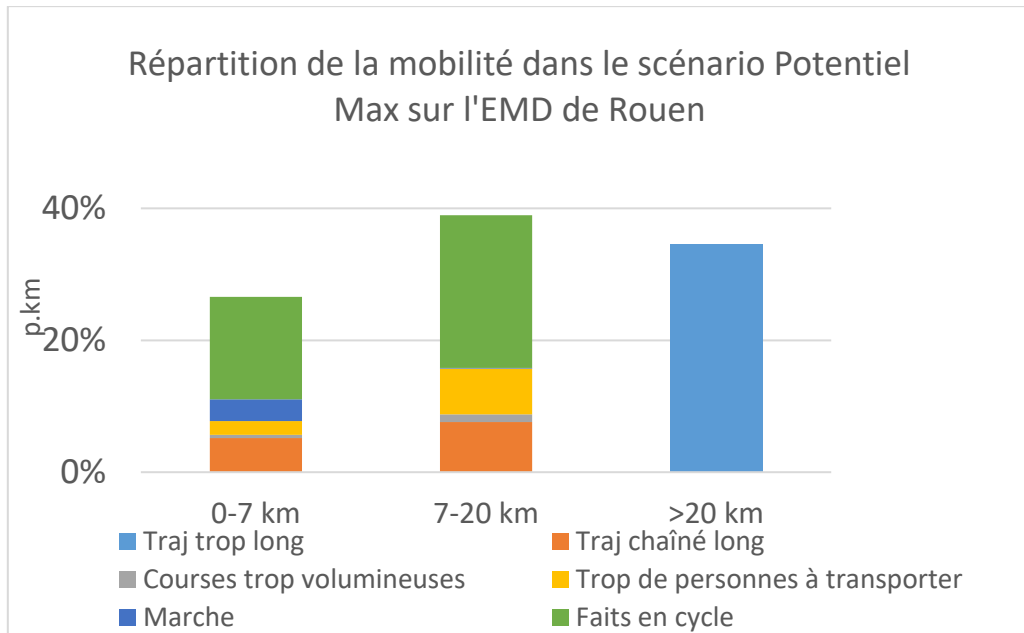


Figure 19 : Répartition de la mobilité locale en appliquant les hypothèses du scénario Potentiel Max vélo selon la catégorie de distance, pour la zone de l'EMD de Rouen

La Figure 20 agrège ces résultats sous forme de camembert, montrant pourquoi la part modale du vélo atteint 39 % sur l'EMD de Rouen :

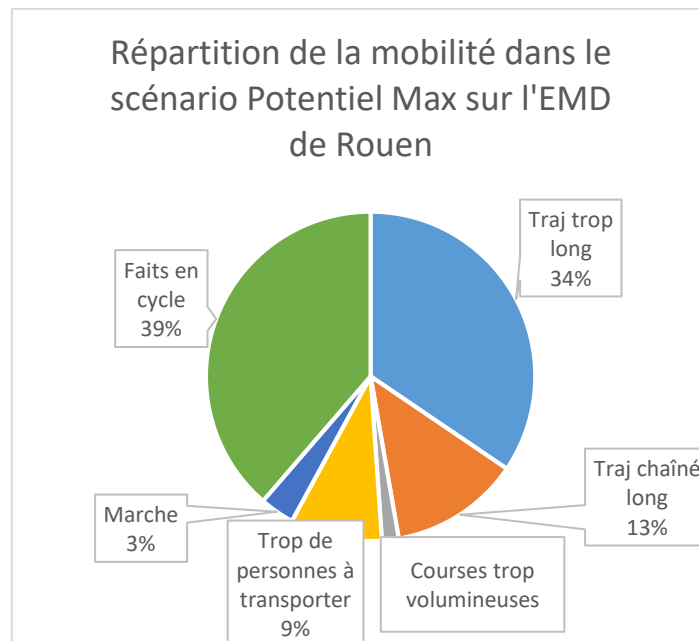


Figure 20 : Répartition de la mobilité locale en appliquant les hypothèses du scénario Potentiel Max vélo, pour la zone de l'EMD de Rouen

Pour comprendre les différences de résultat entre les zones, il est utile de s'intéresser aux v.km, en effet la voiture est prépondérante dans les impacts étudiés (par exemple 95% des émissions de CO<sub>2</sub> viennent de la VP). La variable la plus dimensionnante pour le potentiel du vélo étant la distance des déplacements, il est pertinent de regarder pour chaque zone la part des v.km sur les déplacements de moins de 20km.

On observe Figure 21 que sur le périmètre de Rouen la part des v.km faits sur des distances inférieures à 20km est la plus élevée de toutes les zones, avec 62 %. Dans nos résultats Rouen a aussi la plus forte réduction de v.km des zones avec 37%. On observe le même effet sur les autres zones : plus la part des v.km faits sur des distances inférieures à 20 km est forte, plus la réduction de v.km dans le scénario PM vélo est forte.

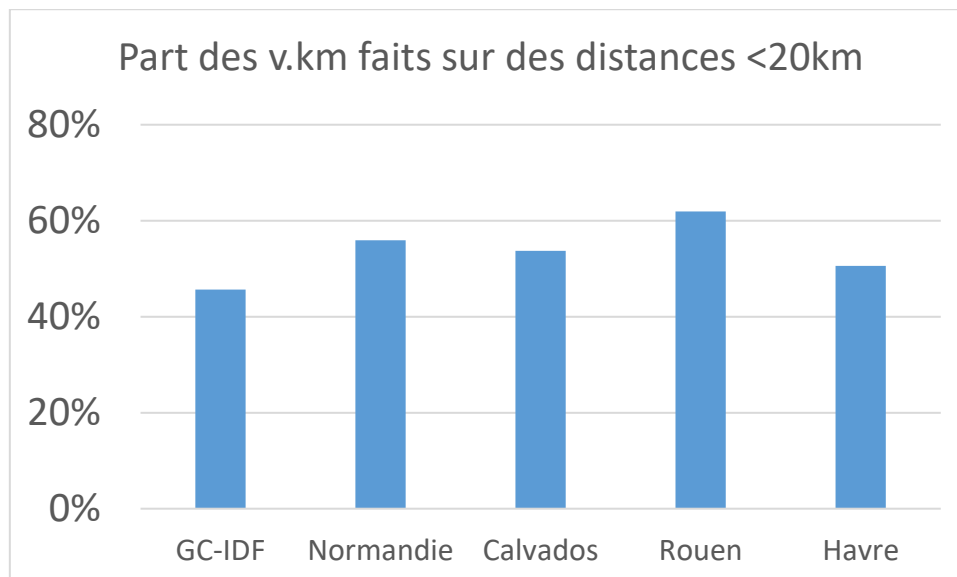


Figure 21 : Part des v.km faits sur des distances inférieures à 20 km

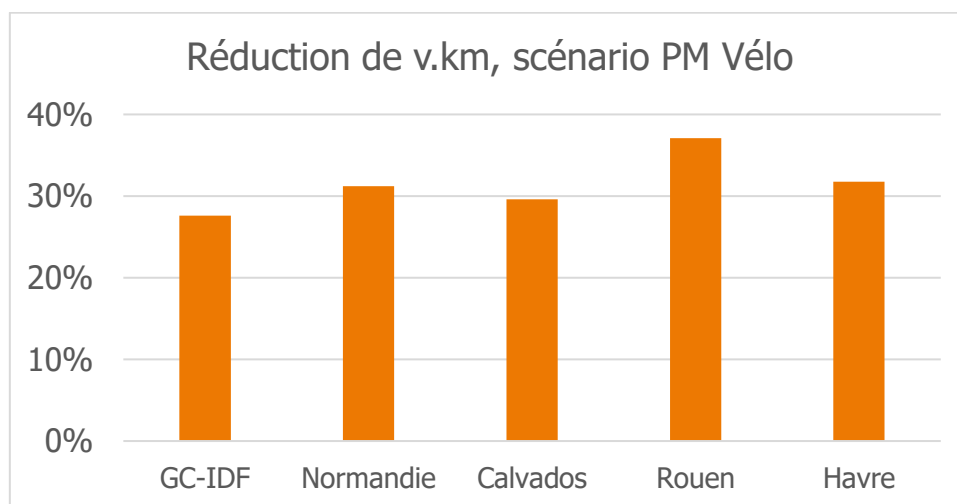


Figure 22 : Réduction du trafic automobile (v.km) dans le scénario PM vélo par zone

Autrement dit, il apparaît qu'un facteur expliquant les différences de potentiels de décarbonation du vélo entre les zones est la répartition en distance des trajets faits en voiture : plus les distances parcourues en voiture sont faibles, plus le potentiel du vélo est grand.

Dans le scénario Vol, la part modale (en p.km) du vélo atteint entre 5 et 8 % des km parcourus. A titre de comparaison, aux Pays-Bas, le pays du monde où la pratique du vélo est la plus développée, la part modale du vélo est d'environ ¼ des déplacements (Harms et Kansen 2018), soit environ 8 % des km parcourus à l'intérieur du pays). Dans le scénario Volontariste, le vélo devient donc environ aussi développé qu'aux Pays-Bas. En France la SNBC table sur une augmentation de la part modale (en %p.km) du vélo de 0,6% à 2,6% en 2030 et 3% en 2050 (Direction Générale de l'Energie et du Climat

2020). La SNBC est donc 2 à 3 fois moins ambitieuse que le scénario Volontariste, qui est lui-même 5 fois moins ambitieux que le scénario PM.

### 5.3.3. Résultats sur la consommation d'énergie et les émissions

A partir des évolutions de la mobilité, on peut en déduire les évolutions sur la consommation d'énergie et sur les émissions des différents polluants en appliquant à chaque mode son facteur d'émission. Pour la grande couronne d'IDF, on obtient les résultats suivants, en relatif par rapport au scénario Référence en 2030 :

	GC-IDF	
	Vol	PM
Trafic voiture, v.km	-6,4%	-27%
Consommation énergétique	-4,8%	-22%
Consommation carburant fossile	-6,5%	-28%
CO <sub>2</sub> à l'usage	-6,3%	-27%
CO <sub>2</sub> total (incluant l'usage et la fabrication des véhicules)	-5,7%	-24%
NO <sub>x</sub>	-6,5%	-28%
PM <sub>10</sub>	-6,7%	-29%
PM <sub>2.5</sub>	-6,3%	-28%

Tableau 74 : Résultats sur la consommation d'énergie et les émissions du domaine d'action vélo sur la grande couronne d'IDF, par rapport au scénario Référence en 2030.

On observe que les réductions de consommation d'énergie et d'émissions sont toutes proches de la réduction du nombre de km parcourus par des voitures. En effet les voitures sont la principale source de consommation d'énergie et d'émissions, ainsi l'utilisation de la voiture et ces différents impacts sont fortement couplés. On observe des résultats similaires sur les autres zones.

### 5.3.4. Résultats sur le temps passé à se déplacer

#### 5.3.2.1. Méthode

Pour estimer le temps passé à se déplacer nous avons fait 3 scénarios :

- Dans le 1<sup>er</sup> scénario : « **Classique** », tous les déplacements à vélo sont faits en vélo classique (sans assistance électrique). Dans ce cas les déplacements en vélo sont supposés être faits au maximum à 15 km/h. Si la vitesse moyenne de la voiture sur cette catégorie de distance est inférieure à 15 km/h (c'est le cas sur les déplacements courts) alors les vélos sont supposés aller à la même vitesse moyenne que la voiture. Actuellement on observe que le vélo reste plus lent que la voiture même sur les trajets courts (Voir Tableau 75), mais cette hypothèse découle de l'idée qu'est mis en place d'ici 2030 un système vélo offrant la même qualité de service que le système voiture (parking, continuité, sécurité,...), augmentant la vitesse moyenne du vélo au niveau de celle de la voiture, tant qu'elle reste sous les 15 km/h.
- Dans le 2<sup>ème</sup> scénario « **VAE** », tous les déplacements à vélo sont faits en VAE. Dans ce cas les déplacements en vélo sont supposés être faits au maximum à 19 km/h. Si la vitesse moyenne

de la voiture sur cette catégorie de distance est inférieure à 19 km/h (c'est le cas sur les déplacements courts) alors les vélos sont supposés aller à la même vitesse moyenne que la voiture.

- Dans le 3<sup>ème</sup> scénario « **Classique vp20** », on imagine que les déplacements à vélo sont effectués en vélo classique (limite à 15 km/h) et qu'en plus la vitesse moyenne des voitures est limitée à 20 km/h dans les pôles<sup>22</sup>. Cette réduction correspond à un « apaisement » du trafic par la mise en place de zones « 30 km/h », dans le sens où le différentiel de vitesse entre les modes est réduit, sécurisant la pratique du vélo.

Scénario	Distance (km)	Vitesse moyenne (km/h)						
		VP	deuxrm	bus_car	metro_tram	train	vélo	marche
Référence	0-3	9	10	5	5	5	6	3
Volontariste musculaire	0-3	9	10	5	5	5	9	3
Volontariste vae	0-3	9	10	5	5	5	9	3
Volontariste musculaire vp20	0-3	9	10	5	5	5	9	3
Référence	3-7	17	16	8	8	7	10	5
Volontariste musculaire	3-7	17	16	8	8	7	15	5
Volontariste vae	3-7	17	16	8	8	7	17	5
Volontariste musculaire vp20	3-7	17	16	8	8	7	15	5
Référence	7-15	23	25	12	13	13	14	5
Volontariste musculaire	7-15	23	25	12	13	13	15	5
Volontariste vae	7-15	23	25	12	13	13	19	5
Volontariste musculaire vp20	7-15	20	25	12	13	13	15	5
Référence	>15	33	43	28	20	25	18	4
Volontariste musculaire	>15	33	43	28	20	25	15	4
Volontariste vae	>15	33	43	28	20	25	19	4
Volontariste musculaire vp20	>15	20	43	28	20	25	15	4

*Tableau 75 : Vitesses moyennes utilisées pour le calcul du temps des scénarios Volontariste Vélo pour le tissu Agglomération-Paris-B-grande-couronne. Toutes les vitesses sont calculées à partir des données d'enquête sauf celles en rouge, qui proviennent des hypothèses.*

A partir des vitesses et des km parcourus pour chaque mode, classe de distance, scénario, on en déduit le temps passé à se déplacer dans chaque tissu. Puis en agrégeant les tissus selon leur population, on en déduit le temps passé à se déplacer pour un habitant de chacune de nos 5 zones.

<sup>22</sup> Dans les faits nous appliquons une limite d'une vitesse moyenne en VP de 20 km/h pour les *habitants* des pôles (et pas sur le *territoire* du pôle). Ceci équivaut à une vitesse moyenne de 20 km/h en VP dans les pôles si et seulement si il y a autant de distances parcourues hors des pôles par des habitants des pôles que de distances parcourues dans les pôles par les habitants hors des pôles.

### 5.3.2.2. Résultats

	GC-IDF			Normandie			Calvados			Rouen			Le Havre		
	Réf	Vol	PM	Réf	Vol	PM	Réf	Vol	PM	Réf	Vol	PM	Réf	Vol	PM
Part modale vélo (%p.km)	0,3%	5,0%	22%	0,5%	7,0%	33%	0,6%	6,0%	31%	0,3%	7,9%	39%	0,6%	6,6%	34%
Vélo classique, temps (h par pers)	1,65	1,64	1,73	1,17	1,18	1,36	1,22	1,23	1,43	1,18	1,17	1,31	1,17	1,16	1,34
Vélo classique, temps (% diff / Réf)		0%	5%		0%	15%		0%	16%		0%	12%		0%	16%
VAE, temps (h par pers)	1,65	1,63	1,66	1,17	1,17	1,26	1,22	1,21	1,31	1,18	1,16	1,22	1,17	1,15	1,24
VAE, temps (% diff / Réf)		0%	2%		0%	8%		0%	8%		0%	5%		0%	8%
Vélo classique et vitesse des voitures limitée à 20 dans les pôles (% temps supplémentaire)	1,81	1,81	1,8	1,38	1,38	1,39	1,45	1,45	1,47	1,32	1,32	1,32	1,41	1,41	1,42
Vélo classique et vitesse des voitures limitée à 20 dans les pôles(% diff / Réf)	10%	0%	-1%	18%	0%	1%	19%	0%	1%	12%	0%	0%	21%	0%	1%

*Tableau 76 : Temps passé à se déplacer par jour par zone par personne (mobile et de plus de 5 ans). A noter que pour le scénario classique vp20, un scénario Référence modifié a été utilisé, dans lequel la voiture se déplace à une vitesse moyenne de 20 km/h maximum dans les pôles.*

On peut remarquer que dans le cas de figure « Vélo classique » Volontariste le temps passé à se déplacer est stable sur toutes les zones. Ainsi un développement significatif du vélo classique ne rallonge pas le temps de transport. Dans le cas du scénario PM, un habitant moyen met plus de temps à se déplacer, entre +5% et + 16% de temps supplémentaire selon la zone.

La généralisation du VAE permet de réduire ce temps supplémentaire de déplacement dans le scénario PM à entre +2% et +8% selon la zone.

Enfin dans le cas où la vitesse moyenne des voitures est limitée à 20 km/h dans les pôles, le développement massif du vélo ne rallonge pas le temps passé à se déplacer. Mais cela se fait au prix d'un temps passé dans les transports plus long dans le scénario Référence (entre +10 et +20%).

### 5.3.5. 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 pour chacune des zones étudiées. Les calculs sont ici illustrés pour notre zone d'étude Grande couronne d'Ile-de-France.

Le coût annuel moyen en vélos neufs est calculé ainsi :

- On suppose que 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.
- La durée de vie (en années) des véhicules 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.
- Le coût unitaire d'usage des vélos a été calculé comme suit :
  - Le coût unitaire d'un vélo a été évalué à 2000€, formant une moyenne de coûts haute pour des vélos de type VAE, ou comprenant quelques speed-pedelects.
  - Soit un coût moyen du vélo au km de  $2000/15\ 000 * 100 = 13\text{c€ TTC/vkm}$ , soit  $11\text{ c€ HT/v.km}$
- Le coût unitaire d'usage des vélos cargos (VC) a été calculé de la façon suivante :
  - On suppose un parc significativement composé de vélo cargo à assistance électrique, pour un coût unitaire moyen de 3000€.
  - Le coût moyen pour les VC est estimé à  $3000/15\ 000 * 100 = 20\text{c€/vkm}$ , soit  $17\text{ c€ HT/v.km}$ .
- La mobilité à vélo en Grande couronne d'Ile-de-France est de 7,8 milliards de km dans le scénario PM et de 1,8 milliards de km dans le scénario Vol. On suppose que 10 % de ces distances sont parcourues en vélo cargo (pour les courses et le transport de personnes), les 90 % restants étant parcourus en vélo classique, VAE ou s-pedelec.
- Ainsi, on estime le coût annuel d'usage des vélos à  $0,11\ \text{€/vkm} * 7,8\ \text{Gvkm} * 0,9 = 780\ \text{M€/an}$  pour le scénario PM et  $0,11\ \text{€/vkm} * 1,8\ \text{Gvkm} * 0,9 = 180\ \text{M€/an}$  pour le scénario Vol.
- On estime le coût annuel d'usage des vélos cargos à  $0,17\ \text{€/vkm} * 7,8\ \text{Gvkm} * 0,1 = 130\ \text{M€/an}$  pour le scénario PM et  $0,17\ \text{€/vkm} * 1,8\ \text{Gvkm} * 0,1 = 30\ \text{M€/an}$  pour le scénario Vol.
- 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 425 € TTC d'équipement par ménage. Ces équipements sont supposés avoir une durée de vie moyenne de 10 ans.
- 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 100 € TTC et dure 3 ans en moyenne.

Tous les coûts précédents sont à la charge des ménages. Les coûts suivants sont réputés à la charge du secteur public.

- 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 460 000 €/km TTC<sup>23</sup> (Codra Nîmes 2019), 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 40 000 €/km TTC (Codra Nîmes 2019), et les bandes sont supposées durer 15 ans.
- Le réseau routier de la zone Grande couronne d'Ile-de-France est supposé constant entre 2018 et 2030, il correspond ici à l'agrégat des données des départements du 94, 95, 77 et 78 (MTE 2018) Il est caractérisé ainsi :
  - Le réseau routier communal est constitué de 18 514 km de route
  - Le réseau routier départemental est constitué de 7 390 km de route
  - Le réseau routier national est constitué de 400 km de route
  - Le réseau autoroutier est constitué de 449 km d'autoroutes

Les données issues du MTE sont distinguées par région et par département. Les autres zones étudiées ne correspondant pas exactement au découpage régional (Normandie) ou étant des aires urbaines, nous avons obtenu le maillage routier au pro-rata du réseau routier existant pour la région ou pour le département correspondant, par une relation linéaire avec la surface de la zone considérée<sup>24</sup>.

- Une signalisation routière dédiée aux vélos est mise en place sur toutes les routes. Le coût d'un tel dispositif est de 3000 €/km TTC (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 coûts 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 231 ouvrages d'art (pour 1150 communes) de ce type dans la zone Grande couronne d'Ile-de-France. Nous avons supposé un coût de 1 million d'€ TTC 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 (hypothèse de 46 k€/an chargés).
- 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.
- Le moindre usage des VP, le moindre besoin d'entretien et la moindre consommation de carburant, par les individus (qu'ils se déplacent en tant que membre d'un ménage ou en tant que professionnels) sont comptabilisés comme pour les scénarios Covoiturage (voir section 0), avec les valeurs de réduction du trafic 2030 suivantes pour la zone Ile-de-France grande couronne, obtenues par la simulation :
  - 28 % de trafic local évité pour le scénario PM

---

<sup>23</sup> Les chiffres du rapport CODRA sont issus d'estimations de coûts d'aménagement, il n'est pas indiqué si ces coûts sont en TTC mais on les a considérés comme tels.

<sup>24</sup> Par exemple, le périmètre de l'EMD du Havre couvre 2100 km<sup>2</sup>, mais les données les plus fines dont nous disposons sur le réseau routier sont à l'échelle de la Seine Maritime, couvrant 6300 km<sup>2</sup>. Ainsi, le linéaire de réseau départemental de l'EMD du Havre a été calculé à partir de celui de la Seine Maritime, qui contient 5700 km de routes départementales :  $5700 \times 2100 / 6300 = 1900$  km.

- 6 % de trafic local évité pour le scénario *Volontariste*
- La réduction de l'entretien de la voirie induite par le moindre trafic VP est considérée comme négligeable dans cette étude (Baaj 2012).

Les bilans économiques sont détaillés dans les Tableau 77 et Tableau 78.

**Le système vélo, en scénario *volontariste*, induit des augmentations de dépenses qui ne sont pas tout à fait compensées par les réductions des dépenses.** Pour les ménages le développement d'un système vélo correspond à des dépenses équivalentes aux économies. **En scénario *Potentiel Max*, le système vélo génère un bénéfice de 450 millions €/an par rapport au scénario *Référence*.** Au niveau des ménages ce scénario permet une économie de 291€ par an. Le développement du système vélo à son potentiel maximal revient à un investissement public de l'ordre de 42€ par habitant par année et à un investissement public de 266€ par tCO<sub>2</sub> évitées.

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 dues 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.

**Les dépenses liées aux infrastructures et ressources humaines du système vélo sont inférieures (de plus de la moitié) 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.

Pour ce domaine d'action, nous avons utilisé l'outil Health Economic Assessment Tool (WHO/Europe 2020), dans l'objectif d'évaluer les externalités d'un système vélo. Cet outil nous a permis de calculer l'impact des différents scénarios sur la mortalité induite par l'accidentologie routière, par l'inhalation de polluants de l'air et par la sédentarité. Les résultats de cette évaluation est disponible dans le rapport de l'étude. Nous avons paramétré l'outil ainsi :

- Nous y avons entré les différentes parts modales, exprimées en km/jour/personne pour chaque zone et chaque scénario. Les parts modales de la marche et du vélo ont été comptées ensemble, la part de la marche étant stable.
- Nous avons considéré qu'il fallait 3 ans pour arriver à ces parts modales.
- Nous avons exclus de nos résultats la traduction économique de la valeur d'évitement d'un décès.

Élément différent entre S' et Sref	Type de modification	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€)	Surcoût à l'année S'/Sref (M€)	Hypothèse d'allocation des coûts
VAE, s-pedelecs, tricycles	Création	0,13	€/vkm	6,99	Gvkm	776	1	776	-	776	Ménages
Cargo bikes, e cargo bike, trailers	Création	0,20	€/vkm	776	Mvkm	129	1	129	-	129	Ménages
Cadenas + vélos classiques	Création	425	€/équipement	2 355 468	équipement	834	10	83	-	83	Ménages
Equipements vestimentaires	Création	100	€/adulte	4 358 036	adulte	363	3	121	-	121	Ménages
Autoroutes vélo	Création	460 000	€/km	8 239	km	3 158	30	105	-	105	Public
Routes vélo (=2 bandes cyclables)	Création	40 000	€/km	18 514	km	617	15	41	-	41	Public
Signalisation vélo	Création	3 000	€/km	26 753	km	67	15	4	-	4	Public
Zones 30 dans les agglomérations	Création	0	€/agflo	1 154	agflo	-	15	-	-	-	Public
Transformation stationnement VP en stationnement vélo	Modif	360	€/place	37 028	place	11	15	1	-	1	Public
Ouvrages d'art, ponts anti-coupure	Création	1 000 000	€/ouvrage	231	ouvrage	192	30	6	-	6	Public
Ressources humaines Vélo-école + maison d'info	Création	45 963	€/pers/an	1 698	pers	78	1	78	-	78	Public
Applis, sites web d'infos	Création	0	0	0	0	-	1	-	-	-	Public
Usage de la voiture - achat véhicule	Modif	0,17	€/vkm	20,4	Gvkm	2 959	1	2 959	4 087	- 1 128	Ménages
Usage de la voiture - achat carburant	Modif	0,07	€/vkm	20,4	Gvkm	908	1	908	1 253	- 346	Ménages
Usage de la voiture - entretien et réparation	Modif	0,05	€/vkm	20,4	Gvkm	848	1	848	1 171	- 323	Ménages
								Total annuel (M€)	6 061	6 511	
								Surcoût total annuel (M€)	- 450		

Tableau 77 : Les différents postes de dépenses du scénario Vélo PM, détaillés pour la zone Grande couronne d'Ile de France. 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 7.4.5.2. 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 (€)	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€)	Surcoût à l'année S'/Sref (M€)	Hypothèse d'allocation des coûts
VAE, s-pedelecs, tricycles	Création	0,13	€/vkm	1,6	Gvkm	179	1	179	-	179	Ménages
Cargo bikes, e cargo bike, trailers	Création	0,20	€/vkm	179	Mvkm	30	1	30	-	30	Ménages
Cadenas + vélos classiques	Création	425	€/équipement	2 355 468	équipement	834	10	83	-	83	Ménages
Equipements vestimentaires	Création	100	€/adulte	4 358 036	adulte	363	3	121	-	121	Ménages
Autoroutes vélo	Création	460 000	€/km	8 239	km	3 158	30	105	-	105	Public
Routes vélo (=2 bandes cyclables)	Création	40 000	€/km	18 514	km	617	15	41	-	41	Public
Signalisation vélo	Création	3 000	€/km	26 753	km	67	15	4	-	4	Public
Zones 30 dans les agglomérations	Création	0	€/agglo	1 154	agglo	-	15	-	-	-	Public
Transformation stationnement VP en stationnement vélo	Modif	360	€/place	37 028	place	11	15	1	-	1	Public
Ouvrages d'art, ponts anti-coupure	Création	1 000 000	€/ouvrage	231	ouvrage	192	30	6	-	6	Public
Ressources humaines Vélo-école + maison d'info	Création	45 963	€/pers/an	1 698	pers	78	1	78	-	78	Public
Applis, sites web d'infos	Création	0	0	0	0	-	1	-	-	-	Public
Usage de la voiture - achat véhicule	Modif	0,17	€/vkm	26	Gvkm	3 827	1	3 827	4 087	- 260	Ménages
Usage de la voiture - achat carburant	Modif	0,07	€/vkm	26	Gvkm	1 174	1	1 174	1 253	- 80	Ménages
Usage de la voiture - entretien et réparation	Modif	0,05	€/vkm	26	Gvkm	1 096	1	1 096	1 171	- 75	Ménages
						Total annuel (M€)		6 746	6 511		
						Surcoût total annuel (M€)		235			

Tableau 78 : Les différents postes de dépenses du scénario Vélo volontariste, détaillés pour la zone Grande couronne d'Ile-de-France. 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 7.4.5.2. 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.

Les hypothèses pour chaque zone sont indiquées dans le Tableau 79 ci-dessous :

	<b>Grande couronne IdF</b>	<b>AU Normandie</b>	<b>EMD Rouen</b>	<b>AU Calvados</b>	<b>EMD Havre</b>
Nombre de communes dans la zone	1 154	2 351	271	404	241
Nombre d'ouvrages d'art (ponts vélo)	231	470	54	81	48
Réduction du trafic local PM	28%	31%	37%	30%	32%
Réduction du trafic local Vol	6%	6%	7%	5%	6%
Route communale (km)	18 514	28 630	3 487	4 166	3 188
Route départementale (km)	7 390	21 146	2 076	3 405	1 899
Route nationale (km)	400	410	42	73	39
Autoroutes (km)	449	526	96	78	88

*Tableau 79 : Hypothèses pour les scénarios vélo différenciés pour chaque zone*

Les résultats généraux des scénarios Système vélo pour chaque zone sont exprimés dans les tableaux ci-dessous :

<b>Système vélo PM</b>	<b>Grande couronne IdF</b>	<b>AU Normandie</b>	<b>EMD Rouen</b>	<b>AU Calvados</b>	<b>EMD Havre</b>
<b>Augmentation des dépenses ménages (M€/an)</b>					
Vélos	1110	840	180	190	120
Equipements vélo					
<b>Augmentation des dépenses collectivités territoriales (M€/an)</b>					
Autoroutes vélo					
Bandes cyclables	240	420	50	70	40
Signalisation routière vélo					
Ouvrages d'art vélo					
Vélo-écoles et points d'information					
<b>Réduction des dépenses ménages (M€/an)</b>					
Consommation carburant réduite	-1800	1410	300	330	190
Fréquence d'achat VP réduite					
Besoins d'entretien/réparation/assurance VP réduits					
<b>Surcoût total annuel (M€/an)</b>	<b>-450</b>	<b>-160</b>	<b>-70</b>	<b>-70</b>	<b>-30</b>

*Tableau 80 : Résultats généraux de coûts pour le scénario Système vélo PM, dans chaque zone (chiffres arrondis).*

<b>Système vélo Vol</b>	<b>Grande couronne IdF</b>	<b>AU Normandie</b>	<b>EMD Rouen</b>	<b>AU Calvados</b>	<b>EMD Havre</b>
<b>Augmentation des dépenses ménages (M€/an)</b>					
Vélos	410	270	60	60	40
Equipements vélo					
<b>Augmentation des dépenses collectivités territoriales (M€/an)</b>					
Autoroutes vélo					
Bandes cyclables	240	420	50	70	40
Signalisation routière vélo					
Ouvrages d'art vélo					
Vélo-écoles et points d'information					
<b>Réduction des dépenses ménages (M€/an)</b>					
Consommation carburant réduite	410	290	60	60	40
Fréquence d'achat VP réduite					
Besoins d'entretien/réparation/assurance VP réduits					
<b>Surcoût total annuel (M€/an)</b>	240	400	50	70	40

*Tableau 81 : Résultats généraux de coûts pour le scénario Système vélo Vol, dans chaque zone (chiffres arrondis).*

# 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 qui relient la périphérie d'une agglomération à son centre (mobilité pendulaire). Entrent dans cette catégorie les trains périurbains (RER, Transilien) et les TER, ainsi que certaines offres basées sur le mode bus, 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. Comparé à un BHNS, les distances entre arrêts sont plus grandes sur un Bus Express afin de garantir une vitesse commerciale plus élevée.

Cette section étudie les conséquences induites par le report modal de la voiture particulière et des deux-roues motorisés vers ces modes. Ni les effets d'induction de mobilité, ni les reports modaux depuis les modes autres que la VP ou les deux-roues motorisés (2RM) ne sont considérés. En réalité, de tels reports 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 associées aux modes bus et train), comparativement à la situation où seul le report modal depuis la VP et les 2RM 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 (Fabrique de la Cité 2015)).

Nous nous limiterons à l'étude des TPE pour les agglomérations, c'est-à-dire pour l'agglomération de Calvados, de Rouen, du Havre et d'Ile-de-France. Nous n'étudierons pas les TPE à l'échelle de la Normandie. En effet nous définissons les TPE comme des transports reliant la périphérie d'une agglomération à son centre (mobilité pendulaire). Leur étude n'est donc pertinente que sur les agglomérations.

Pour chacune des agglomérations, nous nous plaçons dans un monde où des lignes de bus express avec des voies réservées sont mises en place sur les axes autoroutiers radiaux existants autour des agglomérations, lorsque les flux sont suffisants. Des investissements sont faits sur le ferroviaire sur le matériel roulant et la signalisation pour augmenter la capacité du train, sans construire de nouvelles voies ferrées.

## 6.1. Méthode générale

Pour évaluer le potentiel maximal des transports publics express, on estime quels déplacements en voiture (VP) ou en deux-roues motorisés (2RM) peuvent être remplacés par des déplacements en train ou en bus express. A partir de ce report de p.km depuis les modes VP/2RM vers le bus ou le train, on déduit l'impact sur différents indicateurs : consommation de carburant fossile, émissions de CO<sub>2</sub> à l'usage et à la production des véhicules, émissions de NOx et particules fines, temps de déplacement moyen.

La méthode utilisée est décrite en Figure 23. Elle consiste à cibler les déplacements en VP/2RM réunissant les caractéristiques suivantes :

- le déplacement débute en heure de pointe, afin de maximiser le remplissage des TPE, et en supposant un avantage comparatif des TPE qui évitent les congestions, plus forte à cette heure de la journée. En effet dans la mobilité locale en jour ouvré en Vallée de la Seine, un peu plus de la moitié des distances est effectuée dans ces heures de pointe.
- sa distance est supérieure à 10 km, pour que le temps de connexion intermodale soit compensé par la vitesse du TPE,
- il va de la périphérie vers le centre ou inversement



- son extrémité périphérique est proche d'une autoroute (pour le bus express) ou d'une gare (pour le train).

Dans ce scénario potentiel maximal on fait l'hypothèse que les personnes effectueront un report modal depuis la voiture ou les 2 roues motorisées vers le train/bus express dès lors que leur déplacement peut être pris en charge par un service de bus express ou de train périurbain. C'est donc une estimation « au plus » ne prenant pas en compte la motivation des personnes à faire ce report modal.

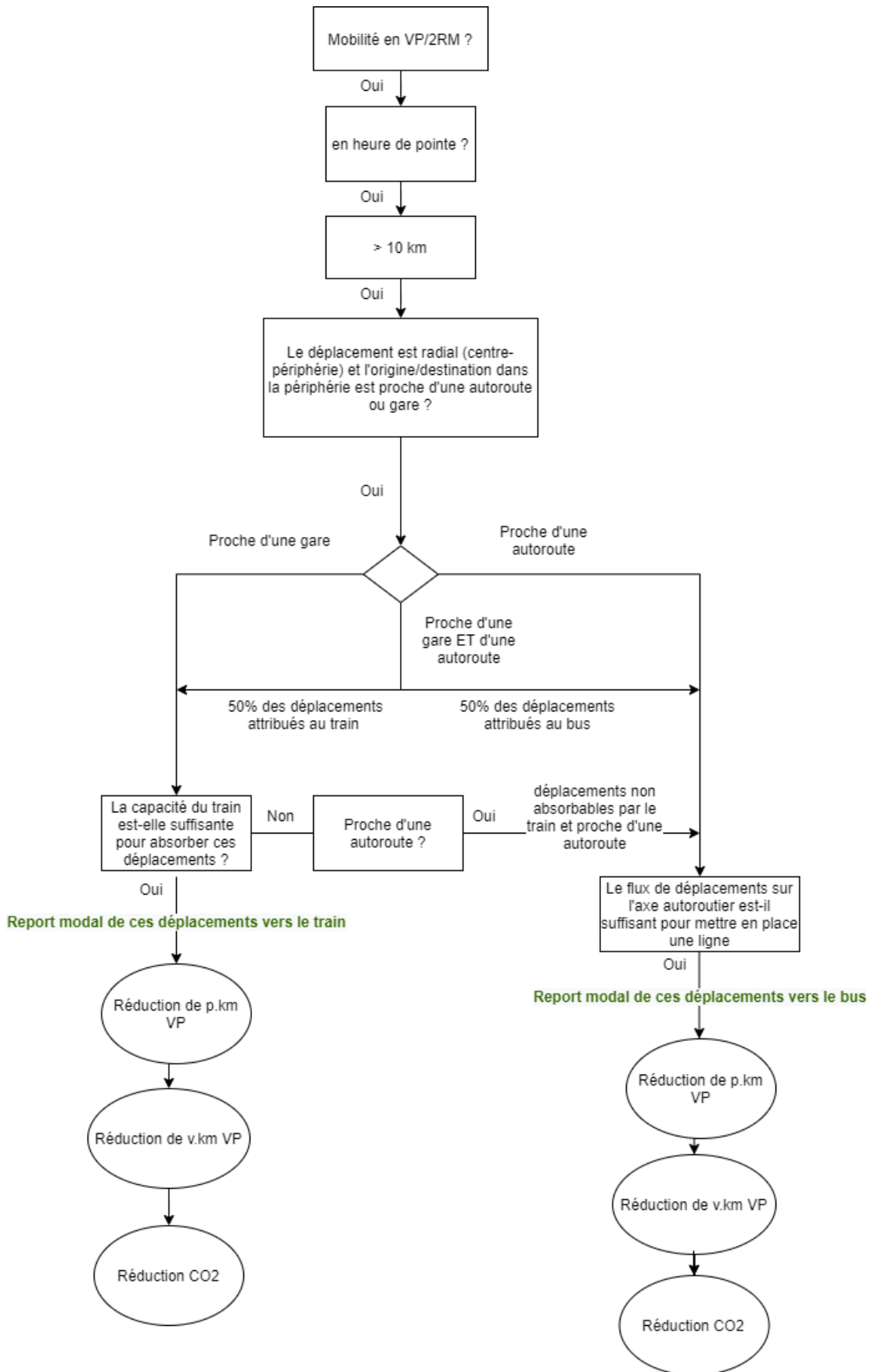


Figure 23 : Méthode de calcul de la réduction de trafic (v.km) dans le scénario TPE PM

### 6.1.1. Etapes de calculs

Pour évaluer le potentiel des TPE, on estime le nombre de déplacements qui seront reportés des modes motorisés individuels vers les TPE, ainsi que leur distance moyenne.

#### 6.1.1.1. Déplacements effectués en VP/2RM

Etant donné que nous cherchons à évaluer le report modal **depuis** les modes voitures et 2 roues motorisées, nous commençons par ne conserver que les déplacements effectués en VP/2RM.

	Grande Couronne d'IDF	Calvados	Rouen	Le Havre
P.km total par jour ouvré (Mp.km)	147	12	13	8
Part modale des VP/2RM (en %pkm)	60%	87%	86%	85%

Tableau 82 : Part des p.km conservés par zone

#### 6.1.1.2. Déplacements en heure de pointe

Les Transports Publics Express, contrairement à la voiture sont des transports collectifs. Pour être efficaces ils ont donc besoin de transporter un nombre important de personnes. En effet un train ou un bus peuvent émettre plus de gaz à effet de serre par personne qu'une voiture s'ils sont peu remplis. Dans ce cadre les heures de pointe où ont lieu la majorité des déplacements sont particulièrement intéressantes pour les TPE.

D'autre part les heures de pointe sont aussi le moment où les routes sont le plus congestionnées. Or nous supposons dans ce scénario que les bus express circulent en sites propres sur les sections congestionnées d'autoroutes. Quant aux trains, ils circulent également sur une infrastructure dédiée et évitent les congestions automobiles. Ainsi ce sont à ces horaires que les TPE, non soumis à la congestion, sont les plus attractifs en termes de vitesse commerciale.

Afin de définir les heures de pointe en jour ouvré, nous nous sommes basé sur une exploitation des horaires de départ des déplacements de plus de 10 km (voir 6.1.1.3). On observe (Figure 24) deux pics de distances parcourues, essentiellement dus au motif domicile-travail, entre 6h et 9h le matin, et entre 16h et 20h le soir.

Dans la mobilité locale en jour ouvré en Vallée de la Seine, un peu plus de la moitié (57%) des distances est effectuée dans ces heures de pointe.

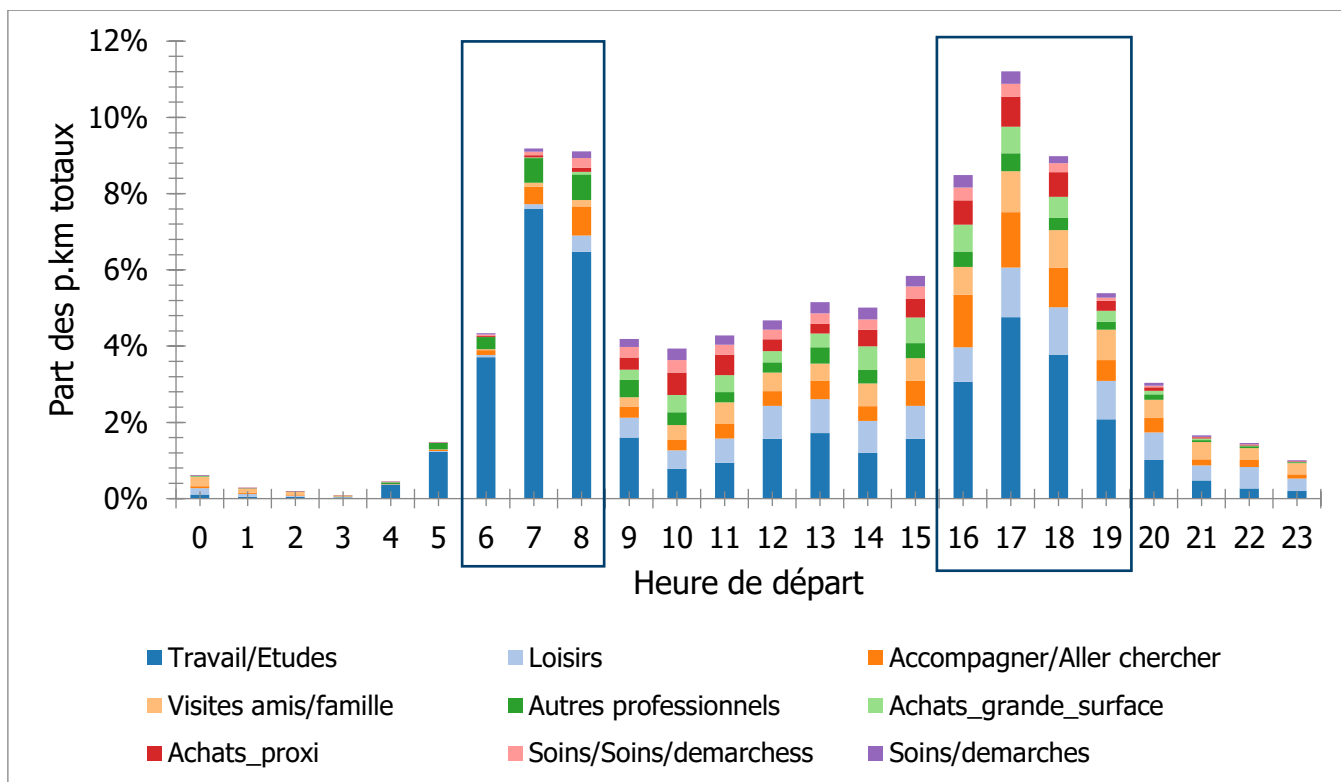


Figure 24 : Distance parcourues en Vallée de la Seine sur des déplacements tous modes de plus de 10 km en fonction de l'heure de départ et du motif.

Cette hypothèse de ne considérer que les déplacements en heure de pointe nous est utile pour simplifier nos calculs d'estimation mais il est à noter qu'il est ressorti de nos entretiens avec des professionnels des transports collectifs qu'une focalisation trop grande sur les heures de pointe était contre-productive.

En effet les comportements des utilisateurs changent et de plus en plus d'utilisateurs ont besoin d'une offre de transport qui ne se limite pas aux heures de pointe. De plus lorsqu'une large amplitude horaire ainsi qu'un cadencement régulier est proposé, l'utilisateur est rassuré par le niveau de service. Des professionnels reportent une augmentation du report modal vers les transports en commun supérieure aux estimations lorsque le niveau de service atteint une qualité d'offre sécurisante.

	Grande Couronne d'IDF	Calvados	Rouen	Le Havre
P.km total par jour ouvré (Mp.km)	147	12	13	8
Part des p.km VP/2RM	60%	87%	86%	85%
<i>Parmi les p.km VP/2RM</i> Part des p.km en heure de pointe	62%	56%	63%	62%

Tableau 83 : Part des p.km conservés par zone

### 6.1.1.3. Déplacements supérieurs à 10 km

Pour qu'un report modal vers les TPE s'opère, il faut que l'utilisation de ceux-ci soit compétitive en terme de temps vis à vis de la voiture. Comparons le temps de transport d'un déplacement en VP et en TPE. Nous connaissons les temps de déplacement en VP grâce aux données des Enquêtes Ménages Déplacement. Pour estimer le temps d'un déplacement en TPE on fait les hypothèses suivantes (voir Figure 25) :

- 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)
- Lorsque le déplacement « après » est fait en train on suppose que la distance parcourue est égale à la distance parcourue sur le trajet « avant » divisé par 1,1 (pour prendre en compte le fait que le train parcourt une trajectoire généralement plus rectiligne, donc plus courte que celle faite en VP).

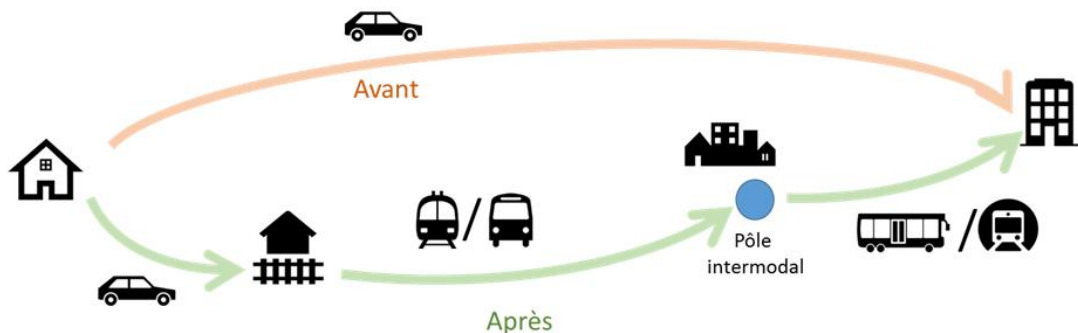


Figure 25 : Représentation du modèle de report modal de la VP vers un TPE.

- Les paramètres suivants ont été fixés :
  - Le premier segment est supposé être fait en VP à une vitesse moyenne de 30 km/h
  - Le bus express est supposé rouler à une vitesse commerciale de 55 km/h (déterminé à partir des horaires des lignes existantes)
  - Le train est supposé rouler à une vitesse commerciale de 50 km/h en grande couronne d'IDF et 80 km/h en Normandie (vitesse moyenne respective du Transilien/RER et TER, (ARAFER 2017)).
  - 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% de la distance parcourue
  - Le 2<sup>ème</sup> segment fait en TPE est d'une longueur de 80% de la distance parcourue

- Entre chaque segment, une durée d'intermodalité est simulée :
  - 8 min pour passer de la VP aux TPE
  - 8 min pour accéder aux transports urbains du dernier segment

A partir de ces hypothèses on peut calculer qui de la VP ou des TPE sera le plus rapide selon la distance du déplacement et la vitesse moyenne de la VP.

Zone	Vitesse moyenne VP
Grande couronne d'IDF	27
Calvados	46
Rouen	35
Le Havre	46

*Tableau 84 : Vitesse moyenne observée sur les déplacements reportables vers les TPE dans les zones étudiées.*

On observe logiquement que plus la vitesse moyenne de la VP est basse, plus les TPE sont compétitifs. Et plus la distance du déplacement est grande plus les TPE sont compétitifs. En effet les TPE ont une vitesse commerciale plus grande que la VP, mais sont désavantagés sur les petites distances par les temps d'intermodalité.

		Vitesse moyenne VP (km/h)			
		20	25	30	35
Distance du déplacement (km)	3	VP	VP	VP	VP
	5	VP	VP	VP	VP
	7	VP	VP	VP	VP
	10	Bus Express	VP	VP	VP
	15	Bus Express	VP	VP	VP
	20	Bus Express	Bus Express	VP	VP
	25	Bus Express	Bus Express	VP	VP
	30	Bus Express	Bus Express	Bus Express	VP
	35	Bus Express	Bus Express	Bus Express	VP
	40	Bus Express	Bus Express	Bus Express	VP

*Tableau 85 : Zone de pertinence de la VP et du Bus Express selon la distance du déplacement (km) et la vitesse moyenne de la VP (km/h).*

*Clé de lecture : si la VP a une vitesse moyenne de 25 km/h sur le déplacement complet, la VP est plus rapide que le bus si ce déplacement est inférieur à 20 km. Au-dessus de 20 km le Bus express est plus rapide que la VP.*

		Vitesse moyenne VP (km/h)			
		20	25	30	35
Distance du déplacement (km)	3	VP	VP	VP	VP
	5	VP	VP	VP	VP
	7	VP	VP	VP	VP
	10	Train	VP	VP	VP
	15	Train	Train	VP	VP
	20	Train	Train	Train	VP
	25	Train	Train	Train	VP
	30	Train	Train	Train	Train
	35	Train	Train	Train	Train
	40	Train	Train	Train	Train

Tableau 86 : Zone de pertinence de la VP et du Train selon la distance du déplacement (km) et la vitesse moyenne de la VP (km/h) en Normandie.

Clé de lecture : si la VP a une vitesse moyenne de 25 km/h, la VP est plus rapide que le train sur des déplacements inférieurs à 15 km. Au-dessus de 15 km le train est plus rapide.

Dans le cas le plus favorable aux TPE, avec une forte congestion automobile (vitesse moyenne VP de 20 km/h), ce n'est qu'à partir de 10 km que le bus express et le train sont compétitifs. Dans le cadre du scénario potentiel maximal, on suppose que les déplacements de moins de 10 km ne sont pas reportables vers les TPE. Les déplacements de plus de 10 km sont reportables vers les TPE s'ils respectent en plus les conditions des sections suivantes.

	Grande Couronne d'IDF	Calvados	Rouen	Le Havre
P.km total par jour ouvré (Mp.km)	147	12	13	8
Part des p.km VP/2RM	60%	87%	86%	85%
<i>Parmi les p.km VP/2RM</i> Part des p.km en heure de pointe	62%	56%	63%	62%
<i>Parmi les p.km VP/2RM en heure de pointe</i> Part des p.km > 10 km	76%	75%	68%	71%

Tableau 87 : Part des p.km conservés par zone

#### 6.1.1.4. Déplacements radiaux

Dans l'optique de capter les forts flux, nous nous limitons aux déplacements radiaux. En effet après analyse des flux de déplacements dans les agglomérations, les plus forts flux sont ceux qui relient la périphérie au centre. Nous définissons un déplacement radial comme un déplacement dont une extrémité se situe dans la commune centre de la métropole (Calvados, Rouen ou Le Havre, pour le

cas de la grande couronne d'IDF voir 4.a) et l'autre extrémité est en dehors de cette commune centre. Le déplacement peut donc aller de la périphérie vers le centre ou du centre vers la périphérie.

		Destination	
		Centre	Périphérie
Origine	Centre		X
	Périphérie	X	

Tableau 88 : Définition du caractère radial ici: un trajet est dit radial si son couple Origine-Destination est coché dans cette matrice.

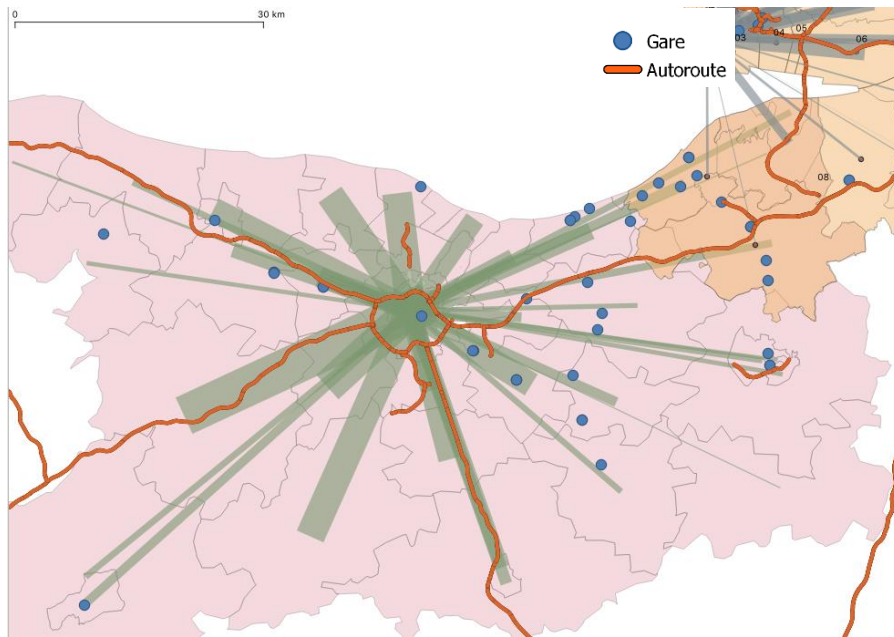


Figure 26 : Carte des flux de déplacements radiaux entre les zones de tirage<sup>25</sup> et la ville-centre Calvados sur le Calvados

<sup>25</sup> Le découpage en zone de tirages est le découpage le plus petit permettant de conserver un nombre de déplacement statistiquement significatif



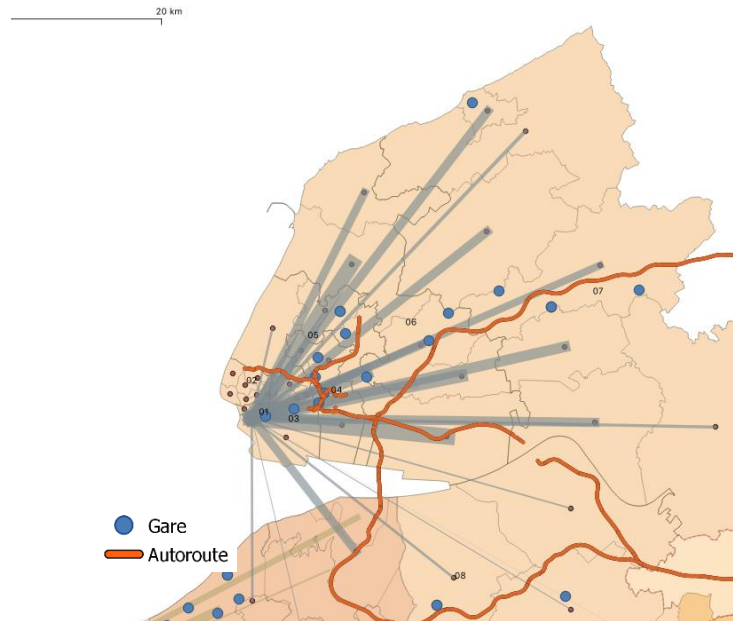


Figure 27 : Carte des flux de déplacements radiaux entre les zones de tirage et la ville-centre sur la métropole du Havre

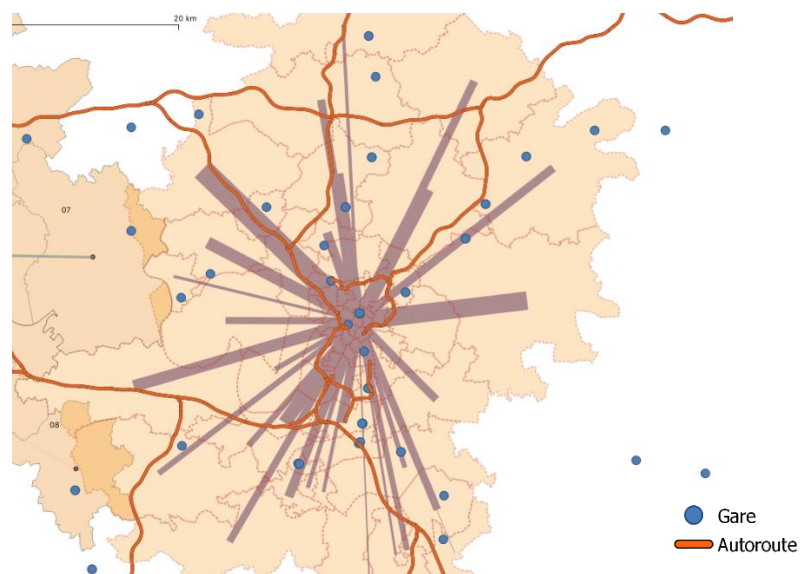


Figure 28 : Carte des flux de déplacements radiaux entre les zones de tirage et la ville-centre sur la métropole de Rouen

	GC-IDF	Calvados	Rouen	Le Havre
P.km total par jour ouvré (Mp.km)	147	12	13	8
Part des p.km VP/2RM	60%	87%	86%	85%
<i>Parmi les p.km VP/2RM</i> Part des p.km en heure de pointe	62%	56%	63%	62%
<i>Parmi les p.km VP/2RM en heure de pointe</i> Part des p.km > 10 km	76%	75%	68%	71%
<i>Parmi les p.km VP/2RM en heure de pointe &gt; 10 km</i> Part des p.km radiaux	22%	36%	29%	36%
<i>Parmi tous les p.km</i> Part des p.km VP/2RM en heure de pointe > 10 km radiaux	6,2%	13,3%	10,8%	13,4%

*Tableau 89 : Récapitulatif des p.km susceptibles d'être reportés vers les TPE par zone*

#### *6.1.1.5. Dont l'extrémité périphérique est proche d'une gare ou d'une autoroute*

Mais le fait que le déplacement soit radial ne suffit pas à assurer qu'il soit faisable en TPE. Il faut aussi que les TPE soient accessibles. Par définition chaque déplacement radial a une extrémité dans la ville-centre de la métropole, supposée accessible aux TPE par des pôles intermodaux connectant les TPE et les TC urbains de la ville-centre. La condition de l'accessibilité des TPE porte donc sur la localisation de l'extrémité périphérique du déplacement. Il faut que cette extrémité soit proche d'une gare (pour que le trajet soit reporté vers le train) ou d'une autoroute (pour qu'il soit reporté vers le bus express).

Nous faisons les hypothèses suivantes :

- Les déplacements radiaux dont l'extrémité périphérique se situe à moins de 5 km d'une gare et à moins de 5 km d'une autoroute sont reportés à 50% vers le train et à 50% vers le bus express
- Les déplacements radiaux dont l'extrémité périphérique se situe à moins de 5 km d'une gare mais à plus de 5 km d'une autoroute sont reportés vers le train
- Les déplacements radiaux dont l'extrémité périphérique se situe à moins de 5 km d'une autoroute mais à plus de 5 km d'une gare sont reportés vers le bus express

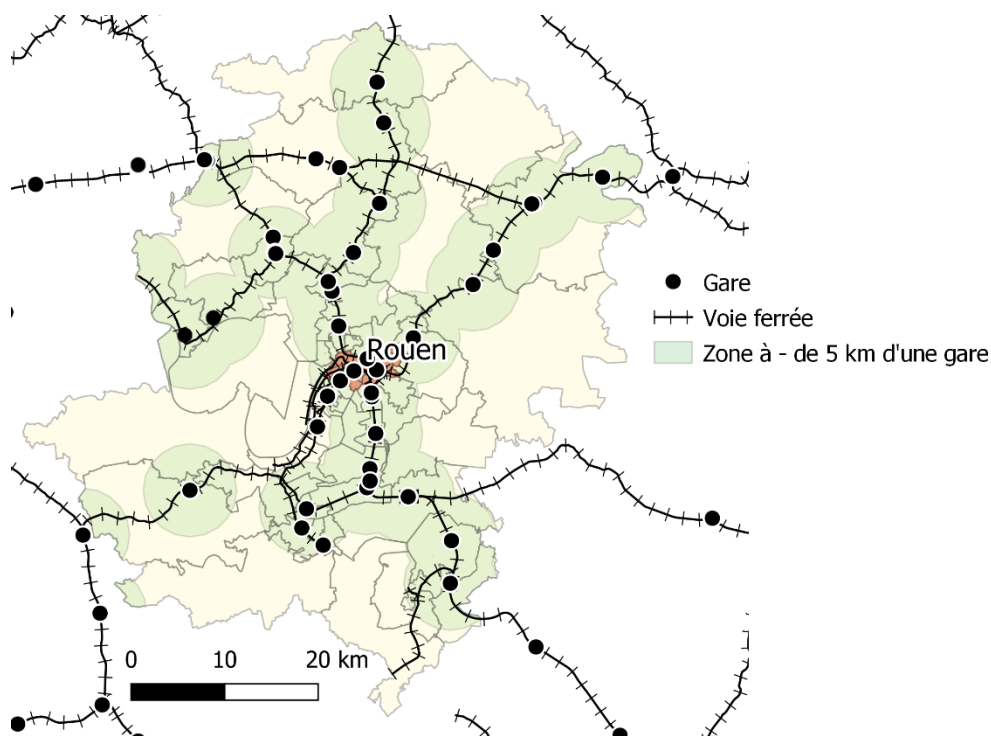
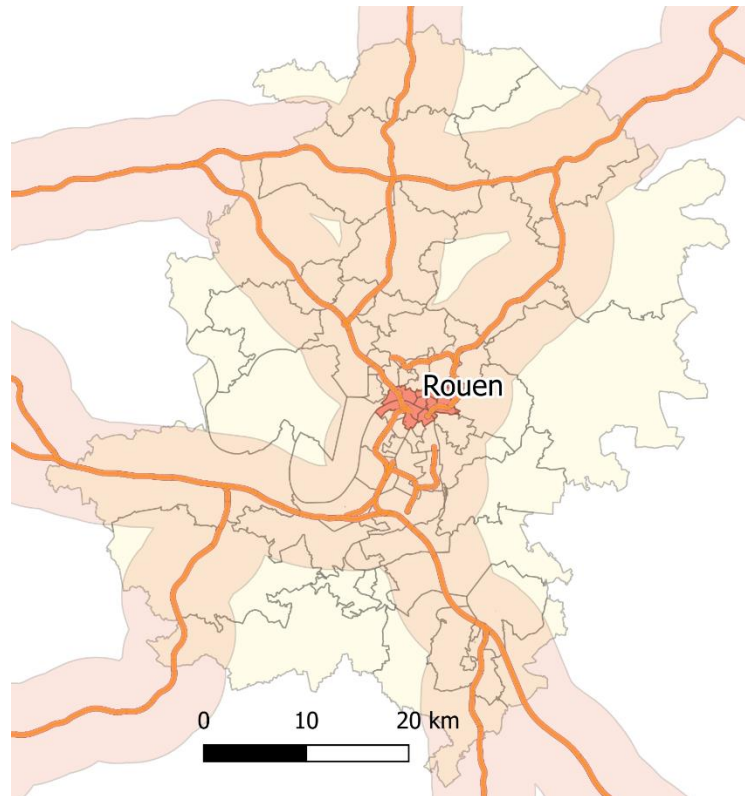


Figure 29 : Carte du réseau ferré sur la métropole de Rouen. La zone en vert correspond aux 5 km autour des gares. Un déplacement avec une extrémité dans Rouen (en rouge) et une autre extrémité en zone vert est éligible à un report vers le TER.

Certaines gares sur cette carte sont hors service ou utilisées seulement pour le fret ce qui pourrait suggérer que le potentiel du train est surestimé. Néanmoins pour estimer la capacité du train, nous partons de la fréquentation du train existante par zone (à partir des données des enquêtes déplacements). Ainsi si une gare n'est utilisée que pour le fret, la fréquentation du train de la zone sera de 0 et l'estimation de la capacité supplémentaire de la zone de tirage sera de  $1,85 * 0 = 0$ .



*Figure 30 : Carte du réseau autoroutier (en orange) sur la métropole de Rouen. La zone orangée correspond aux 5 km autour de l'autoroute. Un déplacement avec une extrémité dans Rouen (en rouge) et une autre extrémité proche d'une autoroute est éligible à un report vers le bus express.*

#### Espacement entre échangeurs<sup>26</sup> autoroutiers

Par analogie avec les gares, nous aurions aimé raisonner à partir des échangeurs autoroutiers pour déterminer quels déplacements sont reportables vers les autoroutes. Néanmoins nous n'avons pas trouvé de données satisfaisantes sur la localisation des échangeurs autoroutiers en Vallée de la Seine.

Quelle différence y aurait-il si nous avions utilisé la distance à l'échangeur le plus proche plutôt qu'à l'autoroute ? Cela dépend de l'espacement entre échangeurs. Celui-ci varie selon la localisation de l'autoroute. En milieu urbain l'espacement entre échangeurs est plus faible qu'en milieu rural, mais il peut varier significativement. Par exemple l'A150 au nord-est de Rouen comporte 5 entrées/sorties sur 34 km soit un espacement moyen entre chaque échangeur de 6,8 km. Sur l'A151 au nord de Rouen, on compte 7 entrées/sorties sur 16 km soit un espacement moyen de 2,3 km.

---

<sup>26</sup> On appelle ici échangeur toute infrastructure permettant d'entrer ou de sortir de l'autoroute



Figure 31 : Carte des autoroutes autour de Rouen. On peut y voir 2 autoroutes urbaines : A150 et l'A151

Pour un espacement moyen entre 2 échangeurs de 5 km, l'aire des 5 km autour des échangeurs vaut 96% de l'aire des 5 km autour de l'autoroute (voir Figure 37). Puisque nos zones d'études se situent principalement en milieu urbain, l'aire à moins de 5 km des autoroutes semble être une approximation satisfaisante de l'aire à moins de 5 km des échangeurs.

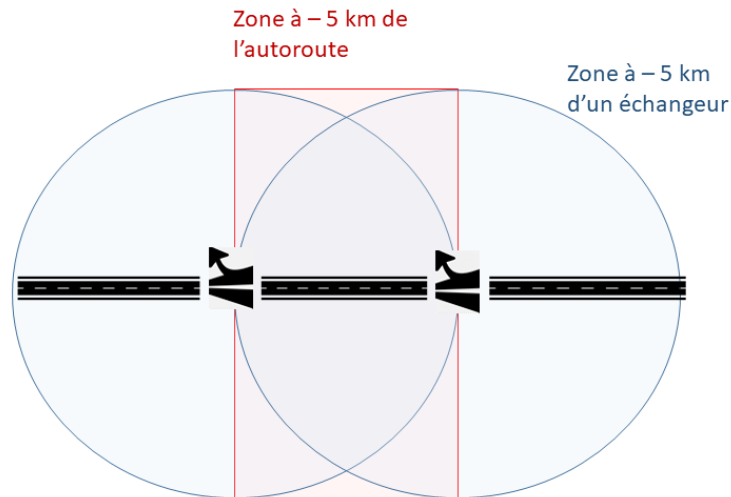


Figure 32 : Zone à moins de 5 km de l'autoroute (en rouge) et zone à moins de 5 km des échangeurs (en bleu) pour un espacement entre échangeurs de 5 km. On constate par un calcul d'intégrale que l'aire bleu est égale à 96% de l'aire rouge.

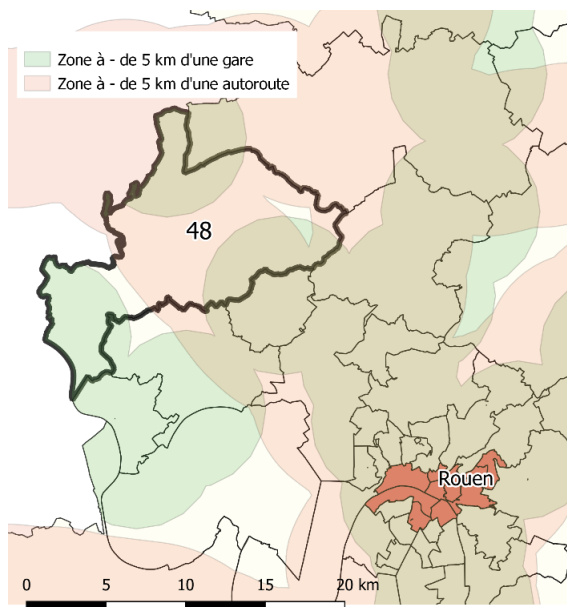
### Utilisation des zones de tirage

Nous ne connaissons pas la position précise du point de départ et d'arrivée des déplacements dans les zones. Il est donc impossible de savoir pour chaque déplacement de l'enquête, s'il est à moins de 5 km d'une autoroute ou d'une gare. Par contre nous connaissons la zone de départ et d'arrivée selon différents découpage du territoire plus ou moins précis. L'un de ces découpages est le découpage en zone de tirage : c'est le zonage le plus précis conservant assez d'échantillons dans la zone pour pouvoir être utilisé de manière statistiquement significatif. On raisonne donc à partir des zones de tirage<sup>27</sup>. On estime le nombre de déplacements reportables vers les TPE pour chacune des

<sup>27</sup> Sauf pour la grande couronne d'IDF où le zonage en zone de tirage n'est pas disponible. Dans ce cas nous raisonnons au niveau de la commune.

zones de tirage. En sommant ces déplacements on aboutit au nombre de déplacements reportables vers les TPE total.

Dans ce but, pour chaque zone de tirage, on calcule quelle part de la zone est proche d'une autoroute, d'une gare ou des deux.



Zone de tirage	Part proche d'une gare et d'une autoroute	Part seulement proche d'une gare	Part seulement proche d'une autoroute	Part proche ni d'une gare, ni d'une autoroute
N°48	36%	20%	39%	5%

Figure 33 : Exemple du calcul de la part du territoire proche d'une gare et d'une autoroute pour la zone de tirage N°48.

Clé de lecture : Sur la zone N°48 (en gras sur la carte), 36% de la zone est proche d'une gare et d'une autoroute (zone en vert et orange), 20% est proche seulement d'une gare (zone en vert), 39% est seulement proche d'une autoroute (zone en orange), 5% n'est proche ni d'une gare, ni d'une autoroute (en blanc).

D'autre part, pour chaque zone de tirage, on calcule avec les données de l'Enquête Ménages Déplacements le nombre de déplacements, en VP/2RM, en heures de pointe, supérieurs à 10 km, radiaux (aller ou retour), par jour ouvré. C'est le nombre de déplacements éligibles aux TPE de la zone de tirage par jour ouvré, avant le filtre sur l'accessibilité des TPE.

Zone de tirage	Nombre de déplacements éligibles aux TPE
N°48	3232

Tableau 90 : Nombre de déplacements chaque jour ouvré, éligibles vers les TPE (avant filtre sur l'accessibilité) pour la zone de tirage N°48

A partir de ce nombre de déplacements reportables vers les TPE de la zone et de la part de la zone proche d'une autoroute et d'une gare (Figure 35), on peut en déduire le nombre de déplacements reportables vers chacun des modes.

Zone de tirage	Nombre de déplacements reportables vers train/bus	Nombre de déplacements reportables seulement vers train	Nombre de déplacements reportables seulement vers bus
N°48	1173	653	1 257

*Tableau 91 : Nombre de déplacements reportables vers le train et le bus pour la zone de tirage 48. 36% de la zone 48 est proche d'une gare et d'une autoroute donc  $0,36 \times 3232 = 1173$  déplacements sont reportables vers le train ou le bus.*

#### 6.1.1.6. Limite de capacité 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 élevés dans ce type d'infrastructure, et car les temps de construction sont trop longs au regard de notre horizon à 10 ans. Le train ne peut pas donc pas accueillir un nombre illimité de déplacements supplémentaires.

Nous faisons les hypothèses suivantes :

- Le taux de remplissage actuel du train aux heures de pointe est de 100% pour la grande couronne d'IDF et de 70% à Rouen, sur le Calvados et le Havre. Cette estimation a été faite à partir des données de taux de remplissage des trains de Normandie fournies par la Direction Mobilités et Infrastructure de la région Normandie.
- D'autre part, en remplaçant le matériel roulant, en augmentant les cadences et en optimisant la signalisation, on peut augmenter de 30% la capacité du ferroviaire dans toutes les zones à horizon 2030 sans ajouter de nouvelles voies ferrées.

En combinant ces deux hypothèses, nous faisons l'hypothèse que pour Rouen, le Calvados et le Havre, le taux de remplissage des trains en heure de pointe peut au maximum passer de 70% à 130% soit +85% d'augmentation pour chaque zone de tirage. Pour la grande couronne d'IDF, le taux de remplissage peut au maximum passer de 100 à 130% soit +30% d'augmentation pour chaque zone.

La part du train dans les déplacements des habitants de grande couronne d'IDF étant très supérieure à celle des déplacements par les habitants des métropoles normandes, le potentiel d'augmentation du train est très différent selon les zones :

	GC-IDF	Calvados	Rouen	Le Havre
Part du train dans les p.km	31,5%	0,7%	1,6%	2,2%
Augmentation maximale des p.km train dans le scénario PM	30%	85%	85%	85%
Augmentation maximale du train en % des p.km total dans le scénario PM	9,4%	0,6%	1,3%	1,8%

*Tableau 92 : Gain maximal du train en % des p.km total pour chaque zone*



A Rouen, pour la zone de tirage N°48 on limite le nombre de déplacements reportables vers le train à une augmentation maximale de 85 % du nombre de déplacements en train, selon le calcul suivant :

Zone de tirage	Nombre de déplacements actuellement fait en train	Nombre maximum de déplacements reportables vers le train
N°48	780	$780 \times 0,85 = 663$

Tableau 93 : Nombre maximum de déplacements reportables vers le train pour la zone de tirage N°48.

Calculons maintenant le nombre de déplacements finalement reportés vers le train et le bus.

- On commence par calculer le nombre de déplacements reportés vers le train
  - On commence par reporter les déplacements reportables seulement vers le train (653 déplacements, voir Tableau 91) tant qu'on n'atteint pas la limite (663 déplacements, voir Tableau 93).
  - La limite de capacité du train n'est pas atteinte. On peut donc continuer à reporter vers le train au maximum la moitié des déplacements reportables vers le train et le bus (1173 déplacements, voir Tableau 91), tant qu'on n'atteint pas la limite de 663.
  - Après avoir reporté 10 déplacements, on atteint la limite de 663 déplacements. Le nombre de déplacements reportés vers le train est donc de 663.
- Puis on calcule le nombre de déplacements reportés vers le bus, cette fois-ci il n'y a pas de limite (on suppose que des lignes de bus express se mettent en place, et que l'infrastructure autoroutière avec des sections dédiées au bus est suffisamment capacitaire).
  - On prend donc les déplacements reportables seulement vers le bus (1257, voir Tableau 91)
  - On ajoute tous les déplacements reportables vers le train ou le bus qui n'ont déjà été attribués au train, soit  $1173 - 10 = 1163$  déplacements.
  - Au total  $1257 + 1163 = 2420$  déplacements sont reportables vers le bus

Zone de tirage	Nombre de déplacements reportés vers train	Nombre de déplacements reportés vers bus
N°48	663	2 420

Tableau 94 : Nombre de déplacements reportés vers le train et le bus pour la zone de tirage N°48

On détermine ainsi le nombre de déplacements reportables vers le train et le bus pour chaque zone de tirage.

#### 6.1.1.7. Flux minimum pour mettre en place une ligne de bus express

Le bus express a l'avantage d'être plus flexible que le train, on peut affecter des autocars ou des minibus plus ou moins grands selon la fréquentation à ce moment-là. Néanmoins, pour qu'une ligne de bus express soit pertinente sur le plan économique et environnemental, il faut que les bus soient suffisamment remplis. En discutant avec des experts nous avons retenu un seuil de 800 déplacements par jour (dans les deux sens confondus) minimum pour que la mise en place d'une ligne de bus express soit pertinente. Nous faisons l'hypothèse que si une ligne de bus express est empruntée par moins de 800 déplacements par jour alors la ligne de bus n'est pas mise en place et ces déplacements ne sont pas reportés vers le bus.



Nous avons donc estimé le flux de déplacements sur chaque ligne de bus express mise en place. Ainsi nous avons regroupé les zones de tirage qui pourraient être desservies par une même ligne de bus express en « zone de ligne de bus express ». Puis pour chaque zone de bus express nous avons estimé le nombre de déplacements par jour qui emprunteraient la ligne de bus express dans notre scénario.

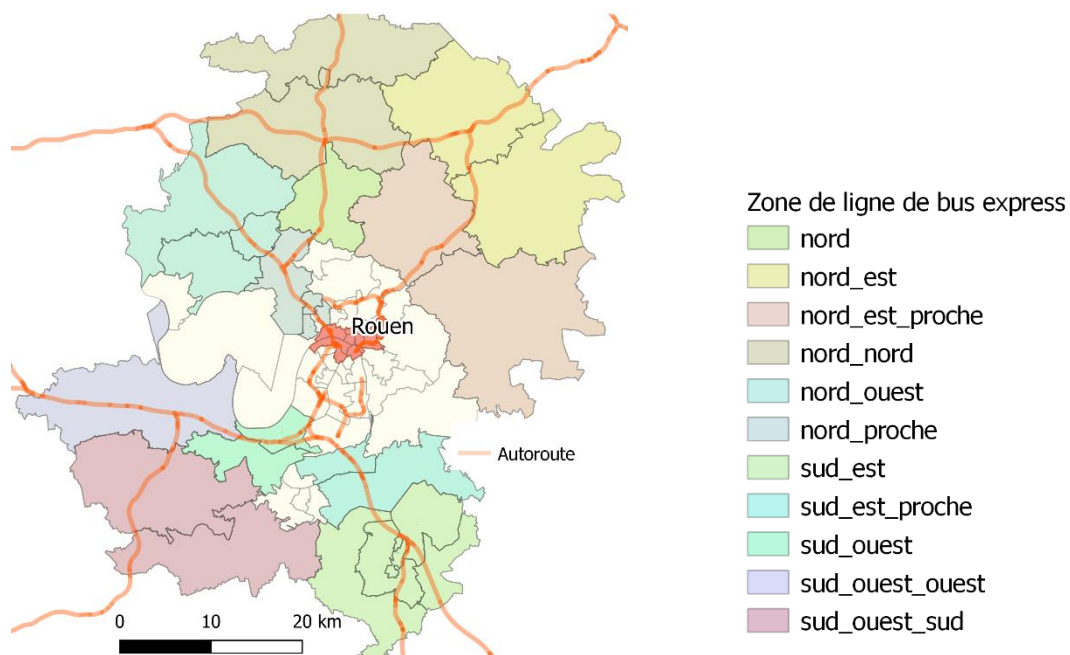


Figure 34 : Découpage de la périphérie de la métropole de Rouen en 11 «zones de ligne de bus express ». On imagine qu'on met en place une ligne de bus express entre chaque zone colorée et Rouen.

Zone de ligne de bus express	Nombre de déplacements par jour
nord	1 194
nord_est	1 182
nord_est_proche	2 077
nord_nord	933
nord_ouest	4 173
nord_proche	1 329
sud_est	1 498
sud_est_proche	1 296
sud_ouest	3 209
sud_ouest_ouest	2 346
sud_ouest_sud	912

Tableau 95 : Nombre de déplacement par jour pour chaque ligne de bus express à Rouen

Dans les faits, dans toutes les métropoles étudiées, toutes les « zones de ligne de bus express » réalisent plus de 800 de déplacements par jour. Ce filtre n'enlève pas de déplacements.

### 6.1.1.8. Aggrégation sur les zones de tirage

On effectue ces calculs pour toutes les zones de tirage :

Zone de tirage	Nombre de déplacements reportés vers le train	Nombre de déplacements reportés vers le bus	Distance moyenne des déplacements reportés (en km)	P.km reportés vers le train (en p.km)	P.km reportés vers le bus (en p.km)
N°10	0	50	10	0	512
N°11	0	1 198	11	0	13 488
...	...	...	...	...	...
N°45	0	634	21	0	13 371
N°47	0	1 176	22	0	25 813
N°48	663	2 420	25	16 337	59 588
N°49	626	2 967	19	11 758	55 749
...	...	...	...	...	...

Tableau 96 : Nombre de déplacement et p.km par jour ouvré reportés vers le bus et le train pour les zones de tirage de l'agglomération de Rouen. Pour obtenir les p.km, nous multiplions le nombre de déplacements reportés (respectivement vers le train et vers le bus express) par leur distance moyenne.

En agréant les zones de tirage on aboutit au nombre de déplacements et de p.km reportés vers le bus et le train.

Zone	Nombre de déplacements reportés vers le train	Nombre de déplacements reportés vers le bus	Distance moyenne des déplacements reportés (en km)	P.km reportés vers le train (en p.km par jour)	P.km reportés vers le bus (en p.km par jour)
Rouen	3 411	49 770	21	83 103	1 019 614

Tableau 97 : Nombre de déplacements et p.km par jour ouvré reportés vers le bus et le train pour l'agglomération de Rouen

### 6.1.2. Radialité pour la Grande Couronne d'IDF

Le cas de la grande couronne d'IDF est différent des métropoles normandes étudiées. En effet dans ce cas notre zone d'étude n'est pas la métropole dans sa globalité mais seulement la couronne périphérique. De plus, cette agglomération est beaucoup plus grande que les agglomérations normandes.

Dans les métropoles précédentes nous avons considéré qu'un trajet était radial si son l'extrémité centrale était dans la ville-centre. Pour la grande couronne d'IDF cela reviendrait à ne considérer que les déplacements entre Paris et la grande couronne. Or une part significative des déplacements en VP, en heures de pointe, radiaux se font entre la grande couronne et la petite couronne. Certains de ces déplacements empruntent une autoroute ou une voie ferrée qui traverse et s'arrête en petite

couronne sur le chemin de Paris. Ces déplacements pourraient donc être reportés vers les TPE. Pour les prendre en compte nous modifions, par rapport aux métropoles normandes, la définition des déplacements radiaux, de la manière suivante :

- Un déplacement est radial en grande couronne d'IDF si son extrémité périphérique est située en grande couronne d'Ile-de-France et si son extrémité centrale est située à Paris ou dans le *quart* de zone de petite couronne adjacente à sa trajectoire.

Concrètement on positionne chaque commune d'Ile-de-France selon son « angle » par rapport à l'axe partant du centre de Paris vers le Nord, dans le sens horaire. Cet angle est une valeur décimale entre 1 et 12 par analogie avec une horloge. Une commune avec un angle de 6 est donc au sud de Paris. Le quart d'une horloge correspond à une amplitude de 3 heures, soit une amplitude de plus ou moins 1,5 heure autour d'un angle donné. La condition de radialité s'exprime alors de la manière suivante :

- Un déplacement est radial en grande couronne d'IDF si son extrémité périphérique est située en grande couronne d'Ile-de-France et
  - si son extrémité centrale est située à Paris
  - ou si son extrémité centrale est située en petite couronne, et que l'angle entre la commune de l'extrémité périphérique et la commune de l'extrémité centrale est inférieur à 1,5.

Par exemple, pour une commune de grande couronne avec un angle de 3,2, le déplacement est radial si l'extrémité centrale est une commune de petite couronne avec un angle compris entre  $3,2 - 1,5 = 1,7$  et  $3,2 + 1,5 = 4,7$ .

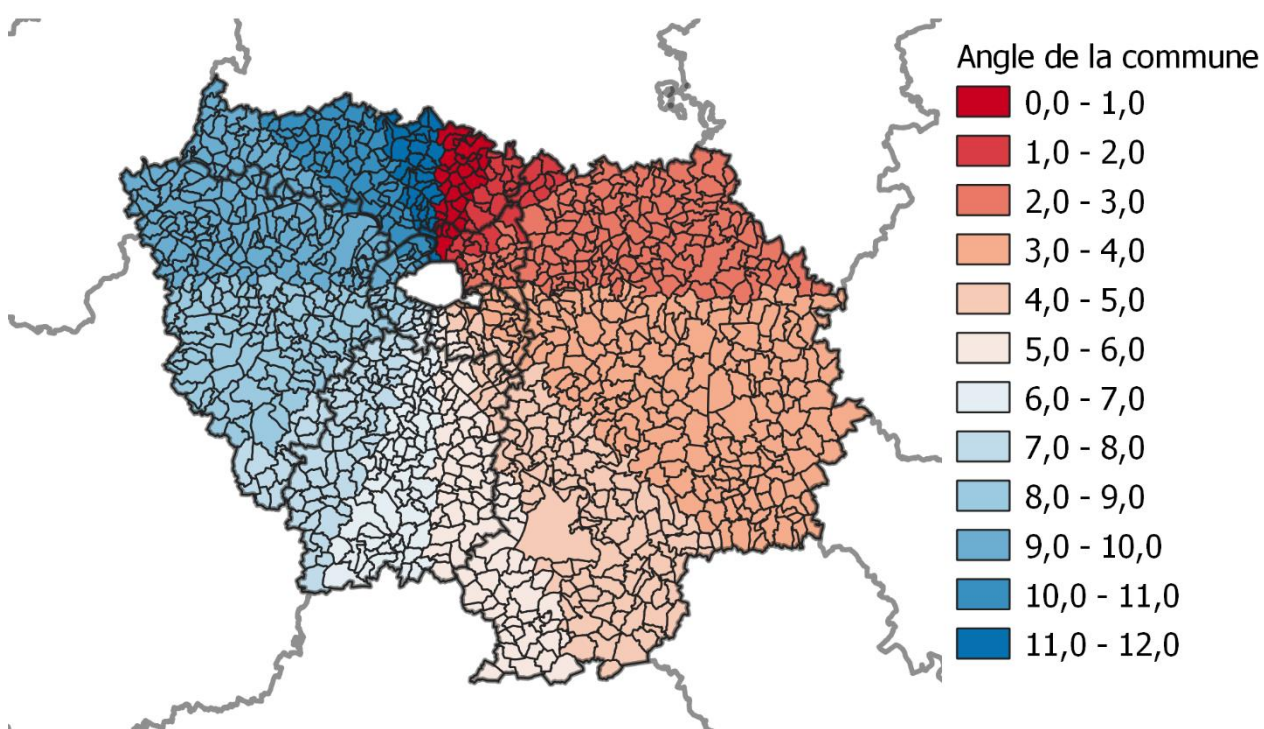


Figure 35 : Carte des communes d'Ile-de-France selon leur angle

## 6.2. Résultats

### 6.2.1. Résultats généraux

Voici les résultats généraux de nos cinq zones d'études sur le domaine d'action TPE :

	GC-IDF	Calvados	Rouen	Havre
Distances parcourues (p.km)	Inchangées			
Trafic voiture (v.km)	-10,6%	-10,6%	-8,7%	-9,9%
CO <sub>2</sub> ACV	-7,1%	-7,1%	-5,3%	-6,0%

Tableau 98 : Résultats généraux du scénario TPE PM sur nos 4 zones d'étude

### 6.2.2. Résultats sur la mobilité

Voici une synthèse des reports modaux qu'on obtient par ces calculs, sur les quatre agglomérations incluses dans notre étude. A partir de ces reports modaux en p.km depuis la VP/2RM vers le bus et le train, on peut calculer les conséquences sur la consommation d'énergie, les émissions de CO<sub>2</sub>, de NO<sub>x</sub> et de particules fines.

	GC-IDF	Calvados	Rouen	Le Havre
P.km total par jour ouvré	147 000 000	11 700 000	13 500 000	8 030 000
Part des p.km VP/2RM en heure de pointe > 10 km radiaux parmi tous les p.km	6,2%	13,3%	10,8%	13,4%
Part des p.km reportée vers le train	1,5%	0,1%	0,6%	0,2%
Part des p.km reportée vers le bus	4,6%	8,0%	7,6%	7,6%
Part des p.km reportée vers les TPE	6,1%	8,1%	8,2%	7,8%

Tableau 99 : Résultats sur la mobilité des scénarios TPE PM

On peut observer sur les figures suivantes comment les parts modales en p.km ont évolué dans le cas de la grande couronne d'IDF et de Rouen.

Evolution des parts modales (en p.km) dans le scénario TPE  
PM en grande couronne d'IDF

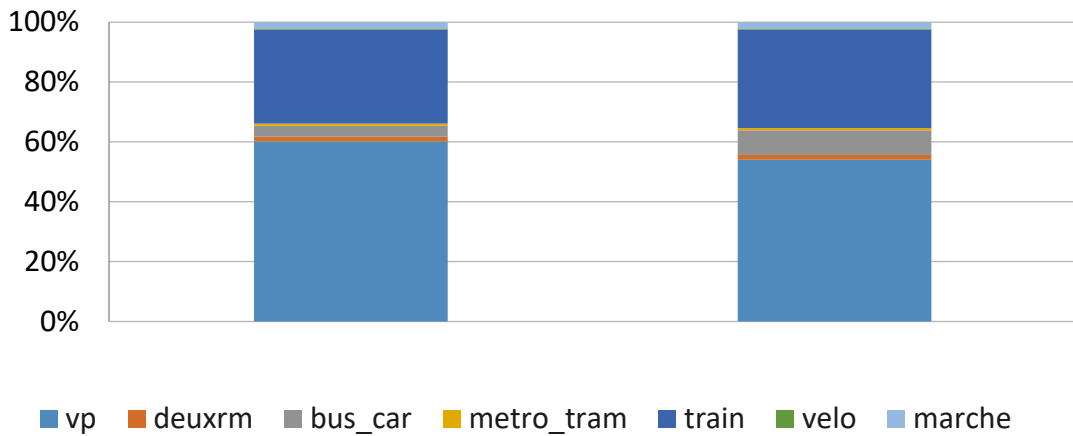


Figure 36 : Évolution des parts modales (en p.km) dans le scénario TPE PM en grande couronne d'IDF

Evolution des parts modales (en p.km) dans le scénario TPE  
PM sur l'EMD de Rouen

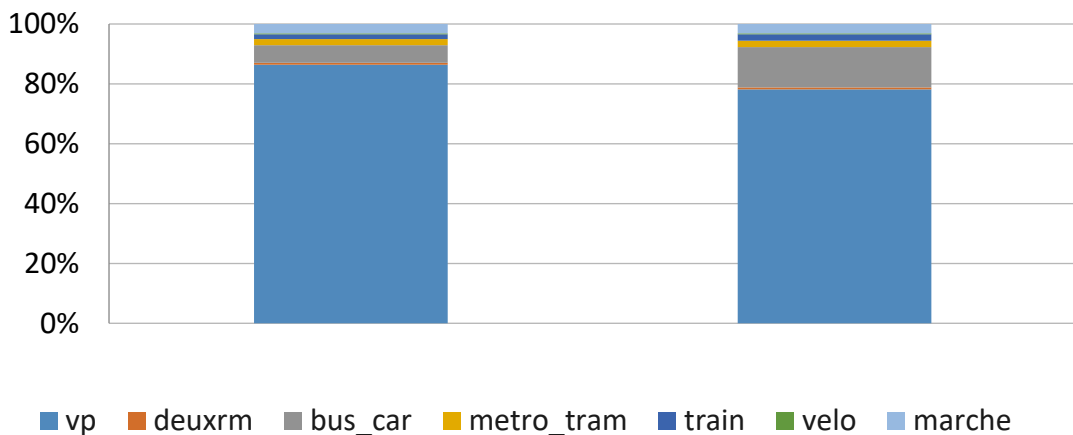


Figure 37 : Évolution des parts modales (en p.km) dans le scénario TPE PM sur l'EMD de Rouen

Sur la figure ci-dessous on peut observer que le report modal se fait majoritairement vers le bus à l'exception de la grande couronne d'IDF.

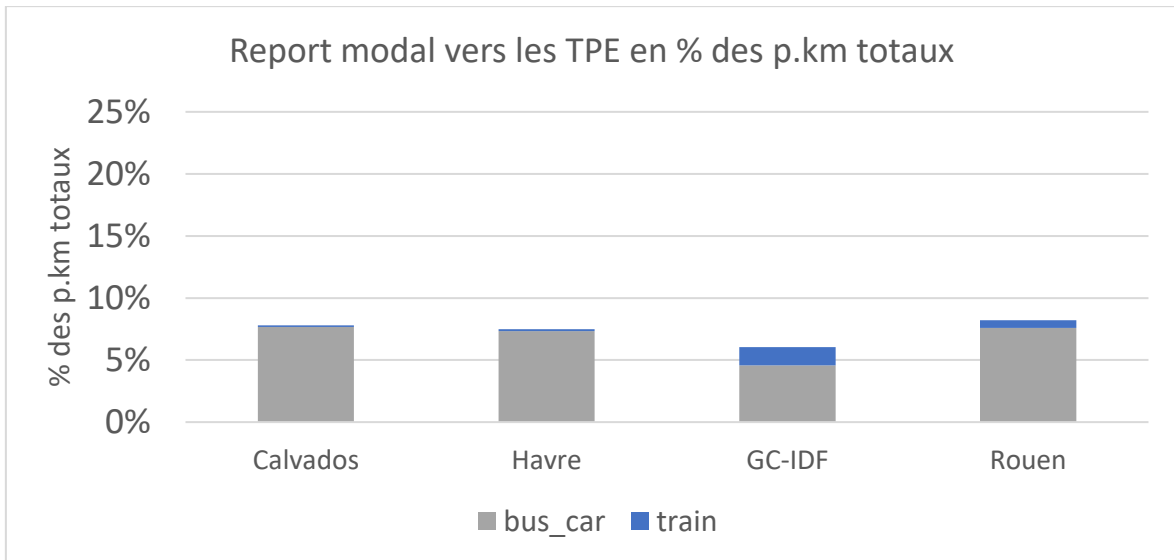


Figure 38 : Report modal vers les TPE en % des p.km totaux pour chaque zone

Sur la figure ci-dessous on peut voir les p.km en heures de pointe, réalisés sur des trajets plus longs que 10 km et radiaux, pour chaque zone. C'est le « gisement » de p.km pouvant être reporté vers les TPE, sous condition qu'une autoroute ou une gare avec de la capacité soit à proximité. On observe que ce gisement vaut environ 13-15% des p.km totaux sur les agglomérations normandes et 24% en grande couronne d'IDF.

En grande couronne d'IDF, seulement 6,2% de ces p.km sont faits en voiture et ils sont quasiment tous reportés (6,1%) soit vers le bus express, soit vers le train. En effet, quasiment tous les déplacements en VP/deuxrm, en heures de pointe, supérieur à 10 km, radiaux sont à proximité d'une autoroute ou d'une gare avec de la capacité supplémentaire.

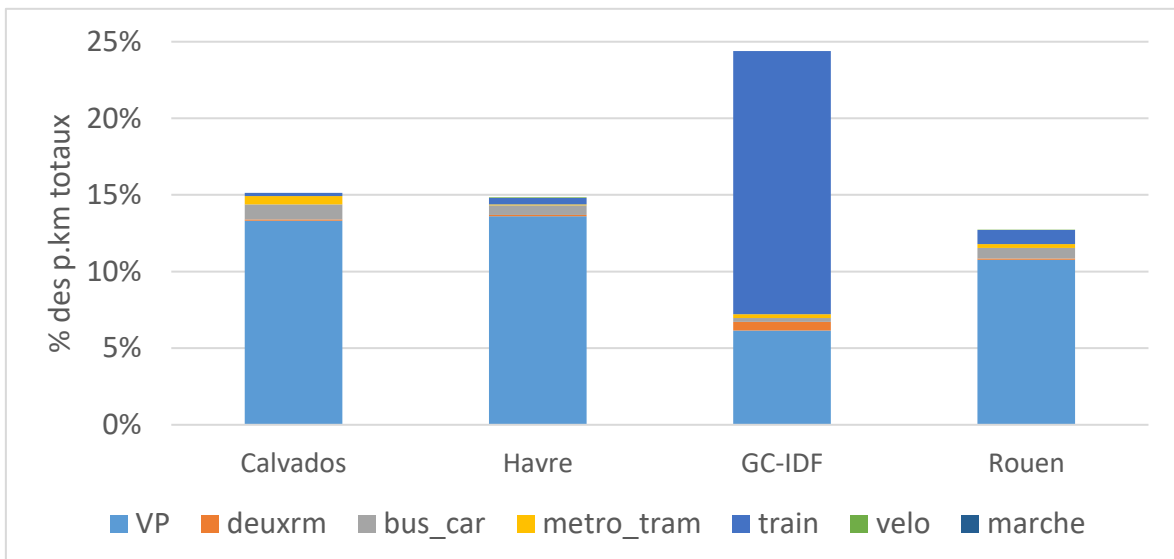


Figure 39 : Part des p.km en heure de pointe, sur des trajets plus longs que 10 km, radiaux, pour chaque zone

### 6.2.3. Résultats sur la consommation d'énergie et les émissions

	GC-IDF	Calvados	Rouen	Havre
Distances parcourues (p.km)	Inchangées			
Trafic voiture (v.km)	-10,6%	-10,6%	-8,7%	-9,9%
Consommation énergétique	-3,9%	-4,8%	-5,2%	-5,1%
CO <sub>2</sub> à l'usage	-7,0%	-5,2%	-5,9%	-5,4%
CO <sub>2</sub> ACV	-7,1%	-7,1%	-5,3%	-6,0%
NOx	-8,9%	-8,9%	-6,9%	-7,3%
PM10	-5,2%	-5,2%	-3,0%	-3,3%
PM2.5	-6,8%	-6,8%	-5,2%	-6,1%

Tableau 100 : Récapitulatif des résultats sur la consommation d'énergie et les émissions du scénario TPE PM, par rapport au scénario Référence.

On remarque que les émissions diminuent moins que le trafic voiture. En effet les émissions des bus express et des trains annulent une partie de ces gains.

### 6.2.4. Résultats sur le temps passé à se déplacer

Pour estimer l'impact sur le temps de déplacement, on compare le temps moyen passé à se déplacer pour un habitant de la zone à partir des données d'enquêtes (qui est égal au temps de déplacement du scénario Référence), puis on calcule le temps passé dans le scénario TPE à partir des hypothèses faites en 6.1.1.3.

On obtient les résultats suivants :

	IDF		Calvados		Rouen		Havre	
	Réf	PM	Réf	PM	Réf	PM	Réf	PM
Temps passé à se déplacer (h par personne)	1,65	1,64	1,21	1,24	1,17	1,19	1,17	1,19
Temps passé à se déplacer (% diff par rapport à référence)		-0,2%		2,6%		1,2%		2,4%
Temps moyen par déplacement reporté vers les TPE (h)	0,89	0,84	0,48	0,73	0,58	0,73	0,47	0,74
Temps moyen par déplacement reporté vers les TPE (% diff par rapport à référence)		-5%		54%		26%		56%

Tableau 101 : Impact du scénario TPE sur le temps passé à se déplacer

On observe que dans le scénario TPE PM, le temps passé à se déplacer est légèrement plus élevé dans les agglomérations normandes (entre +1,2 et +2,6%) mais moindre en IDF.

Si l'on regarde le résultat par déplacement reporté vers les TPE, on observe que chaque déplacement reporté vers les TPE serait moitié plus long dans le Calvados et au Havre, 25% plus long à Rouen et

5% moins long à Paris. Cela s'explique principalement par les différences de vitesse moyenne des voitures sur chaque zone (plus la vitesse moyenne de la voiture est faible, plus les TPE sont avantageux en terme de temps de déplacement), et par les différences de distance des déplacements (plus ils sont longs, moins les coûts fixes des TPE – les temps d'interconnexion – sont déterminants).

### 6.2.5. Bilan économique

Nous avons identifié les postes de dépenses qui diffèrent entre le scénario *Référence* et le scénario PM TPE, dans lequel les TPE ont été mis en place ou améliorés dans chaque zone étudiée :

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

- Les grands axes routiers radiaux de chaque grande agglomération disposent :
  - d'un pôle multimodal (130 M€ TTC chacun),
  - de 4 km de voie dédiée (25 M€/km TTC) 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 (8 M€ TTC chacune).
- Ces infrastructures ont une durée de vie de 30 ans.
- 12 grands axes sont considérés pour Paris, 6 pour Rouen, 6 pour Caen, et 4 pour Le Havre.
- La flotte de bus nécessaire est calculée ainsi :
  - On suppose 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 pour 250 jours ouvrés, soit 75 000 km/an.
  - La mobilité captée par les Bus Express dans ce scénario pour l'EMD de Rouen (qui sert d'illustration pour les applications numériques par la suite) est de 387 Mp.km/an. On suppose un taux de remplissage moyen des bus de 17 p.km/v.km, en tenant compte du déséquilibre de remplissage entre l'aller et le retour du bus. Ainsi la circulation des bus sur l'EMD de Rouen est de 23 Mv.km/an. Il faut donc environ  $23 (Mvkm/an) / 75\ 000 (vkm/an/bus) = 303$  bus pour assurer cette mobilité. Chaque bus coûte 250 000 € HT (CGDD 2016) , et a une durée de vie de 10 ans (soit 750 000 km parcourus sur sa durée de vie).
- Chaque bus est conduit par un actif 250 jours ouvrés par an, chaque actif travaillant 220 jours par an, soit  $303 \times 250 / 220 = 345$  conducteurs à temps-plein. On suppose un nombre de salariés équivalent au nombre de conducteurs pour gérer l'exploitation des flottes de bus (gestion administrative, commerciale, maintenance), soit également 345 salariés. Au total, l'exploitation des lignes de bus requiert 690 salariés.
- On suppose l'ensemble des salariés rémunérés à 2 000 €/mois net, soit environ 38 000 €/an en tenant compte des charges sociales.
- Les bus consomment en moyenne 19 L/100 km en 2030. Les déplacements commerciaux des bus représentent 23 Mv.km/an, auxquels on ajoute 20 % de haut le pied<sup>28</sup>. La consommation totale annuelle de la flotte est donc de  $23 \text{ M} \times 1,20 \times 19 / 100 = 5,2$  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  $303 / 6 = 51$  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.

---

<sup>28</sup> Tout déplacement non commercial d'un véhicule sur le réseau, tels les déplacements entre le centre de maintenance et la route commerciale.



Tous les coûts précédents sont assumés par les ménages, par l'intermédiaire des redevances qu'ils versent au secteur privé pour l'utilisation du service de Bus Express. Une seule exception : le coût de construction des pôles intermodaux est assumé par le secteur public.

- 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 70 rames pour la zone de Rouen ; la durée de vie des rames est estimée à 30 ans. Cela correspond à 79€ par habitant par an pour ce matériel roulant.

Nous supposons que ce coût est porté par le secteur public (qui assume en réalité la majeure partie des coûts des transports en commun ferrés).

Le détail de ces hypothèses pour la zone de l'EMD Rouen est explicité dans le Tableau 102.

Pour l'Ile-de-France grande couronne, ces hypothèses correspondent à 12 pôles intermodaux, un parc de bus de 2045 unités et 48 km de voies dédiées nouvellement construites.

Le moindre usage des VP, le moindre besoin d'entretien et la moindre consommation de carburant, par les individus (qu'ils se déplacent en tant que membre d'un ménage ou en tant que professionnels) sont comptabilisés comme pour les scénarios Covoiturage (voir section 0), avec une valeur de réduction du trafic local 2030 de 9 à 11% selon les zones.

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

**Le scénario TPE PM induit un déficit de 43 M€/an pour la zone de l'EMD de Rouen, mais une légère économie nette pour les ménages de 19 €/an/ménage par rapport au scénario *Référence*. Il correspond à un investissement public de 65€ par habitant chaque année, soit de l'ordre de 1600€ par tonne de CO<sub>2</sub> évitée.**

Les postes de dépense principaux sont le renouvellement du matériel roulant ferré, l'exploitation des flottes de bus (ressources humaines, centres de maintenance), et les dépenses liées aux infrastructures autoroutières.

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

- 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.

Élément différent entre S' et Sref	Type de modification	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€)	Surcoût à l'année S'/Sref (M€)	Hypothèse d'allocation des coûts
Pôles intermodaux autour des grandes agglomérations	Création	130 000 000	€/pôle	6	pôles	650	30	22	-	22	Public
Aménagement des voies rapides autour des grandes agglomérations	Création	25 000 000	€/km	24	km	500	30	17	-	17	Ménages
Gares autoroutières	Création	8 000 000	€/gare	24	gares	160	30	5	-	5	Ménages
Parc de bus	Création	250 000	€/car	303	cars	63	10	6	-	6	Ménages
Centres de maintenance	Création	38 713 544	€/centre	6	centres	194	15	13	-	13	Ménages
Ressources humaines gestion bus	Création	37 718	€/an/salarié	689	salariés	26	1	26	-	26	Ménages
Consommation (supplémentaire) en essence des bus	Création	1,50	€/L	5	M L/an	5	1	5	-	5	Ménages
Renouvellement du parc de trains périurbains	Création	14 705 882	€/rame	70	rames	858	30	29	-	29	Public
Usage de la voiture - achat véhicule	Modif	0,17	€/vkm	3	Gvkm	452	1	452	502	- 50	Ménages
Usage de la voiture - achat carburant	Modif	0,07	€/vkm	3	Gvkm	139	1	139	154	- 15	Ménages
Usage de la voiture - entretien, réparation et assurance	Modif	0,05	€/vkm	3	Gvkm	130	1	130	144	- 14	Ménages
								Total annuel (M€)	843	800	
								Surcoût total annuel (M€)	43		

Tableau 102 : Les différents postes de dépenses du scénario TPE PM, détaillés pour la zone de l'EMD Rouen. 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 7.4.5.2. 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.

Le détail des hypothèses différenciées par zone pour le scénario TPE PM est indiqué dans le tableau ci-dessous :

	Grande couronne IdF	EMD Rouen	AU Calvados	EMD Havre
Nombre grands axes routiers	12	6	6	4
Nombre de rames par zones	600	70	70	60
Réduction trafic local 2030	11%	10%	9%	9%
Mobilité supplémentaire effectuée en bus	2,6 Gp.km/an	400Mp.km/an	500Mp.km/an	300Mp.km/an

*Tableau 103 : Hypothèses de coûts pour le scénario TPE PM différenciées par zone*

Les résultats correspondant sont indiqués ci-dessous :

TPE	Grande couronne IdF	EMD Rouen	AU Calvados	EMD Havre
<b>Augmentation des dépenses ménages (M€/an)</b> Construction de voies dédiée au bus express Gares autoroutières Cars Employés Carburant pour les bus express	330	70	50	50
<b>Augmentation des dépenses collectivités territoriales (M€/an)</b> Pôles intermodaux Nouvelles rames de train	290	50	80	40
<b>Réduction des dépenses ménages (M€/an)</b> Consommation carburant réduite Fréquence d'achat VP réduite Besoins d'entretien/réparation/assurance VP réduits	690	80	100	60
<b>Surcoût total annuel (M€/an)</b>	-80	40	40	30

*Tableau 104 : Résultats généraux de coûts pour le scénario TPE PM pour chaque zone (chiffres arrondis).*

# 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 le covoiturage ; 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 covoiturbables, et de calculer les taux de remplissage correspondants, en posant l'hypothèse d'un système de covoiturage performant et accessible à tous en 2030. Notre objectif est d'estimer les émissions de CO<sub>2</sub> 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. Ces effets sont estimés dans l'étude ADEME sur le covoiturage courte-distance (ADEME, 2015) : s'ils ne pouvaient plus covoiturer 3% des covoitureurs interrogés effectueraient le trajet en transports en commun ou autre mode et 7% n'effectueraient probablement plus le déplacement.

Le taux de remplissage dépend du nombre de personnes de chaque communauté (notion introduite en 7.2.1) 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. Vue d'ensemble

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 cadre de notre modèle, on définit les communautés par la proximité des lieux de vie des gens qui y appartiennent. En fonction des cas, nous considérerons que les habitants d'un même quartier, ou d'une même commune, forment une communauté. On fait ainsi l'hypothèse que les habitants d'une même communauté peuvent covoiturer facilement ensemble car il leur est facile de se rejoindre (et à l'inverse, les individus qui n'appartiennent pas à la communauté ne peuvent pas covoiturer ensemble).

Ayant défini ces communautés, voici les grandes étapes de notre estimation de l'augmentation du taux de remplissage sur une zone dans nos différents scénarios où les membres des communautés covoiturent entre eux :

- A partir du nombre de personnes dans une communauté donnée et du comportement de mobilité du tissu dont elle fait partie (par exemple la banlieue de Rouen), on en déduit un nombre de déplacements en voiture générés chaque jour par la communauté. On retire les déplacements chaînés<sup>29</sup>, on appelle les déplacements restants les déplacements « covoiturbables ».
- A partir de ce nombre de déplacement covoiturbables, on utilise un modèle prenant en compte la compatibilité temporelle et géographique des déplacements pour calculer le taux de remplissage moyen sur ces déplacements.
- Nous reconstituons ensuite le taux de remplissage moyen de la communauté en tenant compte à la fois des déplacements covoiturbables (avec le taux de remplissage obtenu à l'étape précédente), et des déplacements non covoiturbables (dont le taux de remplissage est le taux habituel).

---

<sup>29</sup> Un déplacement chaîné est un déplacement faisant partie d'une chaîne de plusieurs déplacements successifs sans retour au domicile entre les déplacements. Par opposition un déplacement non chaîné est un déplacement qui part du domicile, va au motif, puis revient directement au domicile.

---

- On agrège ensuite les taux de remplissage sur toutes les communautés pour aboutir au taux de remplissage global, sur l'ensemble de la zone d'étude.
- On déduit de ce taux de remplissage une baisse des vkm (véhicule.kilomètres), puis l'impact sur les indicateurs (CO<sub>2</sub>, PM, NOx,...).

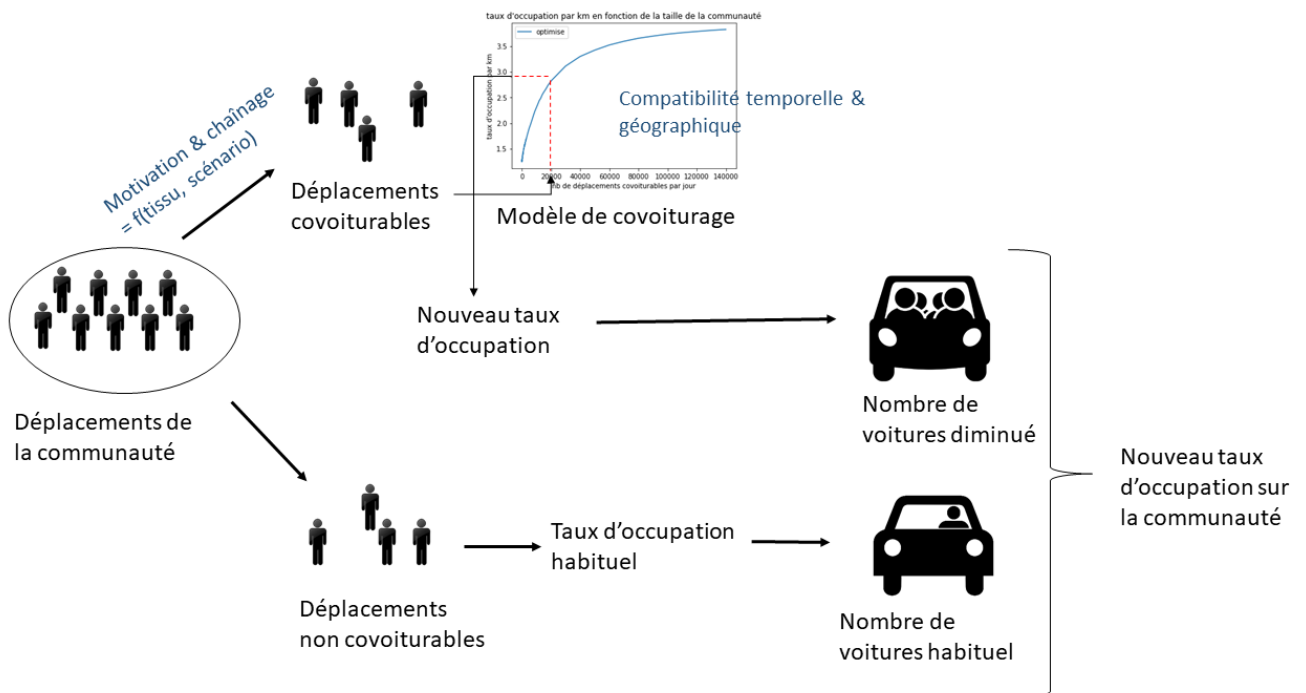


Figure 40 : Etapes de calculs pour obtenir le taux d'occupation global selon les différents scénarios, en se basant sur les communautés du territoire étudié. Ces étapes sont détaillées par la suite.

## 7.2. Scénario Potentiel Max

### 7.2.1. Communautés, découpage par quartier

Notre première étape de modélisation est la définition géographique des communautés. On fait les hypothèses suivantes :

- Pour les communes en dehors des pôles urbains (les communes rurales), on suppose que les habitations sont concentrées dans le bourg et donc que tous les habitants de la commune font partie de la même communauté de covoiturage (c'est-à-dire qu'ils peuvent covoiturer entre eux).
- Pour les communes dans les pôles urbains, il est possible que deux habitants d'une même commune, dont la superficie serait trop grande, habitent trop loin l'un de l'autre pour organiser un covoiturage ensemble. Notre hypothèse est qu'au-delà de deux kilomètres entre les logements de deux personnes, ils ne cherchent pas à covoiturer ensemble. Ce choix a l'avantage de permettre aux covoitureurs passagers de rejoindre facilement le conducteur à pieds ou en vélo. Ainsi si la commune est d'une superficie supérieure à 300 ha (hectares), on la découpe en communautés de 300 ha maximum (un disque d'un km de rayon ayant une surface de 314 ha).



Figure 41 : Découpage de la commune de Grand-Couronne (banlieue de Rouen) en 5 quartiers. Nous supposons la population uniformément répartie dans la commune.

Prenons l'exemple de la commune de Grand-Couronne en banlieue de Rouen. Sa superficie est de 1693 ha. Nous la divisons donc en 4 communautés de 300 ha et une communauté de 493 ha.

### 7.2.2. Filtre sur le mode et sur le chaînage

Une fois notre communauté définie, déterminons quels déplacements des membres de la communauté peuvent être covoiturés. Etant donné que nous négligeons les effets de report modal depuis les transports en commun vers le covoiturage, nous ne conservons que les déplacements effectués en voiture (en tant que conducteur ou passager).

Une séquence de déplacement qui part du domicile puis revient au domicile forme une boucle (ou une chaîne). La taille de la boucle est définie par le nombre de déplacements dans la boucle. Ainsi pour une boucle *domicile -> travail -> domicile*, la boucle est de taille 2 (elle contient 2 déplacements). Pour une boucle *domicile -> travail -> achats -> domicile*, la boucle est de taille 3 etc... Les déplacements de boucle dont la taille est de 3 ou plus sont dits chaînés.

Les déplacements chaînés sont dépendants d'autres déplacements, par conséquent les contraintes temporelles et logistiques sur ces déplacements sont plus fortes. On fait l'hypothèse, dans notre modèle, que ces déplacements ne sont pas covoiturables.

On calcule la proportion de déplacements non chaînés au niveau d'une {zone x tissu} (exemple : Rouen-[200-2000]-B-pôle). En moyenne 46% des déplacements sont non chaînés en Vallée de la Seine. Ces déplacements, faits en voiture et non chaînés, sont dits covoiturables.

Dans le scénario PM on suppose que toutes les personnes faisant un déplacement covoiturable vont covoiturer (contrairement au scénario Vol, pour lequel nous prenons en compte des facteurs sociologiques en lien avec la propension à covoiturer, comme détaillé en partie C).

*Prenons l'exemple de la communauté 1 de Grand-Couronne. C'est une communauté de 1700 habitants. Elle fait partie du tissu de la banlieue de Rouen (Rouen-[200-2000]-B-pôle). Les habitants*

de ce tissu font en moyenne 2,65 déplacements en voiture par jour. De plus 46% des déplacements en voiture dans ce tissu sont non chaînés, si bien qu'un habitant de ce tissu fait 1,21 déplacements en voiture covoiturables par jour. Donc la communauté 1 de Grand-Couronne génère 2057 déplacements covoiturables par jour.

Le tableau suivant résume le nombre de déplacements covoiturables obtenus pour chacune de nos zones d'étude suite à ces étapes de calculs.

	GC-IDF	Normandie	Calvados	Rouen	Havre
Nb depl par pers par jour	4,20	4,33	4,36	4,04	4,36
Part des depl VP	55%	68%	69%	65%	62%
parmi les depl VP Part des depl non chaînés	46%	43%	45%	46%	42%
Nb depl VP covoiturables dans le scénario PM, par pers par jour	1,07	1,26	1,35	1,20	1,15

Figure 3 : Tableau du nombre de déplacements covoiturables dans le scénario PM par personne et par jour selon la zone.

### 7.2.3. Taux d'occupation sur les déplacement covoiturables

#### Comment calculer le taux d'occupation ?

Il existe une ambiguïté sur le calcul du taux d'occupation. Certains calculs comptent le nombre maximum de personnes présents dans la voiture pendant le déplacement. Mais cette méthode néglige que le nombre de personnes varie au cours du temps dans la voiture selon les montées et les descentes de covoitureurs. Pour prendre en compte ce paramètre nous calculons un taux d'occupation « kilométrique ». C'est le rapport du nombre de personne.km (pkm) sur le nombre de véhicule.km (vkm).

Pour illustrer cette différence, imaginons un déplacement de 100 km pour lequel un conducteur prend un covoitureur pendant 50 km. Selon la méthode du nombre maximum de personnes dans la voiture, le taux d'occupation sur le déplacement est de 2. Le taux d'occupation « kilométrique », lui, est de  $(100 + 50) \text{ pkm} / 100 \text{ vkm} = 1,5 \text{ pkm/vkm}$ . Ainsi quand on utilise le nombre de personnes maximum présentes pendant le déplacement, on surestime le taux d'occupation « kilométrique ». Si le conducteur prend un couple de covoitureurs sur 25 km de son trajet, alors le nombre maximum de personnes dans la voiture est de 3, alors que le taux d'occupation kilométrique est de  $(100+2*25) \text{ pkm} / 100 \text{ vkm}$ , soit encore  $1,5 \text{ p.km/v.km}$ .

**Dans la suite, taux d'occupation fera référence au taux d'occupation « kilométrique ».** En effet, c'est de ce taux qu'il faut tenir compte pour estimer les effets « physiques » du covoiturage (consommation d'énergie, de carburant fossile, etc). Le taux d'occupation « maximum », lui, peut être utilisé pour décrire les habitudes de mobilité en des termes plus sociologiques.

### 7.2.3.1. Modélisation des déplacements

Pour estimer le taux d'occupation à partir du nombre journalier de déplacements covoiturables d'une communauté on utilise un modèle de covoiturage.

Nous faisons l'hypothèse que pour que deux déplacements covoiturables soient covoiturés, il faut qu'ils soient compatibles géographiquement (qu'au moins une partie du trajet soit commune) et qu'ils soient compatibles temporellement (que l'heure de départ, ou d'arrivée, soit proche).

Le nombre de déplacements échantillonnés est trop faible pour nous permettre de déterminer combien de déplacements sont compatibles temporellement et géographiquement ensemble. Pour faire cette estimation, on utilise un modèle de type Monte Carlo qui simule aléatoirement les déplacements au cours de la journée selon la distribution de distance et d'heures de départ observées.

Notre modèle numérique vise à estimer le taux de remplissage qu'on obtient sur une communauté en fonction du nombre de déplacements covoiturables par jour dans la communauté. Ce nombre est donc notre paramètre d'entrée. On imagine aisément que s'il y a peu de déplacements covoiturables dans la communauté, ils auront peu de chances de s'associer en des déplacements covoiturables compatibles. A l'inverse, plus il y a de déplacements covoiturables, plus il sera facile d'en trouver des compatibles entre eux.

On commence par générer les déplacements de cette communauté au cours de la journée avec 3 attributs : angle, distance et heure de départ.

- L'angle du déplacement est sa direction. Pour chaque déplacement on génère un angle aléatoire entre 0 et 360°. Ainsi on imagine que les déplacements se répartissent de manière aléatoire dans toutes les directions. En réalité les déplacements se concentrent souvent dans certaines directions : pôles voisins, zone commerciale. Cette hypothèse tend donc à sous-estimer le potentiel du covoiturage.
- La distance du déplacement est générée selon la distribution des distances observées pour les déplacements en voiture sur la Vallée de la Seine. On observe que cette distribution est stable à travers nos 5 zones, si bien qu'on garde cette même distribution pour chacune de nos zones d'étude.

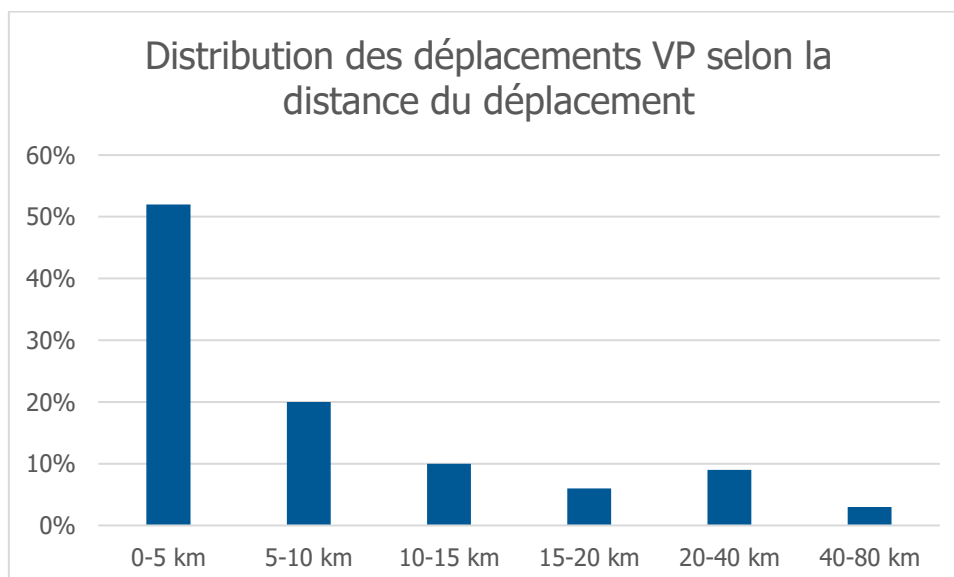


Figure 42 : Répartition des déplacements VP selon la distance en Vallée de la Seine.  
52% des déplacements en voiture font entre 0 et 5 km.



L'heure de départ des déplacements est générée selon la répartition des heures de départ des déplacements en voiture observée sur la Vallée de la Seine. On observe que cette distribution est stable à travers les zones, si bien qu'on garde cette même distribution pour chacune de nos zones d'étude.

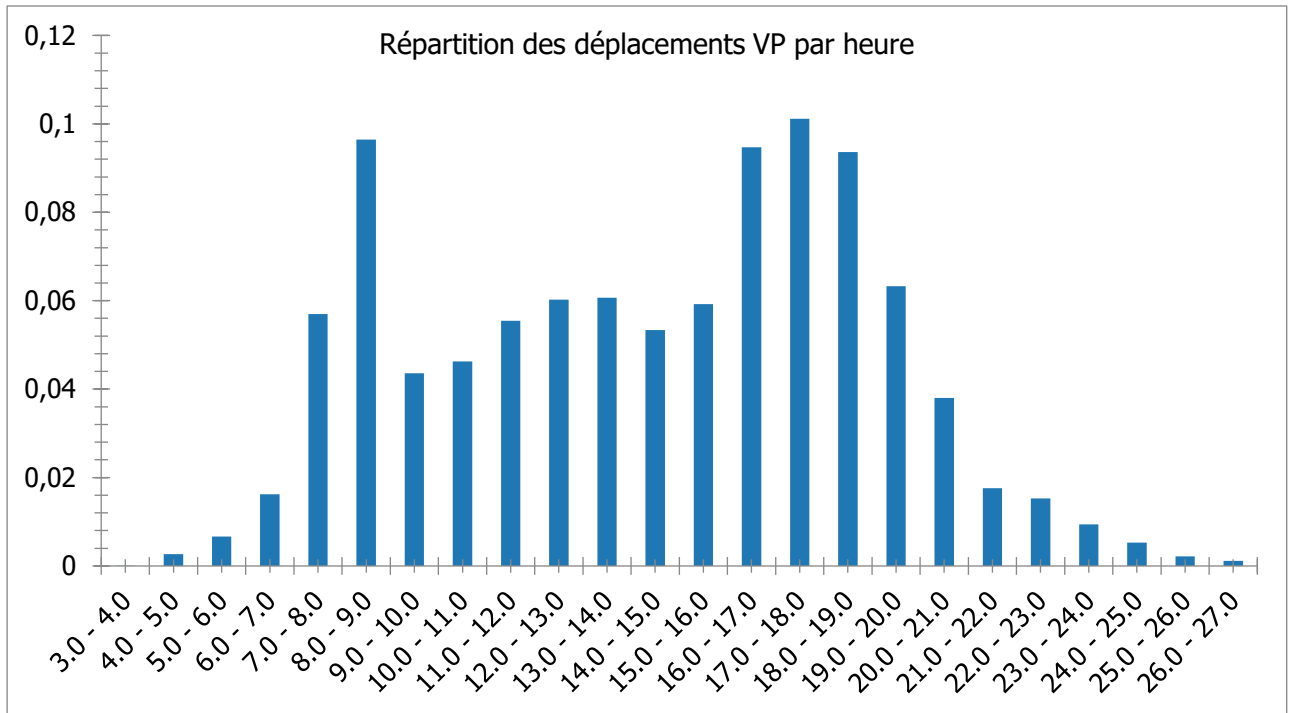


Figure 43 : Répartition des déplacements VP selon l'heure de départ en Vallée de la Seine.  
Clé de lecture : 9,6% des déplacements en VP ont lieu entre 8h et 9h.

Le taux d'occupation actuel des voitures n'est pas de 1 pkm/vkm. Dans les données des déplacements locaux, on observe un taux d'occupation kilométrique qui varie selon les zones mais reste autour de 1,2 pkm/vkm. Pour prendre en compte ce covoiturage existant, largement informel (déplacements en famille ou entre amis), on génère certains déplacements identiques (même angle, même distance, même heure de départ, mais personnes différentes). Ces déplacements sont « parfaitement » compatibles, ils seront donc faits en covoiturage ce qui reproduit le taux de remplissage habituel de 1,2 pkm/vkm.

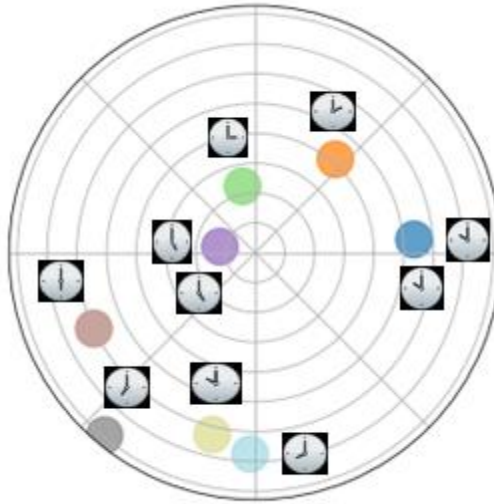
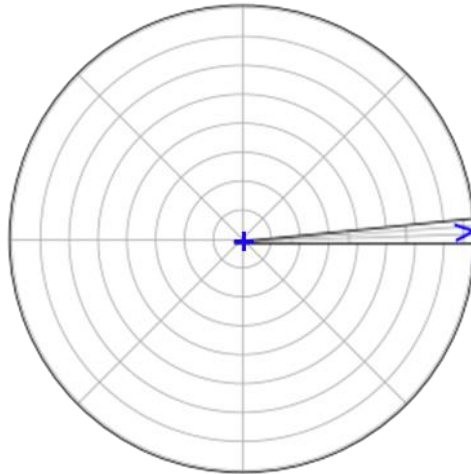


Figure 44 : Visualisation de la génération de 10 déplacements. Le centre de la cible représente l'origine des déplacements (la communauté) et chaque cercle coloré la destination d'un déplacement, l'horloge à côté de chaque cercle indique l'heure de départ du déplacement. Malgré le fait qu'il y ait 10 déplacements, on n'observe que 8 cercles étant donné que certains déplacements sont générés de manières identiques (même destination et heure de départ) et se superposent afin d'intégrer à la simulation le taux de remplissage habituel.

### 7.2.3.2. Remplissage des voitures

Une fois ces déplacements générées (angle, distance, heure), on cherche à regrouper les déplacements compatibles dans une même voiture. Pour cela on effectue l'algorithme suivant :

- **Initialisation** : On sélectionne le 1<sup>er</sup> déplacement  $d1$  non attribué à une voiture.
- **Recherche de déplacements compatibles** : Pour tous les déplacements  $d$  non attribués à des voitures, on étudie la compatibilité de  $d$  avec  $d1$ . Si  $d$  est compatible géographiquement et temporellement avec  $d1$  on l'ajoute à la liste des déplacements compatibles avec  $d1$ . Les critères de compatibilité sont les suivants :
  - compatibilité géographique : il faut que le détour nécessaire pour effectuer ces 2 déplacements en covoiturage soit inférieur à 10% de la distance du déplacement le plus long entre  $d$  et  $d1$ . Cela revient à ce que la destination de  $d$  soit dans l'angle de compatibilité géographique de  $d1$ .



*Figure 45 : Sur cette cible, le centre représente l'origine d'un déplacement et la flèche sa destination. La section de disque représente la zone de compatibilité géographique de 10%. Si un déplacement de la même communauté a une destination dans la zone de compatibilité géographique, alors les déplacements sont définis comme géographiquement compatibles dans le modèle.*

- compatibilité temporelle : il faut que l'heure de départ de  $d$  soit comprise dans un intervalle de 30 min avant/après l'heure de départ de  $d1$ .
- **Résolution de la capacité de la voiture** : Il est possible que  $d1$  ait plus de 3 déplacements compatibles. Or on prend comme hypothèse qu'une voiture ne peut pas contenir plus de 4 personnes. Ainsi :
  - Si  $d1$  a 3 déplacements compatibles ou moins, on garde tous les déplacements.
  - Si  $d1$  a 4 déplacements compatibles ou plus alors on ne peut attribuer tous ces déplacements à une même voiture<sup>30</sup>. Dans ce cas on sélectionne en priorité les déplacements dont la distance est la plus proche de celle de  $d1$ . Ainsi si  $d1$  est un déplacement de 40 km et qu'il y a 4 déplacements compatibles de 20, 35, 42 et 50 km, alors ne garde que les déplacements de 35, 42 et 50 km de distance.
- **Attribution des déplacements à une même voiture** : On attribue tous les déplacements sélectionnés à l'issue de cette étape à une même voiture. On retire ces déplacements de la liste des déplacements non encore attribués à une voiture.
- **Itération** : On recommence l'étape d'initialisation avec un nouveau déplacement de la liste.

---

<sup>30</sup> Nous faisons en effet l'hypothèse qu'une voiture ne peut contenir plus de 4 personnes : 1 conducteur et 3 passagers

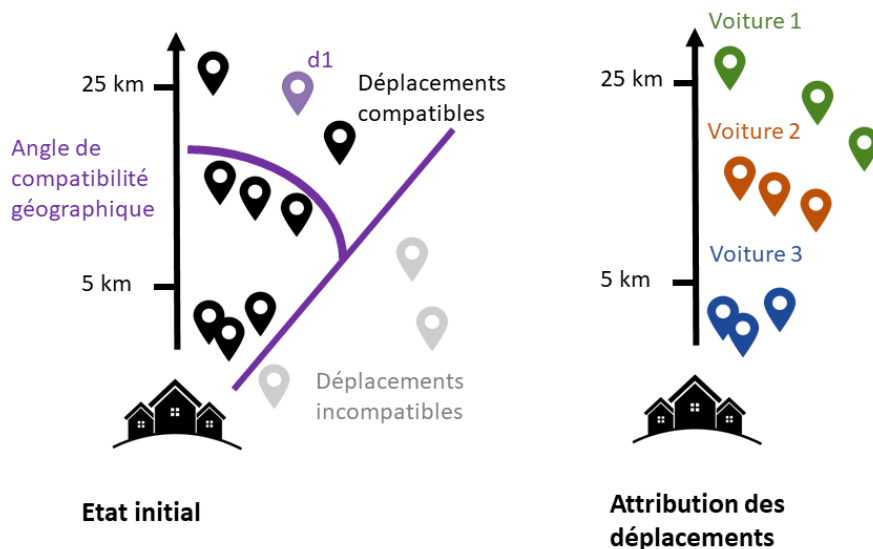


Figure 46 : Schéma du remplissage des voitures dans le cas où il y a plus de 3 déplacements compatibles. Pour faciliter la représentation graphique on suppose ici que la capacité maximale d'une voiture est de 3 personnes (4 personnes dans le modèle). Ici l'icône d'habitations représente la communauté et donc l'origine des déplacements. Les marqueurs représentent les destinations des déplacements. Tous les déplacements représentés sont compatibles temporellement pour l'exemple. A gauche l'état initial représente les déplacements avant l'application de l'algorithme. Ils ne sont pas encore attribués à une voiture.

**Initialisation** : on sélectionne un premier déplacement  $d_1$  (en violet).

**Recherche de déplacement compatibles** : en traçant l'angle de compatibilité géographique de  $d_1$  (en violet), on détermine quels sont les déplacements compatibles (en noir) et incompatibles (en gris).

**Résolution de la capacité de la voiture** : il y a 8 déplacements compatibles avec  $d_1$ . La capacité de la voiture n'étant que de 3 (pour des raisons graphiques ici mais 4 dans le modèle), on sélectionne les deux déplacements compatibles ayant la distance la plus proche de  $d_1$ .

**Attribution des déplacements à une même voiture** : on attribue ces 3 déplacements à une même voiture (en vert sur le schéma de droite) et ils sont retirés de la liste des déplacements non encore attribués.

C'est la fin de la 1<sup>ère</sup> itération. On recommence ensuite avec un nouveau  $d_1$ , le prochain déplacement non attribué avec l'angle le plus proche de l'ancien  $d_1$ . Après 2 nouvelles itérations on obtient le schéma de droite. On observe que les groupes de covoitureurs ont des déplacements de distance similaire.

La répartition des déplacements en voiture permet de déduire les kilomètres parcourus par des personnes (pkm) et le nombre de km parcourus par des voitures (vkm), donc le taux d'occupation pour le nombre de déplacements covoiturables par jour donné. Les déplacements étant générés aléatoirement, on répète l'expérience 10 fois pour avoir un taux d'occupation moyen pour ce nombre de déplacements covoiturables par jour. Les communautés de nos zones d'études sont de tailles très variables, on répète donc la procédure pour tous les nombres de déplacements covoiturables par jour de nos communautés. On obtient le graphique suivant :

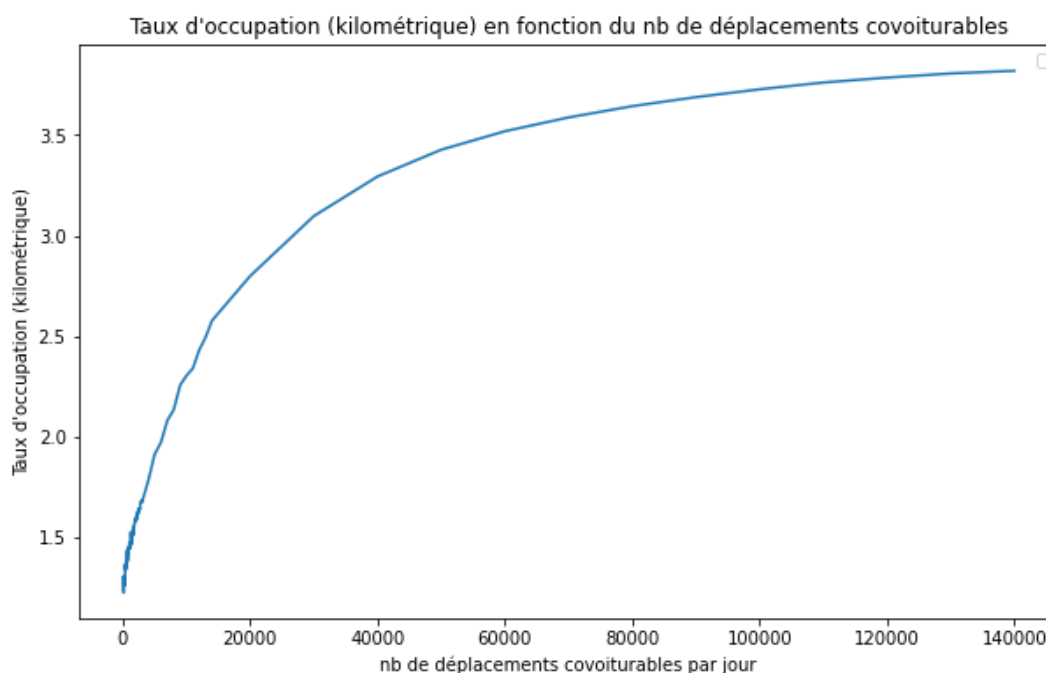


Figure 47 : Courbe du taux d'occupation en fonction du nombre de déplacements covoiturables pour des communautés générant entre 0 et 140 000 déplacements covoiturables par jour

Par exemple, pour la communauté 1 de Grand-Couronne on a 2057 déplacements covoiturables par jour, soit un taux d'occupation sur les déplacements covoiturables de 1,59 pkm/vkm contre 1,26 au départ.

#### Taux d'occupation kilométrique contre taux d'occupation « maximum »

Comme expliqué dans l'encadré « Comment calculer le taux d'occupation ? », le terme taux d'occupation est ambigu. L'approximation de dire que pour un déplacement avec 3 covoitureurs passagers, le taux d'occupation est de 4 est parfois faite. Cela est vrai si tous les passagers ont la même origine et la même destination. Si ce n'est pas le cas, ce taux d'occupation correspond au nombre maximum de personnes dans la voiture sur le déplacement. Dans notre cas, les covoitureurs n'ont pas nécessairement la même destination.

Sur le graphique suivant nous avons représenté le taux d'occupation kilométrique et le taux d'occupation « maximum » pour des communautés générant entre 0 et 20 000 déplacements covoiturables par jour. On observe que le le taux d'occupation « maximum » augmente beaucoup plus rapidement que le taux d'occupation kilométrique. Il est donc important de faire cette distinction.

Cette différence a été à l'origine d'une erreur d'estimation de l'impact du covoiturage dans le rapport Décarboner la mobilité en zone de moyenne densité du *Shift* en 2017, aujourd'hui corrigée (ce qui mène à une baisse sensible de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> induite par le covoiturage par rapport à l'estimation erronée).

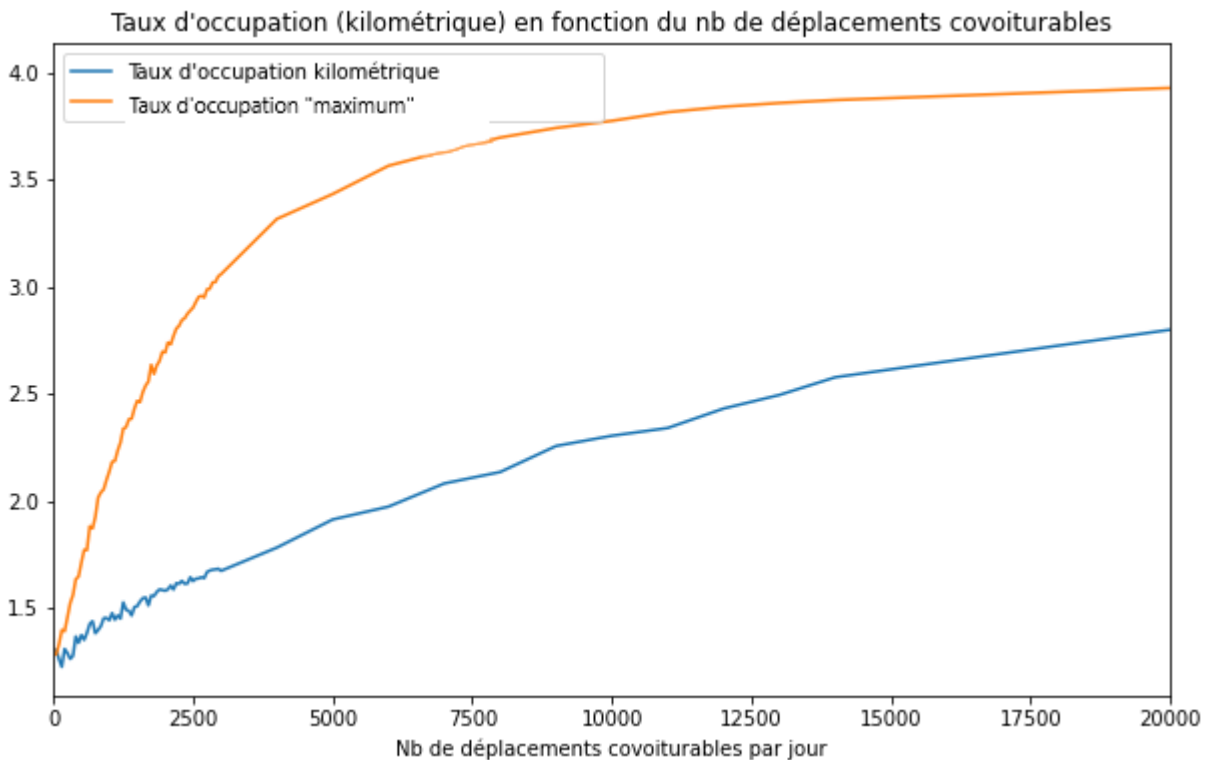


Figure 48 : Différence entre taux d'occupation kilométrique et le taux d'occupation « maximum » entre 0 et 20 000 déplacements covoiturables par jour. On observe que ces 2 indicateurs augmentent avec le nombre de déplacements covoiturables, mais le taux d'occupation kilométrique augmente significativement moins vite.

#### 7.2.4. Taux d'occupation final

Le taux d'occupation calculé n'est valable que sur les déplacements covoiturables. Pour avoir le taux d'occupation sur l'ensemble des déplacements de la communauté on divise les pkm – la somme des kilomètres parcourus par les personnes en voiture (qu'elles soient seules dans la voiture ou non) – par les vkm – somme des kilomètres parcourus par les voitures. Ceci revient à faire la moyenne harmonique du taux d'occupation sur les déplacements covoiturables et du taux d'occupation habituel sur les déplacements non covoiturables.

En effet on a, sur la situation de la communauté en présence d'un système de covoiturage :

$$tx\_occ_{commu,global} = \frac{pkm_{commu}}{vkm_{commu}} \quad (17)$$

Avec :

$tx_{occ_{commu,global}}$  : Taux d'occupation global de la communauté  
 $pkm_{commu}$  : Pkm de la communauté  
 $vkm_{commu}$  : Vkm de la communauté

On peut décomposer les vkm de la communauté en la somme des vkm sur les déplacements non covoiturables et celle sur les déplacements covoiturables :

$$vkm_{commu} = vkm_{noncovoiturable} + vkm_{covoiturable} \quad (18)$$

En utilisant la définition du taux d'occupation on a :

$$vkm_{commu} = \frac{pkm_{non\_covoiturable}}{tx\_occ_{non\_covoiturable}} + \frac{pkm_{covoiturable}}{tx\_occ_{covoiturable}} \quad (19)$$

Le taux d'occupation sur les déplacements non covoiturables étant le taux d'occupation habituel :

$$vkm_{commu} = \frac{pkm_{non\_covoiturable}}{tx\_occ_{habituel}} + \frac{pkm_{covoiturable}}{tx\_occ_{covoiturable}} \quad (20)$$

Avec (1) et (4) on obtient :

$$tx\_occ_{commu,global} = \frac{pkm_{commu}}{\frac{pkm_{non\_covoiturable}}{tx\_occ_{habituel}} + \frac{pkm_{covoiturable}}{tx\_occ_{covoiturable}}} \quad (21)$$

$$tx\_occ_{commu,global} = \frac{1}{\frac{pkm_{non\_covoiturable}}{pkm_{commu}} \times \frac{1}{tx\_occ_{habituel}} + \frac{pkm_{covoiturable}}{pkm_{commu}} \times \frac{1}{tx\_occ_{covoiturable}}} \quad (22)$$

Et enfin :

$$tx\_occ_{commu,global} = \frac{1}{\frac{tx\_pkm_{non\_covoiturable}}{tx\_occ_{habituel}} + \frac{tx\_pkm_{covoiturable}}{tx\_occ_{covoiturable}}} \quad (23)$$

Avec :

$tx\_pkm_{non\_covoiturable}$  : Part des pkm effectués sur les déplacements non covoiturables

$tx\_pkm_{covoiturable}$  : Part des pkm effectués sur les déplacements covoiturables

*Par exemple, pour la communauté 1 de Grand-Couronne on a un taux d'occupation sur les déplacements covoiturables (qui représentent 46% des déplacements en VP) de 1,59 pkm/vkm contre 1,26 pkm/vkm sur les déplacements non covoiturables (qui représentent 54% des déplacements en VP).*

*Le taux d'occupation global sur la communauté 1 de Grand-Couronne est la moyenne harmonique de ces 2 taux soit :  $1/(0,46/1,59 + (0,54/1,26)) = 1,39$  pkm/vkm*

De la même manière, on peut calculer le taux d'occupation global sur les zones qui nous intéressent pour le scénario Potentiel Maximal :

	GC-IDF	Normandie	Calvados	Rouen	Havre
Nb depl par pers par jour	4,20	4,33	4,36	4,04	4,36
Part des depl fait en VP	55%	68%	69%	65%	62%
<i>parmi les depl VP</i> Part des depl non chaînés	46%	43%	45%	46%	42%
Nb depl VP covoiturables PM par pers par jour	1,07	1,26	1,35	1,20	1,15
Taux d'occupation PM depl covoiturables	1,90	1,57	1,60	1,68	1,58
Taux d'occupation habituel	1,19	1,22	1,20	1,25	1,25
Taux d'occupation global	1,44	1,35	1,35	1,42	1,37

Figure 3 : Tableau récapitulatif des étapes de calcul du taux d'occupation global par zone

## 7.3. Scénario Vol

Dans le scénario PM nous avons fait l'hypothèse que tout le monde était prêt à covoiturer pour tout type de déplacement (dans les limites décrites d'appartenance à une même communauté, de non chaînage, de compatibilité géographique, temporelle et de capacité des voitures). Dans les faits la motivation à covoiturer dépend de nombreux facteurs supplémentaires. Dans le scénario Vol, nous gardons l'hypothèse qu'un système covoiturage performant est accessible à tous, mais nous prenons en compte des facteurs supplémentaires, plus sociologiques, qui pourraient limiter la propension des personnes à covoiturer. L'idée est d'intégrer à nos chiffrages des éléments plus culturels, ainsi que les tendances actuelles telles que perçues par des connaisseurs du sujet.

### 7.3.1. Atelier d'experts

#### 7.3.1.1. Participants

Pour évaluer la motivation des personnes à covoiturer nous avons fait appel à des personnes travaillant, ou ayant travaillé, dans le secteur du covoiturage :

- Guillemette Bois – Chef de projet - CITEC
- Alexandre Modena – Chargé de mission Mobilité – Département de l'Eure
- Noé Jubert – Délégué à la stratégie - Klaxit
- Laure Wagner – ex-Blablacar - 1km à pied
- Bastien Diaz – Chief Marketing Officer – Citygo

#### 7.3.1.2. Contenu de l'atelier

L'objectif de l'atelier est d'estimer la proportion de déplacements pouvant être covoiturée dans un scénario Vol, c'est-à-dire en tenant compte de facteurs limitant le covoiturage qui ne sont pas déjà pris en compte dans le scénario PM. Pour faire cette estimation on découpe les déplacements selon 3 facteurs qui sont ressortis lors de l'étude du *Shift* de 2017 : le motif du déplacement, la catégorie socio-professionnelle de la personne effectuant le déplacement, et la distance à parcourir.

Voilà les questions que nous avons posées aux experts :



« On se place en 2030 en Ile-de-France et en Normandie dans un monde où un système covoiturage performant et accessible à tous a été mis en place : stations de covoiturage, applications de covoiturage, voie de covoiturage, incitations économiques pour les particuliers et les entreprises. On considère que les déplacements chaînés ne sont pas covoiturés.

Imaginez un **étudiant** qui va faire un déplacement non chaîné (il part de son domicile pour un motif et revient directement à son domicile) en voiture : aller à l'université pour ses **études**, à une **distance inférieure à 20 km** (Courte Distance : CD) de son domicile. **Sur 100 étudiants dans cette situation, combien chercheront<sup>31</sup> à covoiturer ?**

Cette question a été posée pour toutes les catégories socio-professionnelles, tous les motifs de déplacements et toutes les catégories de distance afin de remplir la grille suivante :

CSP Motif	Cadre / intermédiaire		Employé / ouvrier		Retraité		Scolaire		Etudiant		Inactif : chômeur / au foyer	
	CD LD	20	CD LD		CD LD		CD LD		CD LD		CD LD	
Travail / Etudes	CD LD	20	CD LD		CD LD		CD LD		CD LD		CD LD	
Accompagner / aller chercher	CD LD		CD LD		CD LD		CD LD		CD LD		CD LD	
Achats	CD LD		CD LD		CD LD		CD LD		CD LD		CD LD	
Loisirs	CD LD		CD LD		CD LD		CD LD		CD LD		CD LD	
Soins / démarches	CD LD		CD LD		CD LD		CD LD		CD LD		CD LD	
Visites amis / famille	CD LD		CD LD		CD LD		CD LD		CD LD		CD LD	
Autres professionnels	CD LD		CD LD		CD LD		CD LD		CD LD		CD LD	

*Tableau 105 : Grille utilisée pour recueillir les contributions des experts covoiturage. La grille a été organisée de manière à ce que les catégories représentant le plus grand nombre de déplacements dans la réalité, soient en haut à gauche. Les déplacements pour aller au travail des cadres/intermédiaires représentent donc le plus grand nombre de déplacements parmi les catégories de cette grille. CD : Courte Distance (inférieur à 20 km) ; LD : Longue Distance (supérieur à 20 km),*

*Clé de lecture : Sur 100 cadres/intermédiaires allant au travail, en voiture, sans enchaîner de motifs, à moins de 20 km, 20 chercheront à covoiturer.*

### 7.3.1.3. Déroulé

Nous avons divisé les experts en deux groupes (un groupe de 3 experts et un autre de 2 experts) et nous avons demandé à chacun des groupes de remplir ensemble la grille précédente.

<sup>31</sup> Nous essayons d'estimer ici la motivation à covoiturer, qui est une condition nécessaire mais non suffisante pour que la personne covoiture. Pour que le covoiturage ait lieu, il faut en plus que la personne trouve un covoiturage compatible, ce que nous prenons en compte via le modèle de covoiturage.

Puis nous avons réunis les 2 groupes et observé les différences entre leurs estimations. Les experts étaient alors invités à discuter des estimations qui divergeaient significativement entre les deux groupes afin de comprendre la divergence et voir si elle était réductible<sup>32</sup>.

Les différences entre les estimations s'expliquaient notamment par différentes visions d'un même motif. Par exemple le motif « loisir » a plutôt été interprété comme une sortie pour aller à un concert ou au théâtre pour le groupe A (jugant que ce motif était peu propice au covoiturage) et comme une sortie régulière pour aller au sport pour le groupe B (jugant que ce motif était propice au covoiturage).

Lorsqu'une différence entre les estimations subsistait à l'issue de la phase de réconciliation entre les deux groupes, nous avons gardé la moyenne des estimations. Lorsque les estimations convergeaient, nous les avons gardé telles quelles. Les estimations des 2 groupes sont disponibles en annexe.

CSP Motif	Cadre / intermédiaire		Employé / ouvrier		Retraité		Scolaire		Etudiant		Inactif : chômeur / au foyer	
	CD	LD	CD	LD	CD	LD	CD	LD	CD	LD	CD	LD
Travail / Etudes	CD LD	40 40	CD LD	40 50	CD LD	N/A N/A	CD LD	N/A N/A	CD LD	80 70	CD LD	N/A N/A
Accompagner / aller chercher	CD LD	10 10	CD LD	10 10	CD LD	0 0	CD LD	N/A N/A	CD LD	0 0	CD LD	10 10
Achats	CD LD	10 30	CD LD	20 40	CD LD	20 40	CD LD	N/A N/A	CD LD	30 50	CD LD	20 40
Loisirs	CD LD	20 40	CD LD	20 40	CD LD	20 40	CD LD	N/A N/A	CD LD	30 60	CD LD	20 40
Soins / démarches	CD LD	10 10	CD LD	10 10	CD LD	20 30	CD LD	N/A N/A	CD LD	10 10	CD LD	10 10
Visites amis / famille	CD LD	20 40	CD LD	20 40	CD LD	20 50	CD LD	N/A N/A	CD LD	30 60	CD LD	20 50
Autres professionnels	CD LD	10 10	CD LD	10 10	CD LD	N/A N/A	CD LD	N/A N/A	CD LD	N/A N/A	CD LD	N/A N/A

Tableau 106 :: Grille finale utilisée pour le scénario volontariste

Clé de lecture : Sur 100 cadres/intermédiaires allant au travail, en voiture, sans enchaîner de motifs, à moins de 20 km, 40 chercheront à covoiturer.

## 7.3.2. Exploitation des contributions d'experts

### 7.3.2.1. Exploitation du filtre motivation

A partir de ces estimations nous avons calculé la part des déplacements non chaînés pour lesquelles les personnes chercheraient à covoiturer (les déplacements covoiturables pour ce scénario Vol) en multipliant la part des déplacements correspondant à chaque case de la grille par le coefficient de motivation estimé par les experts.

<sup>32</sup> Les estimations de chaque groupe sont visibles dans l'Annexe 1

Pour illustrer prenons l'exemple d'un cas avec seulement 2 CSP et 2 motifs. Grâce aux contributions d'experts nous obtenons la grille suivante :

CSP Motif	Cadre	Employé
Travail	40	30
Accompagner	10	20

Tableau 107 : Grille de filtre motivation fictive. Sur 100 cadres allant au travail, en voiture, sans enchaîner de motifs, 40 chercheront à covoiturer.

D'autre part, à partir des données de mobilité nous savons quelle part des déplacements est effectuée par chaque doublet {CSP x Motif}

CSP Motif	Cadre	Employé
Travail	50%	30%
Accompagner	15%	5%

Tableau 108 : Part des déplacements effectuée par chaque CSP x Motif. Les cadres allant au travail représentent 50% des déplacements. Si l'on somme toute les cases de cette grille, on arrive à 100%.

Pour calculer le taux de conservation du filtre motivation on fait la somme des produits de chaque coefficient de motivation par la part correspondante.

Soit :

$$tx_{conservation} = 0,4 * 0,5 + 0,3 * 0,3 + 0,1 * 0,15 + 0,2 * 0,05 = 0,315$$

Ainsi dans cette illustration, 31,5% des déplacements sont effectués par des personnes qui chercheront à les covoiturer, les 68,5% restant seront faits par des personnes qui ne chercheront pas à covoiturer.

Dans notre cas cette procédure aboutit à une estimation de 20% de déplacements qui chercheront à être covoiturés (les 80 % restant ne l'étant pas). Le 1<sup>er</sup> filtre sur le chaînage étant d'environ 46% (il varie selon les zones), il reste donc environ 9% de déplacements covoiturables après ces 2 filtres dans le cadre du scénario Vol.

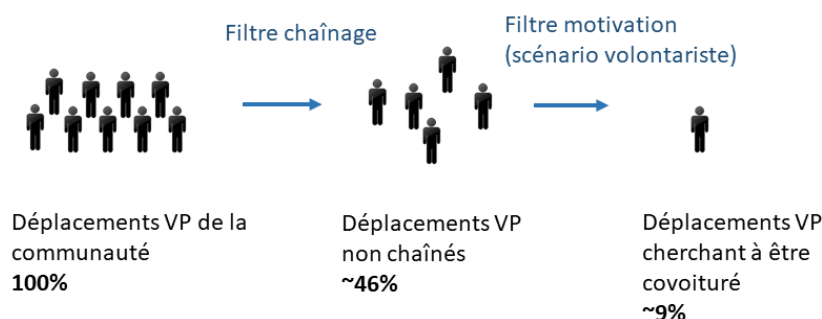


Figure 49 : Schéma des filtres chaînage et motivation pour déterminer les déplacements en voiture cherchant à être covoituré, dans le scénario Vol

### 7.3.2.2. Redressement de la répartition des distances du modèle covoiturage

Dans le modèle covoiturage, nous générons les déplacements selon la distribution des déplacements en VP (Comme détaillé en B.3.a)). Néanmoins, dans le filtre Vol, les experts ont fait ressortir que, pour les déplacements longue-distance, les personnes chercheraient plus à covoiturer que pour les déplacements courte-distance. En effet, les 20% de déplacements restants cherchant à être covoiturés ont une plus grande proportion de déplacements longue-distance que dans le scénario PM.

Ainsi quand on effectue le filtre Vol pour obtenir les déplacements covoiturables, il faut enlever en proportion plus de déplacements courte-distance que de déplacements longue distance. Pour prendre en compte cet effet on modifie en conséquence la distribution des distances du modèle de covoiturage pour le scénario Vol.

Pour ce faire on calcule le taux de conservation du filtre motivation sur les 2 catégories de déplacements : Courte Distance (CD) et Longue Distance (LD). On trouve que les déplacements courts (CD) sont conservés à 19%, tandis que les déplacements plus longs (LD) ont un taux de conservation supérieur, de 33%.

En multipliant ces taux de conservation par les parts de déplacements selon la distance initiales, on trouve qu'il reste  $0,88 \times 0,19 = 16\%$  pour les déplacements CD et  $0,12 \times 0,33 = 4\%$  pour les déplacements LD.

En normalisant ces chiffres à 100%, on obtient les parts CD et LD pour les déplacements VP cherchant à être covoiturés : respectivement 81% et 19%.

	CD : 0-20 km	LD : > 20 km
Part des déplacements VP par distance	88%	12%
Taux de conservation filtre motivation	19%	33%
Déplacements VP cherchant à être covoiturés restants	16%	4%
Part des déplacements VP cherchant à être covoiturés (normalisation)	81%	19%

Tableau 109 : Tableau récapitulatif des différentes étapes de calcul pour aboutir à la distribution de déplacements VP cherchant à être covoiturés selon les catégories de distance CD et LD.

Pour obtenir la distribution finale, on fait « redescendre » cette évolution des proportions des catégories de distance mère (CD et LD) vers les catégories de distance fille (0-5 km, 5-10 km, ...) en conservant les mêmes proportions de part des déplacements de la catégorie fille dans la catégorie mère. Par exemple la catégorie 5-10 km représente 20% des déplacements de la catégorie CD avant et après le redressement.

Catégorie de distance mère	CD				LD	
Part de tous les déplacements VP	88%				12%	
Catégorie de distance fille	0-5km	5-10km	10-15km	15-20km	20-40km	40-80km

Part de tous les déplacements VP	52%	20%	10%	6%	9%	3%
Part des déplacements de la catégorie fille dans la catégorie mère	59%	23%	11%	7%	75%	25%
Part de tous les déplacements VP cherchant à être covoiturés	81%				19%	
Part de tous les déplacements VP cherchant à être covoiturés par catégorie fille	48%	19%	9%	6%	14%	5%

Tableau 110 : Tableau récapitulatif des différentes étapes de calcul pour aboutir à la distribution des déplacements VP cherchant à être covoiturés selon les catégories de distance filles : (0-5 km, 5-10km,...)

Finalement on aboutit à la distribution de distance suivante pour les déplacements cherchant à être covoiturés :

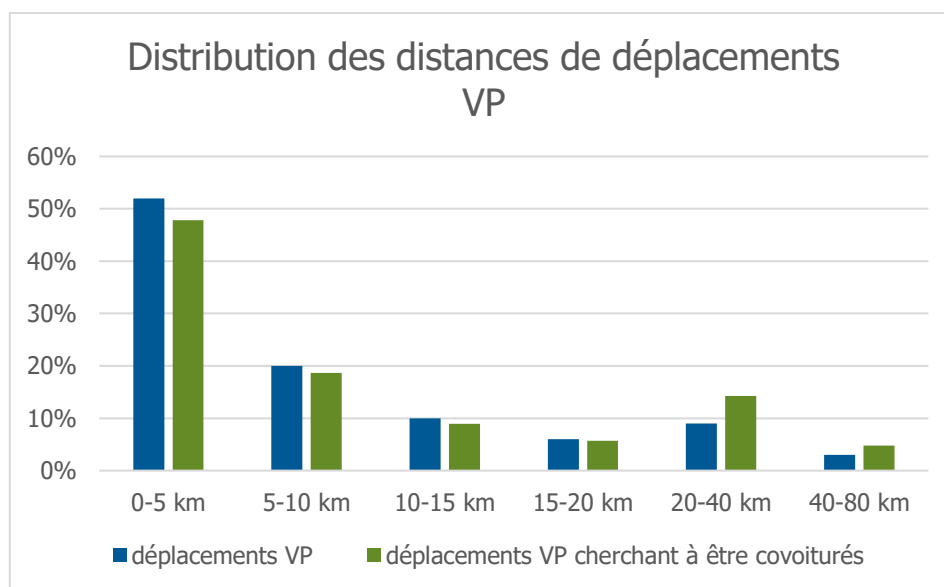


Figure 50 : Distributions de distance avant et après redressement pour le scénario Vol. En bleu, la distribution des distances de l'ensemble des déplacements VP ; en vert, celle uniquement des déplacements VP cherchant à être covoiturés.

### 7.3.3. Taux d'occupation final

De la même manière que dans le scénario PM, par l'application de notre modèle numérique avec cette nouvelle distribution de distances et le nombre de trajets covoiturables obtenus pour le scénario Vol, on peut déduire du nombre de déplacements covoiturables le taux d'occupation sur ces déplacements, puis sur l'ensemble des déplacements.

Ainsi en reprenant l'exemple de la communauté 1 de Grand-Couronne, sur les 2057 déplacements covoiturables, il n'y a que 20% de déplacements qui cherchent à covoiturer, soit 411 déplacements. Le modèle de covoiturage (calibré avec la nouvelle distribution de distances) nous permet alors de trouver le taux d'occupation correspondant à ce nombre de déplacements.

	GC-IDF	Normandie	Calvados	Rouen	Havre
Nb depl par pers par jour	4,20	4,33	4,36	4,04	4,36

Part des déplacements fait en voiture	55%	68%	69%	65%	62%
<i>parmi les déplacements en voiture</i>					
Part des déplacements non chaînés	46%	43%	45%	46%	42%
<i>parmi les déplacements en voiture non chaînés</i>					
Part des déplacements cherchant à être covoituré	20%	20%	20%	20%	20%
Nb depl covoiturable Vol par pers par jour	0,21	0,25	0,27	0,24	0,23
Taux d'occupation Vol déplacements covoiturables	1,25	1,25	1,24	1,29	1,28
Taux d'occupation habituel	1,19	1,22	1,20	1,25	1,25
Taux d'occupation global du scénario Vol	1,22	1,24	1,22	1,27	1,27

*Tableau 111 : Tableau récapitulatif des différentes étapes de calcul pour aboutir au nouveau taux d'occupation global du scénario Vol*

## 7.4. Résultats

### 7.4.1. Résultats généraux

	GC-IDF		Normandie		Calvados		Rouen		Havre	
	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM
Distances parcourues (p.km)	Inchangées									
Taux de remplissage	1,8%	21%	0,7%	11%	0,9%	13%	0,8%	13%	0,5%	10%
Trafic voiture (v.km)	-1,7%	-17%	-0,6%	-10%	-0,9%	-11%	-0,8%	-11%	-0,5%	-8,7%
CO <sub>2</sub> eq ACV	-1,6%	-16%	-0,6%	-9,1%	-0,9%	-11%	-0,8%	-11%	-0,5%	-8,3%

Tableau 112 : Résultats généraux des scénarios covoiturage sur les 5 zones, par rapport au scénario Référence de chaque zone.

On observe une augmentation du taux de remplissage de +21% en grande couronne d'Île-de-France et d'entre +10-13% dans les agglomérations normandes, pour le scénario PM.

### 7.4.2. Interprétation des résultats sur la mobilité

#### 7.4.2.1. Interprétation des résultats sur la grande couronne d'IDF

Pour comprendre les ordres de grandeur de variation des taux de remplissage, on détaille la situation sur la grande couronne d'IDF, l'analyse étant la même sur les autres zones.

Sur la grande couronne d'IDF, on a l'évolution du taux de remplissage suivante :

	GC-IDF		
	Réf	Vol	PM
Taux de remplissage (p.km/v.km)	1,19	1,22	1,44

Tableau 113 : Évolution du taux de remplissage dans les scénarios covoiturage sur la grande couronne d'IDF

Étudions plus en détail comment évolue le trafic voiture dans le scénario covoiturage PM en grande couronne d'IDF :

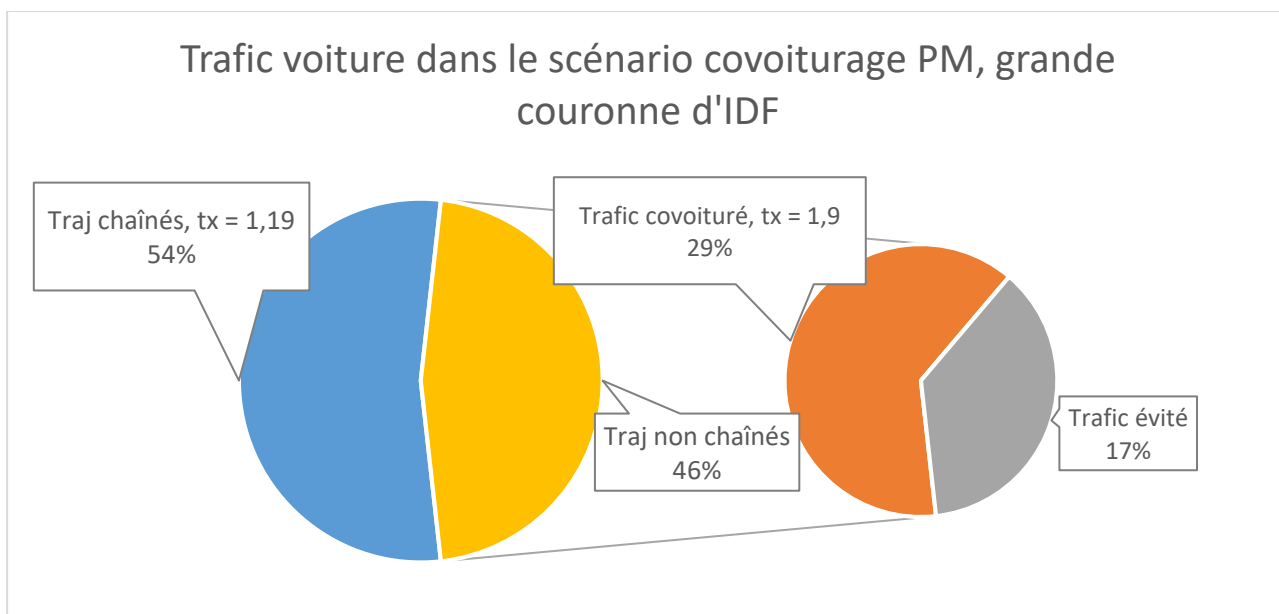


Figure 51 : Détail du trafic voiture dans le scénario covoiturage PM, grande couronne d'IDF  
(tx représente le taux de remplissage en p.km/v.km)

On a une part de trajets chaînés de 54%, ces trajets sont par hypothèse non covoiturables et ont donc le taux d'occupation habituel de 1,19. Parmi les trajets non chaînés, notre modèle prévoit un taux d'occupation de 1,9. Ce surcroît de personnes par voiture entraîne une réduction du trafic de 17%.

#### 7.4.2.2. Interprétation des différences entre zones

Comme on l'a vu, l'un des déterminants de l'usage du covoiturage est le nombre d'habitants dans les communautés<sup>33</sup>. Plus les communautés sont peuplées, plus une personne cherchant un covoiturage a de chance d'en trouver un compatible avec ses contraintes géographiques et temporelles, et donc plus le taux d'occupation dans la communauté sera élevé.

Chacune de nos 5 zones d'études sont constituées de centaines de communautés. Pour évaluer si une zone contient des communautés plutôt peuplées ou vides, étudions le nombre d'habitants médian des communautés d'une zone. C'est le nombre d'habitants dans une zone pour lequel la moitié des communautés de la zone ont plus d'habitants et la moitié des communautés de la zone ont moins d'habitants.

<sup>33</sup> En pratique, un autre déterminant clé est la proportion de ces habitants qui cherchent effectivement à covoiturer pour leurs déplacements. Dans notre scénario PM, on suppose cette proportion égale à 100 %, ce qui gomme ce déterminant. Il réapparaît cependant fortement dans le scénario Vol, pour lequel on voit que les résultats sont significativement plus faibles que dans le scénario PM.



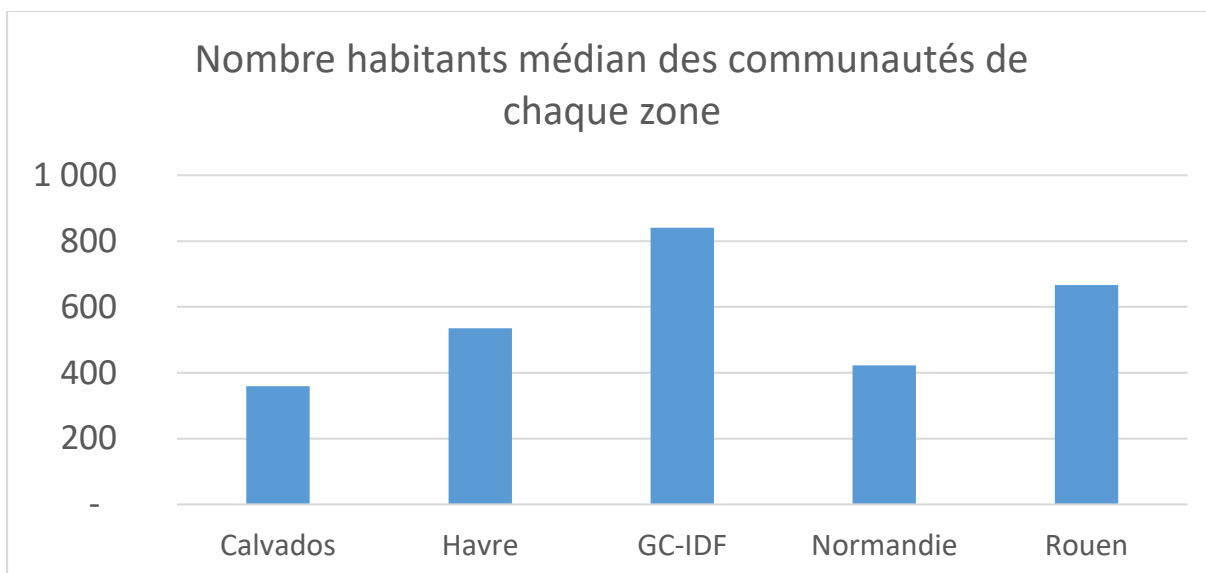


Figure 52 : Nombre d'habitants médian des communautés de chaque zone

On observe que la grande couronne d'IDF a le nombre d'habitants médian dans des communautés le plus élevé. Cela semble cohérent étant donné que c'est la zone la plus dense en habitants.

Comparons cela à nos résultats :

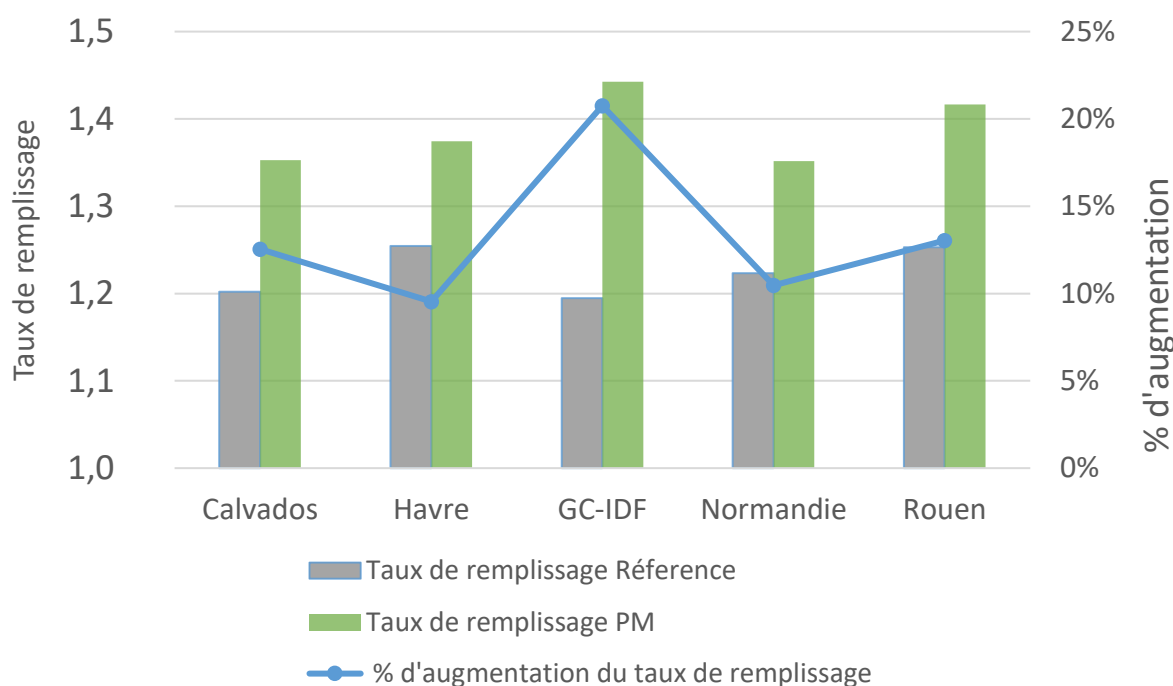


Figure 53 : Taux de remplissage (en p.km/v.km) dans le scénario covoiturage PM et % d'augmentation du taux de remplissage, pour chaque zone.

Si on regarde le taux de remplissage dans le scénario covoiturage PM (barres vertes), on observe une dynamique similaire entre zones que sur l'indicateur du nombre d'habitants médian des communautés (Figure 52) : la grande couronne d'IDF est en tête, suivi de Rouen, puis du Havre, du

Calvados et de la Normandie. Cela illustre bien que le nombre d’habitants médian des communautés est un déterminant important de l’usage du covoiturage dans notre modèle.

Le pourcentage d’augmentation du taux de remplissage (ligne bleu) a une dynamique légèrement différente entre les zones. Cela vient du fait que les zones n’ont pas le même taux de remplissage au départ (barres grises). Au final c’est cet indicateur – le pourcentage d’augmentation du taux de remplissage, qui déterminera la réduction des distances parcourues par les voitures et qui déterminera à son tour les différents impacts (CO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>x</sub>).

### 7.4.3. Résultats sur la consommation d’énergie et les émissions

	GC-IDF		Normandie		Calvados		Rouen		Havre	
	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM
Trafic voiture (v.km)	-1,7%	-17%	-0,6%	-10%	-0,9%	-11%	-0,8%	-12%	-0,5%	-8,7%
Consommation énergétique	-1,2%	-12%	-0,6%	-9,0%	-0,9%	-11%	-0,8%	-11%	-0,5%	-8,1%
CO <sub>2</sub> à l'usage	-1,6%	-16%	-0,6%	-9,1%	-0,9%	-11%	-0,8%	-11%	-0,5%	-8,2%
CO <sub>2</sub> total	-1,6%	-16%	-0,6%	-9,1%	-0,9%	-11%	-0,8%	-11%	-0,5%	-8,3%
NO <sub>x</sub>	-1,7%	-17%	-0,6%	-9,0%	-0,9%	-11%	-0,8%	-11%	-0,5%	-8,2%
PM10	-1,5%	-15%	-0,6%	-8,3%	-0,8%	-10%	-0,7%	-9,9%	-0,4%	-7,4%
PM2.5	-1,5%	-15%	-0,6%	-8,9%	-0,8%	-11%	-0,8%	-11%	-0,5%	-8,1%

Tableau 114 : Résultats sur la consommation d’énergie et les émissions

On observe comme prévu que les réductions de consommation d’énergie et d’émissions sont fortement corrélées à la réduction du trafic voiture.

### 7.4.4. Résultats sur le temps passé à se déplacer

Pour calculer le temps passé à se déplacer on fait les hypothèses suivantes :

- Chaque covoitureur attend 5 min son covoiturage
- Pour prendre les covoitureurs passagers et le déposer au bon endroit, chaque covoitureur conducteur ajoute un détour de 10% de la distance de son déplacement, par covoitureur transporté. Ce détour est fait à la vitesse moyenne de la voiture sur la Vallée de la Seine : 24 km/h.
- Le temps supplémentaire du détour est subi par toutes les personnes du véhicule sauf celle qui se fait déposer. Nous prenons ainsi en compte le nombre de personnes dans le véhicule à chaque instant.

Exemple : Imaginons 1 conducteur et 3 covoitureurs qui vont tous vers une même destination à 15 km mais avec des détours de 10% à faire. Le conducteur vient chercher les 3 covoitureurs qui ont chacun attendu 5 min, soit 15 min supplémentaires. Le conducteur doit faire 3 détours de 10% \* 15 = 1,5 km

soit 3,75 min par détour pour déposer chacun des covoitureurs. Le 1<sup>er</sup> détour est subi par 3 personnes (le conducteur et les 2 autres covoitureurs), le 2<sup>ème</sup> par 2 personnes, et le dernier par 1 personne (le conducteur). Cela fait un total de 6 détours soit  $6 \times 3,75 = 22,5$  min. En y ajoutant les 15 minutes d'attente, 37,5 minutes supplémentaires ont été nécessaires pour que ce groupe de 4 personnes fassent chacun leur déplacement par rapport à si chacun avait utilisé son véhicule. Rapporté par personne, cela fait 9,4 min de plus. Ce déplacement fait en VP aurait normalement pris 37,5 minutes, chaque personne a donc pris 25% de temps en plus.

Selon ces hypothèses, on obtient les résultats suivants sur chaque zone :

	GC-IDF		Normandie		Calvados		Rouen		Havre	
	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM	Vol	PM
Temps passé à se déplacer (h par personne)	1,66	1,72	1,18	1,23	1,22	1,28	1,18	1,24	1,18	1,23
Temps passé à se déplacer (% diff par rapport à Référence)	0,6%	4,5%	0,6%	5,0%	0,7%	5,2%	0,7%	5,6%	0,6%	4,6%

Tableau 115 : Résultats sur le temps passé à se déplacer

On observe que plus le covoiturage se développe, plus le temps passé à se déplacer s'allonge. Environ +0,6 à +0,7% de temps supplémentaire dans le scénario Vol et +4,5 à +5,6% dans le scénario PM.

#### 7.4.5. 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 chacune des zones.

##### 7.4.5.1. 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 pour estimer leur coût 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 116).
  - Coût des stations de covoiturage équivalent à celui d'un parking, soit 373 €/m<sup>2</sup> TTC, avec une durée de vie de 20 ans, en se basant sur les coûts actuels.
  - Une place VP (25 m<sup>2</sup> en incluant la place et son accès (DGALN 2013)) équivaut en surface à 12 places vélo.
- Le réseau routier de la zone de l'aire urbaine du Calvados est calculé selon les données pour le Calvados en 2018, rapportée à la superficie de l'AU Calvados (MTE 2018). On suppose qu'il n'évolue pas entre aujourd'hui et 2030. Il se caractérise alors ainsi :
  - Le réseau routier communal est constitué de 4 166 km de route
  - Le réseau routier départemental est constitué de 3 405 km de route

- Le réseau routier national est constitué de 73 km de route
- Le réseau autoroutier est constitué de 78 km d'autoroutes

Ces hypothèses offrent :

- 100 000 places de stationnement dans le scénario PM, qui permettent 170 000 trajets covoiturés par jour dans l'AU Calvados (que l'on obtient en multipliant le delta du trafic entre le scénario covoiturage et le scénario référence, soit la réduction du trafic local dans le scénario covoiturage PM, par le trafic local VP :  $11\% * 4,79 \text{ Gvkm/an} = 0,5 \text{ Gvkm/an}$  ; delta que l'on divise par la distance moyenne des trajets covoiturés  $0,5 \text{ (Gvkm/an)} / 8,8 \text{ (km/trajet)} = 60,3 \text{ M}$  de trajets covoiturés par an, soit environ 170 000 trajets covoiturés par jour).
- 8 300 places de stationnement dans le scénario *volontariste*, qui mènent à 11 000 trajets covoiturés par jour dans l'AU Calvados.
- Ces nombres de places assurent plus de la moitié du nombre de trajets journaliers qui sont covoiturés selon le scénario. Nous supposons en effet que l'autre moitié des trajets en covoiturage se fera en porte à porte (retour d'expérience WayzUp qui indique que  $\frac{3}{4}$  des trajets se font actuellement en porte à porte, mais dans nos scénarios nous supposons une massification du covoiturage et donc le développement du covoiturage via les stations de covoiturage). Pour illustrer ce point, imaginons que 10 trajets covoiturés soient observés sur un territoire donné (soit 10 voitures qui circulent avec des covoitureurs à leur bord). Nos hypothèses correspondent à l'idée que 5 de ces voitures ont été chercher les covoitureurs directement chez eux (donc les voitures ou vélos de ces covoitureurs restent au garage : pas besoin de places de stationnements ailleurs), et 5 autres voitures, au contraire, ont pris leurs covoitureurs sur une station de covoiturage, covoitureurs qui l'ont rejointe par leurs propres moyens, dont potentiellement des véhicules (vélos ou voitures) à stationner.

AU Calvados	PM			Volontariste		
	Nb stations par 10km de route	Nb places VP/station	Nb places vélo/station	Nb stations par 10km de route	Nb places VP/station	Nb places vélo/station
Route départementale	4	3	60	2	1	10
Route nationale	3	3	100	2	1	10
Autoroutes	1	10	1 500	1	3	75

*Tableau 116 : Hypothèses de fréquence spatiale des stations de covoiturage, et du nombre de places de stationnement VP et vélo qu'elles contiennent, sur l'AU du Calvados.*

Les hypothèses pour les autres zones sont disponibles en fin de partie 7.7.3.

- Nous supposons la 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 700 employés (c'est le nombre d'employés chez Blablacar), payés environ au double du SMIC (hypothèse de 46 k€/an chargés). Cette plate-forme est développée à une échelle nationale, si bien que la dépense affectée pour chaque zone est calculée au prorata de la population de la zone.
- Nous supposons la 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 légèrement au dessus du SMIC (hypothèse de 23 k€/an chargés) et que leur nombre est proportionnel aux nombre de trajets faits en covoiturage, donc dépend du scénario : 98 employés pour le scénario PM et 7 pour le scénario *volontariste* en AU du Calvados. Les hypothèses prises pour déterminer ce nombre sont :
  - 5 % des covoitureurs n'ont pas accès à Internet

- Le service est assuré tous les jours de l'année pendant 7 h
- Un employé peut gérer une réservation toutes les 3 minutes, soit 60 (min/h)\*7(h/jr.homme) / 3 (min/réservation) = 140 réservations/jr.homme.
- Chaque employé travaille 220 jours/an pendant 7 h
- Par exemple pour le scénario PM, les 170 000 trajets covoiturés par jour génèrent 5 %\*170 000 = 8300 appels/jr pour des réservations, qui requièrent 8300(appels/jr)\*365(jr/an)/140(appels/jr.homme)/220(jr.homme/an/salarié) = 98 salariés.

L'ensemble des dépenses est supposé pris en charge par le secteur public

#### 7.4.5.2. Les postes de réduction des dépenses<sup>34</sup>

- Moindre usage moyen de la VP chaque année, d'où une **réduction des dépenses d'achat de véhicules neufs à l'année**.
  - Pour calculer cette réduction, nous estimons dans un premier temps un coût moyen d'achat de voiture neuve, ramené au kilomètre parcouru sur la durée de vie de la voiture (soit un coût « unitaire »).
  - La durée de vie kilométrique moyenne des voitures est supposée égale à 150 000 km (Kolli 2011). Elle est supposée être la même dans tous les scénarios, les domaines d'action étant supposés ne pas jouer sur cette durée de vie, qui est déterminée par l'accidentologie, les pratiques industrielles de conception et production des voitures, les pratiques d'entretien, etc. L'usage d'une durée de vie kilométrique du véhicule permet de faire abstraction des divers changements de main du véhicule et de se focaliser sur le nombre de kilomètres qu'il parcourt au cours de sa vie dans le parc de voitures, de sa vente à sa mise à la casse (ou sa revente en dehors du territoire français).
  - Le prix d'une VP neuve est supposé être de 26 150 € HT (autoMoto 2019).
  - Ainsi, nous estimons le coût unitaire moyen d'achat de la voiture à  $CU_{achatVP} = 17$  c€/v.km.
  - Puis nous utilisons l'écart relatif de trafic entre le scénario *Référence* et les scénarios Covoiturage pour estimer la baisse de coût engendrée par l'achat des VP qui assurent ces kilomètres,  $\Delta C_{achat,Ref \rightarrow C}$ , selon la formule suivante :

$$\Delta C_{achat,Ref \rightarrow C} = CU_{achatVP} * \Delta_r T_{Ref \rightarrow C} * T_{Ref} \quad (24)$$

Avec  $\Delta_r T_{Ref \rightarrow C}$  l'écart relatif de trafic entre les scénarios Covoiturage et le scénario de *Référence*, et  $T_{Ref}$  le trafic de VP annuel en 2030 dans le scénario *Référence*, le produit des deux étant égal à la somme des vkm évités par le covoiturage par rapport au scénario *référence*, en 2030.

- Dans le scénario Vol par exemple, le trafic VP est réduit de  $\Delta_r T_{Ref \rightarrow C} = 0,9 \%$ , pour l'AU du Calvados, soit une réduction absolue de 43 Mv.km/an, soit une baisse de dépense en achats de VP de 6 M€/an.
- Moindre usage moyen de la VP, d'où une réduction de la **consommation de carburant** sur la zone étudiée.
  - Pour calculer cette réduction, nous estimons dans un premier temps un coût moyen de consommation d'une voiture, ramené au kilomètre parcouru (soit un coût unitaire).

<sup>34</sup> La méthode décrite dans cette section est utilisée dans le bilan économique de chaque domaine d'action.

- Nous retenons une consommation moyenne du parc en 2030 de 4,6 L/100 km (il s'agit de notre hypothèse pour le scénario *Référence*), et un prix du carburant de 0,97 €/L HT, soit 1,5€/L TTC. Ainsi, nous estimons le coût unitaire moyen de consommation de carburant de la voiture à  $CU_{carbuVP} = 7 \text{ c€/v.km TTC}$  ou  $4\text{c€/v.km HT}$ .
- Puis nous utilisons l'écart relatif de trafic entre le scénario *Référence* et le scénario Covoiturage pour estimer la baisse de coût engendrée par l'achat des carburants qui assurent ces kilomètres,  $\Delta C_{carbu,Ref \rightarrow C}$ , selon la formule suivante :

$$\Delta C_{carbu,Ref \rightarrow C} = CU_{carbuVP} * \Delta_r T_{Ref \rightarrow C} * T_{Ref} \quad (25)$$

- Dans le scénario Vol par exemple, le trafic VP est réduit de  $\Delta_r T_{Ref \rightarrow C} = 0,9 \%$ , pour l'AU du Calvados, une réduction absolue de 43 Mv.km/an, soit une baisse de dépense en carburant de VP de 2 M€/an.

Dans le scénario *Référence*, le trafic annuel étant de 4,8 Gv.km/an, pour l'AU du Calvados, la consommation annuelle pour la mobilité est de  $4,6 * 4,8 * 10^7 = 220 \text{ ML/an}$ , pour un coût HT de  $4,8 * 0,4 * 10^6 = 213 \text{ M€/an}$ .

- **Moindre usage moyen de la VP, d'où une réduction moyenne des frais liés à l'entretien, aux réparations et à l'assurance.**

- Pour calculer cette réduction, nous estimons dans un premier temps les dépenses moyennes par ménages pour l'entretien, la réparation et l'assurance de leur VP, chaque année. Selon le budget des familles 2017 (INSEE 2017a), cette somme s'élève à 1 100 €/an/ménage.
- En 2008 en France métropolitaine, 488 Gp.km ont été parcourus en mobilité quotidienne, la VP correspondant à 86% de ces km parcourus (CGDD 2010).
- En mobilité longue distance, 330 Gp.km ont été parcourus en 2008 dont 51% en VP (CGDD 2010).
- Le nombre de ménage en France hexagonale était en 2008 de l'ordre de 26,6 M (INSEE 2011).
- Ainsi la mobilité des ménages en VP en 2008 était de l'ordre de :  $(0,86 * 488 \text{ Gpkm/an} + 0,51 * 330 \text{ Gpkm/an}) / 26,6 \text{ Mménages} = 22 \text{ 100 p.km/an/ménage}$
- Nous pouvons en déduire un coût moyen du pkm lié à l'entretien, à la réparation et à l'assurance  $1 \text{ 100} / 22 \text{ 100} * 100 = 5\text{c€/v.km TTC}$ <sup>35</sup>, soit  $CU_{entretVP} = 4\text{c€/v.km HT}$ .
- Puis nous utilisons l'écart relatif de trafic entre le scénario *Référence* et le scénario Covoiturage pour estimer la baisse de coût engendré par les services d'entretien, de réparation et d'assurance qui assurent ces kilomètres,  $\Delta C_{entret,Ref \rightarrow C}$ , selon la formule suivante :

$$\Delta C_{entret,Ref \rightarrow C} = CU_{entretVP} * \Delta_r T_{Ref \rightarrow C} * T_{Ref} \quad (26)$$

---

<sup>35</sup> Une erreur de calcul s'est glissée ici, que nous n'avons pas eu le temps de corriger : la valeur du coût unitaire d'entretien, réparation et assurance aurait dû être divisée par le taux de remplissage moyen des voitures pour passer des pkm aux vkm. Cela aurait réduit ce poste d'économie d'environ 20 % par rapport à ce qui est affiché dans nos résultats de coûts. Ramenée à l'ensemble des postes d'économie (incluant la moindre consommation de carburant et les moindres dépenses d'achats de voitures), cette erreur mène à une surévaluation des économies de 4 à 5% (+1c€/km sur environ 25c€/km). Ainsi, les ordres de grandeur restent bons, et les conclusions qu'on peut tirer des résultats généraux de coût restent valables.

- Dans le scénario Vol par exemple, le trafic VP est réduit de  $\Delta_r T_{Ref \rightarrow C} = 0,9 \%$ , pour l'AU du Calvados, une réduction absolue de 43 Mv.km/an, soit une baisse de dépense en frais d'entretien, de réparation et d'assurance VP de l'ordre de 2 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.

### 7.4.5.3. Résultats

**Le covoiturage, en scénario *volontariste*, permet d'économiser environ 9 millions d'€ chaque année dans l'AU du Calvados. En scénario PM, cette économie atteint 116 millions d'€.**

Les résultats des calculs sont détaillés dans les Tableau 117 et Tableau 118.

On constate que les postes de dépenses créés spécifiquement pour mettre en place le covoiturage représentent des augmentations de dépenses annualisées négligeables devant les réductions de dépenses réalisées par l'augmentation de la durée de vie des VP, par le moindre usage de carburant, et par les moindres dépenses en entretien, assurance et réparation. 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.
- 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 2030, issues du scénario Vision 2035 de l'ADEME pour notre scénario *Référence* sont optimistes et tendent à diminuer les économies réalisées par le système de covoiturage.
- 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 PM, qui évite 11 % du trafic local, permet d'économiser environ 116 millions d'€/an à la société, tandis que le scénario Vol, qui évite 0,9 % du trafic local, permet d'économiser environ 9 millions d'€/an pour l'AU du Calvados.

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 seraient multipliées par un facteur 10 environ si on supposait que les aires de covoiturage n'étaient équipées qu'en stationnements voitures.

Élément différent entre S' et Sref	Type de modification	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€)	Surcoût à l'année S'/Sref (M€)	Hypothèse d'allocation des coûts
Stations de covoiturage autoroute	Création	1 258 200	€/station	8	station	8	20	0	-	0	Public
Stations de covoiturage routes nationales	Création	105 627	€/station	22	station	2	20	0	-	0	Public
Stations de covoiturage routes départementales	Création	74 560	€/station	1 362	station	85	20	4	-	4	Public
Application Internet/smartphone	Création	45 963	€/pers/an	7	pers	0	1	0	-	0	Public
Ressources humaines pour aider à planifier des trajets pour ceux qui ont des difficultés d'accès à Internet	Création	22 981	€/pers/an	98	pers	2	1	2	-	2	Public
Usage de la voiture - achat véhicule	Modif	0,17	€/vkm	4	Gvkm	618	1	618	695	- 77	Ménages
Usage de la voiture - achat carburant	Modif	0,07	€/vkm	4	Gvkm	189	1	189	213	- 24	Ménages
Usage de la voiture - entretien et réparation	Modif	0,05	€/vkm	4	Gvkm	177	1	177	199	- 22	Ménages
						Total annuel (M€)		991	1 107		
						Surcoût total annuel (M€)		- 116			

Tableau 117 : Les différents postes de dépenses du covoiturage, pour le scénario PM dans l'AU du Calvados. 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 7.4.5.2. 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 (€)	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€)	Surcoût à l'année S'/Sref (M€)	Hypothèse d'allocation des coûts	
Stations de covoiturage autoroute	Création	86 210	€/station	8	station	1	20	0	-	0,0	Public	
Stations de covoiturage routes nationales	Création	17 087	€/station	15	station	0	20	0	-	0,0	Public	
Stations de covoiturage routes départementales	Création	17 087	€/station	681	station	10	20	0	-	0,5	Public	
Application Internet/smartphone	Création	45 963	€/pers/an	7	pers	0	1	0	-	0,3	Public	
Ressources humaines pour aider à planifier des trajets pour ceux qui ont des difficultés d'accès à Internet	Création	22 981	€/pers/an	7	pers	0	1	0	-	0,2	Public	
Usage de la voiture - achat véhicule	Modif	0,17	€/vkm	5	Gvkm	689	1	689	695	- 6	Ménages	
Usage de la voiture - achat carburant	Modif	0,07	€/vkm	5	Gvkm	211	1	211	213	- 2	Ménages	
Usage de la voiture - entretien et réparation	Modif	0,05	€/vkm	5	Gvkm	197	1	197	199	- 2	Ménages	
								Total annuel (M€)		1 099	1 107	
								Surcoût total annuel (M€)		- 9		

Tableau 118 : Les différents postes de dépenses du covoiturage, pour le scénario volontariste dans l'AU du Calvados. 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 7.4.5.2. 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.

Le détail des hypothèses par zones est indiqué dans les tableaux suivants :

	Grande couronne IdF	AU Normandie	EMD Rouen	AU Calvados	EMD Havre
Réduction du trafic VP PM (%)	17%	9%	12%	11%	9%
Réduction du trafic VP vol (%)	1,7%	0,6%	0,8%	0,9%	0,5%
Route communale (km)	18 514	28 630	3 487	4 166	3 188
Route départementale (km)	7 390	21 146	2 076	3 405	1 899
Route nationale (km)	400	410	42	73	39
Autoroutes (km)	449	526	96	78	88

Tableau 119 : Hypothèses de coûts pour les scénarios covoiturage, différenciées par zone.

AU Normandie	PM			Volontariste		
	Nb stations par 10km de route	Nb places VP/station	Nb places vélo/station	Nb stations par 10km de route	Nb places VP/station	Nb places vélo/station
Route départementale	4	3	30	1,5	1	5
Route nationale	3	3	50	2	1	5
Autoroutes	1	10	700	1	3	20

Tableau 120 : Hypothèses de fréquence spatiale des stations de covoiturage, et du nombre de places de stationnement VP et vélo qu'elles contiennent, sur L'AU Normandie.

Grande couronne IdF	PM			Volontariste		
	Nb stations par 10km	Nb places VP/station	Nb places vélo/station	Nb stations par 10km	Nb places VP/station	Nb places vélo/station
Route départementale	4	7	200	2	3	35
Route nationale	4	7	200	2	5	50
Autoroutes	1	20	3 000	1	10	500

Tableau 121 : Hypothèses de fréquence spatiale des stations de covoiturage, et du nombre de places de stationnement VP et vélo qu'elles contiennent, sur la zone Grande couronne d'IdF.

<b>EMD Rouen</b>	PM			Volontariste		
	Nb stations par 10km de route	Nb places VP/station	Nb places vélo/station	Nb stations par 10km de route	Nb places VP/station	Nb places vélo/station
Route départementale	4	3	75	2	1	12
Route nationale	3	3	100	2	1	12
Autoroutes	1	10	1 500	1	3	100

Tableau 122 : Hypothèses de fréquence spatiale des stations de covoiturage, et du nombre de places de stationnement VP et vélo qu'elles contiennent, sur la zone de l'EMD de Rouen.

<b>EMD Havre</b>	PM			Volontariste		
	Nb stations par 10km de route	Nb places VP/station	Nb places vélo/station	Nb stations par 10km de route	Nb places VP/station	Nb places vélo/station
Route départementale	4	3	50	1,5	1	6
Route nationale	3	3	50	2	1	10
Autoroutes	1	10	500	1	3	12

Tableau 123 : Hypothèses de fréquence spatiale des stations de covoiturage, et du nombre de places de stationnement VP et vélo qu'elles contiennent, sur la zone de la métropole du Havre.

Les résultats généraux correspondant sont indiqués dans les tableaux ci-dessous :

<b>Covoiturage PM</b>	<b>Grande couronne IdF</b>	<b>AU Normandie</b>	<b>EMD Rouen</b>	<b>AU Calvados</b>	<b>EMD Havre</b>
<b>Augmentation des dépenses ménages (M€/an)</b>	-	-	-	-	-
<b>Augmentation des dépenses collectivités territoriales (M€/an)</b>					
Aires de covoiturage	60	30	10	10	5
Plateforme internet/smartphone					
Centrale d'appel planification sans internet					
<b>Réduction des dépenses ménages (M€/an)</b>					
Consommation carburant réduite	1120	430	90	120	50
Fréquence d'achat VP réduite					
Besoins d'entretien/réparation/assurance VP réduits					
<b>Surcoût total annuel (M€/an)</b>	<b>-1060</b>	<b>-400</b>	<b>-90</b>	<b>-120</b>	<b>-50</b>

*Tableau 124 : Résultats généraux de coûts pour le scénario Covoiturage PM, dans chaque zone (chiffres arrondis).*

<b>Covoiturage Vol</b>	<b>Grande couronne IdF</b>	<b>AU Normandie</b>	<b>EMD Rouen</b>	<b>AU Calvados</b>	<b>EMD Havre</b>
<b>Augmentation des dépenses ménages (M€/an)</b>	-	-	-	-	-
<b>Augmentation des dépenses collectivités territoriales (M€/an)</b>					
Aires de covoiturage	10	5	1	1	0
Plateforme internet/smartphone					
Centrale d'appel planification sans internet					
<b>Réduction des dépenses ménages (M€/an)</b>					
Consommation carburant réduite	110	30	10	10	5
Fréquence d'achat VP réduite					
Besoins d'entretien/réparation/assurance VP réduits					
<b>Surcoût total annuel (M€/an)</b>	-100	-30	-10	-10	-5

*Tableau 125 : Résultats généraux de coûts pour le scénario Covoiturage Vol, dans chaque zone (chiffres arrondis).*



## Chapitre 8 - Bibliographie

---

- ADEME. 2018a. *Bilan transversal de l'impact de l'électrification par segmen. PROJET E4T*. ADEME.
- ADEME. 2018b. *Climat, Air et Energie*.
- ADEME. 2020. « Base Carbone ADEME ». *Bilans GES - ADEME*. Consulté (<https://www.bilans-ges.ademe.fr/>).
- AgriMer. 2012. *Fruits et légumes : évolution et tendance de consommation*.
- Aguilera, Anne, Virginie Lethiais, Alain Rallet, et Laurent Proulhac. 2016. « Home-Based Telework in France: Characteristics, Barriers and Perspectives ». *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 92:1-11. doi: 10.1016/j.tra.2016.06.021.
- ARAFER. 2017. *Annexes - Bilan du transport ferroviaire de voyageurs 2015/2016*.
- autoMoto. 2019. « [Diaporama] Le vrai prix moyen des voitures en France ». *autoMoto*. Consulté (<https://www.auto-moto.com/actualite/societe/diaporama-vrai-prix-moyen-voitures-france-201596.html#item=1>).
- Baaj, Hassan. 2012. « Dégradation et usure des revêtements routiers souples ». *Techniques de l'Ingénieur*.
- Cabinet Roland Berger/ Centre d'Analyse Stratégique. 2009. *Le développement du télétravail dans la société numérique de demain*. Centre d'analyse stratégique.
- CGDD. 2008. « Fichiers détail de l'Enquête nationale transports et déplacements 2008 ».
- CGDD. 2010. *La mobilité des Français - Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008. La Revue du CGDD*. CGDD.
- CGDD. 2016. *Éléments d'évaluation socioéconomique et environnementale du transport par autocar*.
- CITEPA. 2017. *Guide Ominea v2017*.
- Codra Nîmes. 2019. *Schéma directeur des modes actifs de Nîmes*.
- CREDOC. 2012. « Enquête commerce 2012 - Comportements et attitudes des consommateurs à l'égard du commerce alimentaire ».
- CREDOC. 2014. *La diffusion des technologies de l'information et de la communication dans la société française*.
- CVTC. 2004. *Le coût des aménagements cyclables*.
- Del Duce, Andrea. 2011. « Life Cycle Assessment of conventional and electric bicycles ». Présenté à Eurobike 2011, septembre 2, Friedrichshafen.
- DGALN. 2013. *Stationnement des vélos dans les espaces privés : dimensions et caractéristiques*.
- Direction Générale de l'Energie et du Climat. 2019. *Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat*.
- Direction Générale de l'Energie et du Climat. 2020. « Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat ».
- Epitalon, Grégoire. 2016. « L'entreprise face aux défis du télétravail gris ».

- Fabrique de la Cité. 2015. *Optimiser l'offre de mobilité dans les périphéries des villes*.
- Forbes. 2015. « Five Things You Need To Know About Telecommuting ». *Forbes*. Consulté 9 novembre 2020 (<https://www.forbes.com/sites/jacobmorgan/2015/05/04/5-things-you-need-to-know-about-telecommuting/>).
- Forum Vie Mobiles/l'Obsoco. 2016. *Modes de vie et mobilité, une approche par les aspirations*.
- Harms, Lucas, et Maarten Kansen. 2018. « Netherlands Institute for Transport Policy Analysis, Cycling Facts ».
- HBEFA. 2019. « HBEFA v4.1 ».
- INSEE. 2011. « Couples - familles - ménages en 2008 ». *INSEE*. Consulté (<https://www.insee.fr/fr/statistiques/2044606>).
- INSEE. 2016. « Projections de population à l'horizon 2070 ».
- INSEE. 2017a. « Les dépenses des ménages en 2017 ». *INSEE*. Consulté 21 janvier 2021 (<https://www.insee.fr/fr/statistiques/4648339>).
- INSEE. 2017b. « Projections de population 2013-2050 pour les départements et les régions | Insee ». Consulté 27 janvier 2021 (<https://www.insee.fr/fr/statistiques/2859843>).
- INSEE. 2018. « Effectif salarié en équivalent temps plein par catégorie d'entreprise en 2015 ». Consulté ([https://www.insee.fr/fr/statistiques/2012719#tableau-TCR\\_054\\_tab1\\_regions2016](https://www.insee.fr/fr/statistiques/2012719#tableau-TCR_054_tab1_regions2016)).
- INSEE. 2020a. « Effectifs de la fonction publique par versant au 31 décembre 2018 ». Consulté (<https://www.insee.fr/fr/statistiques/2012758>).
- INSEE. 2020b. « Emploi salarié et non salarié par activité de 1989 à 2018 ». *INSEE*. Consulté (<https://www.insee.fr/fr/statistiques/2424696#tableau-Donnes>).
- Kolli, Zéhir. 2011. « Cars longévité: a biometric approach ». P. 1-24 in. Denmark.
- LBMG Worklabs, Seine et Marne Développement. 2020. « Télétravail et Télécentre ».
- Le Monde. 2020. « L'Ile-de-France veut se débarrasser de tous ses bus diesel d'ici à dix ans ». *Le Monde*. Consulté ([https://www.lemonde.fr/planete/article/2020/10/21/l-ile-de-france-veut-se-debarrasser-de-tous-ses-bus-diesel-d-ici-a-dix-ans\\_6056867\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2020/10/21/l-ile-de-france-veut-se-debarrasser-de-tous-ses-bus-diesel-d-ici-a-dix-ans_6056867_3244.html)).
- LSA. 2017. « La montée du drive impose d'adopter de nouveaux outils ». *lsa-conso.fr*. Consulté 29 novembre 2020 (<https://www.lsa-conso.fr/la-montee-du-drive-impose-d-adopter-de-nouveaux-outils,259682>).
- Luciano, Francisco. 2017. *Décarboner la mobilité dans les zones de moyenne densité - Moins de carbone, plus de lien*. The Shift Project.
- MTE. 2018. *Memento de statistique des transports 2018*.
- Observatoires des mobilités actives - CVTC. 2013. *Les français et le vélo en 2012*.
- PAPON, Francis. 2012. « Le retour du vélo comme mode de déplacement ».
- Région Ile-de-France. 2017. *Révolutionner les transports en Ile-de-France*.
- The Shift Project. 2020. *Etude Comparative de l'Impact Carbone des Véhicules*.
- Unibail Rodamco. 2016. « Centres commerciaux ».
- WHO/Europe. 2020. « HEAT v4.2 ». *HEAT*. Consulté ([https://www.heatwalkingcycling.org/#start\\_tool](https://www.heatwalkingcycling.org/#start_tool)).



# Chapitre 9 - Annexes

## 9.1. Estimations des experts à l'atelier covoiturage

Motifs de trajet \ CSP		Etudiant				Employé/ouvrier				Cadre/intermédiaire				Inactif : chômeur/au foyer				Retraité				Scolaire			
		A	B	delta	final	A	B	delta	final	A	B	delta	final	A	B	delta	final	A	B	delta	final	A	B	delta	final
Achats	CD	20	40	20	30	20	20		20	20	0	20	10	20	20		20	20	20		20	0	N/A		N/A
	LD	40	60	20	50	40	40		40	40	20	20	30	40	40		40	40	40		40	20	N/A		N/A
Soins/démarches	CD	20	0	20	10	20	0	20	10	20	0	20	10	20	0	20	10	40	0	40	20	0	N/A		N/A
	LD	20	0	20	10	20	0	20	10	20	0	20	10	20	0	20	10	60	0	60	30	20	N/A		N/A
Visites amis/famille	CD	20	40	20	30	20	20		20	20	20		20	20	20		20	20	20		20	0	N/A		N/A
	LD	60	60		60	40	40		40	40	40		40	40	60	20	50	40	60	20	50	20	N/A		N/A
Accompagner/aller chercher	CD	N/A	0		0	20	0	20	10	20	0	20	10	20	0	20	10	0	0		0	N/A	N/A		N/A
	LD	N/A	0		0	20	0	20	10	20	0	20	10	20	0	20	10	0	0		0	N/A	N/A		N/A
Loisirs	CD	40	20	20	30	40	0	40	20	40	0	40	20	40	0	40	20	40	0	40	20	0	N/A		N/A
	LD	60	60		60	60	20	40	40	60	20	40	40	60	20	40	40	60	20	40	40	20	N/A		N/A
Travail/Etudes	CD	80	80		80	60	20	40	40	60	20	40	40	N/A	N/A		N/A	N/A	N/A		N/A	0	N/A		N/A
	LD	80	60	20	70	60	40	20	50	60	20	40	40	N/A	N/A		N/A	N/A	N/A		N/A	20	N/A		N/A
Autres professionnels	CD	N/A	N/A		N/A	20	0	20	10	20	0	20	10	N/A	N/A		N/A	N/A	N/A		N/A	N/A	N/A		N/A
	LD	N/A	N/A		N/A	20	0	20	10	20	0	20	10	N/A	N/A		N/A	N/A	N/A		N/A	N/A	N/A		N/A

Tableau 126 : Estimations des experts covoiturage. Les colonnes A et B correspondent aux estimations des groupes A et B. La colonne delta est le différentiel entre les deux estimations. Enfin la colonne « finale » est l'estimation finale. Il s'agit soit d'une nouvelle estimation issue de la réconciliation des deux groupes, soit de la moyenne des deux estimations. La grille a été organisée de manière à ce que les catégories représentant le plus grand nombre de déplacements dans la réalité, soient en haut à gauche. Les déplacements pour aller au travail des cadres/intermédiaires représentent donc le plus grand nombre de déplacements parmi les catégories de cette grille. CD : Courte Distance (inférieur à 20 km) ; LD : Longue Distance (supérieur à 20 km).

Clé de lecture : Sur 100 cadre/intermédiaire allant au travail, en voiture, sans enchaîner de motifs, à moins de 20 km, 20 chercheront à covoiturer selon le groupe A.

## 9.2. Estimations des experts à l'atelier vélo

	CSP	Cadre/Intermédiaire				Employé/ouvrier				Retraité				Scolaire				Etudiant				Inactif			
Motifs de trajet	distance	A	B	delta	final	A	B	delta	final	A	B	delta	final	A	B	delta	final	A	B	delta	final	A	B	delta	final
Travail/ Etudes	0-3km	80%	90%	10%	<b>85%</b>	70%	90%	20%	<b>80%</b>	N/A	N/A		0%	90%	100%	10%	95%	80%	100%	20%	90%	N/A	N/A		0%
	3-7km	40%	30%	10%	<b>35%</b>	30%	30%		<b>30%</b>	N/A	N/A		0%	40%	60%	20%	50%	30%	80%	50%	55%	N/A	N/A		0%
	7-15km	5%	20%	15%	<b>13%</b>	5%	10%	5%	<b>8%</b>	N/A	N/A		0%	0%	20%	20%	10%	5%	40%		23%	N/A	N/A		0%
Loisirs	0-3km	80%	90%	10%	<b>85%</b>	70%	90%	20%	<b>80%</b>	70%	80%	10%	75%	90%	100%	10%	95%	80%	100%	20%	90%	70%	100%	30%	85%
	3-7km	40%	30%	10%	<b>35%</b>	30%	30%		<b>30%</b>	30%	20%	10%	25%	40%	60%	20%	50%	30%	30%		30%	40%	40%		40%
	7-15km	5%	20%	15%	<b>13%</b>	5%	10%	5%	<b>8%</b>	5%	0%	5%	3%	0%	20%		10%	5%	40%		23%	5%	40%		23%
Achats	0-3km	80%	80%		<b>80%</b>	80%	80%		<b>80%</b>	80%	80%		80%	80%	80%		80%	80%	100%	20%	90%	80%	100%	20%	90%
	3-7km	20%	20%		<b>20%</b>	20%	20%		<b>20%</b>	20%	10%	10%	15%	20%	20%		20%	20%	30%	10%	25%	20%	60%	40%	40%
	7-15km	5%	10%	5%	<b>8%</b>	5%	0%		<b>3%</b>	5%	0%		3%	5%	10%		8%	5%	20%		13%	5%	20%		13%
Soins/ démarches	0-3km	80%	90%	10%	<b>85%</b>	80%	90%	10%	<b>85%</b>	70%	80%	10%	75%	80%	100%	20%	90%	80%	100%	20%	90%	80%	100%	20%	90%
	3-7km	10%	30%	20%	<b>20%</b>	10%	30%	20%	<b>20%</b>	10%	20%	10%	15%	10%	60%	50%	35%	10%	30%	20%	20%	40%	40%		40%
	7-15km	0	20%	20%	<b>10%</b>	0	10%		<b>5%</b>	0	0%		0%	0	20%		10%	0%	40%		20%	0%	40%		20%
Accompagner/ aller chercher	0-3km	70%	60%	10%	<b>65%</b>	70%	60%	10%	<b>65%</b>	70%	60%	10%	65%	70%	80%	10%	75%	70%	80%	10%	75%	70%	80%	10%	75%
	3-7km	5%	10%	5%	<b>8%</b>	5%	10%	5%	<b>8%</b>	5%	0%	5%	3%	5%	40%	35%	23%	5%	40%	35%	23%	5%	40%	35%	23%
	7-15km	0%	0%		<b>0%</b>	0%	0%		<b>0%</b>	0%	0%		0%	0%	0%		0%	0%	10%		5%	0%	10%		5%
Visites amis/ famille	0-3km	80%	90%	10%	<b>85%</b>	80%	90%	10%	<b>85%</b>	80%	80%		80%	80%	100%	20%	90%	80%	100%	20%	90%	80%	100%	20%	90%
	3-7km	30%	30%		<b>30%</b>	30%	30%		<b>30%</b>	30%	20%	10%	25%	30%	60%	30%	45%	30%	30%		30%	40%	40%		40%
	7-15km	5%	20%	15%	<b>13%</b>	5%	10%		<b>8%</b>	5%	0%		3%	5%	20%		13%	5%	40%		23%	5%	40%		23%
Autres motifs professionnels	0-3km	40%	40%		<b>40%</b>	40%	60%	20%	<b>50%</b>	N/A	N/A		0%	N/A	N/A		0%	N/A	N/A		0%	N/A	N/A		0%
	3-7km	5%	20%	15%	<b>13%</b>	5%	20%	15%	<b>13%</b>	N/A	N/A		0%	N/A	N/A		0%	N/A	N/A		0%	N/A	N/A		0%
	7-15km	0%	10%	10%	<b>5%</b>	0%			<b>0%</b>	N/A	N/A		0%	N/A	N/A		0%	N/A	N/A		0%	N/A	N/A		0%

*Tableau 127 : Estimations des experts vélo. Les colonnes A et B correspondent aux estimations des groupes A et B. La colonne delta est le différentiel entre les deux estimations. Enfin la colonne « finale » est l'estimation finale. Il s'agit soit d'une nouvelle estimation issue de la réconciliation des deux groupes, soit de la moyenne des deux estimations. La grille a été organisée de manière à ce que les catégories représentant le plus grand nombre de déplacements dans la réalité, soient en haut à gauche.*





**Contacts**

Nicolas RAILLARD

[nicolas.raillard@theshiftproject.org](mailto:nicolas.raillard@theshiftproject.org)

Paul BOOSZ

[Paul.boosz@theshiftproject.org](mailto:Paul.boosz@theshiftproject.org)

**Contact presse**

Jean-Noël GEIST

[Jean-noel.geist@theshiftproject.org](mailto:Jean-noel.geist@theshiftproject.org)

+ 33 (0) 6 95 10 81 91

Site web: [www.theshiftproject.org](http://www.theshiftproject.org)

