



Une approche nouvelle du covoiturage dans les modèles macroscopiques

Théo Michallet

► To cite this version:

Théo Michallet. Une approche nouvelle du covoiturage dans les modèles macroscopiques. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2019. dumas-03184731

HAL Id: dumas-03184731

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03184731>

Submitted on 29 Mar 2021

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

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

Copyright



Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

Année 2018-2019

Voie d'approfondissement : Transport

Soutenu le 03/ 09 / 2019

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Ludovic LECLERC
- Maître de TFE : Sophie BOSSUWE
- Expert : Pierre-Antoine LAHAROTTE

Par

Théo MICHALLET

Une approche nouvelle du covoiturage dans les modèles macroscopiques

PTV France



the mind of movement

Notice analytique

AUTEUR			
Nom	MICHALLET		
Prénom	Théo		
ORGANISME D'ACCUEIL			
Nom de l'organisme et Localité	PTV France 47 Rue Maurice Flandin, 69003 Lyon		
Nom du Tuteur			
ANALYSE DU TFE			
Titre (français)	Une approche nouvelle du covoiturage dans les modèles macroscopiques.		
Titre (anglais)	A new approach of carpooling in macroscopic models.		
Résumé (français)	Ce mémoire étudie les possibilités de modélisation d'aménagements de covoiturage dans le cadre d'un modèle à quatre étapes. Le modèle proposé intègre les problématiques environnementales actuelles puisqu'il propose de considérer des variables jusqu'ici trop souvent négligées dans la littérature scientifique. Les principaux aménagements ici étudiés sont les voies à occupation multiple (HOV) et, dans une moindre mesure, les péages à occupation multiple (HOT). Le modèle proposé est issu d'une première phase théorique basée sur des recherches bibliographiques, puis d'une phase pratique de calibration réalisée à partir de données de villes françaises. Ces deux phases amènent à la proposition d'un modèle qu'il convient bien sûr d'utiliser (et de surcroît d'adapter) avec précaution, en particulier à cause du peu de données qui existe actuellement en matière de covoiturage.		
Résumé (anglais)	This paper tries to offer a model that includes carsharing strategies modelling in 4 steps models. The proposed model considers environmental issues as it takes in count some variables too often omitted in common models. The main strategies studied in this paper are High Occupancy Vehicle Lane (HOV), and to a lesser extent High Occupancy Toll (HOT). This model is the result of a first phase of a theoretical literature review, and then a practical application and calibration to some french cities models. These results must be used or adapted with care because of the lack of data available about carpooling user's behavior.		
Mots-clés (français, 5 maxi)	Modélisation, Covoiturage, Macroscopique, Demande, Calage		
Mots-clés (anglais, 5 maxi)	Modelling, Carsharing, Macroscopic, Demand, Calibration		
Termes géo-graphique (français)	Europe, France, Rennes, Lyon		
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	57	1	22

Sommaire

Notice analytique.....	0
Lexique.....	4
Introduction	5
1 Problématique	6
2 Méthodologie	7
2.1 Données initiales	7
2.2 Axe de modélisation.....	8
2.3 Critère d’appréciation du modèle	11
3 Modélisations proposées	12
3.1 Prise en compte de la distinction entre conducteur et passager.....	12
3.1 Prise en compte des voies réservées	13
3.2 Fonctions d’utilité	15
4 Calage.....	22
4.1 Données bibliographiques	22
4.2 Comparaison avec l’ancien modèle de l’agglomération rennaise.....	24
4.3 Respect des charges VP2+ sur l’agglomération rennaise.....	27
5 Analyse des modèles	40
5.1 Modélisation de l’aménagement	40
5.2 Etape de choix modal.....	44
5.3 Synthèse	50
6 Limites et voies d’approfondissement.....	51
6.1 Données de calage.....	51
6.2 Evolutions des comportements.....	51
6.3 Classification des modes.....	52
Conclusion.....	53
Bibliographie	54
Annexes	57

Table des illustrations

Figure 1 : Exemple de fonctions d'utilité du scénario de référence 2030 de Rennes.....	7
Figure 2 : Matrice d'utilité des passagers sur un extrait de la matrice OD.....	8
Figure 3 : Distribution de l'utilité Passagers sur 1000 itinéraires aléatoires de l'agglomération rennaise	8
Figure 4: Régression linéaire effectuée dans le cas d'une enquête préférence réalisée au Texas	9
Figure 5 : Estimation de la capacité des véhicules covoitureurs de l'aire urbaine rennaise (328 personnes interrogées).....	12
Figure 6 : Equivalence entre la part modale et le nombre de véhicules pour différents taux d'occupation des véhicules covoitureurs	13
Figure 7 : Influence d'un report modal de 10% sur le nombre de véhicules (occupation de 2 voyageurs par covoiturage).....	13
Figure 8 : Modélisation d'une voie HOV sous VISUM (attributs pour le sens Sud → Nord)	14
Figure 9 : Création d'un attribut de péage HOT	14
Figure 10 : Motifs de covoiturage pour les habitants de l'aire urbaine rennaise	15
Figure 11: Carte des coûts d'accès au centre-ville avec péage sur rocade.....	17
Figure 12 : Carte des coûts d'accès au centre-ville sans péage.....	17
Figure 13: Estimation des temps de détour avec une relation inverse.....	18
Figure 14 : Estimation des temps de détour avec une relation racine	19
Figure 15: Création d'un indicateur de la contrainte socio professionnelle.....	19
Figure 16: Matrice d'utilité proposée (7 variables).....	21
Figure 17: Matrice d'utilité de référence (3 variables).....	21
Figure 18 : Impact de différentes variables sur le choix modal des habitants du Texas	22
Figure 19 : Classement des motifs de choix du covoiturage.....	23
Figure 20 : Classement des motifs de choix du covoiturage.....	23
Figure 21 : Comparaison des utilités associées à une sélection d'OD	25
Figure 22 : Comparaison des utilités associées aux 15 OD les plus différentes	25
Figure 23 : Comparaison des parts modales entre le modèle proposé et l'ancien modèle.....	26
Figure 24 : Méthodologie de production des données proposée par P.Bonnel	27
Figure 25 : Répartition des postes de comptages utilisés pour l'enquête	28
Figure 26 : Charges VL des capteurs retenus pour le calage.....	28
Figure 27 : Estimation de la répartition modale des capteurs	29
Figure 28 : Charge VP2+ en chacun des capteurs.....	29
Figure 29 : Répartition spatiale des capteurs étudiés.....	30
Figure 30 : Analyse des charges pour la première itération (sens entrant)	30
Figure 31 : Analyse des charges pour la première itération (sens sortant)	31
Figure 32 : Position des 3 voies réservées	31
Figure 33 : Comparaison des GEH au niveau des 22 capteurs étudiés	32
Figure 34 : Comparaison de la composante sociale proposée et de l'impédance pour 3 OD qui empruntent le capteur 9122	32
Figure 35 : Analyse des charges pour la deuxième itération (sens entrant).....	33
Figure 36 : Analyse des charges pour la deuxième itération (sens sortant).....	33
Figure 37 : Comparaison des GEH pour les charges entrantes	34
Figure 38 : Comparaison des GEH pour les charges sortantes.....	34
Figure 39 : Arborescence au niveau du capteur Thorigné E-W.....	35
Figure 40 : Valeur du temps préconisée par le Commissariat Général du Plan.....	36

Figure 41 : Analyse des charges pour la 3ème itération (sens entrant).....	37
Figure 42 : Analyse des charges pour la 3ème itération (sens sortant)	37
Figure 43 : Synthèse des résultats de calage sur les 11 capteurs les plus intéressants.....	38
Figure 44 : Synthèse des résultats de calage sur l'ensemble des capteurs	38
Figure 45 : Chemins étudiés dans le 1 ^{er} test	40
Figure 46 : Temps de parcours et taux d'occupation des 2 chemins étudiés dans le sens de l'entrée pour le 1 ^{er} test	40
Figure 47 : Caractéristiques des tronçons lors du 1 ^{er} test	41
Figure 48 : Chemins étudiés dans le second test.....	42
Figure 49 : Caractéristiques des tronçons lors du 2ème test.....	42
Figure 50 : Parts modales associées aux deux modèles.....	44
Figure 51 : Répartition des véhicules covoitureurs et autosolistes associée à chaque modèle	44
Figure 52 : Comparaison des parts modales entre le modèle proposé et les 4 scénarios du test d'élasticité	45
Figure 53 : Comparaison du niveau d'occupation du réseau entre le modèle proposé et le modèle initial.....	47
Figure 54 : Comparaison du niveau d'occupation du réseau entre le modèle proposé et les 4 scénarios du test d'élasticité.....	47
Figure 55 : Impact du changement d'occupation des tronçons sur le temps de parcours des usagers (comparaisons des 4 scénarios avec le modèle de référence proposé, et comparaison du scénario de référence avec l'ancien modèle)	49
Figure 56 : Tableau récapitulatif de l'étude d'élasticité du modèle	50
Figure 57 : Séquence de procédure proposée pour la création des nouvelles variables.....	57

Lexique

HOT : High Occupancy Toll ou péage à occupation multiple. Le prix du péage est différencié pour les covoitureurs et les autosolistes. Souvent, la portion est payante pour les autosolistes, et gratuites pour les covoitureurs.

HOV : High Occupancy Vehicle Lane, ou voies réservées aux véhicules à occupation multiple. Les autosolistes ne sont pas autorisés à circuler sur ces voies.

Impédance : Fonction utilisée lors de la génération pour calculer les émissions et attractions d'une zone à partir de ses attributs.

MaP : Marche à pied. Peut faire référence à un mode, un système de transport ou un segment de demande.

Mode : Chaque déplacement est rattaché à au moins un mode. Un mode se rattache généralement à un unique système de transport, mais il peut faire appel à plusieurs systèmes de transports lors d'une affectation multimodale.

OD : Origine-Destination. Représente une relation orientée entre deux zones.

Segment de demande : Le segment de demande permet d'affecter la demande au réseau. Pour une affectation TI, les segments de demande contiennent le nombre de véhicules du mode associé. Pour une affectation TC, le segment de demande du mode TC contient un nombre de déplacements.

SysTr : Système de transport. Classification utilisée dans VISUM pour différencier les systèmes de transport (ne doit pas être confondu avec le mode). Chaque système de transport possède des caractéristiques (vitesse maximale, nombre d'UVP), et ce sont sur ces systèmes de transport que portent les restrictions de circulation des tronçons.

TI : Transports Individuels. Ce mode s'oppose au mode TC, et englobe les modes de transport suivants : VP Con, VP Pass, Marche à pied, Vélo, Poids lourds

PTV Visum : Logiciel de modélisation et de simulation développé par PTV. Les simulations utilisées dans le rapport ont été calculées et analysées à l'aide de ce logiciel.

Utilité : Fonction utilisée lors de la distribution pour passer des émissions/attractions d'une zone aux matrices OD. L'utilité est à la distribution ce que l'impédance est à la génération.

VP : Véhicule Particulier. Système de transport utilisé ici pour les véhicules d'autosoliste. Souvent utilisé en contradiction de VP2+, auquel cas cela sous-entend que le VP ne contient qu'une seule personne.

VP2+ : Véhicules à occupation multiple. Système de transport utilisé pour les véhicules contenant 2 personnes ou plus.

VP Con : Mode VP Conducteur. Un usager de ce mode peut conduire son véhicule seul, ou bien transporter des passagers.

VP Pas : Mode VP Passager.

Introduction

Apparu à la fin du XIX^{ème} siècle, l'automobile s'est surtout popularisée durant la seconde moitié du XX^{ème} siècle. Elle s'est progressivement présentée comme une alternative aux autres modes de transport, jusqu'à devenir un système de transport universel. On estime à près d'un milliard le nombre actuel d'automobilistes, et les prévisions estiment qu'on en comptera près de 1,7 milliard à l'horizon 2035.

Plus qu'un système de transport, la voiture façonnait jusqu'ici le territoire dans une société où l'accessibilité est un facteur important d'intégration. L'émergence des problématiques environnementales redistribue les cartes, faisant de la voiture un sujet polémique aux frontières des problématiques économiques, sociales et environnementales.

C'est dans ce contexte que les politiques urbaines commencent à proposer des alternatives à l'autosolisme. Majoritairement popularisé en Europe par une plateforme privée, le covoiturage est actuellement un point d'intérêt important des agglomérations françaises qui commencent à proposer des mesures. Celles-ci peuvent aussi bien se matérialiser par des campagnes d'incitation ou des aires de covoiturage que par des aménagements plus lourds, à l'instar des nombreux projets fleurissants de voies de covoiturage. Initialement popularisées aux Etats-Unis suite à la crise pétrolière de 1979, ces voies de covoiturage ne sont plus uniquement le reflet d'une motivation économique, et il semble désormais essentiel d'intégrer ces nouvelles composantes.

L'objectif de ce rapport est dans un premier temps la mise en équation des comportements des covoitureurs. Celle-ci devrait pouvoir aboutir à un modèle mathématique qui reproduit le plus fidèlement possible les comportements de mobilité des covoitureurs.

La modélisation adoptée devra permettre l'évaluation de ces nouveaux aménagements de covoiturage. Une modélisation efficace permettra aux collectivités qui disposent d'un modèle à quatre étapes d'étudier en amont les conséquences d'un projet de développement du covoiturage.

1 Problématique

Pour répondre à ce constat, il a été choisi d'aborder la question du point de vue de la modélisation de la demande. L'objectif est donc de proposer une modélisation du covoiturage qui permette de mesurer l'efficacité des mesures de développement du covoiturage.

Les pratiques de covoiturage sont relativement peu connues en comparaison avec les pratiques traditionnellement prises en compte dans les modèles à quatre étapes. Les modèles généralement établis n'intègrent pas, ou peu, le covoiturage dans le choix modal, et les analyses réalisées par la suite ne peuvent que donner une évaluation grossière des aménagements de covoiturage.

Au-delà de simplement proposer une modélisation des voies de covoiturage, l'objectif de ce rapport sera de proposer un modèle de covoiturage dans son ensemble. Il sera donc discuté de l'étape de choix modal ainsi que de la prise en compte des différents types d'aménagements que des collectivités pourraient être amenées à vouloir évaluer.

La problématique du covoiturage urbain est encore relativement récente, et peu de données sont actuellement disponibles en matière de modélisation du covoiturage. Il est donc difficile de comparer le modèle proposé à des benchmarks, et nous utiliserons donc principalement le modèle de l'agglomération rennaise pour mener nos réflexions. Il faudra donc éviter au maximum de complexifier inutilement le modèle si l'on veut éviter l'overfitting.

La problématique du rapport réside donc dans le fait de *proposer une méthodologie de modélisation raisonnablement complexe et qui offre une élasticité suffisamment intéressante pour évaluer de manière pertinente différents scénarios de développement du covoiturage.*

La partie suivante détaille la méthodologie qui va être mise en œuvre pour répondre au mieux à cette problématique.

2 Méthodologie

2.1 Données initiales

Le logiciel PTV Visum a été mis à ma disposition durant mon stage. C'est un logiciel de modélisation et de simulation macroscopique qui permet de créer des modèles à quatre étapes puis de les analyser.

Le logiciel intègre les variables de la fonction d'utilité au moyen de matrices d'indicateurs contenant diverses informations sur les couples d'origines-destinations du modèle. Les matrices d'indicateurs les plus utilisées sont par exemple les matrices de temps de parcours (à vide ou en charge), de distances (distance parcourue ou à vol d'oiseau) ou de coûts de péage. Les modèles macroscopiques étant agrégés, l'information est une moyenne de l'ensemble des déplacements de l'OD. Les matrices d'indicateurs sont spécifiques à un segment de la demande puisque chaque mode va induire ses propres indicateurs.

Les indicateurs sont calculés dans le logiciel par des lignes de codes appelées procédures. Les lignes de code utilisées pour produire les matrices d'indicateurs les plus fréquentes sont préexistantes (temps à vide, temps chargé, distance à vol d'oiseau, etc), mais il est possible de calculer n'importe quelle matrice d'indicateur en proposant ses propres formules.

Le modèle de choix modal jusqu'ici utilisé dans ma structure comprenait en général une dizaine de variables. Chaque modèle possède ses propres fonctions d'utilité, et pour un même modèle, il existe une fonction d'utilité par groupe d'utilisateurs et par mode.

A titre d'exemple, le tableau ci-contre reprend les formules d'utilité utilisées dans le modèle de référence de l'agglomération rennaise, pour un groupe d'utilisateurs spécifique (les actifs habitant dans le centre et possédant une voiture).

Groupe d'utilisateurs	Mode	Fonction d'utilité	Type de fonction
Actifs du centre avec voiture	Marche	$0,18 * TpsMaP - 5$	Logit
	TC	$0,06 * TpsTC + 0,12 * TpsAccèsTC - 0,8 * Ln(DistVO) + 0,2 * TpsAttent + 2 * BonusCorresp - 0,1$	
	Vélo	$0,06 * TpsVélo + 0,1$	
	VP Conducteur	$0,06 * TpsVPCon + 0,33 * TpsAccèsCon - 0,5 * Ln(DistVO) - 2,246$	
	VP Passager	$0,06 * TpsVPPas + 0,12 * TpsAccèsPas - 0,4 * Ln(DistVO) + 2$	

Figure 1 : Exemple de fonctions d'utilité du scénario de référence 2030 de Rennes

On peut remarquer qu'il n'existe aucune distinction entre un conducteur autosoliste et un conducteur covoitureur. On entrevoit donc déjà la limite du modèle, puisqu'il suppose que le choix de covoiturer ne se fait pas par le conducteur, mais uniquement par le passager. Le passager quant à lui a le choix entre conduire son propre véhicule, ou covoiturer avec un conducteur. Pourtant en pratique le covoiturage est un accord mutuel entre un conducteur ayant fait le choix de partager son véhicule, et un passager souhaitant rejoindre un véhicule.

On remarque également que les fonctions d'utilité proposées présentent de fortes constantes, ce qui présage une faible réactivité de la part modale aux aménagements. L'idée va donc être d'augmenter l'élasticité du modèle en rajoutant des variables explicatives.

2.2 Axe de modélisation

Deux axes majeurs de modélisation ont été empruntés pour parvenir au modèle proposé. Le premier axe consiste à se concentrer sur l'étape de choix modal. Les principales notions abordées seront la fonction d'utilité ainsi que la description des modes et systèmes de transport.

Nous nous concentrerons ensuite d'avantage sur la modélisation des aménagements de covoiturage et verrons comment les intégrer au mieux dans les étapes de choix modal et d'affectation.

2.2.1 Modélisation du choix modal

Fonction d'utilité

Comme nous l'avons vu sur l'exemple du modèle rennais, les fonctions d'utilité du modèle initial sont basiques, seul le temps et la distance à vol d'oiseau sont pris en compte dans le choix modal. Il en résulte que la constante, prise égale à 1, représente une part relativement importante de l'utilité des passagers (voir figure 2). Si l'on s'intéresse à la distribution de l'utilité (figure 3), on constate une forte concentration aux alentours de 0.8, ce qui présage une réactivité relativement faible de l'utilité aux évolutions des variables qui la composent.

1137 x 1137			0123800	0123800	0123800	0123800	0123800	0123800	0123800	0123800	0123800	0123800	0123801	0123801	0123801	0123801	0123801	0123801
	Nom		RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES
		Total	480641.16	480606.61	480539.15	480550.72	480573.06	480686.46	480690.06	480692.42	480678.44	480558.83	480553.42	480578.33	480657.02	480634.01	480687.91	480687.91
101238001	RENNES	478672.87	0.18	1.68	1.50	1.30	1.08	1.03	0.90	0.88	0.84	0.65	0.57	0.57	1.56	0.98	1.05	
101238002	RENNES	478638.33	1.68	0.18	1.50	1.20	1.09	1.04	0.92	0.92	0.89	0.82	0.73	0.76	1.52	1.10	1.03	
101238003	RENNES	478570.86	1.50	1.50	0.18	1.46	1.26	1.12	0.96	0.93	0.88	0.67	0.57	0.56	1.32	0.98	1.10	
101238004	RENNES	478582.44	1.30	1.20	1.46	0.18	1.53	1.27	1.07	1.02	0.98	0.76	0.64	0.64	1.42	1.19	1.28	
101238005	RENNES	478604.78	1.08	1.09	1.26	1.53	0.18	1.49	1.21	1.12	1.05	0.77	0.63	0.62	1.13	1.11	1.40	
101238006	RENNES	478718.17	1.03	1.04	1.12	1.27	1.49	0.18	1.44	1.11	1.00	0.83	0.74	0.75	1.09	1.14	1.49	
101238007	RENNES	478721.77	0.90	0.92	0.96	1.07	1.21	1.44	0.18	1.43	1.20	0.87	0.75	0.74	0.95	1.03	1.30	
101238008	RENNES	478724.14	0.88	0.92	0.93	1.02	1.12	1.11	1.43	0.18	1.44	0.88	0.74	0.72	0.93	0.90	1.06	
101238009	RENNES	478710.16	0.84	0.89	0.88	0.98	1.05	1.00	1.20	1.44	0.18	1.01	0.81	0.78	0.90	0.92	1.04	
101238010	RENNES	478590.55	0.65	0.82	0.67	0.76	0.77	0.83	0.87	0.88	1.01	0.18	1.05	0.96	0.72	0.84	0.93	
101238011	RENNES	478585.14	0.57	0.73	0.57	0.64	0.63	0.74	0.75	0.74	0.81	1.05	0.18	1.47	0.63	0.72	0.83	
101238012	RENNES	478610.04	0.57	0.76	0.56	0.64	0.62	0.75	0.74	0.72	0.78	0.96	1.47	0.18	0.64	0.75	0.84	
101238013	RENNES	478688.73	1.56	1.52	1.32	1.42	1.13	1.09	0.95	0.93	0.90	0.72	0.63	0.64	0.18	1.16	1.14	
101238014	RENNES	478665.72	0.98	1.10	0.98	1.19	1.11	1.14	1.03	0.90	0.92	0.84	0.72	0.75	1.16	0.18	1.34	
101238015	RENNES	478719.63	1.05	1.03	1.10	1.28	1.40	1.49	1.30	1.06	1.04	0.93	0.83	0.84	1.14	1.34	0.18	

Figure 2 : Matrice d'utilité des passagers sur un extrait de la matrice OD

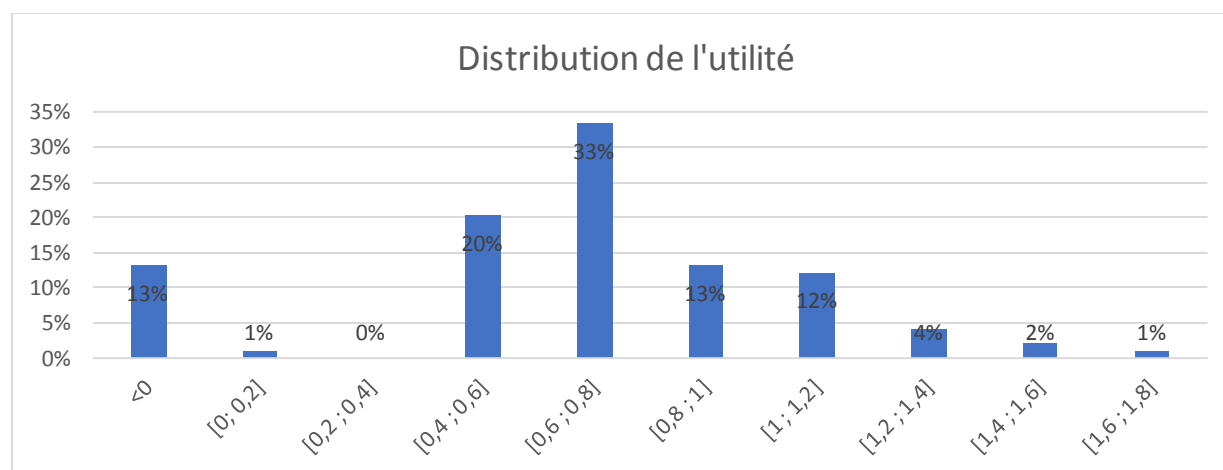


Figure 3 : Distribution de l'utilité Passagers sur 1000 itinéraires aléatoires de l'agglomération rennaise

Ces critères ne sont pourtant pas les seuls à rentrer en compte dans le choix modal¹. Comme le montre Li² sur la figure ci-contre, le temps de trajet n'est pas la seule motivation des covoitureurs. Elle se situe même derrière des motivations sociales ou environnementales non prises en compte dans la fonction d'utilité initiale.

Factor	Gender		Trip Purpose		Carpool	
	Female	Male	Commute and Work	Other	Yes	No
Access to HOV lanes	3.88 ^a	3.68 ^a	4.06 ^c	3.28 ^c	3.64 ^b	4.07 ^b
Relaxation while traveling	3.69	3.50	3.46 ^a	4.13 ^a	3.57	3.65
Enjoy travel with others	3.44 ^b	3.11 ^b	3.17 ^a	3.42 ^a	3.29	3.20
Help environment and society	3.38 ^b	3.09 ^b	3.36 ^b	2.99 ^b	3.13 ^b	3.45 ^b
Travel time saving	3.33 ^b	3.01 ^b	3.50 ^c	2.58 ^c	2.97 ^c	3.58 ^c
Other	3.45	2.98	3.07	3.21	3.23	2.97
Sharing vehicle expenses	3.33 ^b	2.98 ^b	3.53 ^c	2.47 ^c	2.89 ^c	3.74 ^c
Reliability of arrival time	3.19 ^c	2.71 ^c	3.27 ^c	2.33 ^c	2.75 ^c	3.36 ^c
Splitting tolls on toll roads	2.40	2.36	2.60 ^b	1.95 ^b	2.05 ^c	3.17 ^c
Get work done while traveling	2.34	2.05	2.04 ^a	2.79 ^a	2.32	2.04
Drop off kids at school/day care	2.61 ^c	1.89 ^c	2.21	2.26	2.43 ^c	1.78 ^c
Carpool partner matching program	2.14	1.99	2.18 ^b	1.86 ^b	1.97 ^b	2.28 ^b
Encouraged by program at work	2.08	1.93	2.10 ^b	1.82 ^b	1.88 ^b	2.26 ^b
Preferred parking at work	2.10 ^b	1.79 ^b	2.00	1.84	1.82 ^b	2.21 ^b

Figure 4: Régression linéaire effectuée dans le cas d'une enquête préférence réalisée au Texas

Le problème des coefficients de cette régression est de plusieurs nature. Premièrement ils sont spécifiques à la communauté étudiée, et même s'ils permettent d'esquisser quelques hypothèses, ils restent tout de même spécifiques au modèle texan.

De plus, ces coefficients sont conséquences des mentalités actuelles en matière de covoiturage, mais celles-ci évoluent rapidement. Un élément comme les voies à occupation multiple auront probablement beaucoup plus d'importance dans le choix modal lorsqu'elles seront bien développées qu'actuellement où elles n'en sont bien souvent qu'à l'étape de test.

L'objectif de cette étape sera donc d'isoler un jeu de variables explicatives, et de trouver les coefficients associés dans la fonction d'utilité. Pour surmonter les limites évoquées en matière de connaissances des pratiques de covoiturage, un travail de calage sera effectué en utilisant principalement les données issues du modèle de la métropole rennaise.

¹ G Correia and JM Viegas. *Carpooling and carpool clubs : Clarifying concepts and assessing value enhancement possibilities through a Stated preference web survey in Lisbon, Portugal*. Transportation Research Part A, Volume 45, 2011, Pages 81-90.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.457.1668&rep=rep1&type=pdf>

² J Li, P Embry, SP Mattingly and KF Sadabadi. *Who Chooses to Carpool and Why ? Examination of Texas Carpoolers*. Transportation Research Board, Volume 2021, 2007, Pages 110-117.
<https://pdfs.semanticscholar.org/58f9/ef8ae2afe29d0589a3e5975588de05cd2226.pdf>

Différenciation des modes et des systèmes de transport

L'étape de choix modal a pour objectif de scinder la matrice issue de l'étape de distribution en matrice par mode. Afin d'affecter ces matrices aux différents systèmes de transport, il est nécessaire de transformer un nombre de déplacements en nombre de véhicules. Cette conversion n'est pas triviale dans un modèle incluant le covoiturage, et il est nécessaire de différencier les véhicules qui covoiturent de ceux qui ne covoiturent pas : 10 déplacements de covoitureurs vont moins affecter le réseau que 10 déplacements d'autosolistes.

Il est bien important de comprendre la distinction entre les modes VPPas et VPCon (conducteur autosoliste ou conducteur covoitureur) et entre les systèmes de transport VP (véhicules autosolistes) et VP2+ (véhicule de covoitureurs). Ces termes et abréviations, détaillées dans la partie annexe, seront régulièrement utilisés dans la suite du rapport.

Il se pose alors la question de définir une relation pour estimer la capacité d'un véhicule de covoitureurs. Cette notion sera abordée plus en détail dans la section 3.1.

2.2.2 Modélisation des aménagements

En plus de proposer une fonction d'utilité fiable et réactive, il faut penser à la manière dont vont être modélisés les scénarios d'aménagements que l'on veut tester. Bien que décrite après le choix de la fonction d'utilité, cette étape doit être pensée en même temps que le choix modal.

L'intérêt de proposer une fonction d'utilité plus complexe réside dans la volonté de vouloir étudier la réponse du modèle à des variables sur lesquelles la collectivité a la main. En pratique, cela signifie qu'il est par exemple intéressant d'intégrer une variable qui mesure la longueur de voie réservée au covoiturage. On comprend donc facilement qu'il est indispensable de réfléchir à la manière dont seront modélisés ces aménagements de politiques urbaines si l'on veut les intégrer au mieux dans l'étape de choix modal.

Les principaux éléments que l'aménageur du territoire pourra évaluer dans le cas de ce modèle sont :

- Les voies réservées aux véhicules à occupation multiple (HOV). Elles ne sont ouvertes qu'aux véhicules dont l'occupation est supérieure à un certain seuil (souvent 2 ou 3 personnes). La voie peut être rajoutée, mais également prise sur les voies existantes ce qui peut avoir de fortes conséquences sur les véhicules autosolistes. Cet aménagement peut être modélisé par l'ajout de tronçons indépendants ouverts uniquement aux véhicules covoitureurs. L'ajout de ces tronçons s'accompagnerait évidemment d'une éventuelle baisse de capacité du tronçon initial si la voie réservée remplace une ancienne voie. L'idée est d'offrir une voie non congestionnée pour concurrencer les voies classiques congestionnées.
- Les voies à péage réservées aux véhicules à occupation multiple (HOT). Elles sont accessibles gratuitement aux véhicules à occupation multiple, mais les autres usagers doivent payer pour y accéder. Le prix du péage peut varier en fonction de la demande, et la voie peut ainsi tendre vers une voie réservée si le prix du péage atteint un niveau non acceptable par les usagers. L'idée est toujours d'utiliser un tronçon indépendant, mais au lieu de restreindre sa circulation aux véhicules à occupation multiple on fixe un prix de péage fonction du mode.
- Les panneaux incitant à la pratique du covoiturage. Ceux-ci peuvent être de différentes natures : on les rencontre habituellement sur les panneaux à affichage variable ou sur les panneaux annonçant une aire de covoiturage.

Les autres variables prises en compte dans le modèle ne sont pas la conséquence directe d'un aménagement et il est donc difficile de jouer dessus. Il est théoriquement possible de modifier les paramètres de la fonction d'utilité si la collectivité adopte une politique fortement orientée et qui a des conséquences sur le comportement des usagers. Cette modification est toutefois hasardeuse car cela implique de recalculer le modèle.

2.3 Critère d'appréciation du modèle

La proposition d'un modèle pertinent passe par un travail de calage. Cette étape nécessite de fixer des critères pour évaluer la précision du modèle. Différents critères ont été proposés afin d'évaluer soit la modélisation du choix modal, soit la modélisation des aménagements (voie réservées ou péages).

2.3.1 Modélisation du choix modal

Parts modales

Le critère généralement le plus important dans un projet de dynamisation du covoiturage est la part modale. Le modèle proposé doit donc estimer le plus fidèlement possible ce critère, et c'est la raison pour laquelle ce critère sera un élément essentiel d'évaluation du modèle.

L'avantage d'utiliser cet élément comme critère d'évaluation est qu'on le trouve généralement publiquement (SCoT, PDU, enquêtes de pratique, enquêtes ménages déplacements), et qu'il peut donc constituer un élément intéressant de calage.

Occupation

L'occupation du réseau est également un élément intéressant car elle mesure les conséquences du covoiturage sur le réseau. Elle doit par conséquent être reproduite fidèlement par le modèle. Cette donnée peut également être trouvée dans des ressources publiques.

Elasticité

Il est important que le modèle offre une bonne élasticité face aux variables que l'on pourrait être amené à vouloir faire varier. Un des inconvénients majeurs du modèle initial est d'ailleurs le manque d'élasticité du choix modal devant les dimensions autres que temporelles. L'objectif de la nouvelle fonction d'utilité est d'intégrer le coût du trajet, l'aspect environnemental, la motivation sociale ainsi que la composante incitative à l'étape de choix modal, et il semble donc essentiel que le modèle réagisse lorsque l'on modifie ces paramètres.

Dans le cas général, l'élasticité est le rapport entre la variation de la variable étudiée et la variation de la résultante étudiée. Nous nous intéresserons principalement aux élasticités de la part modale et de l'occupation des voies.

2.3.2 Modélisation de l'aménagement

Temps de parcours

La mesure des temps de parcours est un indicateur de la pertinence de la modélisation de la voie réservée. On peut en effet s'attendre à ce que le temps de parcours des covoitureurs diminue à la suite de la mise en place de la voie. Des données sont d'ailleurs présentes sur internet³, et on peut par exemple comparer les différences de temps de parcours du modèle avec les différences espérées pour voir si la HOV est correctement modélisée.

³ X Liu, G Zhang and YJ Wu. *Measuring the Quality of Service for high Occupant Toll Lanes Operations*. Procedia – Social and behavioral Sciences, Volume 16, 2011, Pages 15-25.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042811009712>

3 Modélisations proposées

3.1 Prise en compte de la distinction entre conducteur et passager

Conformément à ce qu'étaient généralement les attentes des commanditaires d'études lors de mon stage, le modèle de choix modal retenu est un modèle à 5 issues : conducteur, passager, transports en commun, vélo ou marche à pied. La présente section s'intéresse parfois uniquement aux deux premiers modes car beaucoup d'articles ont été écrits à propos de ce choix bimodal. On passe facilement d'un modèle logit de choix modal conducteur/passager à un modèle multimodal en utilisant les 5 utilités plutôt qu'uniquement celle des deux modes. Cela nécessite en revanche d'utiliser un autre jeu de paramètres pour les fonctions d'utilité.

Une fois ces deux modes différenciés, la question de l'affectation se pose. L'étape d'affectation des modes individuels nécessite en entrée une matrice représentant le nombre de véhicules de chaque mode individuel (l'affectation TC fonctionne différemment). Si cette étape est triviale pour le vélo et la marche à pied, elle peut être un peu plus complexe pour des systèmes de transport partagés.

Pour un même nombre de voyageurs se déplaçant en voiture, moins de voitures seront affectées sur le réseau si ces derniers covoiturent. Il est donc nécessaire de connaître le taux de remplissage moyen afin de passer d'une matrice de déplacements à une matrice de véhicules. Une enquête menée par l'AUDIAR⁴ (figure 3) estime à 2,56 personnes l'occupation moyenne d'un véhicule covoitureur. Une première approche a consisté à considérer que chaque covoiturage comprend 2 personnes, ce qui offre l'avantage de simplifier les calculs.

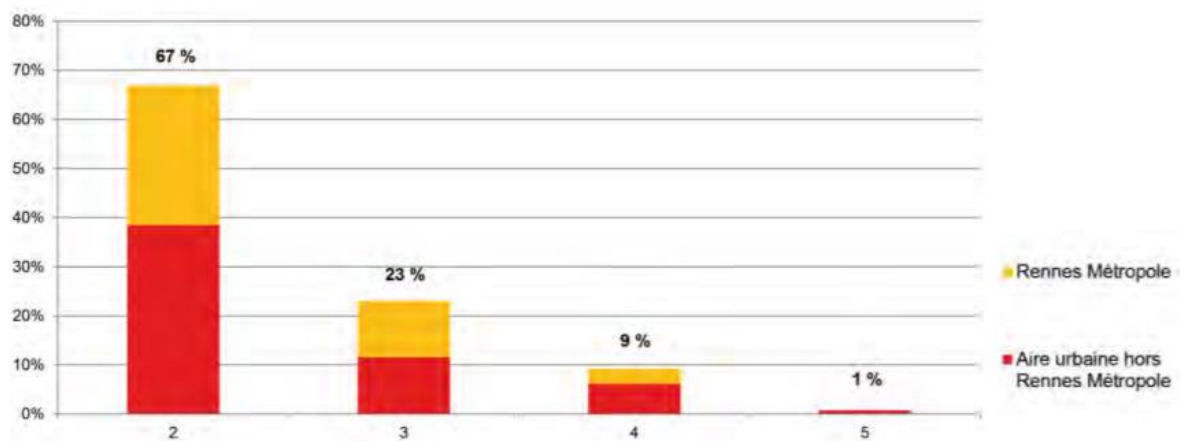


Figure 5 : Estimation de la capacité des véhicules covoitureurs de l'aire urbaine rennaise (328 personnes interrogées)

Sous cette hypothèse, deux formules simples donnent le nombre de véhicules de chaque système de transport en fonction des matrices de déplacement :

Nb VP individuelle : Nb conducteurs – Nb passagers

Nb VP collective : Nb passagers

⁴ Agence d'urbanisme et de développement intercommunal de l'agglomération rennaise. *Le covoiturage courte distance au départ des aires : pratiques des covoitureurs*. www.audiar.org, 2006.
https://www.audiar.org/sites/default/files/documents/etudes/web_1rapportfinal.pdf

La figure 6 donne un exemple de passage du nombre de déplacements au nombre de véhicules pour différents taux de remplissage. On observe que le nombre de covoitureurs par véhicule semble avoir un impact quasi asymptotique sur le nombre de véhicules.

En comparaison, la figure 7 montre que la part modale a une influence plus importante sur le nombre de véhicules que le taux d'occupation. Nous conserverons donc dans la suite l'hypothèse d'une occupation moyenne de 2 voyageurs par covoiturage afin de se pencher plus particulièrement sur les parts modales.

	Autoslisme	Covoiturage	Total			Autoslisme	Covoiturage	Total
Nombre de déplacements	90	10	100		Nombre de déplacements	90	10	100
Nombre de véhicules	90	5	95		Nombre de véhicules	90	7	97
Cap véhicules covoitureurs	2				Cap véhicules covoitureurs	1,4		
	Autoslisme	Covoiturage	Total			Autoslisme	Covoiturage	Total
Nombre de déplacements	90	10	100		Nombre de déplacements	90	10	100
Nombre de véhicules	90	4	94		Nombre de véhicules	90	3	93
Cap véhicules covoitureurs	2,5				Cap véhicules covoitureurs	3,3		

Figure 6 : Equivalence entre la part modale et le nombre de véhicules pour différents taux d'occupation des véhicules covoitureurs

	Autoslisme	Covoiturage	Total
Nombre de déplacements	90	10	100
Nombre de véhicules	90	5	95
	Autoslisme	Covoiturage	Total
Nombre de déplacements	80	20	100
Nombre de véhicules	80	10	90

Figure 7 : Influence d'un report modale de 10% sur le nombre de véhicules (occupation de 2 voyageurs par covoiturage)

3.1 Prise en compte des voies réservées

3.1.1 Voie réservée classique (HOV)

Sous PTV Visum, les restrictions de circulation portent sur les systèmes de transport et non sur les modes. On interdit donc la circulation au système de transport VP sur ces voies réservées (figure 8).

Sur les autres voies, on laisse aux VP2+ la possibilité de circuler, mais on abaisse la capacité pour l'ensemble des véhicules. La congestion dû à cette baisse de capacité devrait normalement entraîner un report des covoitureurs sur la voie réservée.

L'intérêt de ne pas interdire les covoitureurs sur les voies classiques est qu'en cas de forte congestion sur la voie réservée, on observera un retour des covoitureurs sur les voies classiques, ce qui peut être intéressant à intégrer. Pour autoriser ces mouvements de changement de voies ces covoitureurs il faut toutefois être attentif sur les mouvements autorisés. Les tronçons sont codés de manière indépendante, et il est donc nécessaire d'introduire des mouvements aux nœuds à certains endroits afin de permettre aux covoitureurs de passer d'une voie à une autre.

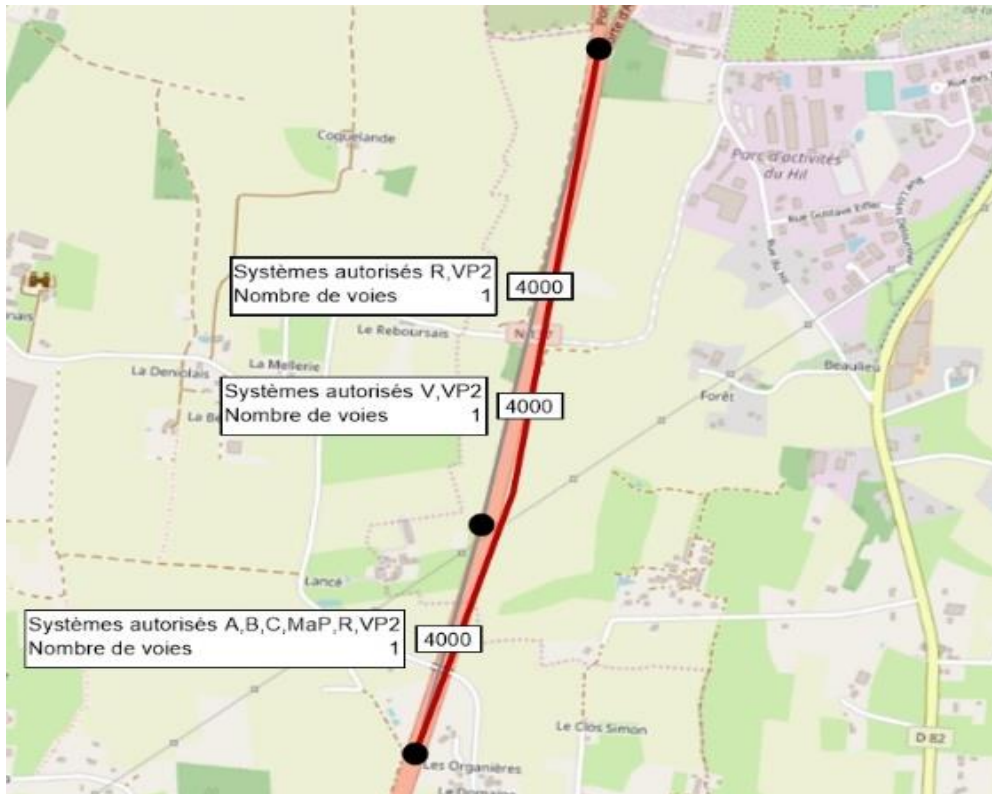


Figure 8 : Modélisation d'une voie HOV sous VISUM (attributs pour le sens Sud → Nord)

3.1.2 Voie réservée avec péage (HOT)

Ces voies réservées aux véhicules à occupation multiple peuvent également être ouvertes aux autres systèmes de transport, moyennant une taxe de péage : on parle alors de HOT (High Occupancy Toll). Pour modéliser ce type d'aménagement, la procédure suivante a été adoptée.

On modélise deux tronçons indépendants, de la même manière que pour une HOV. On calcule ensuite un attribut de tronçon « Péage » spécifique au système de transport VP (les VP2+ en sont exonérés).

Sous VISUM, on peut par exemple utiliser la formule de la figure ci-contre où HOV est un attribut booléen renseigné manuellement et décrivant le caractère réservé de la voie. Cette formule correspond à un prix de 1 euro par kilomètre de HOV empruntée.

Une fois les valeurs de péage VP renseignées sur l'ensemble du réseau, on peut calculer une matrice d'indicateurs Péage et l'intégrer directement à la matrice d'indicateur du coût de trajet.

Paramètres : 'Modifier attribut' X

Type élém. réseau : Tronçons

Attrib. cible : Péage-TISysTr (V)

☐ actifs seuls

L'attribut résultant est défini par l'expression suivante.

`ROUND([HOV]*[LONG],1)`

Buttons: x, +, f(x), []

Figure 9 : Création d'un attribut de péage HOT

De nombreux chercheurs se sont déjà penchés sur la question de l'efficacité des HOT⁵ ⁶. Eisele⁷ préconise de fixer un prix de péage variable au cours de la journée afin d'éviter que la voie réservée ne se congestionnent trop en période de pointe. Il est possible de mettre en place une stratégie tarifaire variable en intégrant une fonction du temps ou de l'espace dans le calcul de l'attribut « Péage ».

3.2 Fonctions d'utilité

Pour le modèle de demande, on peut proposer une « meilleure » fonction d'utilité. Comme cela a été évoqué, l'intérêt est d'intégrer de nouvelles variables pour rendre le modèle plus sensible aux politiques d'aménagements. Cela peut se faire grâce à l'ajout des matrices d'indicateurs évoquées en section 2.1.

La première étape du raisonnement consiste à identifier les variables à intégrer à la procédure de choix modal. La figure ci-dessous donne une première idée des paramètres qui vont influencer le choix modal.

3.2.1 Choix des variables explicatives

Coût du trajet

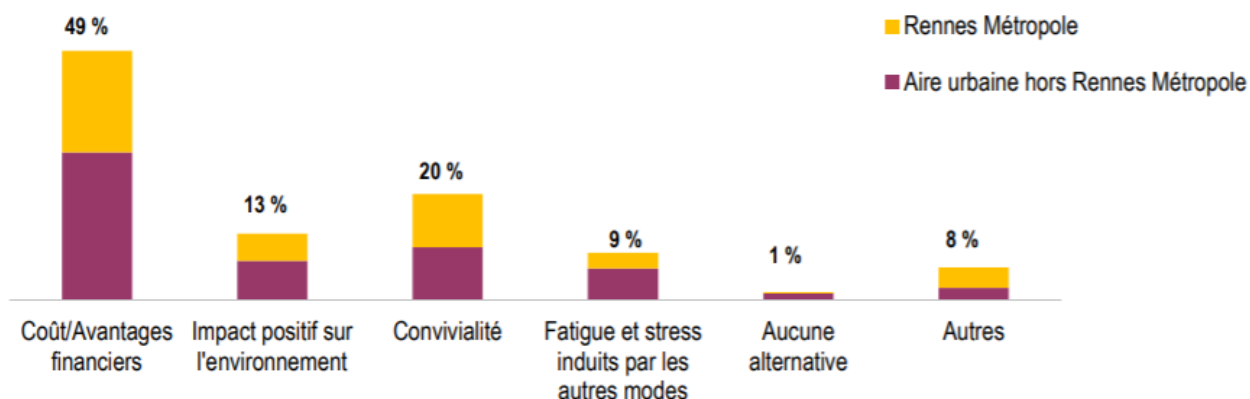


Figure 10 : Motifs de covoiturage pour les habitants de l'aire urbaine rennaise

On aperçoit clairement que l'économie budgétaire représente une composante principale dans le choix de covoiturer. Il n'est cependant pas possible d'observer le poids de cette composante économique face au critère du temps de parcours car les deux modes offrent actuellement des temps de parcours sur tronçons égaux. En effet, en l'absence de voies réservées, les véhicules covoitureurs sont tout autant sujets à la congestion que les véhicules autosolistes.

⁵ W Fan, S Erdogan and TF Welch. *Assessing HOV to HOT Lane Conversion : Multi-scale Analysis in Maryland*. Conference : Transportation research Board, 2016. <https://www.researchgate.net/publication/296484909>

⁶ H Konishi and S Mun. *Carpooling and Congestion Pricing : HOV and HOT Lanes*. Regional Science and Urban Economics, Volume 40, 2010, Pages 173-186. <http://fmwww.bc.edu/ec-p/wp719.pdf>

⁷ WL Eisele, HT Wilner and MJ Bolin. *Evaluating criteria for adapting HOV Lanes to HOT Lanes : development and application of HOT Start Software Tool*. Texas transportation Institute, 2006. <https://pdfs.semanticscholar.org/e346/b7071e6fd28508d88a84a49fea6401ca1c4b.pdf>

Temps de détour

Il y a tout de même une différence de temps de parcours en pratique, puisque les covoitureurs doivent se rejoindre à un endroit et attendre les derniers arrivants, ce qui représente une perte de temps par rapport à un conducteur autosoliste qui part quand il le souhaite. Relativement aux autres modes, ce temps d'attente est d'ailleurs la variable la plus importante pour le mode covoiturage⁸.

Il paraît donc nécessaire d'intégrer à la fonction d'utilité les variables de coût du trajet et la variable de temps d'attente pour covoiturer. Cette deuxième pourrait être intégrée à la composante temps de trajet, mais cela nécessiterait de la pondérer puisque le temps d'attente est généralement⁹ perçu différemment d'un temps de trajet.

Social

La figure 10 révèle que 20% des covoitureurs évoquent la convivialité comme principale motivation. L'enquête révèle également que 70% des covoiturages se font entre collègues d'une même entreprise, ce qui présage un probable lien de cause à effet entre la typologie des déplacements et la part modale.

Environnemental

Cette même figure 10 montre aussi que la motivation environnementale n'est pas négligeable. Il peut donc être intéressant de proposer une variable qui mesure la motivation des individus face au covoiturage.

3.2.2 Proposition d'un jeu de variables

L'étude de ces variables a permis de proposer un premier modèle qui intègre les 4 variables précédemment évoquées. Ces dernières sont prises en compte au travers des 4 matrices d'indicateurs suivantes :

Coût du trajet

La fonction d'utilité initiale intégrait la distance à vol d'oiseau entre l'origine et la destination. Cette variable n'est pas indépendante du coût du trajet, mais elle n'en est pas pour autant une estimation précise. On peut par exemple utiliser cette procédure à 3 étapes :

- Multiplier la distance du plus court chemin par une estimation du prix coût moyen par kilomètre : Jean-Pierre Orfeuil¹⁰ estime à 0,2€/Km ce coût, tandis que Jean-Marie Beauvais¹¹ l'estime à 0,27. Le coefficient retenu est donc de 0,3 €/Km.
- Ajouter le coût d'un éventuel péage

⁸ K Nurul Habib, H Zaman and Y Tian. *Modelling carpool mode choice with explicit consideration on willingness to consider carpool in the choice set formation*. 90th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington, 2011.
https://www.researchgate.net/publication/258133761_Modelling_carpool_mode_choice_with_explicit_consideration_of_willingness_to_consider_carpool_in_the_choice_set_formation

⁹ P Bonnel. *Prévision de la demande de transport*. Economies et finances. 2002.
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00268919/document>

¹⁰ JP Orfeuil. *Les coûts de déplacements urbains : la durabilité du modèle en questions*. Revue d'économie financière, n° 86, 2006.
http://www.persee.fr/doc/ecofi_0987-3368_2006_num_86_5_4198

¹¹ JM Beauvais. *Dépenses supportées par les voyageurs selon les différents modes de transport*. 2013.
<https://www.fnaut.fr/images/docs/dossiers/db12ctsdpld.pdf>

- Diviser l'ensemble de ces coûts par le nombre moyen d'occupants d'un véhicule covoitureur (2 personnes par véhicule).

La formule matricielle suivante donne la matrice indicatrice du coût du trajet issu de cette procédure d'estimation :

$$M_{\text{coût}} = (DistanceParcourue * 0,3 + CoutPéage) / 2 = Meconomie$$

Un autosoliste paie deux fois plus que deux covoitureurs qui se partagent les coûts. Cette formule donne donc également l'économie budgétaire réalisée par rapport à l'autosolisme. Cette propriété est intéressante car cela fait de la variable une variable d'alternative : il n'est donc pas nécessaire de modifier la fonction d'utilité du mode VP pour lui rajouter la composante de coût. Il est important de noter que le raisonnement ne fonctionne que lorsque les composantes

Les deux cartes ci-dessous donnent le coût d'accès estimé par cette formule à destination du centre-ville Rennais. Le deuxième cas intègre un péage sur la rocade tandis que le premier ne comporte aucun péage.

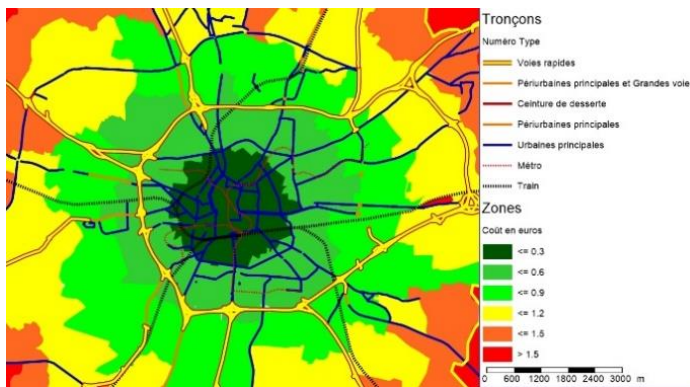


Figure 12 : Carte des coûts d'accès au centre-ville sans péage

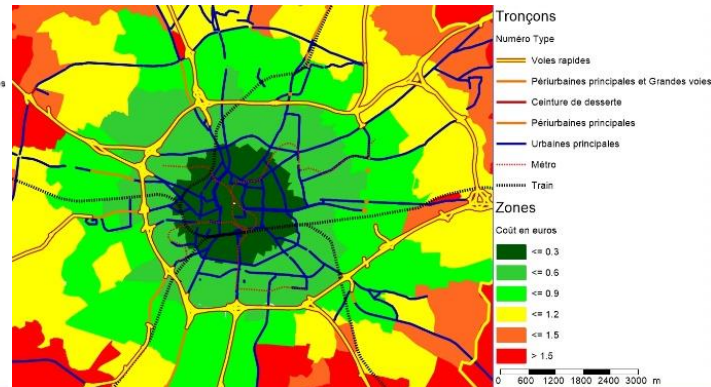


Figure 11: Carte des coûts d'accès au centre-ville avec péage sur rocade

Temps de détour

On peut penser que les temps d'attente sont plus élevés dans les zones rurales car il y a moins de covoitureurs à proximité, et que les détours sont plus fréquents. Ces détours sont également réduits lorsqu'il y a une aire de covoiturage ou un parking relais sur la zone de départ ou d'arrivée car les gens se concentrent probablement sur ces aires.

$$M_{\text{tempsdétour}} = 6 + 6000 / (Densité\ Origine + Densité\ Destination) - (NombreAiresCovoit)$$

Le coefficient a été choisi de manière à obtenir, sur un ensemble arbitraire d'OD, une variabilité satisfaisante des temps de détours. La constante de 6 permet quant à elle d'atteindre un temps de détour moyen aux alentours de 8 minutes.

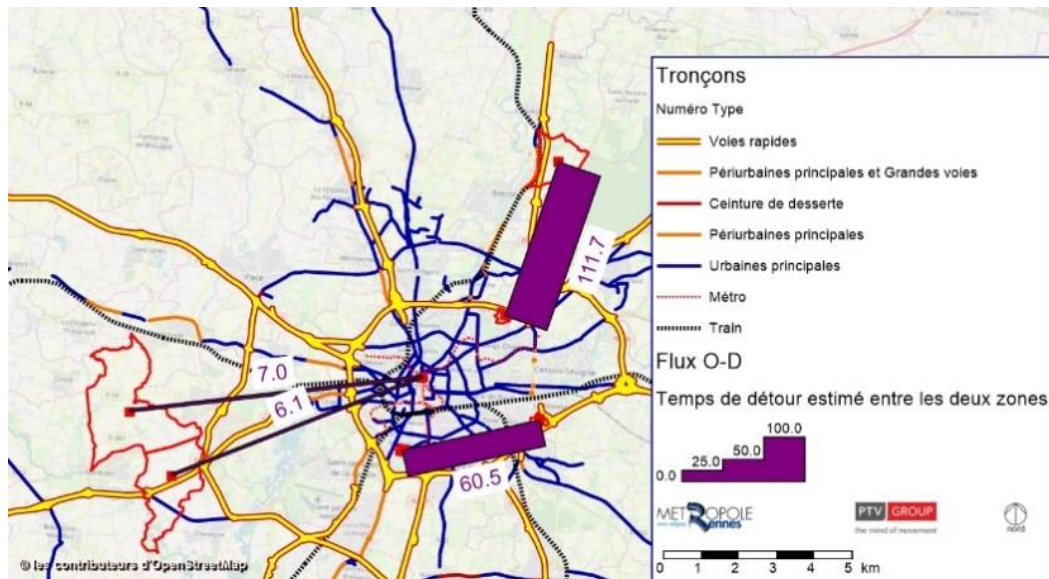


Figure 13: Estimation des temps de détour avec une relation inverse

La figure ci-dessus donne le temps de détour estimé par cette formule sur 4 OD du territoire, en l'absence d'aire de covoiturage. On observe une trop grosse différence sur le temps de détour. Ce problème ne vient pas des coefficients, mais de la relation de linéarité puisqu'il y a d'importantes variations de densité entre différentes zones. La solution retenue pour parer ce problème consiste à utiliser une décroissance en racine carrée. On introduit également un maximum 15 minutes car l'absence de données sur la densité de certaines zones fausse l'estimation.

$$M_{\text{tempsdétour}} = \text{Min} ([6 + 180/\sqrt{\text{Densité Origine} + \text{Densité Destination}}) - (\text{NbAireCovoit}), 15)$$

La même carte a été réalisée avec la nouvelle formule d'estimation du temps de parcours afin de visualiser la variable sur 4 OD aléatoires. On observe sur cette figure que les temps de détour semblent cohérents. Cette formule propose une première estimation intéressante du temps de détour, et sera donc conservée par la suite. Il faut toutefois être vigilant à l'importance qu'on lui accorde, notamment lors du choix des coefficients de la fonction d'utilité.

Il faudrait sans doute proposer une estimation plus précise si les aménagements à tester ont directement pour objectif la baisse des temps de détour (aires de covoiturage, plateforme de mise en relation, etc).

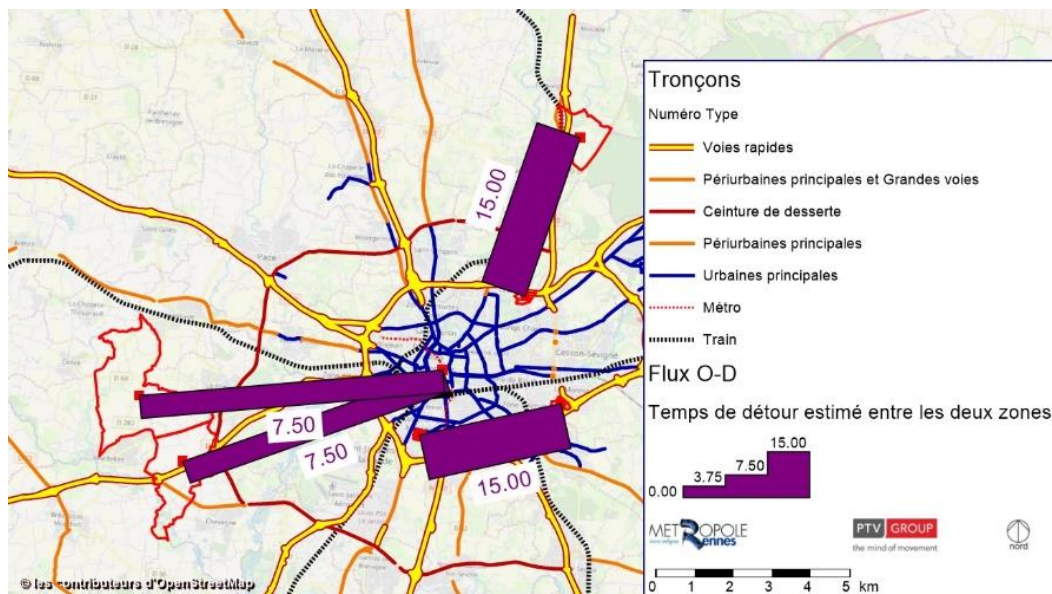


Figure 14 : Estimation des temps de détour avec une relation racine

Contrainte socio-professionnelle

L'enquête AUDIAR estime qu'environ 70% des covoiturages de l'aire urbaine rennaise sont des covoiturages professionnels réguliers. On peut donc attribuer un bonus aux OD où il y a une forte demande en déplacement pour des motifs Domicile-Travail. La solution retenue est d'attribuer un coefficient entre 0 et 1, où 1 correspond à l'origine destination où il y a le plus de déplacements Domicile-Travail.

$$M_{social} = \frac{\min(NbactifsO, NbEmploisD)}{\max(\min(NbactifsO, NbEmploisD))} \quad (Max = 3570)$$

La figure ci-dessous donne le coefficient social attribué par cette formule sur 5 OD aléatoires du territoire. L'estimation semble assez représentative des logiques de déplacement qu'on peut observer sur le territoire. Il existe en effet beaucoup de mouvements pendulaires Domicile-Travail entre la commune de Vern-sur-Seiche et la zone d'activité de Sévigné (campus, hôpital, commerces, etc), et il semble logique que cet itinéraire draine facilement des covoitureurs.

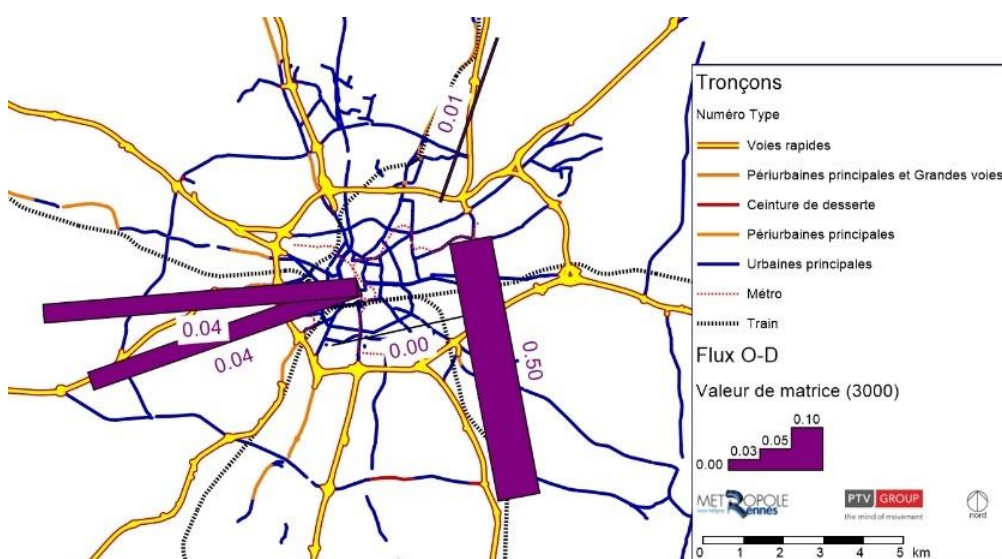


Figure 15: Création d'un indicateur de la contrainte socio professionnelle

De la même façon que pour le temps de détour, toute la difficulté réside maintenant dans le fait d'intégrer cette variable qualitative au modèle. Elle n'a pas de réelle signification, et il faut donc l'intégrer avec prudence dans le modèle.

Il faudra, lors de l'étape de calage du modèle de choix modal, trouver un coefficient qui prenne en compte cette contrainte sociale sans toutefois trop délaissé les itinéraires où l'indicateur est faible. Si aucune solution n'est trouvée lors du calage, il pourra être envisagé de chercher une relation non linéaire pour réduire les variations de l'indicateur.

Aspect incitatif

On va modéliser l'incitation à travers deux éléments mesurables, la longueur de HOV empruntée sur l'itinéraire et le nombre de messages incitatifs rencontrés sur l'OD. On peut penser que l'utilité augmente proportionnellement à la longueur de voie réservée et aux nombres de messages incitatifs rencontrés sur le trajet.

Sous VISUM, on peut facilement mesurer la longueur de voie réservée empruntée et le nombre de panneaux incitatifs rencontrés sur une OD.

On définit ensuite une somme pondérée, en considérant par exemple qu'un message incitatif est aussi efficace que le fait d'observer une voie réservée pendant deux kilomètres. Il conviendra ensuite de trouver, lors du calage, le coefficient qui permet d'intégrer cette variable qualitative à la fonction d'utilité.

$$M_{\text{incitation}} = M_{\text{longueurHov}} * 0,5 + M_{\text{nombreMessages}}$$

Il faut bien garder à l'esprit que la longueur de voie réservée est ici prise en compte pour les conséquences qu'elle a sur le choix de l'utilisateur qui l'observe. Les notions de temps de parcours ont déjà été prises en compte dans une autre variable, et on s'intéresse ici uniquement à l'aspect incitatif de la voie.

Il n'est pas intéressant de visualiser une telle variable sur une carte car elle est difficilement interprétable. On sait en tout cas que c'est une fonction d'ordre de grandeur comparable au coût ou au temps de trajet : il conviendra donc de lui accorder un plus faible coefficient si l'on veut éviter de surestimer le nombre de covoitureurs à proximité des voies.

3.2.3 Proposition d'un jeu de paramètres

Une fois les matrices d'indicateurs créées, il faut trouver une relation qui intègre ces variables au modèle de choix modal. Il faut bien garder à l'esprit que les 4 variables proposées ici sont des variables spécifiques à l'alternative. La fonction d'utilité du mode covoiturage présentait déjà 3 variables (voir section 2.1), cette étape revient par conséquent à trouver un jeu de 7 paramètres.

Pour calculer l'utilité des autres modes, il faut utiliser d'autres matrices d'indicateurs, et donc d'autres paramètres. Les modèles proposés jusqu'ici par PTV sont toutefois satisfaisants pour l'ensemble des autres modes, et ce n'est de toute manière pas l'objet de cette étude que de revenir sur ces éléments.

Il existe actuellement peu de données sur les pratiques de covoiturage, et il est donc difficile de construire un modèle de choix modal pour estimer ces paramètres par régression. La méthode utilisée pour

estimer ce jeu de paramètre a donc été de condenser un ensemble d'études^{12 13} afin d'avoir une première idée de l'ordre de grandeurs de ces paramètres.

Les paramètres dépendent du jeu de variables utilisé dans la régression, et par conséquent les coefficients ne peuvent pas être utilisés comme tels. Cela a toutefois permis d'esquisser des ordres de comparaison entre les variables et de proposer une première fonction d'utilité :

$$\text{Utilité covoiturage} = 0.06 * M_{\text{pscovoit}} + 0.12 * M_{\text{connecteurs}} - 0.4 * \ln(M_{\text{distVO}}) - 0.5 * M_{\text{economie}} - 0.08 * M_{\text{détour}} - 1 * M_{\text{social}} - 2 * M_{\text{incitation}}$$

1137 x 1137			0123800	0123800	0123800	0123800	0123800	0123800	0123800	0123800	0123800
	Nom		RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES
		Total	542385.35	542398.5	542375.4	542378.9	542395.1	542408.2	542411.0	542402.3	
101238001	RENNES	542437.44	2.12	3.28	3.18	3.01	2.83	2.66	2.55	2.49	
101238002	RENNES	542391.75	3.18	2.12	3.17	2.93	2.83	2.66	2.56	2.51	
101238003	RENNES	542402.56	3.18	3.17	2.12	3.14	2.98	2.74	2.62	2.54	
101238004	RENNES	542413.59	3.01	2.89	3.14	2.12	3.20	2.87	2.71	2.62	
101238005	RENNES	542436.39	2.83	2.79	2.98	3.20	2.12	3.05	2.82	2.69	
101238006	RENNES	542390.40	2.64	2.61	2.72	2.84	3.02	2.12	3.12	2.83	
101238007	RENNES	542393.21	2.54	2.51	2.60	2.68	2.79	3.12	2.12	3.08	
101238008	RENNES	542410.03	2.46	2.45	2.49	2.56	2.63	2.83	3.08	2.12	
101238009	RENNES	542381.27	2.43	2.40	2.47	2.54	2.59	2.75	2.91	3.09	
101238010	RENNES	542357.70	2.39	2.40	2.39	2.46	2.47	2.52	2.55	2.57	
101238011	RENNES	542340.82	2.36	2.36	2.34	2.39	2.38	2.40	2.41	2.40	
101238012	RENNES	542358.50	2.39	2.38	2.37	2.42	2.40	2.41	2.41	2.39	
101238013	RENNES	542440.13	3.22	3.03	3.03	3.11	2.87	2.70	2.59	2.53	
101238014	RENNES	542397.93	2.75	2.65	2.73	2.89	2.82	2.77	2.68	2.58	
101238015	RENNES	542405.45	2.65	2.59	2.70	2.85	2.94	3.14	2.99	2.78	
101238016	RENNES	542408.25	2.54	2.50	2.59	2.69	2.76	3.00	3.15	2.97	

Figure 17: Matrice d'utilité de référence (3 variables)

1137 x 1137			0123800	0123800	0123800	0123800	0123800	0123800	0123800	0123800	0123800	0123800
	Nom		RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES	RENNES
		Total	541197.47	540988.55	540955.26	540971.96	540979.75	540968.06	541195.96	540985.86	541089.11	
101238001	RENNES	541250.59	0.68	0.68	0.67	0.69	0.68	0.61	0.61	0.66	0.79	
101238002	RENNES	540989.75	0.67	0.66	0.65	0.60	0.60	0.59	0.62	0.62	0.63	
101238003	RENNES	540973.24	0.65	0.63	0.64	0.63	0.63	0.56	0.59	0.59	0.60	
101238004	RENNES	540974.40	0.65	0.61	0.62	0.63	0.63	0.56	0.60	0.59	0.61	
101238005	RENNES	541000.08	0.65	0.62	0.62	0.64	0.64	0.57	0.60	0.59	0.61	
101238006	RENNES	540955.42	0.62	0.60	0.61	0.62	0.62	0.63	0.65	0.62	0.63	
101238007	RENNES	541216.73	0.64	0.65	0.66	0.68	0.68	0.68	0.68	0.69	0.83	
101238008	RENNES	541002.55	0.64	0.61	0.60	0.61	0.61	0.62	0.66	0.66	0.67	
101238009	RENNES	541084.52	0.79	0.62	0.63	0.65	0.65	0.65	0.81	0.65	0.77	
101238010	RENNES	540961.91	0.62	0.62	0.57	0.58	0.58	0.59	0.63	0.59	0.61	
101238011	RENNES	541197.63	0.63	0.61	0.62	0.64	0.64	0.63	0.62	0.64	0.78	
101238012	RENNES	541053.22	0.74	0.64	0.62	0.64	0.63	0.63	0.74	0.63	0.69	
101238013	RENNES	541003.37	0.66	0.63	0.63	0.63	0.63	0.57	0.60	0.60	0.61	
101238014	RENNES	540964.21	0.65	0.56	0.58	0.59	0.59	0.58	0.64	0.58	0.62	
101238015	RENNES	540954.63	0.60	0.58	0.59	0.60	0.60	0.61	0.63	0.60	0.61	
101238016	RENNES	540963.23	0.61	0.59	0.56	0.61	0.61	0.61	0.64	0.61	0.62	

Figure 16: Matrice d'utilité proposée (7 variables)

Avec ce jeu de paramètres, on observe une matrice d'utilité du même ordre de grandeur que pour le scénario de référence où la fonction d'utilité ne comprenait que 3 paramètres. On remarque en revanche que la matrice d'utilité du nouveau modèle varie moins que l'ancien. De plus, un écart quasi constant existe entre les deux modèles, ce qui prouve que l'hypothèse d'une constante nulle dans la fonction d'utilité proposée n'était pas justifiée.

Un travail de recalage va maintenant être mis en place pour parvenir à un modèle encore plus proche de ce qu'on avait déjà et de ce à quoi on s'attend.

¹² G Correia and JM Viegas. *Carpooling and carpool clubs : Clarifying concepts and assessing value enhancement possibilities through a Stated preference web survey in Lisbon, Portugal*. Transportation Research Part A, Volume 45, 2011, Pages 81-90.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.457.1668&rep=rep1&type=pdf>

¹³ M Cline, C.S Sparks and K Eschbach. *Understanding Carpool Use by Hispanics in Texas*. Transportation Research Board, Volume 2118, 2009, Pages 39-46.
https://www.researchgate.net/publication/238197207_Understanding_Carpool_Use_by_Hispanics_in_Texas

4 Calage

Un modèle complexe de fonction d'utilité a été proposé précédemment. Il faut être attentif avec ce type de modèles car on perd parfois en fiabilité à vouloir intégrer trop d'informations.

Un processus de calage va être mis en place afin d'essayer d'avoir un modèle qui soit le plus stable possible. Il faut en effet que le modèle proposé puisse rester efficace dans le temps et qu'il ne devienne pas caduc avec la prise en compte de nouveaux aménagements. Il serait également intéressant que le modèle proposé soit adaptable à d'autres cas d'agglomérations, ce qui devient de plus en plus complexe lorsque l'on ajoute des variables.

La première étape va être de vérifier la cohérence des relations utilisées. On s'assurera que la prise en compte des variables soit correctement équilibrée, et ce sur l'ensemble du territoire. Une fois la cohérence spatiale vérifiée, on jouera sur les coefficients de la fonction d'utilité jusqu'à parvenir à un jeu de paramètres satisfaisant.

4.1 Données bibliographiques

La première étape de l'opération de calage consiste à essayer de respecter l'importance des critères de choix modal relevés dans différentes enquêtes. Jianling Li a réalisé une enquête¹⁴ en vue d'étudier l'impact des quelques variables sur le choix modal des habitants du Texas.

L'objectif va être de comparer ces résultats avec l'utilité de chacune des variables lors de l'étape de choix modal. Cela permet de s'assurer que les termes de la fonction d'utilité proposée respectent en ordre de grandeur le comportement des habitants du Texas sur plusieurs origines-destinations. Il aurait été possible de prendre les résultats d'une autre enquête, mais celle-ci étudie un nombre important de personnes, et les variables étudiées sont proches de celles du modèle proposé.

TABLE 2 Reasons for Carpooling

Factor	Frequency Selected	% of Total (N = 789)	Mean	
Access to HOV lanes	699	89	3.77	
Relaxation while traveling	77	10	3.60	Motivation sociale
Enjoy travel with others	691	88	3.26	
Help environment and society	684	87	3.23	
Travel time saving	690	87	3.16	Economie de temps
Other	109	14	3.16	
Sharing vehicle expenses	703	89	3.15	
Reliability of arrival time	666	84	2.93	Economie budgétaire
Splitting tolls on toll roads	159	20	2.38	
Get work done while traveling	79	10	2.24	Psychologie
Drop off kids at school/day care	674	85	2.23	
Carpool partner matching program	680	86	2.07	
Encouraged by program at work	677	86	2.00	
Preferred parking at work	687	87	1.94	

Figure 18 : Impact de différentes variables sur le choix modal des habitants du Texas

¹⁴ J Li, P Embry, SP Mattingly and KF Sadabadi. *Who Chooses to Carpool and Why ? Examination of Texas Carpoolers*. Transportation Research Board, Volume 2021, 2007, Pages 110-117.
<https://pdfs.semanticscholar.org/58f9/ef8ae2afe29d0589a3e5975588de05cd2226.pdf>

La donnée de sortie du choix modal est un nombre de déplacements par mode, alors que l'enquête donne des raisons de covoiturer (notées sur une échelle de 1 à 5). On va donc restreindre le tableau aux variables de notre modèle (voir figure 18), et faire l'hypothèse que chaque personne a 5 raisons de covoiturer. Cette hypothèse semble crédible puisque les sondés de l'enquête donnaient en moyenne 4,76 de ces motifs dans leurs réponses.

Chacun de ces 5 motifs sera évalué sur une échelle de 1 à 5, où 5 représente le paramètre qui pèse le plus dans l'utilité. On va réaliser cette opération sur 200 origines-destinations aléatoires du territoire rennais pour obtenir une base de données conséquente.

	Enquête : 789 personnes interrogées (4,8 rep/pers)				Modèle : 6240 OD interrogées (4 rep/OD)		
	Moyenne				Moyenne		
Motivation sociale		3,3				3,4	
Economie de temps		3,2				5,0	
Economie budgétaire		3,0				2,8	
Psychologie		2,1				1,3	

Figure 19 : Classement des motifs de choix du covoiturage

Le tableau ci-dessus synthétise les résultats de cette opération de calage. On observe déjà deux éléments intéressants :

- La composante incitative est clairement sous-estimée. Dans le modèle seuls les voies de covoiturage et les panneaux à affichage variable jouent sur cette composante, tandis que l'étude englobe plus de variables (conscience environnementale et programmes d'incitations à la pratique du covoiturage). Il n'est pas intéressant de simplement augmenter le coefficient associé à la variable car cela creuserait trop les différences entre les zones aménagées et les zones non aménagées. On peut par exemple rajouter une constante qui modélise la motivation environnementale générale des habitants de la métropole. L'avantage d'ajouter un bout de constante à cette variable est qu'on peut jouer sur cette constante si la politique de la ville tend à fortement s'orienter vers le covoiturage.
- La composante temporelle est la composante la plus importante du modèle. On ne peut pas vraiment exploiter la différence car l'enquête mesure l'importance du gain de temps lié au covoiturage, tandis qu'on mesure sur le modèle l'importance du temps de parcours (perte ou gain dans l'utilité). Le critère du temps de parcours n'est donc pas pertinent dans cette analyse.

Cette première étape de calage donne donc lieu à la proposition d'une nouvelle matrice d'indicateur. Les coefficients associés dans la formule de l'utilité ne changent pas puisque on veut ici simplement vérifier la cohérence des relations.

$$Mincitation = MlongHov * 0,5 + MnbMessages + 1$$

	Enquête : 789 personnes interrogées (4,8 rep/pers)				Modèle : 6240 OD interrogées (4 rep/OD)		
	Moyenne				Moyenne		
Motivation sociale		3,3				2,2	
Economie de temps		3,2				4,2	
Economie budgétaire		3,0				1,6	
Psychologie		2,1				4,6	

Figure 20 : Classement des motifs de choix du covoiturage

On observe cette fois ci que la composante incitative intervient trop dans le processus de choix modal. Il n'est cependant plus logique de modifier la constante car la variable aurait moins de signification physique. La constante égale à 1 signifie en effet qu'une personne voit sa motivation doubler à la vue de deux kilomètres de voie réservée. La solution retenue consistera donc à diminuer le coefficient multiplicatif associé à cette constante si celle-ci fausse trop le modèle.

Il est difficile d'aller plus loin dans cette étape de calage car on compare les résultats de deux modèles différents, aussi bien en termes de comportement des usagers que d'aménagements. De plus, la variable temporelle du modèle est différente de la variable temporelle utilisée dans l'enquête.

Il faut bien garder à l'esprit que cette étape n'est qu'une vérification permettant de s'assurer du bon ordre de grandeur des différents coefficients de la fonction d'utilité, et non un processus itératif visant à atteindre un équilibre parfait.

4.2 Comparaison avec l'ancien modèle de l'agglomération rennaise

Bien que sensé être plus sensible, le modèle proposé doit être relativement proche de l'ancien modèle, ce qui offre un nouvel élément de calage. Il est en effet possible de comparer la fonction d'utilité du modèle proposé avec la fonction d'utilité de l'ancien modèle. L'avantage de cette comparaison est qu'elle n'est plus globale comme la précédente, mais localisée sur une sélection d'origines-destinations.

Là aussi, cet élément n'est qu'un outil de vérification et il n'est pas du tout attendu une concordance exacte entre les fonctions d'utilité des deux modèles. Il serait absurde de pousser trop loin ce critère d'égalité puisque c'est justement le désir de complexifier le modèle initial qui a amené cette nouvelle fonction d'utilité. L'objectif de cette étape est le même que dans la section 4.1, à savoir la vérification des relations utilisées. La recherche d'un jeu de coefficients sera abordée dans la section 4.3.

Plusieurs méthodes peuvent être envisagées pour comparer les fonctions d'utilité du modèle. Une méthode numérique a été utilisée dans la section 3.3.2 afin de comparer rapidement les matrices d'utilité. Cela avait permis de remarquer un écart quasi constant entre les modèles, ce qui amène à proposer d'intégrer une constante au modèle. La fonction d'utilité désormais utilisée est la suivante.

$$\text{Utilité covoiturage} = 0.06 * M_{\text{tpscovoit}} + 0.12 * M_{\text{connecteurs}} - 0.4 * \ln(M_{\text{distVO}}) - 0.5 * M_{\text{economie}} + 0.08 * M_{\text{détour}} - 1 * M_{\text{social}} - 1 * M_{\text{incitation}} + 1.8$$

On a ici commencé par réaliser des comparaisons graphiques sur une sélection d'origines-destinations. La comparaison graphique est moins précise que la méthode numérique, mais elle offre l'avantage d'isoler rapidement les zones d'erreur.

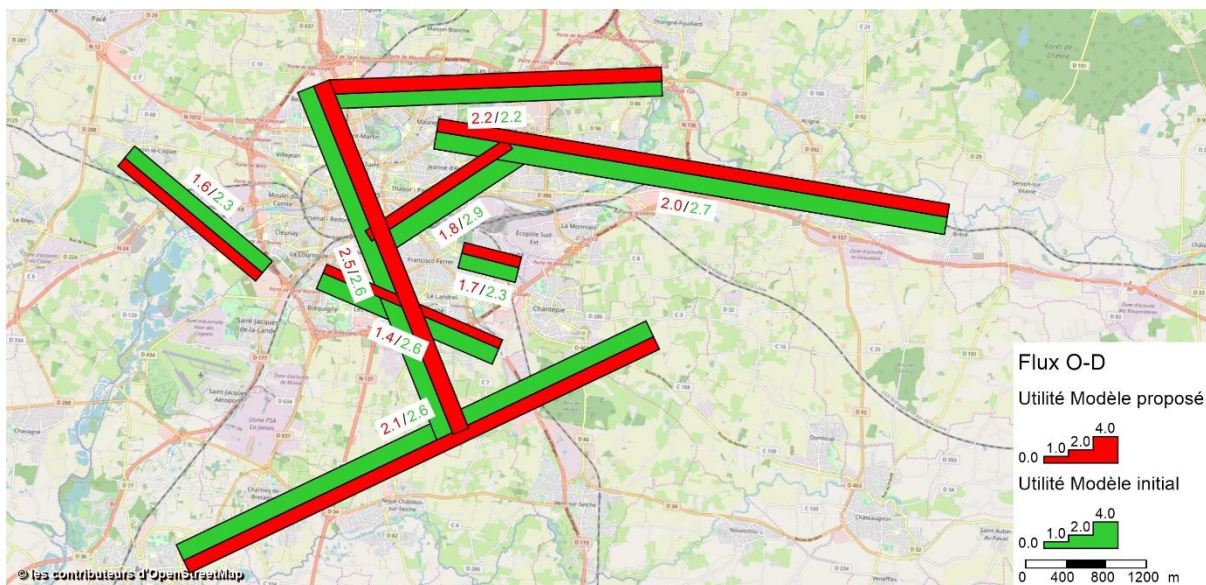


Figure 21 : Comparaison des utilités associées à une sélection d'OD

Le premier constat qui ressort de cette illustration est que, pour cette sélection de 8 OD, les utilités sont globalement du même ordre de grandeur pour les deux modèles. Ce résultat vient confirmer ce qui avait déjà été avancé à la suite de l'analyse précédente (section 3.2.3).

On observe toutefois une différence notable d'utilité entre les deux modèles pour certaines origines-destinations. Afin de mieux isoler ces différences, on peut réaliser cette même carte en triant les origines-destinations sur lesquelles les différences sont les plus importantes.

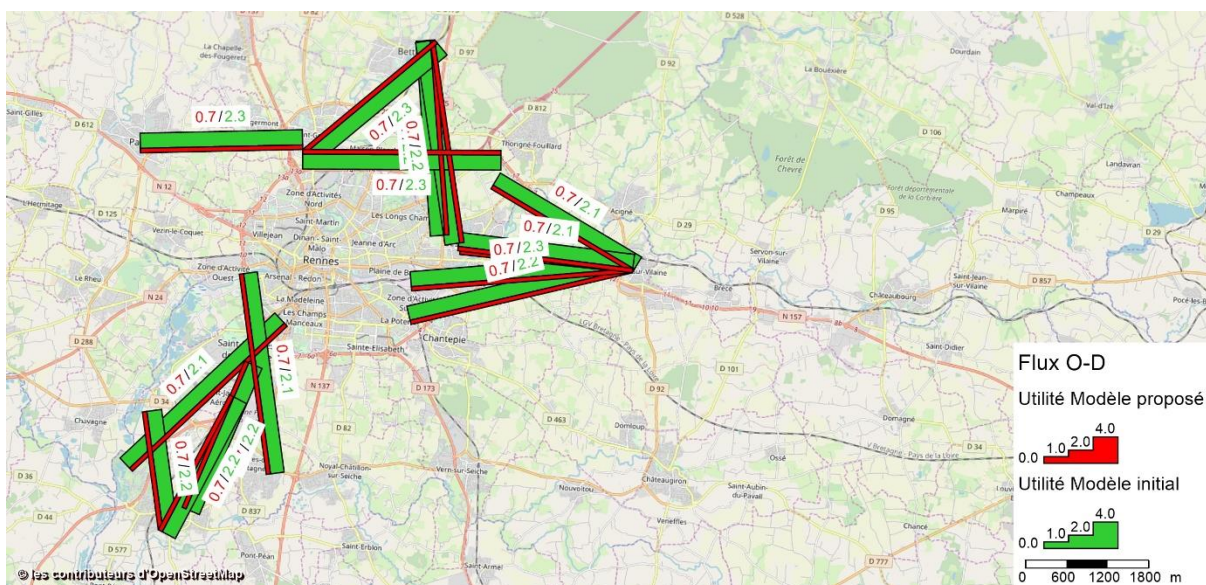


Figure 22 : Comparaison des utilités associées aux 15 OD les plus différentes

On observe que les déplacements des communes peuplées de l'agglomération (Betton, Noyal-sur-Vilaine et Bruz) vers Rennes présentent de fortes différences entre le modèle initial et le modèle proposé.

La raison à cela est que grâce à la prise en compte de la dimension sociale, l'utilité diminue lorsque beaucoup de trajets pour motifs professionnels ont lieu. Les OD ciblées vont de zones fortement résidentielles (villes dortoirs) vers des zones avec beaucoup d'emplois (zones d'activités). De plus, ces itinéraires empruntent des portions de voies comprenant à la fois des voies de covoiturage et des messages d'incitation à la pratique du covoiturage. Il est donc tout à fait normal qu'avec le modèle proposé ces OD soient favorables au covoiturage.

Le dernier élément de vérification de cette section est le critère des parts modales. On va comparer à l'échelle du réseau les parts modales des deux modes afin de voir si elles sont du même ordre de grandeur. En effet, bien que les deux modélisations soient différentes, les phénomènes à modéliser sont les mêmes, et on devrait donc retrouver des répartitions modales proches.

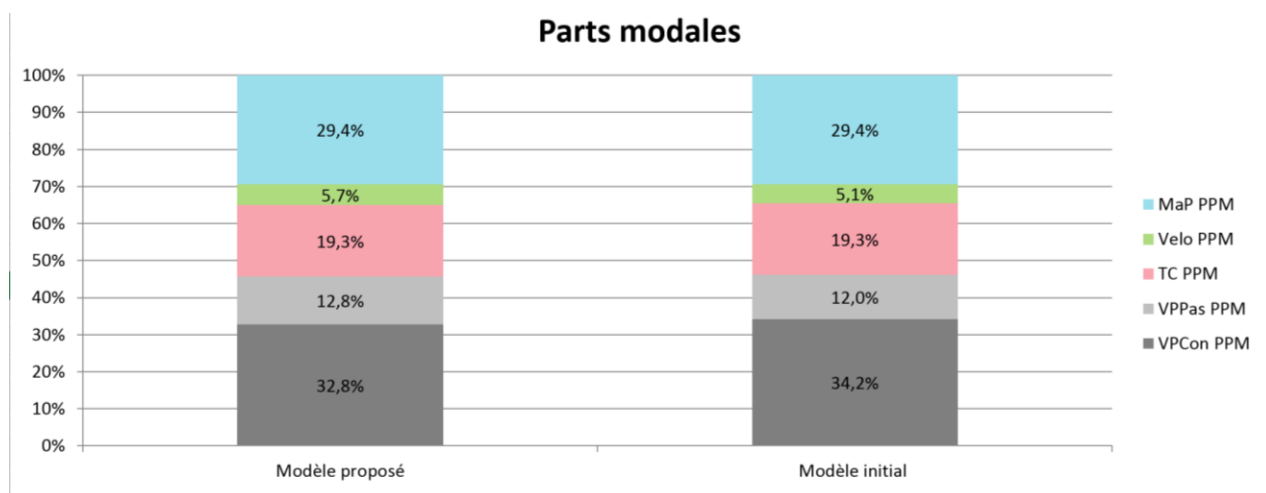


Figure 23 : Comparaison des parts modales entre le modèle proposé et l'ancien modèle

On observe un léger transfert modal du covoiturage vers l'autosolisme, cela signifie en termes mathématiques que les variables intégrées au modèle n'ont pas complètement compensé la diminution de la constante.

A ce stade, les différentes variables semblent correctement construites. Il n'est désormais plus intéressant de comparer le nouveau modèle avec l'ancien, car cette comparaison servait uniquement à éviter les incohérences. L'objectif va être de trouver un jeu de paramètres qui optimise la représentativité du modèle, et nous allons pour cela devoir utiliser d'autres données que celles utilisées pour le modèle de base.

4.3 Respect des charges VP2+ sur l'agglomération rennaise

4.3.1 Méthodologie

Le GEH est un critère de calage souvent utilisée dans les modèles à quatre étapes. Cette statistique est généralement réalisée à l'issue de l'étape d'affectation, mais dans la mesure où l'affectation corrélée avec l'étape de choix modal, on peut utiliser le GEH pour vérifier la bonne représentativité des charges VP2+ ¹⁵ au niveau des capteurs.

$$GEH_j = \sqrt{\frac{2(K_j - M_j)^2}{K_j + M_j}} \quad \begin{array}{l} K_j = \text{Débit de comptage au capteur } j \\ M_j = \text{Débit modélisé au capteur } j \end{array}$$

Le choix des données est une question importante dans l'élaboration d'un modèle. La figure ci-contre¹⁶ donne un exemple de méthodologie possible pour choisir ses données. La définition des statistiques nécessaires est importante, et deux possibilités sont envisageables à ce sujet :

- La première consiste à considérer les résultats de l'ancien modèle comme des données de comptage. L'avantage est que l'on connaît les débits sur l'ensemble du réseau, et que l'information est disponible pour chaque système de transport. L'inconvénient est en revanche qu'on cherche ainsi à faire coïncider le nouveau modèle avec l'ancien, ce qui n'est plus intéressant étant donné que l'ancien modèle ne prenait pas assez en considération le covoiturage (cf section 4.2).

- L'autre méthode consiste à exploiter les données de comptage disponibles. L'avantage est que les données de comparaison semblent à première vue moins incertaines que les résultats d'un modèle. La principale difficulté à surmonter réside dans le fait d'obtenir des données sur les covoitureurs : les outils de mesures majoritairement utilisés (boucles électromagnétiques ou floating car data) ne distinguent généralement pas les modes autosolisme et covoiturage.

Les deux méthodes seront utilisées conjointement. Les données de comptage seront utilisées en priorité, et nous recourrons aux résultats du modèle initial lorsque les données de comptage seront jugées insuffisamment précises.

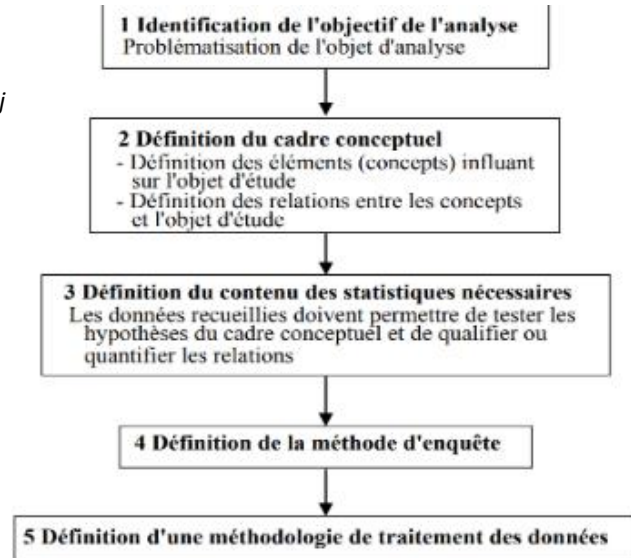


Figure 24 : Méthodologie de production des données proposée par P. Bonnel

¹⁵ S Gupta and S Dhameniya. *Base Year Travel Demand Model - Delhi*. School of Planning and Architecture of New Delhi, 2016.

¹⁶ P Bonnel. *Prévision de la demande de transport*. Economies et finances. 2002.
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00268919/document>

4.3.2 Préparation des données

La figure ci-contre donne la répartition spatiale des postes de comptage sur lesquels on dispose d'informations. Pour chacun des capteurs représentés, l'information est disponible dans les deux sens, et pour l'heure de pointe du matin (8h-9h), l'heure de pointe du soir (17h-18h) et la journée.

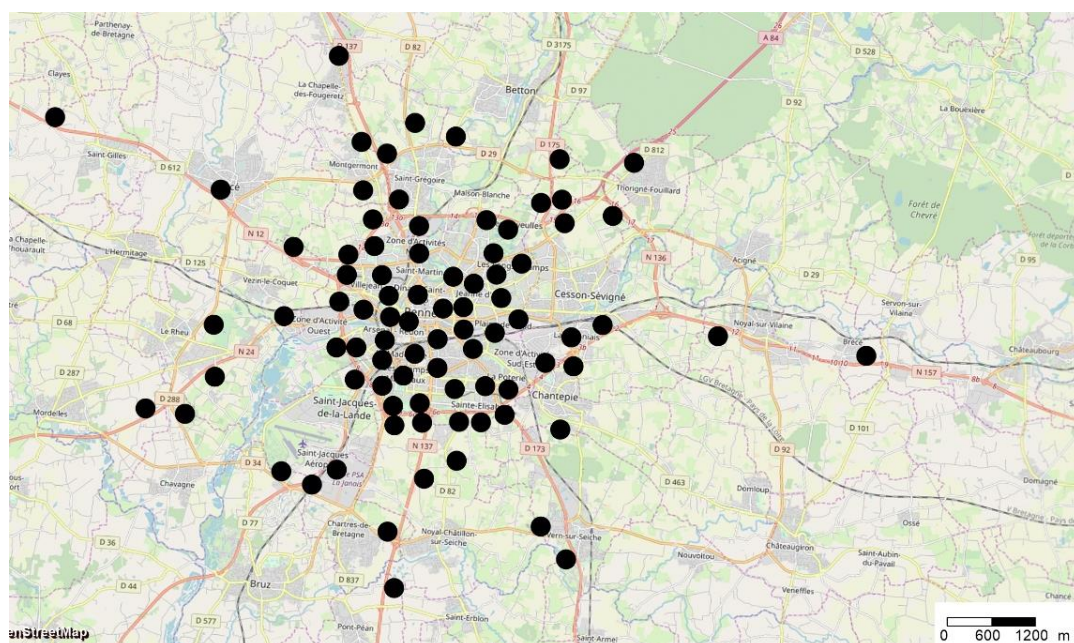


Figure 25 : Répartition des postes de comptages utilisés pour l'enquête

Le modèle proposé a vocation à modéliser les pratiques de covoiturage sur autoroutes urbaines, et en ce sens on s'intéressera principalement aux données de comptage le long des axes les plus concernés. Au vu de ce fait et de la qualité des données disponibles, la carte ci-dessous reprend les 11 capteurs utilisés lors de l'étape de recalage.

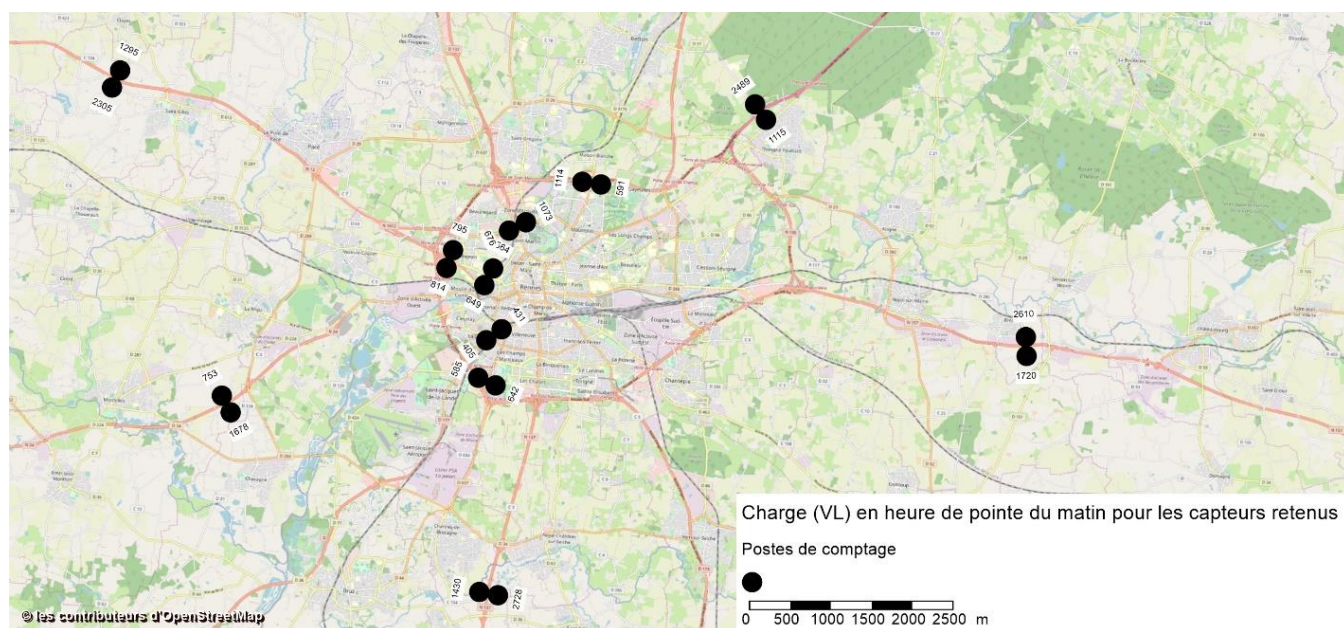


Figure 26 : Charges VL des capteurs retenus pour le calage

Les capteurs distinguent seulement les deux modes Véhicules Légers (VL) et Poids Lourds (PL). Il est donc nécessaire de faire des hypothèses sur la manière dont les VL se répartissent entre l'autosolisme et le covoiturage si l'on veut vérifier les charges associées au covoiturage. On peut par exemple utiliser les résultats issus du modèle initial afin de récupérer la répartition VP/VP2+ sur le tronçon au droit de chaque capteur.

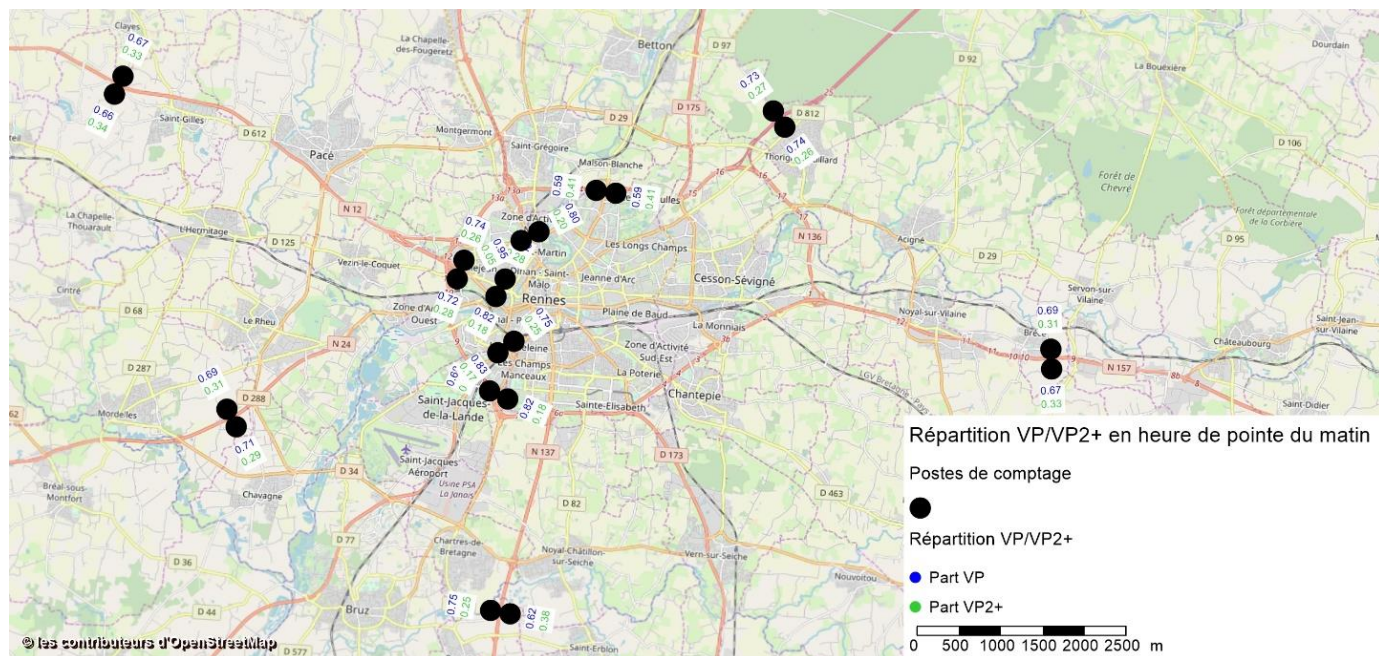


Figure 27 : Estimation de la répartition modale des capteurs

Le modèle initial permet simplement d'approximer la répartition des VL détectés par les boucles, mais c'est bien une comparaison entre le modèle proposé et les données de comptage qui est réalisée.

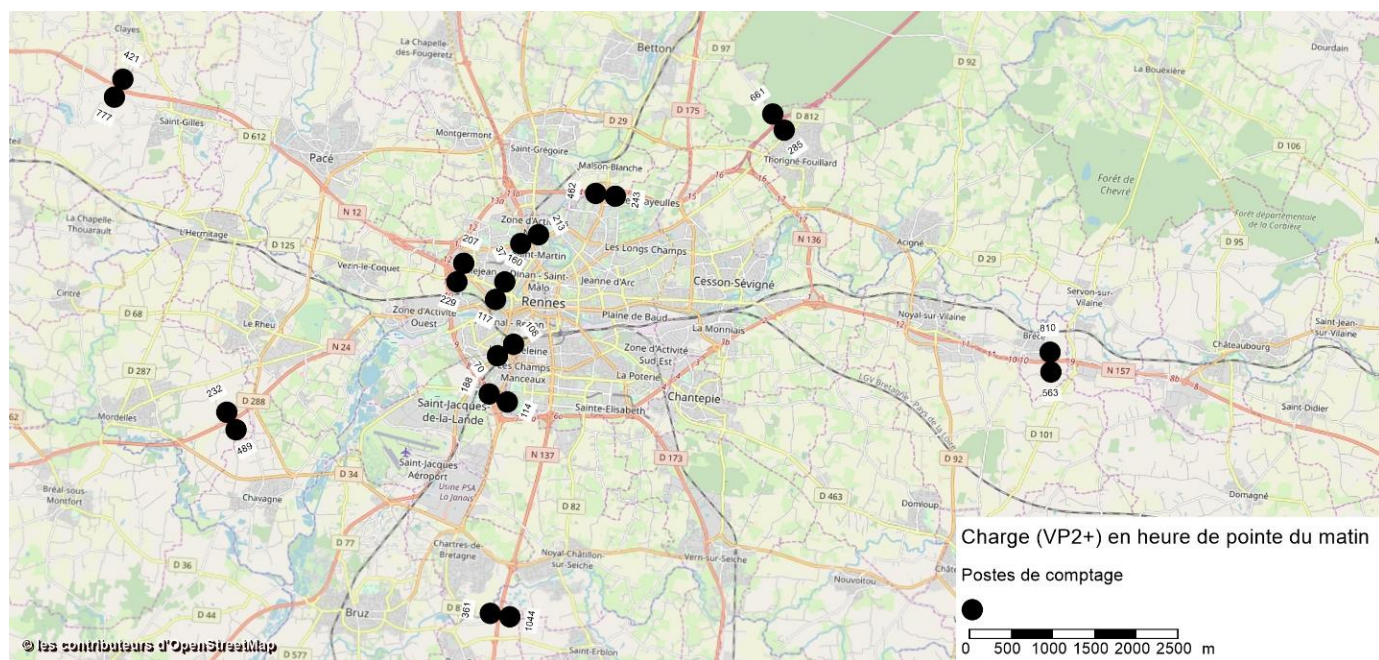


Figure 28 : Charge VP2+ en chacun des capteurs

On va maintenant réaliser un processus itératif de recalage afin de faire coïncider au mieux les résultats de notre modèle avec ces données de comptage. On va pour cela modifier les coefficients de la fonction d'utilité afin de jouer sur les étapes de choix modal et d'affectation.

4.3.3 Processus et résultats

Les charges vont être étudiées à l'heure de pointe du matin.

Une fois que ce processus aura abouti à un jeu de coefficients satisfaisants, il faudrait réaliser la même étude sur l'heure de pointe du soir ainsi que sur l'ensemble de la journée pour vérifier la pertinence du modèle en toute période.

1^{ère} itération

Les deux figures ci-dessous comparent les charges mesurées en chaque capteur et pour chacun des modèles proposés.

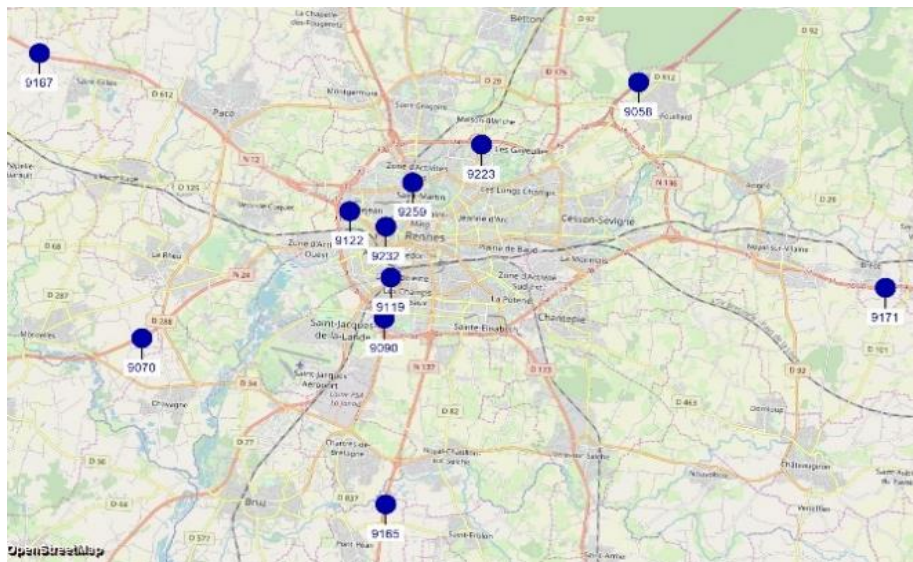


Figure 29 : Répartition spatiale des capteurs étudiés

On a différencié le sens entrant dans le centre-ville du sens sortant afin d'offrir une meilleure lisibilité des résultats, et parce que les logiques de déplacements ne sont pas les mêmes.

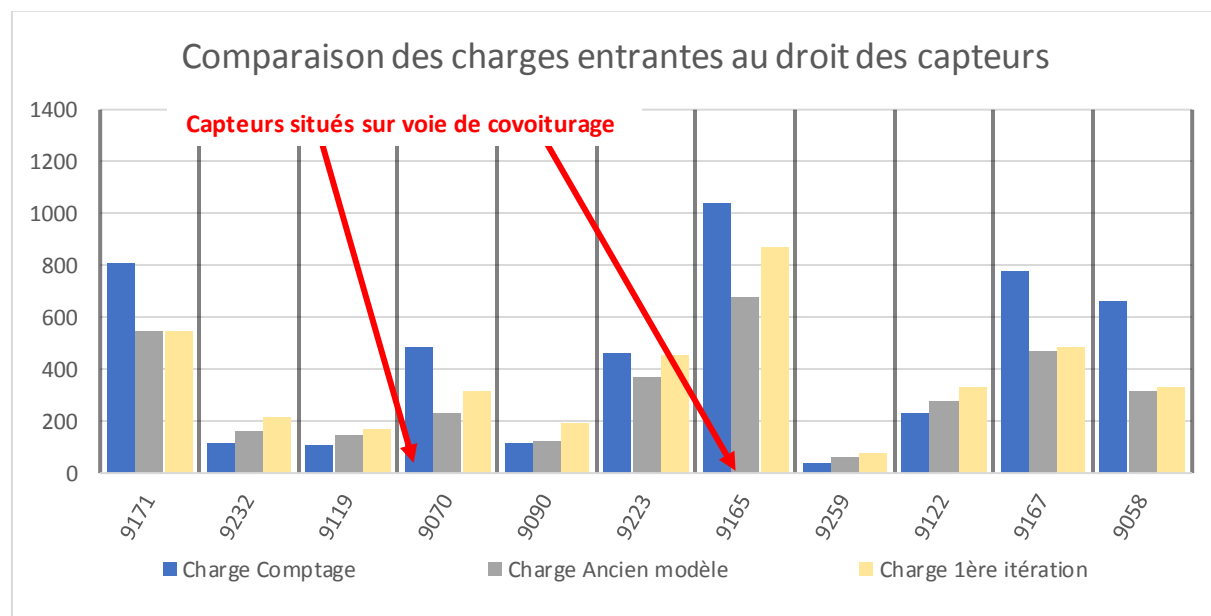


Figure 30 : Analyse des charges pour la première itération (sens entrant)

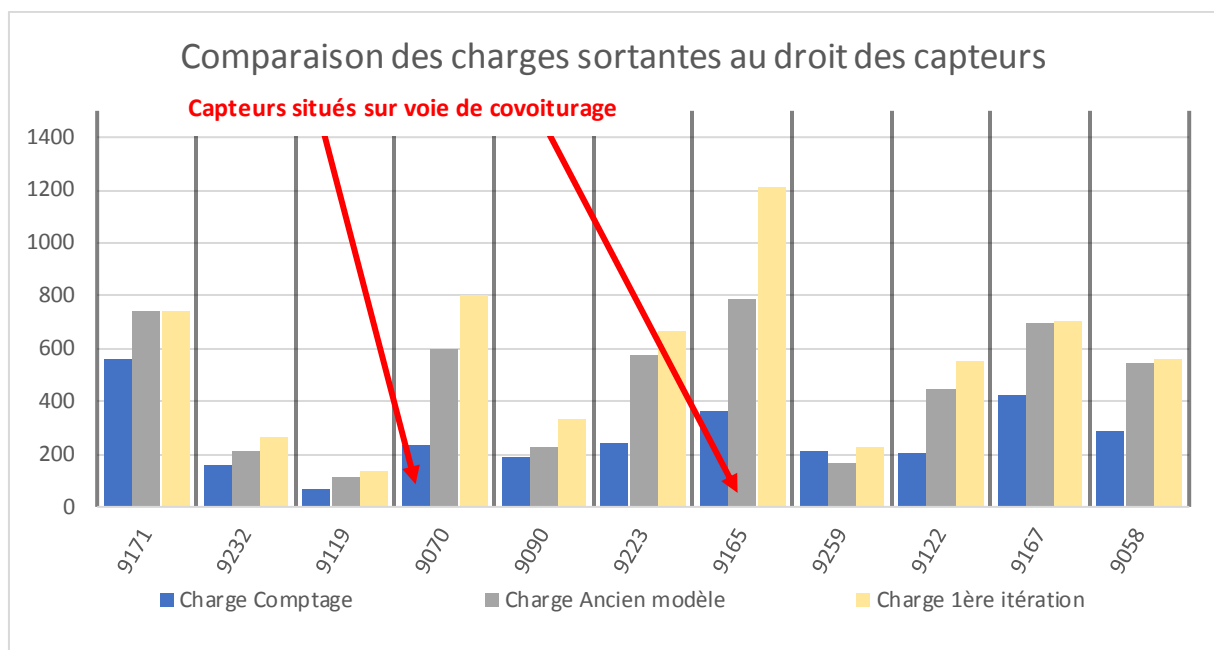


Figure 31 : Analyse des charges pour la première itération (sens sortant)

On observe rapidement que les charges du modèle proposé sont :

- Surestimées sur le capteur 9165 en sortie de centre-ville.
- Correctement estimées sur le capteur 9223 en entrée, mais surestimées en sortie.
- Sous-estimées sur les capteurs 9171, 9070, 9167, et 9058 en entrée de centre-ville, et surestimées en sortie.

Pour le capteur 9165, cela semble venir de la composante incitative qui est probablement trop prise en compte puisque la RN137 possède une longue portion de voie réservée.

On remarque aussi que le capteur 9070 surestime lui aussi très largement les charges dans le sens de la sortie, et la RN24 possède également une voie réservée.

Il faut être vigilant avec ces capteurs car le modèle possède des voies réservées au covoiturage alors que les données de comptage datent d'une période où les voies n'étaient pas encore là.

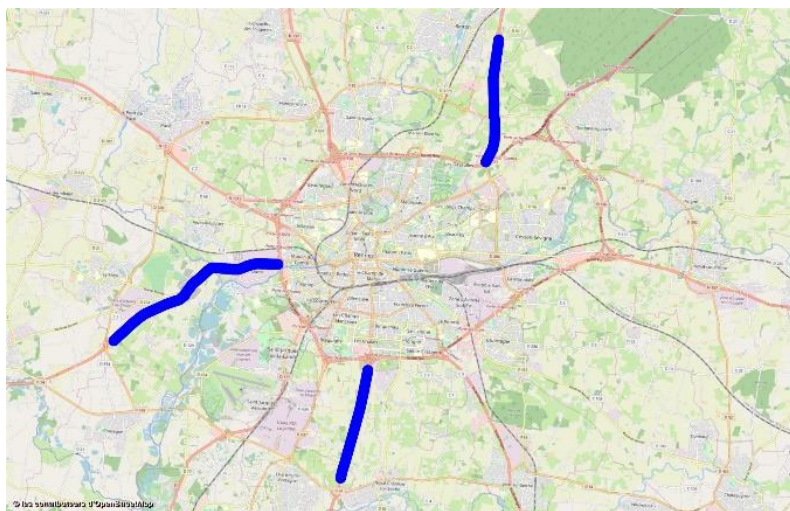


Figure 32 : Position des 3 voies réservées

Pour les capteurs 9171, 9070, 9167 et 9058 la différence semble provenir de la composante sociale.

Pour rappel, la composante sociale augmente avec la population de la zone d'origine et le nombre d'emplois de la zone de destination. Pour le sens sortant, la composante sociale est généralement faible car on va vers des zones résidentielles. Elle est en revanche forte dans le sens entrant.

On peut aussi regarder les GEH afin d'obtenir un indicateur global du modèle. Du point de vue de ce critère, le modèle proposé est légèrement moins pertinent que l'ancien.

	Capteur	Ancien modèle	1ère itération
9171	BRECE EW	10,22	8,11
	BRECE WE	6,97	8,88
9232	BREST EW	3,61	0,97
	BREST WE	4,12	16,45
9119	MENDES FRANCE NS	4,31	1,92
	MENDES FRANCE SN	3,70	4,10
9070	MORDELLES NS	17,97	3,11
	MORDELLES SN	13,72	10,70
9090	NANTES NS	2,64	7,72
	NANTES SN	1,10	15,83
9223	PATTON NS	4,56	5,17
	PATTON SN	16,50	0,65
9165	PONT PEAN NS	17,68	7,01
	PONT PEAN SN	12,59	10,84
9259	ST MALO SN	3,26	15,86
	ST MALO NS	3,80	18,71
9122	ST BRIEUC EW	13,14	0,92
	ST BRIEUC WE	3,14	26,98
9167	ST GILLES EW	11,75	4,42
	ST GILLES WE	12,16	9,58
9058	THORIGNE EW	15,40	8,08
	THORIGNE WE	12,68	5,60
MOYENNE		8,86	8,71
Nb < 5		10	7

Figure 33 : Comparaison des GEH au niveau des 22 capteurs étudiés



Figure 34 : Comparaison de la composante sociale proposée et de l'impédance pour 3 OD qui empruntent le capteur 9122

On est confrontés à la limite évoquée en section 3.3.2 à propos de la variable sociale, à savoir qu'elle présente des variations trop importantes, et qu'on ne peut donc pas reproduire précisément les déplacements à la fois entrants et sortants.

Plutôt que de modifier la variable pour la rendre moins disparate, on peut essayer d'utiliser la matrice d'impédance utilisée dans l'étape de distribution pour le motif professionnel. Par définition, cette matrice mesure en effet l'attraction mutuelle des zones pour le motif professionnel, et on peut donc penser que cette variable est une bonne estimation du flux professionnel entre les zones.

Le choix de cette nouvelle variable nécessite bien entendu un nouveau coefficient, ce qui amène à utiliser la matrice d'utilité suivante :

$$\text{Utilité covoiturage} = 0.06 * M_{\text{tpscovoit}} + 0.12 * M_{\text{connecteurs}} - 0.4 * \ln(M_{\text{distVO}}) - 0.5 * M_{\text{economie}} + 0.08 * M_{\text{détour}} - 0.0005 * M_{\text{socialImpédance}} - 0.8 * M_{\text{incitation}} + 1.8$$

2^{ème} itération

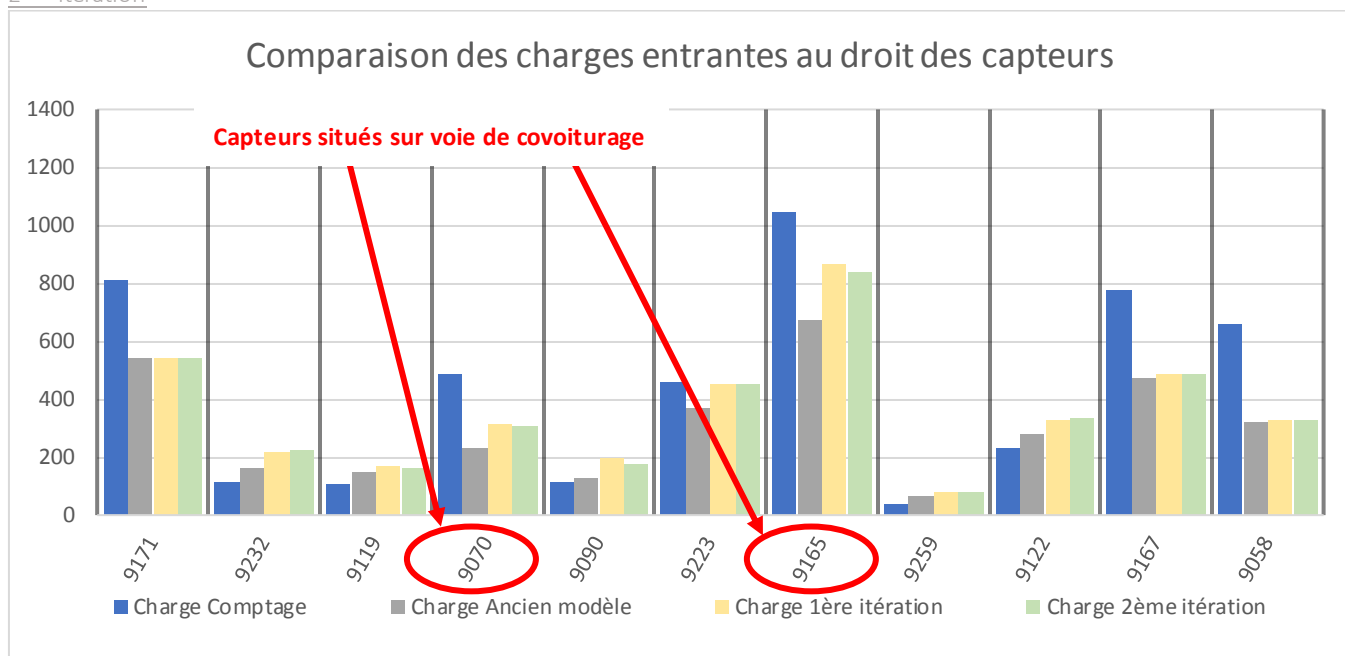


Figure 35 : Analyse des charges pour la deuxième itération (sens entrant)

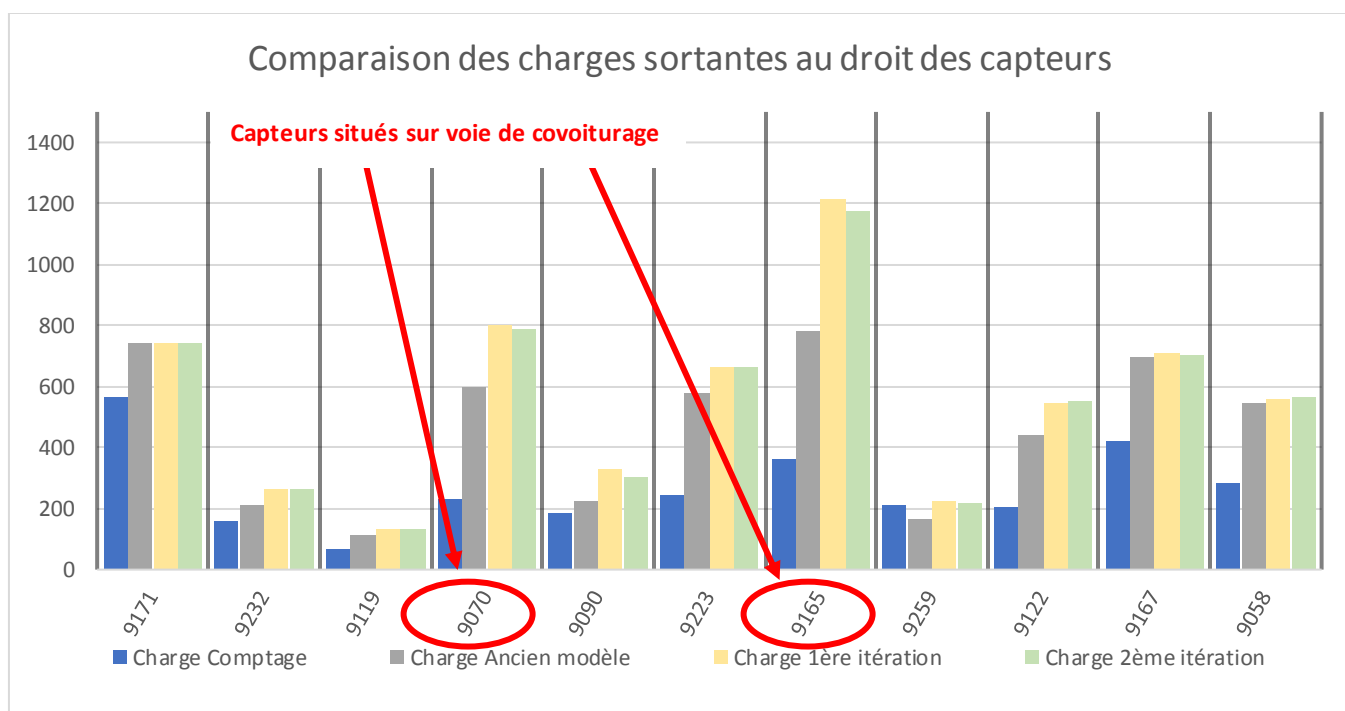


Figure 36 : Analyse des charges pour la deuxième itération (sens sortant)

Ces nouvelle fonction utilité est plus pertinente car on se rapproche des valeurs de comptages.

La raison à cela est que la matrice d'impédance varie moins que la matrice proposée, ce qui explique qu'on se rapproche du modèle initial où la constante jouait beaucoup dans l'utilité.

	Capteur	Ancien modèle	1ère itération	2ème itération
9171	BRECE EW	10,22	10,22	10,22
9232	BREST WE	4,12	7,87	8,39
9119	MENDES FRANCE SN	3,70	5,11	4,88
9070	MORDELLES SN	13,72	8,68	9,07
9090	NANTES SN	1,10	6,59	5,15
9223	PATTON NS	4,56	0,37	0,28
9165	PONT PEAN SN	12,59	5,62	6,61
9259	ST MALO NS	3,80	5,73	5,51
9122	ST BRIEUC WE	3,14	5,99	6,15
9167	ST GILLES WE	12,16	11,49	11,58
9058	THORIGNE EW	15,40	14,97	15,03
MOYENNE		7,68	7,51	7,53
Nb < 5		6	1	2

Figure 37 : Comparaison des GEH pour les charges entrantes

9171	BRECE WE	6,97	6,97	6,97
9232	BREST EW	3,61	7,14	6,96
9119	MENDES FRANCE NS	4,31	6,50	6,17
9070	MORDELLES NS	17,97	25,00	24,68
9090	NANTES NS	2,64	8,88	7,45
9223	PATTON SN	16,50	19,88	19,84
9165	PONT PEAN NS	17,68	30,42	29,29
9259	ST MALO SN	3,26	0,94	0,20
9122	ST BRIEUC EW	13,14	17,59	17,63
9167	ST GILLES EW	11,75	12,04	11,97
9058	THORIGNE WE	12,68	13,46	13,62
MOYENNE		10,04	13,53	13,16
Nb < 5		4	1	1

Figure 38 : Comparaison des GEH pour les charges sortantes

Du point de vue du GEH, on constate de nouveau une amélioration de représentativité du modèle proposé.

Afin de proposer un troisième modèle encore plus représentatif, l'idée va être d'isoler les 5 postes de comptages avec le plus gros GEH, afin de réfléchir à l'origine des différences. Cela permettra de procéder à de légers ajustements et de réduire les GEH en ces postes :

- Mordelles NS : Ce capteur est situé le long de la RN24 dans le sens de la sortie. Le modèle proposé contient une voie de covoiturage tandis que celle-ci n'était pas présente lors des données de comptage. Ceci explique que les charges soient largement surestimées, mais il n'est pas possible de savoir quelle part de cette différence est due à l'ajout de la voie.
- Pont-Péan NS : De même que pour le capteur de Mordelles, les charges sont surestimées à cause de la présence de voie réservée.
- Patton SN : La charge est clairement surestimée par les modèles à ce capteur. Le modèle issu de la seconde itération donne autant de véhicules VP2+ (600) que de véhicules VP (650), ce qui semble irréaliste. Une recherche de plus court chemin entre différents points du centre-ville rennais et les alentours de Chevaigné montre que beaucoup d'itinéraires empruntent à la fois le tronçon du capteur et la D175. Un troisième tronçon de voie réservée est présent sur cette D175 ce qui peut expliquer le surplus de covoitureurs au niveau du capteur
- Thorigné E-W : Les charges sont sous-estimées sur ce capteur en entrée de centre-ville. Ce capteur est situé en aval de l'A84, et l'arborescence sur ce tronçon montre que les gens concernés effectuent de longstrajets. La composante budgétaire pèse donc beaucoup dans la fonction d'utilité ce qui a tendance à surestimer le nombre de covoitureurs. Il semble donc qu'il faille légèrement diminuer l'importance du critère économique dans la fonction d'utilité. On remarque de plus qu'en moyenne le nombre de covoitureurs par capteur est surestimé dans le modèle proposé (387 contre 354), il ne semble donc pas problématique de diminuer l'impact de l'économie budgétaire.
- Saint-Brieuc E-W : De même que pour le capteur précédent, la surcharge semble être due au critère budgétaire.

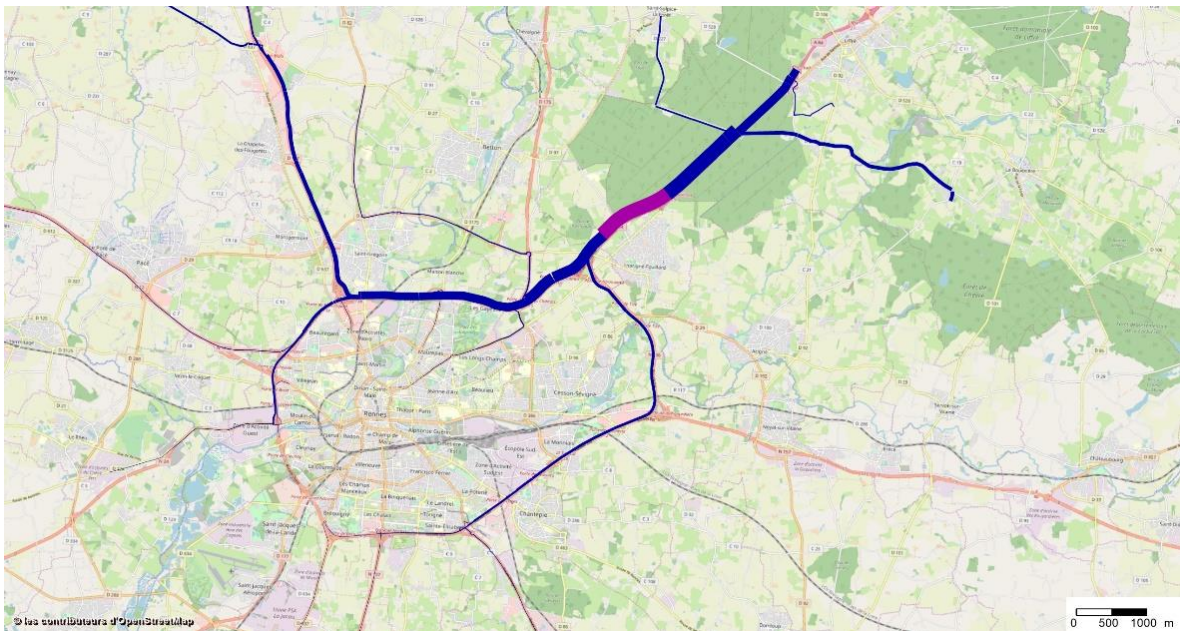


Figure 39 : Arborescence au niveau du capteur Thorigné E-W

On va donc baisser l'influence de la composante budgétaire en diminuant le coefficient associé. Ce coefficient était de 0.5 ce qui signifie qu'un euro économisé est équivalent à un gain de temps de 6min40 (voir section 3.3.2).

La valeur du temps utilisée en pratique diffère selon les auteurs. Le tableau ci-dessous reprend par exemple les valeurs du temps données par le rapport Boiteux ²¹⁷ en 2002.

Valeur du temps proposée en milieu urbain par voyageur (euros 1998/h)

Mode de déplacement	% du coût salarial	% du salaire brut	France entière (euros 1998/h)	Île-de-France (euros 1998/h) ¹
Déplacement professionnel	61 %	85 %	10,5 €	13 €
Déplacement domicile-travail	55 %	77 %	9,5 €	11,6 €
Autres déplacements (achat, loisir, tourisme, etc.)	30 %	42 %	5,2 €	6,4 €
Lorsqu'on ne dispose pas du détail des trafics par motifs, prendre une valeur moyenne pour tous les déplacements	42 %	59 %	7,2 €	8,8 €

Figure 40 : Valeur du temps préconisée par le Commissariat Général du Plan

Les chiffres du rapport Boiteux datent de 2001, et sont rapportés à la valeur monétaire de l'euro en 1998. Nous prendrons ici une valeur du temps moyenne de 12 euro/h, ce qui correspond à un gain de temps de 5 min par euro, soit un coefficient de 0.38.

$$\text{Utilité covoiturage} = 0.06 * M_{\text{tpscovoit}} + 0.12 * M_{\text{connecteurs}} - 0.4 * \ln(M_{\text{distVO}}) - 0.38 * M_{\text{economie}} + 0.08 * M_{\text{détour}} - 0.0005 * M_{\text{socialImpédance}} - 0.8 * M_{\text{incitation}} + 1.8$$

¹⁷ Commissariat général du Plan. *Transports : choix des investissements et coûts des nuisances. Rapport du groupe de travail présidé par Marcel Boiteux, Rapporteur général Luc Baumstark*. La Documentation française, Paris, 2001.

<https://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/014000434.pdf>

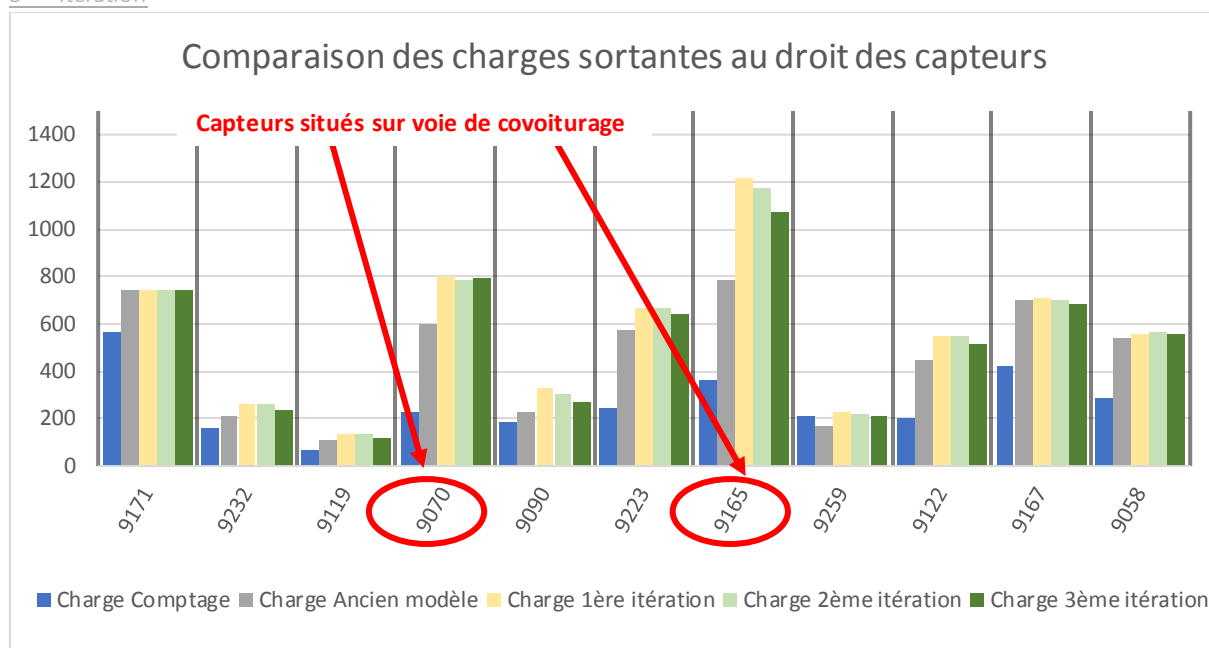


Figure 41 : Analyse des charges pour la 3ème itération (sens entrant)

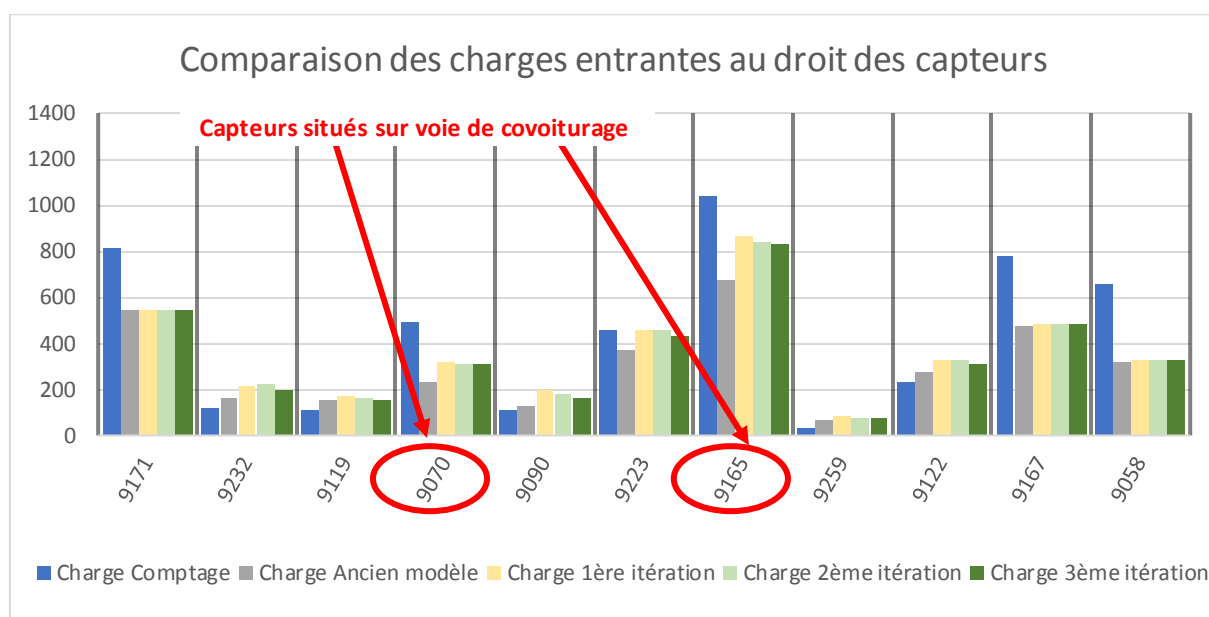


Figure 42 : Analyse des charges pour la 3ème itération (sens sortant)

Les graphiques montrent que ce troisième modèle reproduit encore mieux les charges VP2+ que les deux modèles précédents.

Synthèse du processus itératif

Le tableau ci-dessous synthétise les tests réalisés à chaque itération, et donne un indicateur agrégé des modèles pour les 11 capteurs.

Modèle	Description du modèle	Moyenne des charges sur les 11 capteurs	Ecart relatif	Moyenne GEH	Nb GEH < 5	Pourcentage GEH < 5
Comptages	-	354	-			
Ancien modèle	3 variables dans la fonction d'utilité (temps trajet, temps accès, distance vol d'oiseau)	386	9%	8,86	10	45%
1ère itération	Intégration des 4 nouvelle variables + Processus de vérification des variables	463	31%	10,52	2	9%
2ème itération	Utilisation de la matrice d'impédance Travail pour la motivation sociale	457	29%	10,35	3	14%
3ème itération	Réduction de l'influence du critère économique dans le choix modal	441	24%	9,72	5	23%

Figure 43 : Synthèse des résultats de calage sur les 11 capteurs les plus intéressants

Seul 11 capteurs ont été utilisés pour caler le modèle puisque ces capteurs étaient les principaux points concernés par le covoiturage urbain. Pour autant, il est nécessaire de s'intéresser à l'impact des modifications sur le reste du réseau.

Le tableau ci-dessous reprend les éléments de la figure précédente mais à l'échelle de 187 postes de comptages à disposition.

Modèle	Description du modèle	Moyenne GEH	Nombre GEH < 5	Pourcentage GEH < 5
Comptages	-			
Ancien modèle	3 variables dans la fonction d'utilité (temps trajet, temps accès, distance vol d'oiseau)	6,03	101	54,0%
1ère itération	Intégration des 4 nouvelle variables + Processus de vérification des variables	7,02	94	50,3%
2ème itération	Utilisation de la matrice d'impédance Travail pour la motivation sociale	6,80	99	52,9%
3ème itération	Réduction de l'influence du critère économique dans le choix modal	6,35	101	54,0%

Figure 44 : Synthèse des résultats de calage sur l'ensemble des capteurs

Logiquement, l'indicateur de GEH est meilleur sur les 187 postes de comptages que sur les 11 précédents puisque les 11 postes retenus étaient les plus concernés par les mesures de covoiturage.

Le niveau de précision du modèle en matière de covoiturage est probablement perfectible, mais au vu de l'imprécision des données, le modèle proposé lors de la 3^{ème} itération sera celui qui sera conservé dans la suite de l'exercice.

Pour rappel, les charges VP2+ au niveau des capteurs ont été approximées en utilisant la répartition VP/VP2+ du modèle initial, et dans la mesure où ce modèle intégrait de manière basique le covoiturage, l'estimation est grossière.

Il serait intéressant de confronter le modèle proposé à d'autres cas d'étude ou à d'autres données afin de converger vers un modèle plus précis et plus général.

Maintenant que le processus de calage a abouti à un premier modèle satisfaisant, ce dernier va être analysé afin de mettre en évidence sa plus-value.

5 Analyse des modèles

L'objectif de cette partie est d'analyser le nouveau modèle afin de voir quel type d'outils offre ce nouveau modèle.

Pour cela, la notion d'élasticité est importante. Elle mesure la variation d'une grandeur provoquée par la variation d'une autre grandeur. Dans notre cas, nous regarderons l'élasticité du modèle aux projets d'aménagements en rapport avec le covoiturage.

5.1 Modélisation de l'aménagement

Le premier volet de cette analyse concerne principalement les voies réservées. Nous étudierons donc l'impact de ces aménagements sur l'affectation.

Il existe deux manières de mettre en place une voie réservée au covoiturage. La première consiste à utiliser une voie déjà existante, ce qui a pour conséquence une restriction de capacité pour les usagers. L'autre méthode, plus coûteuse, consiste à construire une troisième voie, ce qui n'a pas (ou peu) de conséquences sur la capacité de la voie non réservée.

Les deux types d'aménagements vont ici être étudiés car ils ne répondent pas aux mêmes besoins et que leurs logiques ne sont pas les mêmes.

5.1.1 Temps de parcours

Des comparaisons vont être réalisées entre le modèle proposé sans voies réservées et le modèle proposé comprenant les deux voies réservées. Ces tests permettront d'illustrer le type d'analyses que permet de réaliser le modèle proposé.

1^{er} test

Les chemins sur lesquels seront étudiés les temps de parcours seront simplement les 2 chemins où une voie réservée existe.

Pour chacun des deux chemins, le tableau ci-dessous dresse une estimation des temps de parcours et de l'occupation.

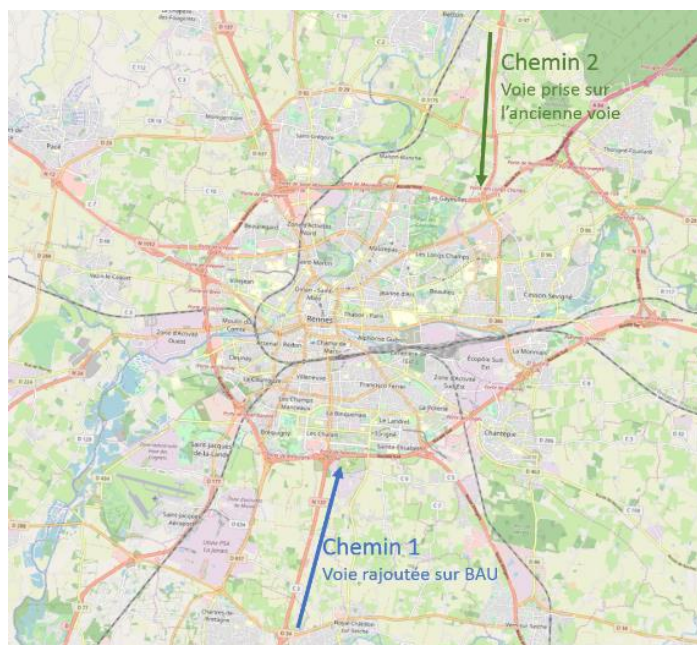


Figure 45 : Chemins étudiés dans le 1^{er} test

	Sans Covoit	Avec Covoit		Sans Covoit	Avec Covoit
Chemin 1 (RN137 Entrée)			Chemin 1 (RN137 Entrée)		
Temps VP	02:07	02:57	Occupation Voie Classique		79
Temps VP	02:07	02:57	Occupation Voie réservée	50	5
Chemin 2 (D175 Entrée)			Chemin 2 (D137 Entrée)		
Temps VP	02:41	03:37	Occupation Voie Classique		100
Temps VP2+	02:41	03:37	Occupation Voie réservée	30	1

Figure 46 : Temps de parcours et taux d'occupation des 2 chemins étudiés dans le sens de l'entrée pour le 1^{er} test

On remarque étonnement que la voie de covoiturage ne permet pas aux covoitureurs du premier chemin de gagner du temps. La raison à cela est que la voie de covoiturage a été installée sur la bande d'arrêt d'urgence de la RN137, et qu'elle n'est donc pas adaptée à une circulation rapide.

On observe également qu’il est plus rapide de rouler sur la D175 congestionnée, que sur sa bande d’arrêt d’urgence libre. La raison à cela est encore une fois la vitesse à vide de la voie réservée qui est trop faible par rapport à la vitesse à vide sur la voie classique. La conséquence directe est que même congestionnée, la RN137 reste plus rapide que la voie réservée. En revanche, contrairement à la voie du premier chemin, cette voie n’est pas prise sur la BAU et il n’est donc pas logique que sa vitesse à vide soit si faible.

Le tableau ci-dessous synthétise les caractéristiques de voies utilisées dans le raisonnement. Les valeurs de temps sont données pour une courte portion aléatoire de chemin.

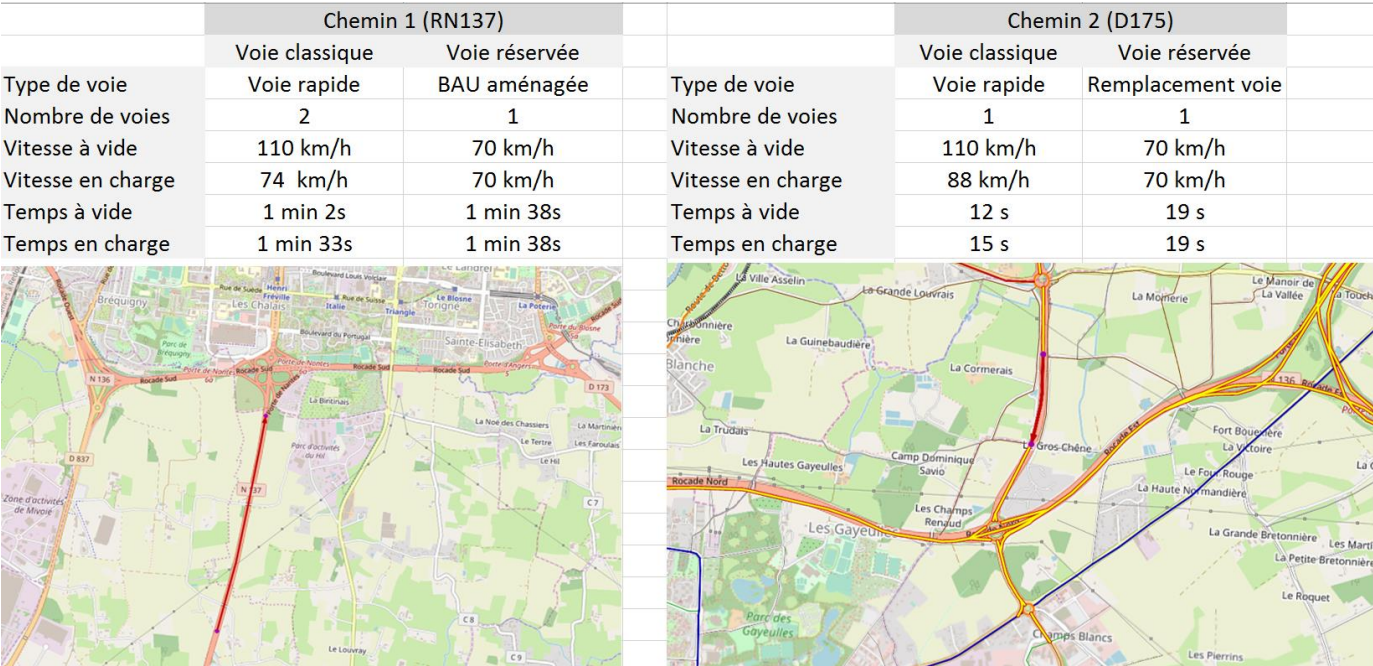


Figure 47 : Caractéristiques des tronçons lors du 1^{er} test

Le modèle permet déjà de tirer une conclusion, à savoir que les voies réservées avec prise sur BAU ne sont efficaces qu’en cas de très forte congestion, ou bien si la BAU est suffisamment large pour offrir une circulation satisfaisante.

2ème test

La voie réservée de la D175 va désormais être modélisée comme une voie supplémentaire normale. Les caractéristiques de la voie réservée seront donc les mêmes que ceux de la voie classique, ce qui devrait logiquement entraîner un report d'itinéraire.

La RN137 va quant à elle être réduite à une voie afin de permettre la mise en place d'une voie de covoiturage. La voie de covoiturage vient en remplacement d'une voie classique et ses conditions de circulation ne seront donc pas réduites comme c'était le cas avec la voie sur BAU du 1^{er} test. On s'attend là-aussi à ce que les covoitureurs se reportent vers l'utilisation de la voie réservée.

Enfin, les attributs de la voie classique sont modifiés afin de coïncider avec les règles actuellement en vigueur (limitations à 90 Km/h au lieu de 110).

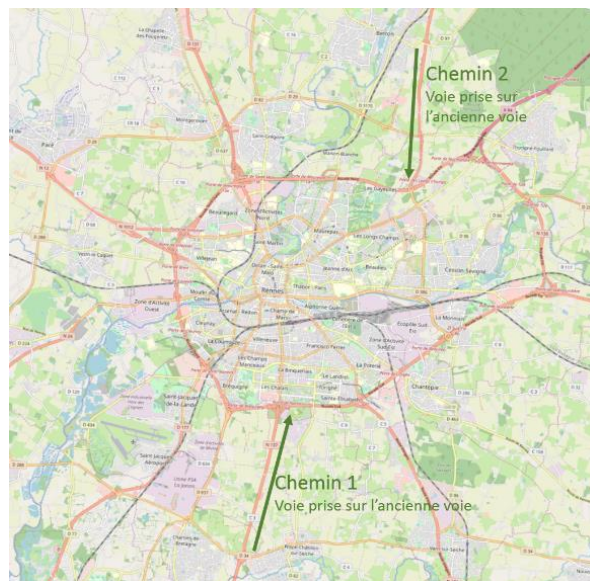


Figure 48 : Chemins étudiés dans le second test

	Chemin 1 (RN137)			Chemin 2 (D175)	
	Voie classique	Voie réservée		Voie classique	Voie réservée
Type de voie	Voie rapide	Remplacement voie	Type de voie	Voie rapide	Remplacement voie
Nombre de voies	1	1	Nombre de voies	1	1
Vitesse à vide	90 km/h	90 km/h	Vitesse à vide	90 km/h	90 km/h
Vitesse en charge	38 km/h	51 km/h	Vitesse en charge	51 km/h	76 km/h
Temps à vide	1 min 16 s	1 min 16 s	Temps à vide	15 s	15 s
Temps en charge	3 min 2 s	2 min 15 s	Temps en charge	27 s	18 s

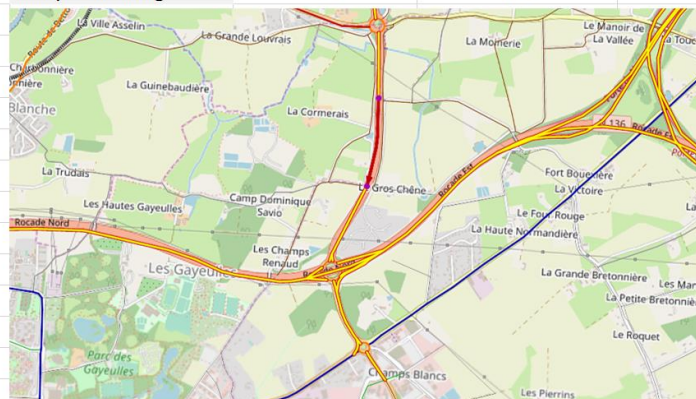
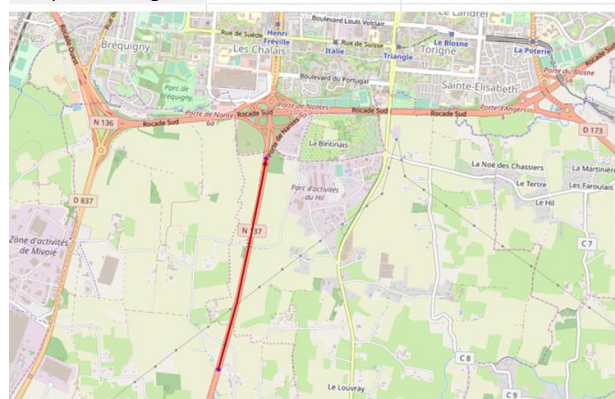


Figure 49 : Caractéristiques des tronçons lors du 2ème test

On observe qu'avec les modifications effectuées, les voies de covoiturage deviennent plus intéressantes que les voies classiques.

D'une part la requalification de la voie rapide en voie 90 km/h entraîne une congestion puisque sa capacité et sa vitesse maximale diminuent. D'autre part, le fait de ne plus considérer la voie de covoiturage comme une voie sur BAU offre une vitesse à vide et une capacité qui en font une voie attractive pour les covoitureurs.

Le modèle permet de dresser une conclusion intéressante sur la manière dont doit être aménagée une voie de covoiturage si l'on veut reporter efficacement les autosolistes vers le covoiturage.

5.1.2 Parts modales

Nous allons maintenant aborder le fonctionnement du modèle du point de vue des parts modales. Il semble en effet logique que les aménagements de covoiturage aient une conséquence sur la répartition modale des usagers du réseau.

Il est possible de s'intéresser aux parts modales globales du réseau, mais l'influence des deux voies réservées serait sans doute trop faible pour être analysée efficacement. Nous allons plutôt étudier les parts modales aux alentours des deux voies mises en place. Pour cela, nous ne conservons que les OD qui partent aux alentours des débuts de chemins et qui vont vers le centre-ville (2% de l'ensemble des OD).

De la même manière que lors de l'étude des temps de parcours, nous nous intéressons ici à l'impact de la voie réservée, et non à l'impact du modèle de demande proposé. Nous allons donc comparer les parts modales issues du modèle avec voies réservées avec les parts modales du modèle sans les voies réservées. Il est en effet nécessaire que les modèles comparés aient la même fonction d'utilité si l'on veut mesurer uniquement l'influence de la voie.

Il est primordial de recalculer le modèle sans voie réservée ainsi que celui du test 1 car sur ces deux modèles, les voies rapides sont limitées à 110 km/h (contre 90 km/h pour le modèle du test 2). La figure ci-dessous présente les parts modales obtenues avec les trois modèles corrigés (limitation à 90 km/h au lieu de 110 sur la voie classique).

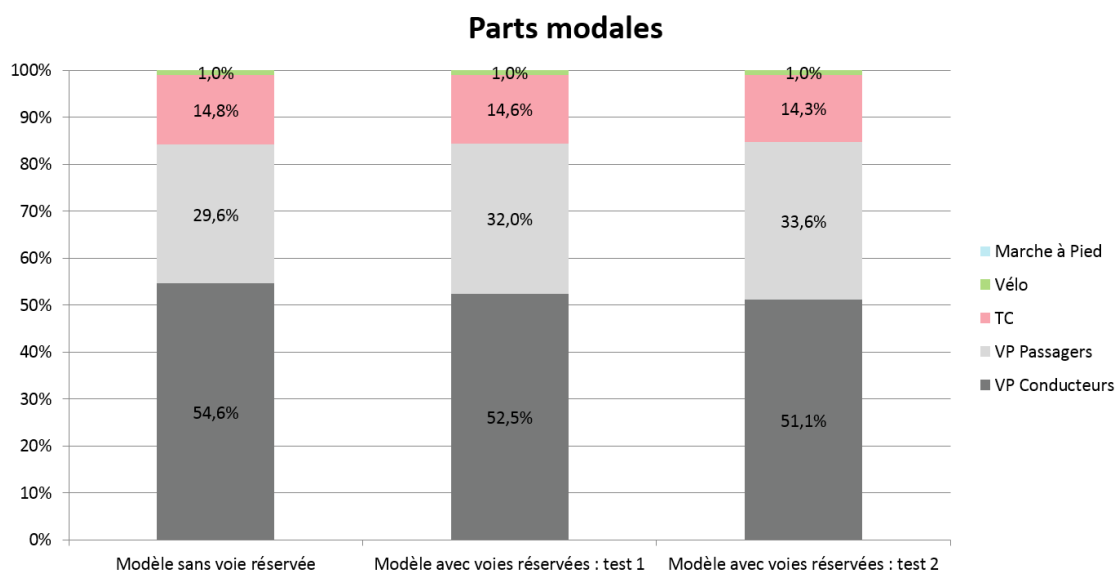


Figure 49 : Parts modales issues des scénarios avec voies de covoiturage

Comme on pouvait s'y attendre, le Scénario testé dans le second cas révèle un report modal du mode conducteur vers le mode passager. C'est assez logique puisque qu'entre les deux tests, les conditions de circulation ont été :

- améliorées sur la voie réservée de la D175 : on est passé d'une voie limitée à 70 km/h à une voie limitée à 90 km/h.
- améliorées sur la voie réservée de la RN137, et dégradées sur la voie classique. On est passé d'un profil de voie sur BAU à un profil de voie normale. La voie classique est quant à elle passée de 2 voies à 1 voie.

5.2 Etape de choix modal

Cette deuxième partie concerne la procédure de choix modal. La fonction d'utilité du mode covoiturage a été modifiée, et nous allons voir quelles sont les conséquences de cette nouvelle fonction d'utilité.

5.2.1 Parts modales

Dans la section précédente, nous avons isolé les OD empruntant les voies réservées afin de ne mesurer que les variations de part modales causées par les voies de covoiturage.

Nous nous intéressons désormais aux variations causées par la proposition d'une nouvelle fonction d'utilité. Ces variations ne sont plus localisées, et c'est pourquoi nous allons désormais étudier les parts modales sur l'ensemble du périmètre du modèle.

La première étape consiste à comparer les parts modales issues du modèle proposé à celles de l'ancien.

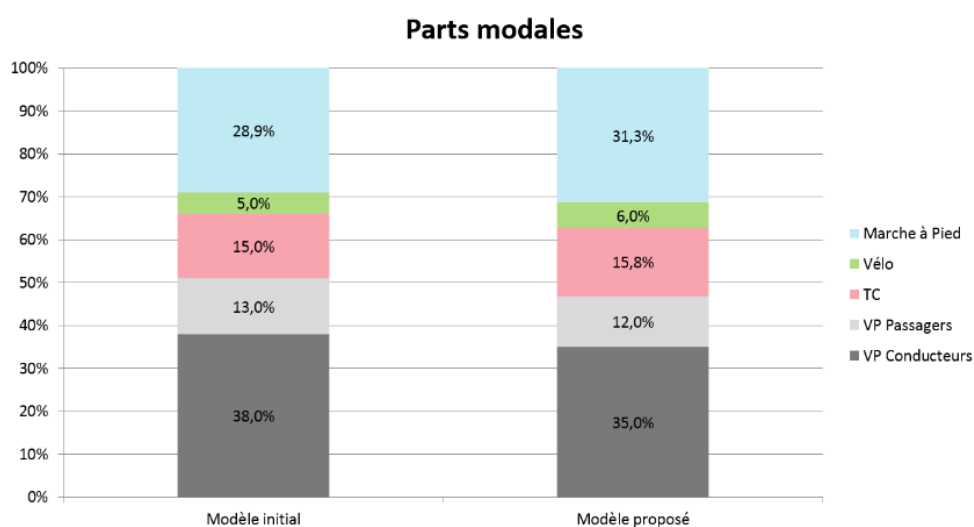


Figure 50 : Parts modales associées aux deux modèles

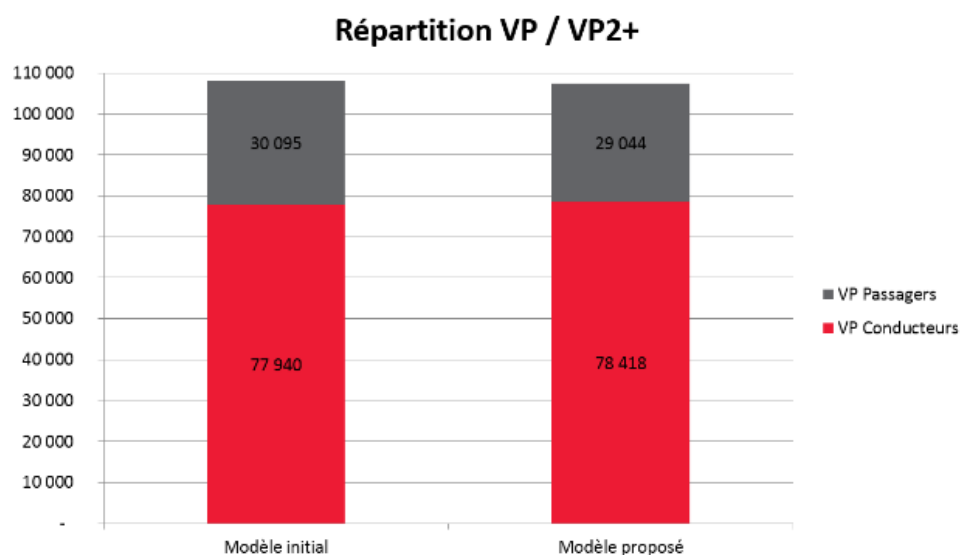


Figure 51 : Répartition des véhicules covoitureurs et autosolistes associée à chaque modèle

On observe que la fonction d'utilité proposée permet d'agir de manière conséquente sur les parts modales, et pas seulement sur les modes passagers et conducteurs. Si l'on s'intéresse à la répartition VP / VP2+, on constate que le nouveau modèle implique une très légère baisse du nombre total de véhicules, et ce malgré une augmentation du nombre de véhicules autosolistes.

On peut également étudier l'élasticité du modèle de demande proposé en faisant varier les variables que l'on a ajouté au modèle. On va pour cela comparer les parts modales du modèle proposé aux 4 scénarios suivants :

- Scénario 1 / Hausse du prix du carburant : On augmente de 20% les coûts de circulation liés à la consommation de carburant.
- Scénario 2 / Développement des groupes de covoiturages professionnels : On utilise les d'emplois et de population à 5 ans (2020).
- Scénario 3 / Développement des plateformes de mise en relation : On diminue de 20% les temps de détour d'un trajet.
- Scénario 4 / Politique urbaine incitative : On ajoute 5 panneaux incitants à la pratique du covoiturage.

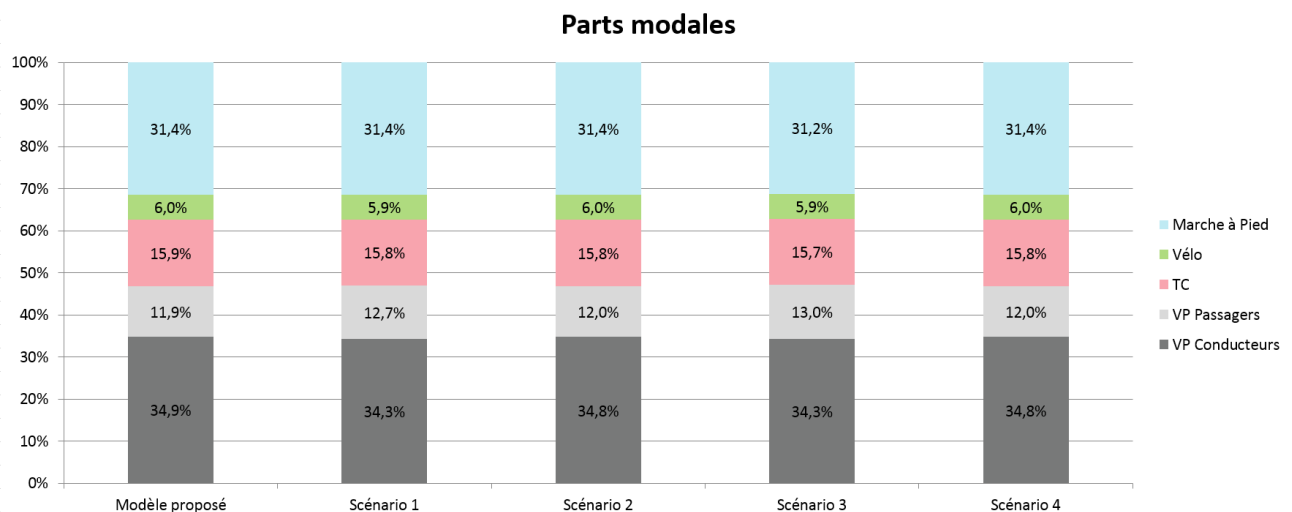


Figure 52 : Comparaison des parts modales entre le modèle proposé et les 4 scénarios du test d'élasticité

On observe rapidement que les 5 modèles donnent lieu à des répartitions modales sensiblement différentes, surtout aux niveaux des deux modes VP.

Il y a un report modal lorsque le mode VP Passager a une utilité légèrement plus forte (respectivement plus faible) que celle d'un autre mode, et que la modification de la fonction d'utilité la fait devenir plus faible (respectivement plus forte). Dans ce cas, il y a un report modal du mode en question vers le mode VP Passager (respectivement du mode VP Passager vers le mode en question).

Il n'est pas surprenant de constater que le principal report modal s'effectue entre les deux modes VP puisqu'on peut logiquement s'attendre à ce que ces deux modes soient relativement proches en termes d'utilité. On observe toutefois quelques reports vers les modes TC et Vélo.

- Scénario 1 / Hausse du prix du carburant :

On observe d'importantes variations de parts modales entre la référence et ce scénario de hausse du prix des carburants. En effet, 0,6% des conducteurs du réseau seraient amenés à se reporter vers d'autres modes, et en particulier vers le covoiturage.

Ce résultat est rassurant car il semble cohérent d'avancer que la hausse des coûts de circulation inciterait à mutualiser les véhicules. Le modèle réagit donc bien à la variable de coût, ce qui signifie qu'il permettrait d'évaluer les conséquences d'une politique visant à jouer sur les coûts de circulation (péages urbains, taxes sur les carburants).

- Scénario 2 / Développement des groupes de covoitages professionnels :

Une variable sociale a été intégrée au modèle afin de faciliter le covoiturage le long des axes fortement empruntés par les travailleurs. Le modèle ne semble pas très réactif aux variations de cette variable puisque les prévisions socioéconomiques de 2020 donnent lieu à des résultats très proches du modèle de 2015.

Seul 0,1% de report modal vers le covoiturage est ainsi attendu suite à la restructuration naturelle des pôles professionnels et résidentiels.

Il pourrait être intéressant de rendre le modèle plus sensible à la variable sociale si l'on veut lui permettre d'évaluer des projets de développement du covoiturage professionnel.

- Scénario 3 / Développement des plateformes de mise en relation :

De même que pour le premier scénario testé, ce scénario offre de belles perspectives de report modal. La notion de temporalité représente en effet une part importante du processus de choix modal, et de surcroît pour les temps d'attente qui sont perçus plus péniblement que les temps de trajet¹⁸.

Le modèle offre donc un potentiel d'évaluation des mesures visant à réduire les temps d'attente. La question se pose ensuite de trouver une relation permettant de mesurer le gain en temps d'attente offert par une plateforme de mise en relation, mais cela dépasse le cadre de ce rapport.

- Scénario 4 / Politique urbaine incitative :

La mise en place de panneaux incitatifs à la pratique du covoiturage ne semble pas agir de manière notable sur les parts modales. Seul 1% de report est en effet attendu en conséquence de la mise en place de panneaux à 5 endroits stratégiques.

Le modèle ne semble pas très réactif aux panneaux incitatifs, mais pour autant, le processus de calage a révélé que la longueur de voie réservée empruntée (autre composante de la variable incitative) modifie notablement le choix modal. Il pourrait être intéressant de rééquilibrer les deux coefficients de cette variable afin que le modèle soit plus sensible à ces panneaux.

Il serait probablement intéressant de jouer sur les deux leviers de la variable incitative en déployant des voies réservées à proximité de ces panneaux. Cela permettrait d'agir de manière plus importante sur l'utilité des déplacements concernés, et on pourrait ainsi observer un fort report modal sur ces portions localisées.

¹⁸ P Bonnel. *Prévision de la demande de transport*. Economies et finances. 2002.
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00268919/document>

5.2.2 Occupation

De même que pour les parts modales, nous allons étudier l'occupation globale du réseau. Le tableau ci-dessous compare l'occupation du modèle proposé avec celle de l'ancien modèle.

L'idée a été de créer 6 classes d'occupation, et de comptabiliser l'importance relative de chaque tranche. Les tronçons ne font pas tous la même longueur, et il aurait été imprécis de comptabiliser le nombre de tronçons de chaque tranche d'occupation. Nous avons donc comptabilisé le nombre de kilomètres de tronçons de chaque tranche. La longueur cumulée relative de chacune des 6 tranches d'occupation a finalement été représentée sur le graphique ci-dessous.

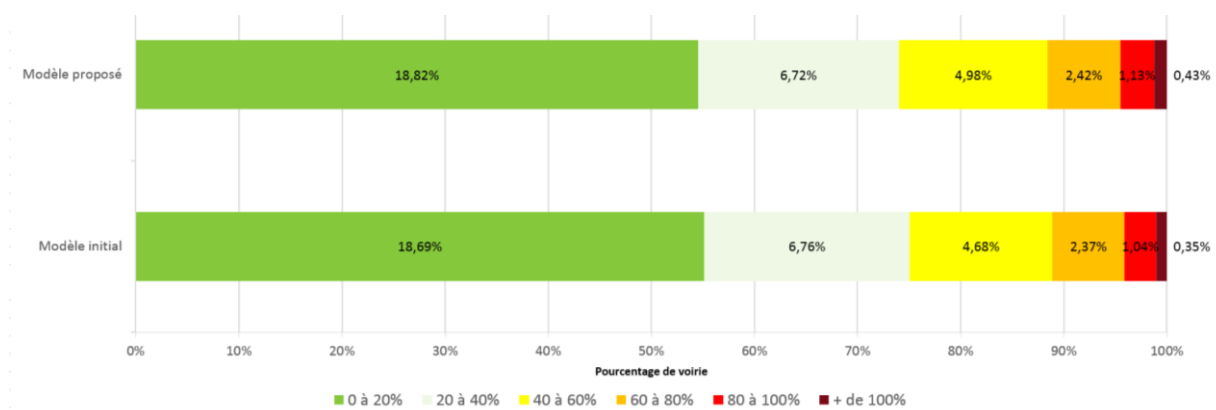


Figure 53 : Comparaison du niveau d'occupation du réseau entre le modèle proposé et le modèle initial

On observe que le modèle proposé offre des résultats légèrement différents en termes d'occupation. Il est impossible d'isoler les causes de ces différences car le modèle a subi beaucoup de changements.

Nous allons reprendre les 4 scénarios calculés précédemment afin d'étudier l'élasticité du modèle à chacune des variables ajoutées.

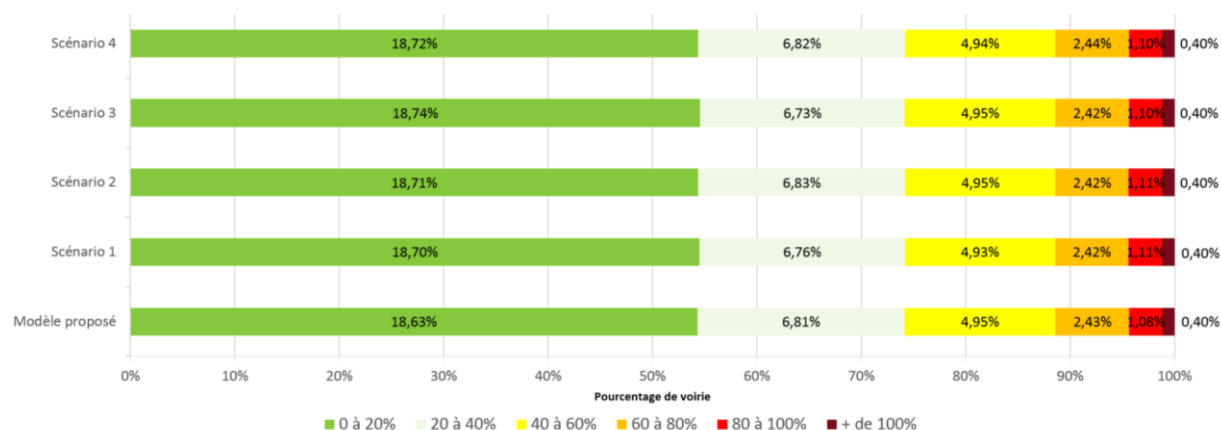


Figure 54 : Comparaison du niveau d'occupation du réseau entre le modèle proposé et les 4 scénarios du test d'élasticité

Le premier constat qui ressort de cette figure est que l'occupation du réseau et les parts modales ne réagissent pas de la même manière aux variables proposées.

Du point de vue des parts modales, seuls les scénarios 1 et 3 semblaient affectés par les modifications effectuées. Du point de vue de l'occupation, on constate cette fois que les 4 scénarios subissent des variations intéressantes.

Il est important de noter que les parts modales sont le résultat direct de la procédure de choix modal tandis que l'occupation est le résultat de l'étape d'affectation qui se situe plus en aval. Il est donc un peu plus délicat d'analyser l'occupation étant donné que les modifications effectuées vont agir sur une succession d'étapes.

- Scénario 1 / Hausse du prix du carburant :

Pour rappel, l'étude des parts modales avait révélé un report modal du mode conducteur vers le mode passager. Ce report modal semble avoir pour conséquence la hausse de longueur de voirie très faiblement occupée (0 à 20% d'occupation).

La longueur de voirie de la classe d'occupation 20-40 augmente légèrement, mais c'est surtout sur la classe 80-100 que l'on observe une augmentation problématique. En effet, même si le pourcentage n'augmente que de 0,3%, c'est une hausse relative de 2,7% sur des éléments de voirie déjà critiques.

- Scénario 2 / Développement des groupes de covoiturages professionnels :

Les parts modales de ce scénario n'avaient été que très peu affectées par les modifications effectuées.

La longueur de voirie occupée entre 0 et 20% diminue, tandis que celle de la classe 80-100 subit encore une fois une augmentation relative de 2,7%.

- Scénario 3 / Développement des plateformes de mise en relation :

Ce scénario avait permis de mettre en évidence une forte élasticité des parts modales à la variable du temps de détour. L'occupation du réseau ne semble cependant pas très réactive aux variations de cette variable.

On observe un transfert de la tranche 20-40 vers la tranche 0-20, mais ce transfert n'est pas très lourd de conséquences. La modification de la variable temps de détour semble donc avoir une faible influence sur l'occupation du réseau.

- Scénario 4 / Politique urbaine incitative :

Les parts modales de ce scénario avaient elles-aussi été peu affectées par les modifications effectuées.

Une fois de plus, l'occupation de la classe 0-20 diminue, tandis que celle de la classe 80-100 subit une augmentation relative de 1,8%.

L'impact de la modification sur l'occupation du réseau est relativement faible.

Il peut être intéressant de quantifier les effets de la hausse du nombre de tronçons occupés sur les temps de parcours des usagers. Pour cela, on va regarder les variations relatives de temps de parcours pour les utilisateurs de ces tronçons fortement occupés (occupation supérieure à 80%).

	Référence	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Temps moyen des tronçons occupés à plus de 80% (en s)	32,90	32,68	32,92	32,61	32,86
Différence relative	4,5%	-0,7%	0,1%	-0,9%	-0,1%

Figure 55 : Impact du changement d'occupation des tronçons sur le temps de parcours des usagers (comparaisons des 4 scénarios avec le modèle de référence proposé, et comparaison du scénario de référence avec l'ancien modèle)

La variation d'occupation des tronçons a une faible influence sur les temps de parcours. On observe une augmentation inférieure à 1% des temps de parcours, et uniquement sur les tronçons les plus chargés. Les tronçons moins chargés sont moins soumis aux variations des temps de parcours puisqu'ils ne sont pas congestionnés.

Les scénarios ne révèlent pas une forte sensibilité de l'occupation aux nouvelles variables proposées. Même pour les scénarios 1 et 3 qui étaient les plus concernés par les variations de parts modales, la différence de temps de parcours avec le modèle proposé est négligeable.

5.3 Synthèse

Le tableau ci-dessous synthétise les résultats obtenus lors de ces deux phases d'analyse du modèle étudié.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Variable testée	Coûts de circulation	Composante sociale	Temps de détour	Motivation psychologique
Parts modales sensibles à cette variable	Fortement	Moyennement	Fortement	Moyennement
Occupation sensible à cette variable	Faiblement	Très faiblement	Faiblement	Très faiblement
Projets que le modèle permet d'étudier efficacement	Péages (urbains ou autoroutiers)	Programmes de développement du covoiturage professionnel	Plateformes de mise en relation	Panneaux incitatifs
	Restriction sur vignettes Crit'Air	Développement d'une zone d'activité	Aires de covoiturage	Voies réservées

Figure 56 : Tableau récapitulatif de l'étude d'élasticité du modèle

On voit que le modèle proposé permet déjà d'étudier efficacement certains projets d'aménagements difficilement analysables avec l'ancien modèle de covoiturage. En particulier, ces projets peuvent facilement être analysés du point de vue du critère des parts modales. En revanche, pour ce qui est des conséquences de ces projets sur l'occupation du réseau, le modèle n'offre pas beaucoup d'informations.

Si l'on veut étudier en profondeur un projet qui joue sur la composante incitative ou sociale, il peut être intéressant de proposer des variables qui offrent une meilleure élasticité du modèle.

6 Limites et voies d'approfondissement

La partie précédente a montré que le modèle proposé offre l'avantage de réagir aux évolutions des données d'entrée, qu'elles soient naturelles (actualisation de données socioéconomiques) ou conséquences d'un projet d'aménagement.

Pour autant, le modèle connaît certaines limites sur lesquelles il serait intéressant de se pencher. Trois de ces limites sont ici abordées, mais la liste n'est pas exhaustive dans la mesure où un modèle n'est toujours qu'une représentation simplifiée de la réalité.

6.1 Données de calage

Contrairement aux modèles classiques où l'on dispose généralement de données de comptage, il existe peu de données de calage pour le covoiturage. Une grande partie des données de calage provient en effet des boucles électromagnétiques, et ces dernières ne peuvent pas faire de distinction entre les véhicules autosolistes et les véhicules covoitureurs.

Il a été nécessaire de faire des hypothèses afin d'obtenir une estimation des volumes de covoitureurs, et ces hypothèses ajoutent une part d'incertitude au modèle. On peut également s'intéresser aux enquêtes réalisées sur les pratiques de covoiturage, mais ces dernières sont généralement réalisées sur de faibles échantillons. Dans le cas de l'enquête AUDIAR utilisée dans ce rapport, on comptait par exemple seulement 336 personnes interrogées. De plus, toutes ces personnes utilisaient des aires de covoiturage ce qui signifie donc que l'échantillon n'est pas représentatif de l'ensemble des covoitureurs.

Il serait intéressant de recalibrer un modèle de covoiturage en utilisant des données plus précises. La plateforme BlaBlaCar possède par exemple une base de données très intéressante puisqu'en plus d'enregistrer les origine-destinations des personnes qui effectuent un trajet, la plateforme enregistre les requêtes ne donnant pas lieu à une réservation. Obtenir ce type de données permettrait d'avoir un modèle qui intègre avec précision la demande des usagers, y compris dans des zones où la demande est plus forte que l'offre, ce qui peut représenter un atout important pour les collectivités.

6.2 Evolutions des comportements

Le modèle a été calé sur des données de comptages 2013 et sur la connaissance du réseau rennais de 2015. Le réseau va être amené à évoluer, modifiant ainsi le comportement des individus de la métropole de Rennes. A ce changement localisé des comportements va probablement s'ajouter une mutation globale de nos villes et des pratiques de mobilité.

Les coefficients utilisés dans ce modèle reproduisent les comportements actuels des usagers du réseau, mais le modèle deviendra de moins en moins précis au fur et à mesure que les comportements évoluent.

L'actualisation des données d'entrée permettra d'adapter le modèle à un nouveau réseau ou à de nouvelles données socioéconomiques, mais un travail de recalage du modèle de demande sera nécessaire lorsque les comportements auront évolué. En particulier, la variable incitative proposée devrait être amenée à beaucoup évoluer dans la mesure où elle traduit une prise de conscience environnementale en développement.

Cette limite rejoint la précédente dans le sens où la bonne modélisation des comportements nécessite d'avoir une base de données conséquentes sur les pratiques des usagers du réseau.

6.3 Classification des modes

6.3.1 Choix modal

Dans ce modèle, la distinction entre covoiturage et autosolisme a été réalisée de manière basique, à savoir un mode conducteur et un mode passager. En réalité, un usager possédant un véhicule est confronté à 3 choix lorsqu'il veut voyager en véhicule particulier : conduire son véhicule seul (« autosolisme »), conduire un véhicule de covoiturage (« conducteur covoiturage ») ou bien monter dans le véhicule d'un conducteur (« passager covoiturage »).

Ces trois modes ont normalement une fonction d'utilité différente. On considérerait pourtant jusqu'ici dans le modèle que conduire son véhicule seul revenait à le partager, on parlait de mode VP Conducteur. Il serait plus précis de réaliser la distinction entre ces 3 modes, et rattacher les modes « conducteur covoiturage » et « passager covoiturage » au système de transport VP2+.

Cette classification est difficile à gérer car il faut s'assurer que chaque véhicule respecte les contraintes suivantes :

- Le nombre de « passager covoiturage » par véhicule ne dépasse pas 3.
- Il y a au moins un « conducteur covoiturage » par véhicule.

Ces deux contraintes sont désagrégées car elles sont propres à des véhicules. Il faudrait agréger cette contrainte, et par exemple imposer que le critère suivant soit respecté sur chaque relation de zones (origine destination) :

$$Nb \text{ « conducteur covoiturage »} < Nb \text{ « passager covoiturage »} < 3 * Nb \text{ « conducteur covoiturage »}$$

Le fait d'imposer le respect du critère sur chaque OD est beaucoup plus précis que de l'imposer à l'ensemble du réseau. En fonction de la manière dont cette procédure est intégrée au modèle, les temps de calculs peuvent vite devenir longs. Il peut alors devenir plus raisonnable d'imposer le respect de ce critère sur des relations de macrozones plutôt que sur des relations de zones.

6.3.2 Affectation

Une fois l'ensemble des critères respectés, l'étape de choix modal est terminée et on obtient les matrices de demande par mode. Il se pose alors la question de la manière dont doivent être réparties ces matrices de demande sur les véhicules.

Le modèle considérerait simplement qu'il y a un conducteur et un passager par véhicule, ce qui revient à faire une hypothèse d'un remplissage constant de 2 personnes par véhicule de covoiturage. Cela permettrait de déterminer le nombre de véhicules VP2+ sans avoir aucune information supplémentaire sur les conducteurs.

Avec l'approche consistant à distinguer les 3 modes il n'est plus nécessaire de faire des hypothèses sur le remplissage moyen d'un véhicule. Le nombre de véhicules VP2+ à affecter est en effet simplement le nombre de « conducteur covoiturage ».

Conclusion

La première phase de ce rapport a abouti à la proposition d'un modèle à quatre étapes qui intègre au mieux les problématiques de covoiturage. Ce travail s'est découpé en deux phases distinctes.

La première étape a été de proposer une approche qui permette d'intégrer au réseau des voies réservées aux véhicules à occupation multiple. Il s'agissait ici de jouer sur les données d'entrée, et plus précisément le réseau. La manière dont a été traité cet aménagement est propre au logiciel de modélisation VISUM et à ses spécificités.

Un modèle de demande a ensuite été proposé afin d'intégrer le nouvel aménagement créé d'une part, et de reproduire avec plus de précision les comportements des utilisateurs du réseau d'autre part. Cette étape s'inscrivait dans une logique plus large que la simple intégration des voies de covoiturage au modèle. Quatre variables ont été intégrées à l'étape de choix modal, et ce afin de rendre le modèle plus sensible aux projets de développement du covoiturage.

Le modèle proposé a ensuite subi un processus de calage, ce qui nécessitait de choisir un territoire d'étude qui offre suffisamment de données pour obtenir un modèle fiable. J'ai choisi pour cela de travailler sur l'agglomération rennaise où un modèle avait déjà été développé en 2015, et où des données de comptage 2013 étaient disponibles.

Une fois le modèle calé, une analyse de ce dernier a permis d'étudier son élasticité aux quatre variables créées. Cette étude a abouti à un tableau récapitulatif des types de projets que le modèle proposé permet d'étudier.

Il faut être vigilant sur le fait que, même si la phase théorique de construction du modèle a été réfléchie de manière générale, sa mise en œuvre pratique est spécifique à l'agglomération de Rennes. Les résultats qui découlent du modèle doivent donc être analysés avec recul, et il est du ressort du lecteur d'exploiter ce rapport à la lumière des limites évoquées en section 6.

Bibliographie

Agence d'urbanisme et de développement intercommunal de l'agglomération rennais. *Le covoiturage courte distance au départ des aires : pratiques des covoitureurs*. www.audiar.org, 2006.
https://www.audiar.org/sites/default/files/documents/etudes/web_1rapportfinal.pdf

JM Beauvais. *Dépenses supportées par les voyageurs selon les différents modes de transport*. 2013.
<https://www.fnaut.fr/images/docs/dossiers/db12ctsdpld.pdf>

P Bonnel. *Prévision de la demande de transport*. Economies et finances. 2002.
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00268919/document>

M Cline, C.S Sparks and K Eschbach. *Understanding Carpool Use by Hispanics in Texas*. Transportation Research Board, Volume 2118, 2009, Pages 39-46.
https://www.researchgate.net/publication/238197207_Understanding_Carpool_Use_by_Hispanics_in_Texas

Commissariat général du Plan. *Transports : choix des investissements et coûts des nuisances. Rapport du groupe de travail présidé par Marcel Boiteux, Rapporteur général Luc Baumstark*. La Documentation française, Paris, 2001.
<https://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/014000434.pdf>

G Correia and JM Viegas. *Carpooling and carpool clubs : Clarifying concepts and assessing value enhancement possibilities through a Stated preference web survey in Lisbon, Portugal*. Transportation Research Part A, Volume 45, 2011, Pages 81-90.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.457.1668&rep=rep1&type=pdf>

WL Eisele, HT Wilner and MJ Bolin. *Evaluating criteria for adapting HOV Lanes to HOT Lanes : development and application of HOT Start Software Tool*. Texas transportation Institute, 2006.
<https://pdfs.semanticscholar.org/e346/b7071e6fd28508d88a84a49fea6401ca1c4b.pdf>

W Fan, S Erdogan and TF Welch. *Assessing HOV to HOT Lane Conversion : Multi-scale Analysis in Maryland*. Conference : Transportation research Board, 2016.
<https://www.researchgate.net/publication/296484909>

O Feldman. *The GEH measure and quality of the highway assignment models*. Conference : European Transport Conference of Glasgow, 2012.
<https://www.researchgate.net/publication/263140653>

S Gupta and S Dharmeniya. *Base Year Travel Demand Model - Delhi*. School of Planning and Architecture of New Delhi, 2016.
https://www.toi.no/getfile.php/1348327/Publikasjoner/DELHI_%20Base%20Year%20Travel%20Demand%20Model.pdf

HJ Huang, M Bell, H Yang. *The models and economics of carpool*. The Annals of Regional Science, Volume 34, 2000, Pages 55-68.
https://www.researchgate.net/publication/24053447_The_models_and_economics_of_carpools

H Konishi and S Mun. *Carpooling and Congestion Pricing : HOV and HOT Lanes*. Regional Science and Urban Economics, Volume 40, 2010, Pages 173-186.
<http://fmwww.bc.edu/ec-p/wp719.pdf>

J Li, P Embry, SP Mattingly and KF Sadabadi. *Who Chooses to Carpool and Why ? Examination of Texas Carpoolers*. Transportation Research Board, Volume 2021, 2007, Pages 110-117.
<https://pdfs.semanticscholar.org/58f9/ef8ae2afe29d0589a3e5975588de05cd2226.pdf>

K Nurul Habib, H Zaman and Y Tian. *Modelling carpool mode choice with explicit consideration on willingness to consider carpool in the choice set formation*. 90th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington, 2011.
https://www.researchgate.net/publication/258133761_Modelling_carpool_mode_choice_with_explicit_consideration_of_willingness_to_consider_carpool_in_the_choice_set_formation

JP Orfeuil. *Les coûts de déplacements urbains : la durabilité du modèle en questions*. Revue d'économie financière, n° 86, 2006.
http://www.persee.fr/doc/ecofi_0987-3368_2006_num_86_5_4198

Références non explicitement citées :

C Bhat and R Sardesai. *The Impact of Stop-Making and Travel Time Reliability on Commute Mode Choice*. Transportation Research Part B methodological, Volume 49, 2006, Pages 709-730.
<https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/23849>

F Canitez, M Deveci. *An Integration Model for Car Sharing and Public Transport : Case of Istanbul*. Conference : Transit 2017 Istanbul Transport Congress and Exhibition, 2017.
https://www.researchgate.net/publication/324530842_An_Integration_Model_for_Car_Sharing_and_Public_Transport_Case_of_Istanbul

M Dupre. *Représentation sociale du covoiturage : des contraintes perçues au faire-ensemble*. Cahiers Scientifiques du Transport, Volume 66, 2014, Pages 97-113.
<http://mickaeldupre.com/wp-content/uploads/2016/06/repr%C3%A9sentation-sociale-du-covoiturage-des-contraintes-per%C3%A7ues-au-faire-ensemble.pdf>

NT Fellows, D Pitfield. *An Economic and operational Evaluation of urban car-sharing*. Transportation Research Part D Transport and Environment, Volume 5, 2000, Pages 1-10.
https://www.researchgate.net/publication/223222948_An_economic_and_operational_evaluation_of_urban_car-sharing

X Liu, G Zhang and YJ Wu. *Measuring the Quality of Service for high Occupancy Toll Lanes Operations*. Procedia – Social and behavioral Sciences, Volume 16, 2011, Pages 15-25.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042811009712>

EJ Miller, MJ Roorda and JA Carrasco. *A tour-based model of travel mode choice*. Transportation, Volume 32, 2005, Pages 399-422.
<https://www.researchgate.net/publication/225966957>

I Stamos, G Kitis, S basbas and I Tzevelekis. *Evaluation of a High Occupancy Vehicle Lane in Central Business District Thessaloniki*. Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 48, 2012, Pages 1088-1096.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812028212>

Annexes

105	⊗	Groupe Groupe Fonction Utilité	106 - 118			⚙ Activer tous
106	⊗	Calculer matrice d'indicateurs TI	VP2 Voiture 2 passagers ou plus			⚙ Désactiver tous
107	⊗	Calculer matrice d'indicateurs TI	VP2 Voiture 2 passagers ou plus			Aperçu
108	⊗	Combinaison de matrices et de vecteur	Matrix(1000):=(0.3*IF(Matrix(193)<100,Matrix(193),0.5)+IF(Matrix(527)<50,Matrix(527),0))/2			⚙ Développer gros
109	⊗	Combinaison de matrices et de vecteur	Matrix(1001):=Min (6 + 180/SQRT(FROM[DENSIE_POP_2015]+TO[DENSIE_POP_2015]) , 15)			
110	⊗	Combinaison de matrices et de vecteur	Matrix(1002):=MIN(0.7*FROM[POP_2015],FROM[EMPLOIS_2015])/3570			
111	⊗	Modifier attribut	Tronçons - ValAdd1			
112	⊗	Modifier attribut	Tronçons - ValAdd2			
113	⊗	Calculer matrice d'indicateurs TI	VP2 Voiture 2 passagers ou plus			
114	⊗	Combinaison de matrices et de vecteur	Matrix(1003):=IF(Matrix(1003)<50000,Matrix(1003),0)			
115	⊗	Combinaison de matrices et de vecteur	Matrix(1004):=IF(Matrix(1004)<1000,Matrix(1004),0)			
116	⊗	Calculer matrice d'indicateurs TI	VP2 Voiture 2 passagers ou plus			
117	⊗	Combinaison de matrices et de vecteur	Matrix(1005):=Matrix(1003)/2000 + Matrix(1004) + 1			
118	⊗	Combinaison de matrices et de vecteur	Matrix(1500):=0.06*min(Matrix(112),Matrix(114)) + 0.12*Matrix(122) - 0.4*Ln(Matrix(130)) - 0.38*Matrix(1000) + 0.08*Matrix(1001) - 0.0005*Matrix(51) - 1*Matrix(1005) + 1.8			

Éditer la formule pour la matrice

Définissez une ou plusieurs matrices résultantes et utilisez le caractère d'assignation := pour les séparer des instructions de calcul.

```
Matrix(1500):=0.06*min(Matrix(112),Matrix(114))
+ 0.12*Matrix(122)
- 0.4*Ln(Matrix(130)) - 0.38*Matrix(1000) + 0.08*Matrix(1001)
- 0.0005*Matrix(51) - 1*Matrix(1005) + 1.8
```

Figure 57 : Séquence de procédure proposée pour la création des nouvelles variables