CONNAISSANCE DU TERRITOIRE
RÉGION PROVENCE-ALPES-CÔTE-D'AZUR

RÉGION SUD PROVENCE ALPES CÔTE D'AZUR

Les Fabriques de la Connaissance

MODÉLISATION ET ANALYSE SPATIALES DES PRATIQUES DE MOBILITÉ PARTAGÉE ET DE TRANSPORT FLEXIBLE EN RÉGION

Didier Josselin, Alexis Marcon, Frédéric Audard, Samuel Carpentier-Postel

UMR ESPACE 7300

31 décembre 2019

Table des matières

Introduction....5
I. Les transports flexibles et partagés en PACA....8
I.A. Contexte et définition....8
I.B. Véhicule autonome....8
I.B.1. Définition....8
I.B.2. Niveau d'automatisation des véhicules autonomes....9
I.B.3. Recensement des expérimentations de véhicule autonome....10
En France....10
En Provence-Alpes-Côte-D'azur....11
I.B.4. Acceptation du véhicule autonome....13
I.B.5. La problématique des données massives....13
I.C. Transport à la demande (TAD)....14
I.C.1. Définition....14
I.C.2. Les transports à la demande en PACA....15
I.D. Véhicule de tourisme avec chauffeur (VTC)....17
I.D.1. Définition....17
I.D.2. Différence entre VTC « Chauffeur Privé » / VTC type « Uber »....17
I.D.3. Statistiques d'utilisation d'UBER et ses concurrents en France....17
I.D.4. VTC en PACA....18
I.D.5. Perspectives de développement....19
I.E. Autopartage....20
I.E.1. Définition....20
I.E.2. Systèmes d'autopartage....20
I.E.3. Acteurs de l'autopartage....21
En France....21
En PACA....22
I.F. Covoiturage....23
I.F.1. Définition....23
I.F.2. Le covoiturage appuyé par la Loi d'Orientation des Mobilités....24

I.F.3. Aires de covoiturage en PACA....24
I.G. Zoom sur deux sites en PACA (covoiturage)....25
I.G.1. Nice/Alpes maritimes : migrations alternantes en covoiturage estimées *via* une enquête ménage....25
I.G.2. Potentiel de covoiturage dans 5 EPCI en zone rurale en PACA....28
I.H. Synthèse - Typologie comparative des transports flexibles et partagés et de leur usage....28
II. Méthodologie et approche prospective des mobilités et des transports partagés et flexibles en PACA....30
II.A. Définition....30
II.B. Recensement des données disponibles pour réaliser les estimations des mobilités....32
II.B.1. Données d'enquêtes quantitatives vs qualitatives, questionnaires vs entretiens....32
II.B.2. Les migrations alternantes issues du Recensement Général de la Population (INSEE)....33
II.B.3. Comptages routiers et données de trafic....34
II.B.4. Les Enquêtes Nationales sur les Transports et les Déplacements (ENTD)....34
II.B.5. Enquêtes Ménages Déplacements (EMD)....34
II.B.6. Traces mobiles et réseaux sociaux....36
II.B.7. Observation de services....36
II.B.8. Tableau comparatif des principales données pour analyser les flux....37
II.C. Modèles pertinents en géographie pour l'estimation spatialisée des flux personnes....38
II.C.1. Modèles gravitaires....38
Modèles basés sur les interactions par couple d'entités....39
Modèle intégrant les occasions interposées....39
II.C.2. Modèle à 4 étapes....40
II.C.3. Les modèles d'interactions transport-urbanisme (LUTI)....41
II.C.4. Modèles multi-agents....41
II.C.5. Tableau comparatif des principaux modèles de flux....42
II.D. Méthodes et indicateurs robustes prospectifs....43
II.D.1. Analyse multicritère robuste....43
Approche robuste par rang, méthodes « objectives »....43
Méthodes participatives « subjectives »....44
Tableau comparatif des analyses multi-critères....44

II.D.2. Indicateurs d'incertitude et de sensibilité des cartes et des résultats....45
Méta information, cartographique duale....45
Analyse de sensibilité....46
II.E. Prospective en PACA....47
II.E.1. Les transports flexibles et partagés dans les scénarios de la Mission Prospective PACA..47
Un scénario catastrophiste....47
Deux scénarios ancrés dans l'économie....48
Deux scénarios orientés vers l'environnement....49
II.E.2. Analyse de flux intercommunaux en région Provence Alpes Côte d'Azur....50
Analyse cartographique et exploratoire....50
Modèles utilisés : Newton et Wilson généralisés....51
Comparaison des résultats....52
Usage des modèles gravitaires pour la Région Provence Alpes Côte d'Azur....55
II.E.3. Exemple d'analyse de sensibilité du modèle d'estimation des flux domicile-travail....55
Sensibilité du modèle aux variations des paramètres de la fonction C_{ij} de transformation de la distancedu modèle de Wilson....56
Sensibilité du modèle aux variations des élasticités des critères explicatifs des flux dans un modèle gravitaire généralisé de Newton....56
Conclusion....59
Bibliographie....60
Ouvrages, thèses, articles et rapports publiés....60
Webographie....63
Annexes....64

Introduction

En France métropolitaine, en 2018 (ADEME, 2018), on estime que les transports contribuent à environ 40 % dans l'émission du dioxyde de carbone atmosphérique, 70 % pour les oxydes d'azote, 50 % pour le monoxyde de carbone et 15 % pour les particules. De plus, le transport consomme à lui seul un tiers de l'énergie produite. C'est dire son impact dans la lutte contre le réchauffement climatique (Houghton, 2011) est à considérer avec acuité : il constitue un levier essentiel pour réduire les émissions de polluants atmosphériques.

Dans l'objectif de neutralité carbone fixé par l'État, on vise une réduction de 40 % des gaz à effet de serre dès 2030, puis 75 % à l'horizon 2075. Dans ce contexte, la région PACA a déjà réduit de 22 % ses émissions entre 2000 et 2017, pour une baisse moyenne de 30 % au niveau de la France sur la même période. Exceptés les gaz à effet de serre, comme l'ozone, qui a augmenté de 10 % entre 2007 et 2017 et le dioxyde de carbone (plus 6 % depuis 2015), tous les autres polluants atmosphériques sont en baisse depuis 10 ans (Air-PACA, 2017), contribuant à une sensible amélioration de la qualité de l'air : -45 % des particules, -20 % du dioxyde d'azote, -75 % du dioxyde de soufre. La région Provence Alpes Côte d'Azur développe par ailleurs une politique ambitieuse d'augmentation de l'usage du vélo (objectif de 9 % de pénétration en 2024). Comme on le voit, la Région est soucieuse de la qualité de l'air respiré dans la région et a mis en place un programme ambitieux d'études prospectives pour envisager le territoire régional de demain.

Dans l'étude de l'ADEME de 2018, on constate que plus de 50 % des personnes interrogées lors d'une enquête concernant la perception du réchauffement climatique considèrent qu'un changement de vie est nécessaire, alors que la seconde moitié est défaitiste ou indique comme solution possible le rôle de l'État et l'impact des progrès techniques. Même si l'on sait qu'il peut exister d'assez fortes divergences entre les déclarations d'intention et les pratiques avérées vis-à-vis de tout service, dont les transports (préférences déclarées vs préférences révélées), on peut tout de même noter que la majorité des gens ont saisi le rôle des transports et de leurs émissions dans le réchauffement climatique et, en conséquence, l'impérieuse nécessité de protéger la planète par le biais d'une réduction significative des émissions liées au transport pour les générations futures.

Face à ces enjeux, la région PACA, comme la plupart des régions françaises, se doit de réduire drastiquement ses émissions de polluants atmosphériques liés aux transports routiers. En complément du développement des transports publics type train, tramway, car et bus, la lutte contre l'usage et la dépendance à l'automobile est l'une des voies possibles. Au-delà de mesures coercitives pour réduire la circulation en fonction des pics de pollution et une politique volontariste de sensibilisation de la population pour changer le rapport à l'automobile personnelle, on peut travailler sur le changement de pratiques en lien avec la progression des modes de transport alternatifs, dont sont partie prenante les transports flexibles et partagés.

Dans notre étude, l'objectif environnemental est structurant, puisqu'il éclaire de quelle façon nous allons analyser différents modes de transport de ce domaine, à savoir les véhicules autonomes, les transports à la demande, les véhicules de tourisme avec chauffeur, l'autopartage et le covoiturage. En effet, nous chercherons, à travers leur efficacité en termes de regroupement et de réduction des kilomètres parcourus, à mettre en évidence leur capacité à réduire les émissions et ainsi à participer à la lutte contre le réchauffement climatique, tout en permettant une desserte optimisée et équitable des territoires. A ce titre, hormis l'analyse particulière des véhicules autonomes, largement

tournés vers les nouvelles technologies connectées et l'intelligence artificielle, des thèmes abordés sont davantage en phase avec les scénarios « Bas carbone » et « Proximité » élaborés par la mission prospective de la région Provence Alpes Côte d'Azur.

En effet, la mission Prospective a échafaudé des scénarios prospectifs aux horizons 2030 et 2050, sur la base de différentes expertises, dont la fabrique de connaissances est une brique dans laquelle s'insère ce travail. Nous avons, dans ce contexte partenarial :

- participé à plusieurs réunions de discussion des scénarios, à Nice (27 juin 2019) et à Marseille (28 mai 2019) ;
- pour la zone rhodanienne, contribué à l'organisation, le 20 juin 2019, de la réunion de concertation prospective à l'Université d'Avignon, avec tous les partenaires de transports locaux, les bureaux d'études associées et la Région ;
- participé aux réunions de travail synthétique, les 23-24 septembre et le 28 novembre 2019 à Marseille.

Plusieurs restitutions des travaux des étudiants ont eu lieu en 2019 dans le cadre de ce projet :

- une à Avignon en seconde année de Master de géographie (janvier 2019),
- une à Marseille pour les travaux des étudiants de licence du Cursus Master Ingénierie (24 mai 2019),
- une autre avait été planifiée à Digne pour la restitution des travaux des L3 de géomatique (8 mars 2019).

Les scénarios élaborés lors des journées de concertation prospective ont constitué pour nous un fil rouge directeur intéressant et instructif tout au long de l'année.

C'est dans ce cadre partenarial et académique que notre étude a été réalisée. Elle revêt de ce fait un triple objectif, pédagogique, scientifique et opérationnelle :

- sensibiliser et former des étudiants aux problématiques des transports innovants et respectueux de l'environnement, et à la recherche-action territoriale, dans le cadre d'une prestation-convention de recherche,
- contribuer à l'avancée des connaissances méthodologiques et opérationnelles des chercheurs du domaine,
- participer à la réflexion territoriale animée par la mission prospective de PACA, dans le cadre des Fabriques de la Connaissance et, plus globalement du Schéma Directeur d'Aménagement, de Développement Durable et d'Egalité des Territoires de la région.

Ce rapport, rédigé par les auteurs identifiés ci-dessus, est ainsi constitué de différents travaux complémentaires :

- la définition, la modélisation et l'analyse de cinq modes de transport flexible et partagé : véhicule autonome, transport à la demande, véhicule de tourisme avec chauffeur, autopartage et covoiturage (travail encadré des étudiants de licence seconde et troisième année de cursus Master ingénierie de géographie d'Avignon, durée d'activité de deux semaines étalées sur le premier semestre 2019) [§ I];

- l'étude de l'implantation potentielle du covoiturage sur cinq sites ruraux (travail encadré des étudiants de licence de géomatique de l'IUT de Digne-les-Bains, concentré sur trois jours en mars 2019) [§ I.G.2] ;
- la construction d'indicateurs prospectifs robustes pour l'anticipation des transports (travail encadré des étudiants de Master 2 de géomatique et conduite de projet de l'université d'Avignon, durée d'une semaine en janvier 2019) [§ Annexes en complément des § II.A & § II.D] ;
- les recherches encadrées de deux étudiants de Master de géographie (Saafa Amarouch et Jean-Baptiste Durand, en CMI, durée d'une semaine étalée sur le second semestre de l'année universitaire 2019) sur la modélisation des flux domicile-travail par un modèle gravitaire en région PACA [§ II.C & § II.E] ; ces résultats ont produit en 2019 un poster et un résumé long dans une conférence nationale sélective à comité de lecture ;
- les résultats du stage de Louisette Garcin (L3 d'Aix en Provence) sur l'enquête ménages déplacements de Nice Alpes-Maritimes de 2009 concernant le covoiturage (comparaison des observations de flux et des estimations du modèle régional) [§ I.G.1] ;
- les cartes issues du stage de Maxime Bodet sur le recensement des transports la demande en région PACA [§ I.C] ;
- le recensement des expériences de véhicules autonomes, résultats du stage de Tom Roussat à Avignon [§ I.B];
- le travail de synthèse et d'intégration réalisé par Didier Josselin, accompagné par Alexis Marcon, ancien étudiant de géographie d'Avignon et aujourd'hui auto-entrepreneur en géomatique, qui a approfondi plusieurs aspects des transports flexibles et partagés.

On trouvera également dans ce rapport plusieurs livrables identifiés dans la réponse à l'appel à propositions :

- *[Livrable 1, § I & Posters en Annexes]* une typologie comparative des transports flexibles et partagés, avec production de 5 posters,
- *[Livrable2, § II.B et Annexes]* un recensement des données disponibles pour réaliser des estimations prospectives de mobilité,
- [Livrable 3, § II.C et Annexes] une liste de modèles pertinents en géographie pour l'estimation spécialisée des flux de personnes, avec une modélisation des flux par modèle gravitaire (un article et un poster),
- [Livrable 4, § II.D] un ensemble de propositions de méthodes et d'indicateurs robustes d'incertitude et de sensibilité des cartes et les résultats prospectifs,
- [Livrable 5, § I.G] deux focus sur le covoiturage sur deux types de sites en région, urbanisé [Livrable 5.a, § I.G.1] et rural [Livrable 5b, § I.G.2].

Le présent rapport est divisé en deux grandes parties. Dans une première partie, nous réalisons un état de l'art des cinq transports partagés et flexibles étudiés, en leur associant plusieurs études plus spécifiques réalisées par des stagiaires ou des cohortes d'étudiants. Dans une seconde partie, nous abordons la prospective à proprement parler, en regard des scénarios proposés, en présentant les données et les méthodes d'estimation des mobilités et en proposant une application ciblée d'une analyse des flux domicile-travail en PACA avec une étude de sensibilité du modèle aux paramètres.

I. Les transports flexibles et partagés en PACA

I.A. Contexte et définition

Les transports flexibles et partagés constituent une alternative au transport régulier et fixe dans le temps et dans l'espace. Ils concernent le transport terrestre de personnes. Ils sont flexibles car ils peuvent intervenir sur des lieux ou des tracés non prédéfinis, dans la mesure du possible. Sont ainsi exclus de ces modes les transports publics et en commun, telles que les bus, les tramways, les métros les trains, etc., même s'ils contribuent en première ligne à l'économie de distances parcourues face aux véhicules personnels. Ces transports lourds ont en effet une caractéristique commune avec les transports flexibles et partagés : ils visent à regrouper les passagers dans les mêmes véhicules, luttant ainsi contre la dépendance automobile et participant à la baisse des émissions de polluants atmosphériques. Du même coup, les taxis sont exclus, car, par défaut, la fonction de calcul appliquée par la préfecture est basée sur les distances parcourues et les conditions de service, n'incitant aucunement les conducteurs à regrouper les passagers, selon cette fonction d'utilité.

Les différents modes que nous avons étudiés sont par ailleurs plus ou moins enclins à regrouper les passagers, comme nous le verrons dans le détail de leur fonctionnement. Ainsi, le "et" séparant flexible et partagé peut être d'une certaine façon considérée comme un "ou", et largement discuté selon les transports en question et leur mode de fonctionnement (optimisé, favorisant le regroupement, réduisant les distances parcourues...).

Ce qui réunit ces modes, par ailleurs, c'est :

- leur pénétration actuelle ou future sur le marché de la mobilité, en concurrence ou en complémentarité des offres existantes,
- l'innovation qu'ils amènent en termes d'offre de service,
- la réponse qu'ils apportent pour les besoins de transports à la fois proches de la demande et ubiquistes, souples et fiables, collectifs et individualisés,
- leur emprise spatiale, dans les interstices urbains et ruraux, comme en termes de localisation, d'horaires ou de clientèle niche.

De manière sous-jacente, l'hypothèse que nous faisons dans ce travail est que ce type de mode va largement se développer dans les années à venir et qu'il constitue de fait une perspective intéressante et crédible en termes d'offre de transport à court et moyen terme. Il convient toutefois de bien étudier ces nouveaux modes en les insérant dans les offres et les pratiques actuelles de mobilité. Dans le domaine assez large des transports flexibles et partagés, nous proposons dans ce rapport de nous focaliser sur cinq d'entre eux : les véhicules autonomes, les transports à la demande, les véhicules de tourisme avec chauffeur, les services d'auto-partage et le covoiturage.

I.B. Véhicule autonome

I.B.1. Définition

Un véhicule est dit "autonome" lorsque certaines commandes actives sont confiées à une intelligence embarquée. Un véhicule connecté (ou coopératif) permet d'échanger des informations avec les infrastructures, les autres véhicules, ainsi que divers services de mobilité environnants. Cet ensemble permet à l'automobile de se déplacer, au meilleur de la technologie, sans aucune intervention du conducteur. Tout ceci est permis par une intelligence artificielle qui a enregistré

l'ensemble des situations de circulation possibles, ainsi que la communication de l'ensemble des composantes présentes sur le réseau.

Toutefois, le passage de l'utopie du véhicule autonome à un réel potentiel de développement et de mise en service a nécessité la création d'un référentiel international commun concernant les différents niveaux d'automatisation de ces derniers. C'est pour cette raison que le S*ociety of Automotive Enginners* (Organisation internationale traitant de l'ingénierie nouvelle des véhicules), aujourd'hui renommé *SAE International*, a mis en place une classification - non-officielle - de ces niveaux d'automatisation, et surtout des possibilités de reprise de contrôle de l'humain sur le véhicule. En l'état, la loi française sur les véhicules autonomes est en gestation (Andreu, 2018).

I.B.2. Niveau d'automatisation des véhicules autonomes

Cette classification est divisée en six niveaux d'automatisation (Fig. 1), commençant par de simples aides à la conduite pour terminer à l'automatisation totale du véhicule.

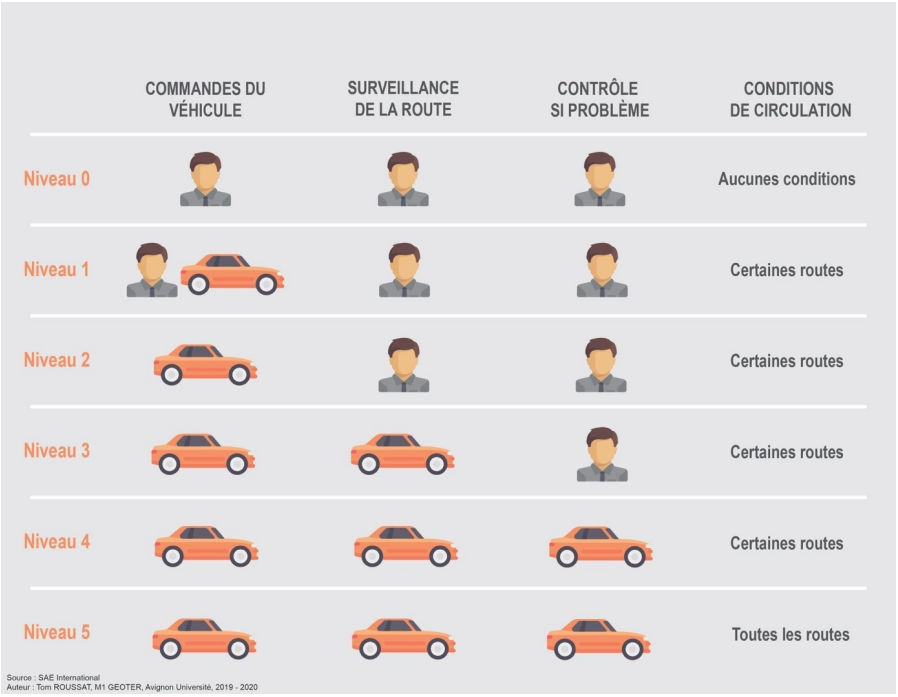

Figure 1. 6 niveaux d'automatisation selon SAE International

- ***Niveau 0** : Pas d'autonomie, aucune assistance*

Ce niveau expose les caractéristiques d'un véhicule classique dans lequel l'être humain a le contrôle sur tout. L'ensemble de la conduite est réalisé par le conducteur, sans qu'il ne bénéficie d'aucune assistance.

- ***Niveau 1** : Assistance à la conduite (eyes on – hands on)*

Ce niveau désigne l'ensemble des aides à la conduite pouvant se déclencher en situation d'urgence (ESP, ABS), signaler un danger (détection d'angle mort), ou les options de confort à la conduite (régulateur de vitesse). La présence du conducteur est obligatoire et il conserve l'entièreté du contrôle sur le véhicule, mais bénéficie d'outils d'assistance.

- ***Niveau 2*** *: Automatisation partielle (eyes on – hands off)*

Pour ce niveau, le conducteur peut partiellement déléguer la conduite. L'intelligence embarquée du véhicule peut combiner le contrôle longitudinal et latéral du véhicule, tels que le régulateur de vitesse adaptatif et le maintien sur voie. Le conducteur se doit de surveiller l'environnement du véhicule pour pouvoir reprendre le contrôle à tout moment.

- ***Niveau 3*** *: Autonomie conditionnelle (eyes off – hands off)*

Le niveau 3 fait office de transition, puisque c'est à partir d'ici que l'intelligence artificielle est assez puissante pour être responsable de la surveillance de la route, ainsi que des potentiels obstacles, et d'agir en conséquence. Dernière étape avant une automatisation quasi-totale (niveaux 4 et 5), le conducteur est au contrôle en cas de problème. Le véhicule est autonome dans certains cas de circulation, comme sur autoroute. Audi revendique sa dernière A8 à ce niveau d'automatisation.

- ***Niveau 4*** *: Autonomie élevée (eyes off – hands off – mind off)*

A ce niveau 4, l'intelligence embarquée couvre l'ensemble des caractéristiques de l'infographie ci-dessus, permettant au conducteur une quasi-passivité. L'autonomie n'est toutefois assurée que dans certaines conditions prédéfinies : un seul type d'infrastructure routière ou lors de bonnes conditions climatiques. Le conducteur se doit de reprendre les commandes en dehors de ces conditions. Mais au contraire du niveau précédent, si le véhicule ne subit pas de reprise du contrôle par le conducteur, il doit pouvoir se garer seul à un endroit permettant de stationner.

- ***Niveau 5*** *: Autonomie élevée complète (driveless)*

Dernier niveau de la classification, le niveau 5 représente l'automatisation totale des véhicules. L'intervention humaine n'est plus requise, qu'importe la situation. Le véhicule est capable de s'adapter à toutes les conditions et est totalement autonome. La conduite assurée par l'humain devient théoriquement un plaisir.

I.B.3. Recensement des expérimentations de véhicule autonome

A notre connaissance, aucun exercice de recensement complet et international des expérimentations de véhicule autonome n'a été réalisé, et l'engouement venant du domaine public ou privé dans ce secteur de R&D rend la tâche d'autant plus complexe.

Au cours de cette phase, un travail de collecte, au sein d'un même document, de l'ensemble le plus exhaustif possible des expérimentations de véhicule autonome en France, et de fait, en PACA également, a été réalisé par Tom Roussat, étudiant de l'Université d'Avignon.

En France

Depuis le début de la décennie, la France a accueilli sur son territoire environ 70 expérimentations de véhicule autonome. Actuellement, le document de collecte de données (cf. Annexes) comptabilise un total de 66 expérimentations de véhicule autonome. 64 sont clairement identifiées sur le territoire français métropolitain. Les deux autres sont identifiées comme étant d'origine française, mais n'ont pas de localisations précises. Le fichier est composé de vingt champs, qui permettent notamment de préciser la nature et les acteurs de chaque test.

Selon le Ministère des transports, plus de 200 000 km ont été parcourus en véhicules autonomes depuis le début des expérimentations en France. L'objectif fixé par le Ministère est d'atteindre « un

million de kilomètres parcourus en expérimentation (…) d'ici 2022, dans une grande diversité de cas d'usages »[1]. Ce dernier point semble être un point sur lequel s'axe tout particulièrement la France. En effet, les navettes concentrent quasiment 70% des essais sur le territoire National.

Les expérimentations de véhicules individuels autonomes deviennent un enjeu majeur pour les autorités publiques. Par exemple, le projet "*Rouen Normandy Autonomous Lab*" a été rendu possible depuis 2018, où les acteurs majeurs testent quatre voitures individuelles autonomes. Le montant de 11 millions d'euros du projet a fait l'objet d'un financement public/privé (40 / 60%).

En 2019, l'Etat a retenu 16 expérimentations nécessitant un budget de 200 millions d'euros. Le financement provient de trois sources différentes. Les consortiums privés (120 millions d'euros), l'État (42 millions d'euros) et enfin les collectivités territoriales (38 millions d'euros).

Si l'État français souhaite investir dans la mobilité innovante, afin de se positionner comme l'un des piliers européens, voire mondiaux en la matière, les 200 000 km d'expérimentation français sont bien peu par rapport au pays leader mondial, les Etats-Unis, qui comptabilise uniquement avec Waymo, filiale de Google spécialisée en véhicule autonome, quelques 16 millions de kilomètres parcourus.

En Provence-Alpes-Côte-D'azur

Par souci de fiabilité de l'information, nous avons préféré exclure des statistiques les deux expérimentations françaises dont nous n'avions par les localisations exactes.

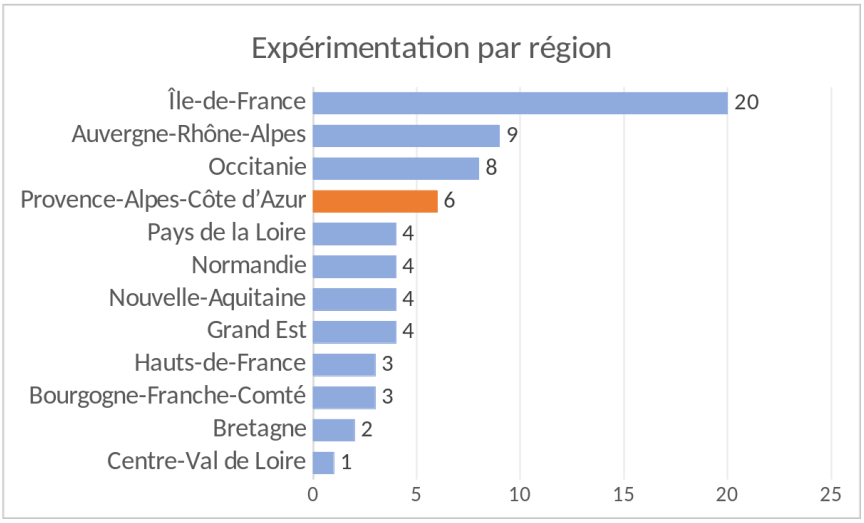

Figure 2. Expérimentations de véhicules autonomes recensées en France (Roussat, 2019)

Comme on peut le constater sur la figure 2, la région PACA arrive 4ème (sur 12) dans le classement des régions françaises ayant accueilli des expérimentations de véhicule autonome, ce qui en fait un des territoires les plus actifs en termes d'expérimentations. Si l'on ignore le cas de l'Île-de-France, PACA est d'autant plus compétitive par rapport à ses deux régions voisines, l'Occitanie et l'Auvergne-Rhône-Alpes.

1 Ministère de la Transition écologique et solidaire, Onglet « Les véhicules autonomes », 13 juin 2019 https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/vehicules-autonomes

On relèvera d'après le recensement réalisé par nos soins qu'il semble que la première expérimentation de véhicule autonome en PACA se soit déroulée en 2004 à Antibes, à une époque où la course à l'innovation pour le véhicule autonome n'était pas dans les objectifs principaux des secteurs publics et privés. L'unique expérimentation antérieure à celle d'Antibes a été réalisée en 1997 en Île-de-France, ce qui place la région PACA comme l'une des régions les plus avant-gardistes sur la question du véhicule autonome.

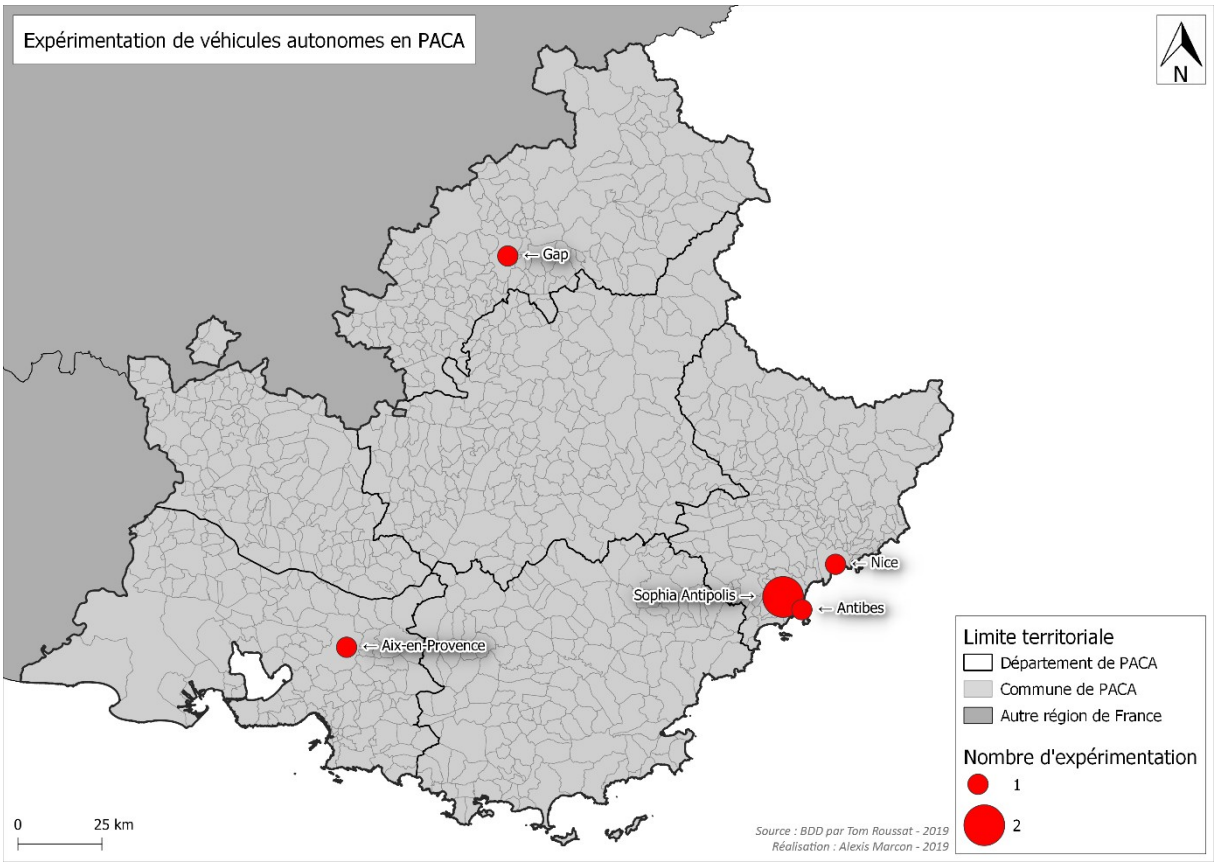

Figure 3. localisation des expérimentations de véhicules autonomes en PACA

Chronologiquement(Fig. 3), nous avons identifié le premier test de véhicule autonome en PACA dans le département des Alpes-Maritimes, à Antibes, en 2004. Piloté par la compagnie générale française des transports et des entreprises (CGFTE), nous supposons que le véhicule avait une autonomie de niveau 3.

Vient ensuite une première expérimentation à Sophia Antipolis en 2016, dans le cadre du projet CityMobil2 et piloté par la Communauté d'Agglomération de Sophia Antipolis (CASA). Quatre navettes EasyMile de niveau 4 y ont été utilisées.

Toujours dans le département des Alpes-Maritimes, c'est Nice qui a accueilli une présentation de véhicule autonome en 2018, piloté par la Ville de Nice et en partenariat avec VuLog et AKKA. Le véhicule était un modèle de niveau 3 développé par la société privé AKKA.

En 2019, on compte deux expérimentations sur le territoire de PACA, à Sophia Antipolis de nouveau et à Gap dans les Hautes-Alpes. Une nouvelle fois, c'est la CASA qui était pilote du projet pour le cas de Sophia Antipolis avec deux navettes de niveau 4. Pour Gap, c'est la Communauté d'Agglomération Gap-Tallard-Durance avec une navette Navya de niveau 4.

Enfin, nous avons noté une expérimentation prévue dans les Bouches-du-Rhône, à Aix-en-Provence, pour l'année 2020, menée par la Métropole Aix-Marseille Provence, qui utilisera une navette Milla de niveau 3.

I.B.4. Acceptation du véhicule autonome

En France, plusieurs études ont été menées afin de quantifier l'acceptabilité du véhicule autonome par les populations. Parmi elles, en 2018, il a été réalisé une enquête « Débat Citoyen » intitulée « Demain des véhicules sans conducteurs dans nos vies, débattons-en ensemble », recensant les avis de 361 personnes.

Les grandes tendances qui ressortent de celle-ci sont que 52% des interrogés veulent être assurés de l'absence de dysfonctionnement avant leur utilisation d'un véhicule autonome, mais n'y sont pas réfractaires, tandis que 3% refusent catégoriquement l'utilisation. Globalement, 66% des enquêtés voient la généralisation du véhicule autonome aux alentours de 2030 – 2035. De plus, les résultats de cette enquête montrent que 43% des questionnés accepteraient de se déplacer au sein d'un véhicule autonome dans un futur proche.

Enfin, deux questions sur le rôle de l'État et des autorités publiques locales ont été posées. Les réponses sur leurs rôles qui reviennent le plus souvent sont les suivantes :

- Le rôle de l'État doit être de :
  - Placer l'équité entre les territoires et les populations au centre de cette révolution technologique (60%)
  - Imposer d'importantes contraintes environnementales (45%)
  - Encadrer et sécuriser l'usage des données personnelles (36%)
- Le rôle des autorités locales est de :
  - Prévoir les évolutions et les changements liés à la montée en qualification des emplois (56%)
  - Favoriser l'adaptation des infrastructures routières (49%)
  - Informer objectivement les populations sur les enjeux liés au véhicule autonome (49%)

I.B.5. La problématique des données massives

La société américaine Tuxera (technologie de stockage et network) a révélé un problème récurrent dans les expérimentations des véhicules autonomes : le traitement et le stockage de la donnée. En mettant en relation les données de Waymo et du Flash Memory Summit 2017, on apprend qu'un véhicule autonome générerait entre 11 et 154 To de données par jour d'utilisation et a un besoin d'une bande passante comprise entre 3 et 40 Gb/s, pour que l'ensemble des capteurs fonctionnent correctement. Le véhicule autonome devient ainsi un défi en termes d'infrastructure réseau et de datacenter. Une flotte de seulement 200 véhicules autonomes Waymo seraient les auteurs d'environ 30 Po (30 000 To) de données par jour. Une démocratisation de ce type de véhicule entraîne donc forcément des questions sur l'infrastructure de réseaux de communication, sur la capacité d'accueil de la donnée sur le territoire et sur l'impact carbone d'un tel développement.

Autre bémol au niveau environnemental : seules les navettes sans conducteur sont potentiellement en capacité de regrouper les passagers et de réduire l'empreinte carbone. Les véhicules personnels autonomes ont les mêmes avantages et inconvénients que l'automobile personnelle actuelle.

I.C. Transport à la demande (TAD)

I.C.1. Définition

Apparu en France dans les années 70 - 80, le service de transport à la demande s'est vu forger une image de service de niche réservé au monde rural, ou réservé aux territoires enclavés dont les services plus communs de transports publics n'étaient pas disponibles, et où l'accessibilité était de fait réduite. Puis les services urbains se sont progressivement implantés (Castex, 2007).

Pour des travaux complets sur les transports à la demande, voir les thèses (co-)encadrées par Didier Josselin, sur les aspects géographiques (Banos, 2001 ; Thévenin, 2002, Castex, 2007, Prud'homme, 2014), sur les aspects modélisations et simulations informatique (Bolot, 2006 ; Garaix, 2007 ; Chevrier, 2008 ; Lammoglia, 2013).

La définition moderne du TAD date des années 1990 et le définit comme un mode de transport flexible associant les avantages du bus et du véhicule privé, dans le sens où il est plus économe que la mise en place de lignes de bus classiques et plus flexible et adaptable pour sa clientèle (donc proche d'un transport en véhicule privé). Successivement, les lois d'orientation des transports intérieurs (LOTI, 1982), puis la loi solidarité et renouvellement urbain (SRU 2000), intègrent les transports à la demande dans leur périmètre. Après une définition technique basée sur un nombre limitée de places offertes dans un véhicule de transport en commun pour un service sujet à une classique délégation de service (induisant un appel d'offre préalable concurrentiel, une obligation service, une exclusivité territoriale), le transport à la demande devient un transport collectif personnalisé, à l'image des services de type « Dial A Ride » qui se développent aux États-Unis d'Amérique, de façon totalement privée. Il reste cependant en France une faille juridique permettant le développement, en parallèle, d'une forme acceptée par l'État français de dérégulation des transports flexibles : les véhicules de tourisme avec chauffeur (VTC). C'est précisément dans ce créneau que se développeront les premiers services concurrents au taxi, à commencer par l'entreprise EasyTake en France, puis par Uber et toutes les nouvelles formes de VTC connues actuellement. Aujourd'hui, en France, les transports à la demande restent des services inclus dans les transports publics, ou de forme associative partiellement financée par les collectivités, souvent à partir du versement transport. Ce mode de transport est donc subventionné par l'Etat, sous la tutelle des Autorités Organisatrices des Transports dans la plupart des cas.

Dans la conscience collective, le TAD reste encore aujourd'hui un service de transport marginal servant notamment préférentiellement aux personnes à mobilité réduite ou aux personnes âgées. Le marché est largement mature depuis les années 2000, les offres se sont relativement stabilisées et sont souvent pérennes. Dans la pratique, le fonctionnement des transports à la demande peut changer en fonction du public ciblé. D'ailleurs ce sont aujourd'hui les grandes villes et les villes intermédiaires qui sont les plus équipées en service TAD, preuve que les besoins et les réponses à ses besoins ont cru en milieu urbain.

Un des enjeux reste l'optimisation de ce type de service, afin que la présence de haut-le-pied et l'obligation de chauffeurs ne grèvent pas leur impact positif sur l'environnement. En effet, un service de transport à la demande optimisé se doit de regrouper plusieurs personnes par transport afin d'améliorer son efficacité sur le trajet et réduire au maximum les courses à vide (Prud'homme, 2014). Actuellement, il fonctionne généralement par réservation avec un délai minimal de 24 heures et doit tendre vers l'immédiateté s'il veut concurrencer les véhicules de tourisme avec chauffeur.

I.C.2. Les transports à la demande en PACA

Un étudiant de l'université d'Avignon, Maxime Bodet, a réalisé un travail de collecte de données sur les TAD en PACA en 2019. Il a rassemblé toutes les informations dans une base de données, puis a généré une série de cartes identifiant trois informations majeures de la base de données.

Ces informations ont été mises à jour et ont produit trois cartes qui caractérisent les communes disposant d'un service de TAD de celles qui n'en disposent pas, à notre connaissance et en fonction des informations trouvées dans la littérature technique et sur Internet. Il y est aussi renseigné l'EPCI dans laquelle chaque commune appartient (cf. Annexes).

La carte (Fig. 4) permet d'identifier la clientèle visée du service de TAD de chaque commune. La figure 5 permet de connaître le fonctionnement de chaque service de TAD par commune. Enfin, la figure 6 identifie chaque service de TAD par son nom.

Sur ces trois cartes on remarquera que tout le département du Var, dans sa partie sud et ouest majoritairement, accuse un retard de service de TAD. Il en est de même pour l'arrière-pays vauclusien et pour la quasi-totalité des communes des « départements de montagne », les Alpes-de-Haute-Provence et les Hautes-Alpes. Le département des Bouches-du-Rhône est, quant à lui, relativement bien doté en services de TAD, que l'on peut certainement expliquer par la présence de la métropole Aix-Marseille, dont les communes limitrophes dépendent pour la plupart de services quotidiens et pour l'accès aux lieux de travail.

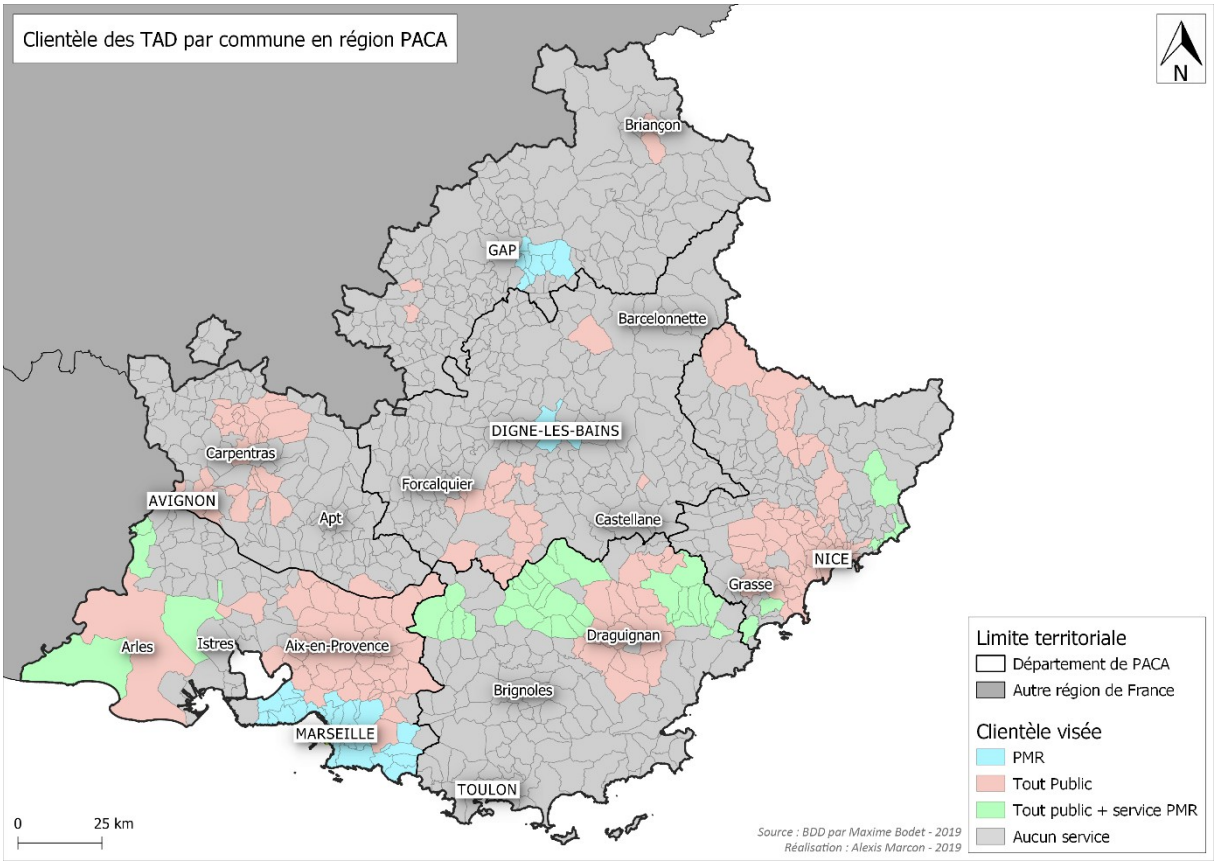

Figure 4. Types de clientèle des transports à la demande en région PACA

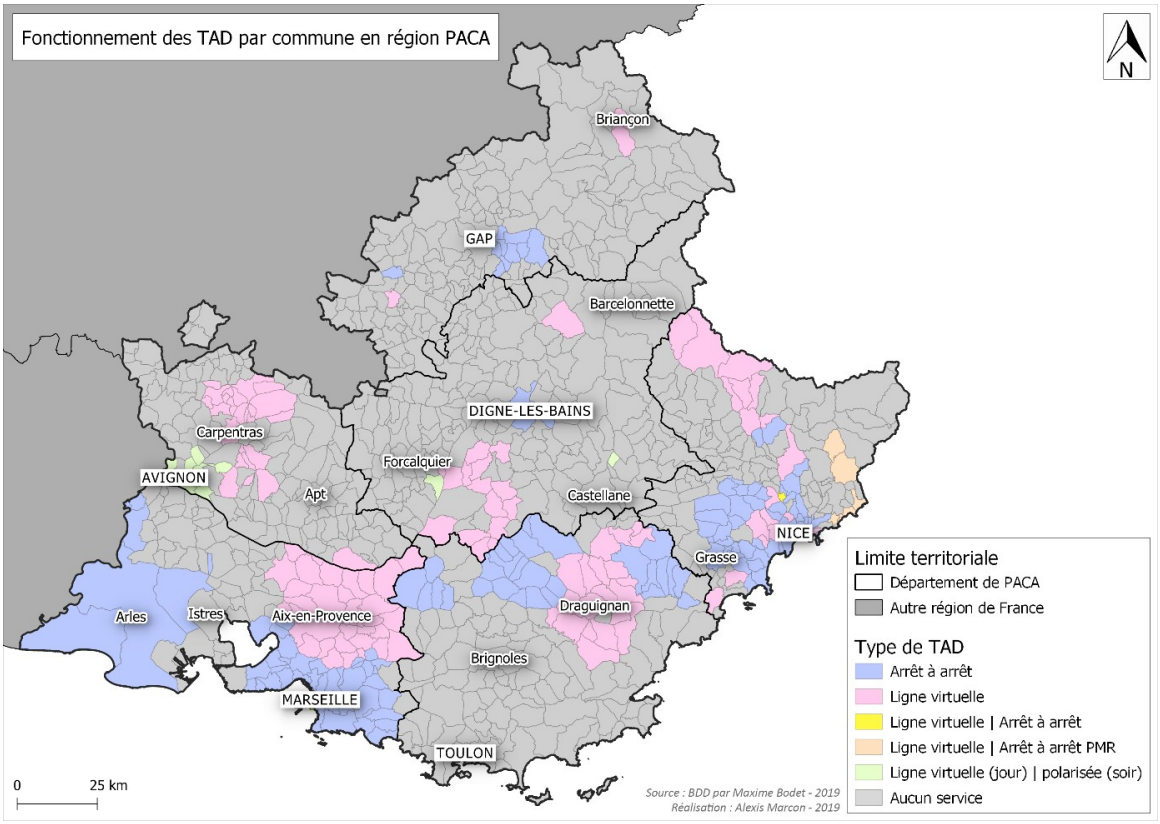

Figure 5. Types de fonctionnement de transport la demande en région PACA

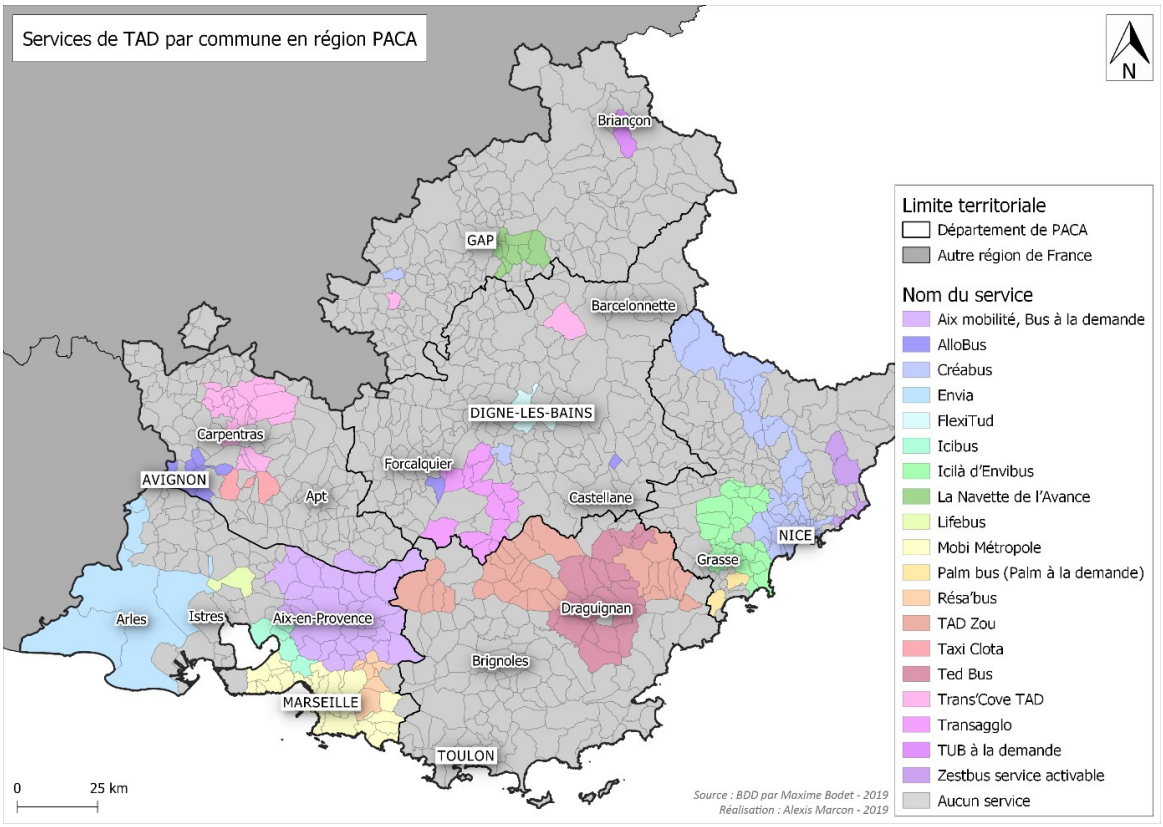

Fig. 6. Localisation et nom des services de transport la demande en région PACA

I.D. Véhicule de tourisme avec chauffeur (VTC)

I.D.1. Définition

Le VTC est initialement l'acronyme de Véhicule de Tourisme avec Chauffeur, devenu par la suite par dérive sémantique Véhicule de Transport avec Chauffeur. À la différence du taxi, dont la fonction est quasiment similaire, le VTC n'a pas le droit de se déplacer à vide pour trouver de nouveaux clients. Entre deux courses, il doit stationner jusqu'à ce qu'une nouvelle commande apparaisse. Un VTC n'a pas le droit non plus d'utiliser un signal lumineux à l'instar des taxis pour s'identifier comme véhicule de transport. Il doit cependant afficher clairement sur son pare-brise sa vignette professionnelle de VTC.

Aujourd'hui, il existe deux marchés VTC qui se font concurrences. Les VTC privés fonctionnant comme des indépendants où via des plateformes privées (exploitant immatriculés), et en opposition les VTC « low-cost » ou de nouvelle génération de type Uber et consorts.

I.D.2. Différence entre VTC « Chauffeur Privé » / VTC type « Uber »

Les relations entre ces deux marchés sont relativement tendues et le terme UBER pour désigner un VTC tend à se généraliser, alors que les services diffèrent.

- Le VTC « Chauffeur-Privé » travaille indépendamment ou par plateforme privée, a un coût de course débutant à 30 € et s'adapte à la demande du client (arrêts, achats divers, etc.) ;
- Le VTC « Uber » travaille via une application de réservation/mise en relation (Uber, Bolt, etc.), avec un coût débutant à 6 € en moyenne et n'effectue que le trajet demandé.

En globalité, on comptait environ 30 000 VTC en circulation dont 70% en région Île-de-France en 2017. D'après les derniers chiffres sur le registre des exploitants de VTC tenu par le Ministère de la transition écologique et solidaire, la région PACA possède un peu plus de 1000 exploitants VTC. Ce qui la place en second rang en France métropolitaine après l'île de France.

Nous avons cependant très peu d'information autre que celle évoquée juste au-dessus concernant les VTC dans leur globalité. Aussi, les VTC « Chauffeur privé », se revendiquent plus comme un transport privé premium voire de luxe, plutôt qu'un simple moyen de transport flexible. C'est pourquoi dans la suite de l'étude de ce mode de transport, nous allons nous focaliser uniquement sur les VTC de type Uber, et sur ce dernier en particulier étant donné son quasi-monopole sur le marché des VTC par application.

I.D.3. Statistiques d'utilisation d'UBER et ses concurrents en France

Une audience Médiamétrie de janvier 2019 (Fig. 7), se concentrant sur l'utilisation des applications de service VTC type Uber, a été transmise aux journaux spécialisés en avril.

- Les résultats de cette audience révèlent qu'Uber écrase littéralement ses concurrents en France et enregistre quotidiennement plus de courses que le troisième (Heetch) du classement sur un mois complet.
- On y apprend aussi que ces applications sont plébiscitées en majorité par les 15-24 ans, les 25-34 ans, et les CSP+.

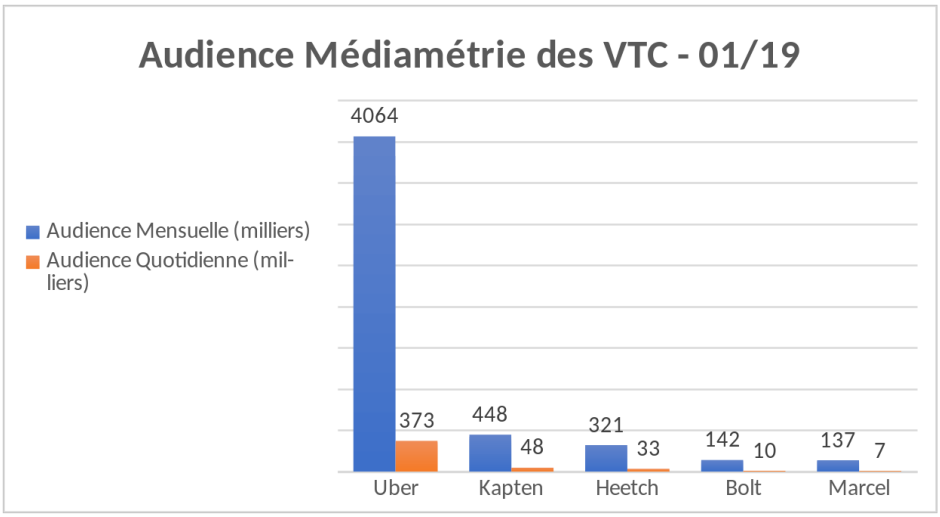

Figure 7. Estimation des taux de pénétration des VTC en fonction de l'utilisation de leurs applications

I.D.4. VTC en PACA

Nous ne sommes parvenus à obtenir des informations géographiques des VTC « 2.0 » que chez Uber. On découvre ainsi qu'Uber dispose de quatre bureaux en PACA, à Avignon, Marseille, Toulon Nice. Chacun de ces bureaux gère un ensemble de communes où les chauffeurs Uber sont rattachés.

On constate ainsi qu'Uber Toulon couvre l'ensemble des communes du Var et offre donc un service à un peu plus d'un million d'habitants. Uber Nice se concentre essentiellement sur les communes littorales (ou du proche littoral) de la Côte d'Azur, jusqu'à partager quelques communes avec Uber Toulon, pour également un peu plus d'un million d'habitants.

Uber Marseille se concentre lui aussi sur les communes (proches) du littoral, jusqu'à la frontière avec le Var. Tout l'étang de Berre est desservi par Uber ainsi qu'Aix-en-Provence et la plupart de ses communes limitrophes. L'ensemble représente environ 1,5 millions d'habitants.

Enfin, les communes concernées par Uber Avignon représentent un territoire complètement démesuré par rapport aux autres. Il réunit l'ensemble des communes du Vaucluse, mais aussi des quatre départements hors de PACA, à savoir, l'Ardèche, la Drôme, le Gard et la Lozère. L'ensemble de ce territoire offre un marché potentiel de deux millions d'habitant à Uber Avignon.

Pour information, on peut trouver la liste de tous les exploitants de véhicules de tourisme avec chauffeur de la région Provence Alpes Côte d'Azur sur le registre de l'État[2].

La couverture géographique régionale des véhicules de tourisme avec chauffeur est présentée dans la carte de la figure 8.

2 https://registre-vtc.developpement-durable.gouv.fr/public/recherche-geographique/17/lister

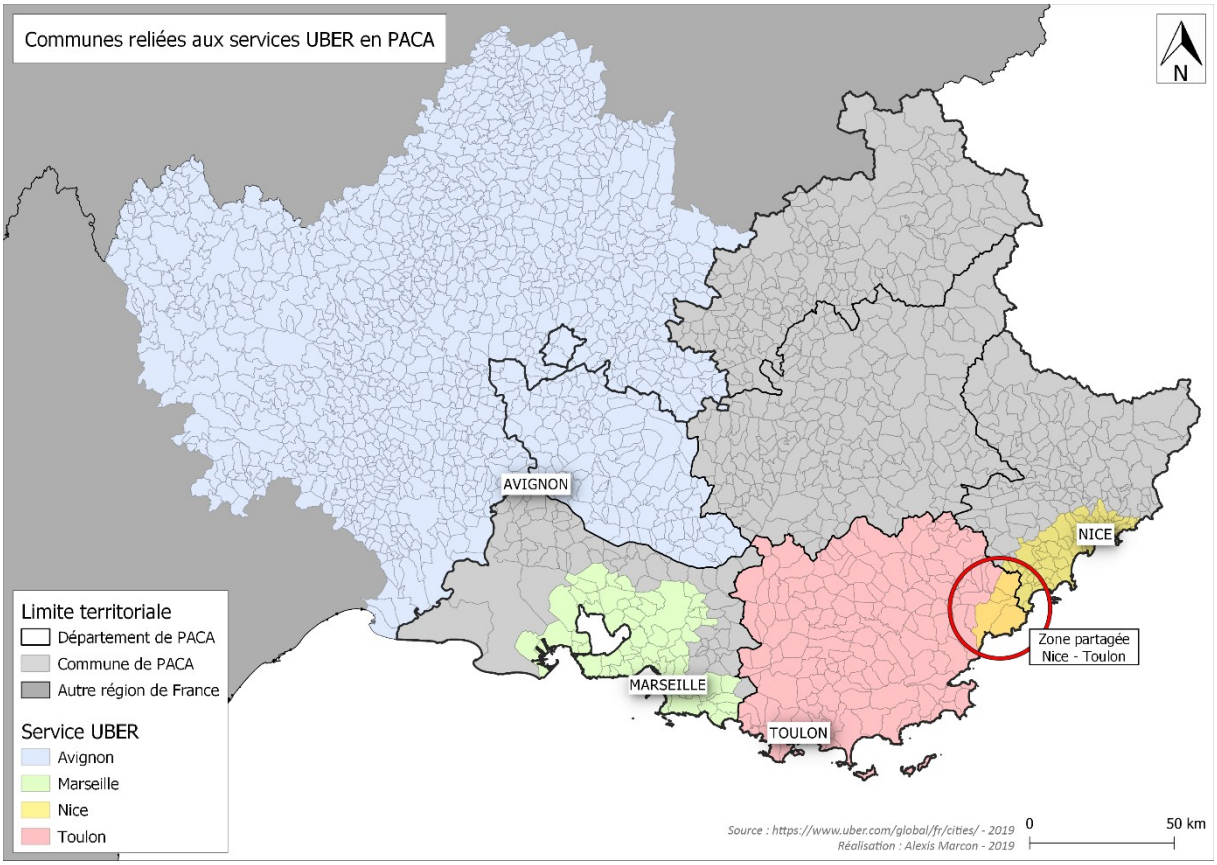

Fig. 8. Couverture communale potentielle d'Uber en PACA

I.D.5. Perspectives de développement

D'après un rapport du cabinet Boston Consulting Group (BCG) commandé par Uber, on apprend que le VTC est une source d'emploi importante en France et notamment en Île-de-France où la reprise d'activité concerne 1/4 des chômeurs pour un revenu net de 1500 €. L'étude de BCG estime entre 40 000 et 80 000 le nombre de VTC en France, correspondant à une recette fiscale entre 0,7 et 1,7 milliards d'euros d'ici 2022. La taille de la filière du VTC dans sa globalité devrait peser entre 1,5 et 3,9 milliards d'euros au même horizon.

Si les tendances se confirment, le VTC serait une filière professionnelle favorable à l'emploi sur le territoire de PACA et également se présenter comme une solution de transport flexible fiable et accessible. Cette affirmation est à relativiser en fonction des pertes d'emplois engendrés par les reports modaux (taxis, transports en commun, etc.).

Il est toutefois à noter que peu d'efforts sont placés sur l'optimisation des services et la réduction de leur impact carbone, et qu'en conséquence, les VTC sont des services polluants, car se déplaçant souvent à vide et ne cherchant pas à regrouper les passagers (hormis partiellement Uber-Pool).

En parallèle, des services très encourageants pour l'économie voient le jour, dont un acteur de la location de véhicules, Sixt fait partie. Sixt a commencé à exploiter ses véhicules en stationnement – qui ne lui rapportent donc rien – en proposant le service « Sixt Mydrive », mettant en relation des clients avec un chauffeur et l'utilisation d'une de leurs voitures, sélectionnée par le client.

I.E. Autopartage

I.E.1. Définition

L'autopartage est aussi appelé « service de voitures en libre-service », (en anglais : *carsharing*), est un mode de transport pouvant être proposé aux individus par le domaine privé (société privée), le domaine public (région, département etc.), par des coopératives ou même entre particuliers, via des applications dédiées ou de manière informelle. Quelle que soit la méthode avec laquelle l'autopartage est proposé, il y a un "prestataire" mettant à la disposition de "clients" un ou plusieurs véhicules (Ait Ouhamed, 2018).

Le concept de l'autopartage tel qu'on le connaît en France est inspiré du modèle suisse qui avait été expérimenté à partir des années 1980 chez nos voisins. Le client d'un service d'autopartage dispose d'un véhicule qu'il ne finance que pour la durée de son besoin. Le reste du temps, la voiture est utilisée par d'autres individus.

L'intérêt principal de ce mode transport réside dans la manière d'utiliser la voiture. Dans les faits, un véhicule personnel reste l'essentiel de son temps au garage ou sur une place de stationnement et n'est utilisé que lors du déplacement – cas typique des déplacements pendulaires Domicile ↔ Travail. Ce mode de transport s'inscrit dans une logique de mobilité flexible et partagée, afin de permettre à n'importe quel individu disposant du permis de conduire d'utiliser un moyen de transport, sans pour autant posséder de véhicule. L'individu paie un service et non plus un bien.

Il s'agit là de l'autre intérêt de l'autopartage : la dimension économique. Le coût d'achat du véhicule, les efforts d'entretien et les problèmes pour trouver un stationnement sont la plupart du temps mutualisés par le service d'autopartage. L'autopartage entre particuliers est un cas à part, sur lequel nous reviendrons.

I.E.2. Systèmes d'autopartage

On distingue deux grandes méthodes de pratique de l'autopartage. La première réunit les entreprises et organismes proposant des services d'autopartage via des flottes de véhicules qu'ils mettent à disposition des individus dans un service locatif exploité sous différents modes (cf. tableau 1).

La seconde méthode d'autopartage, entre particuliers, s'organise via des applications de mise en relation, ou de manière plus informelle par l'utilisation de réseaux privés ou de groupes communautaires. Depuis les années 2010, la France a vu l'autopartage entre particuliers se développer très largement avec, d'une part, la démocratisation des smartphones et du web-mobile, et d'autre part, du fait qu'il n'existe pas de contrainte d'abonnement comme on peut les trouver dans la première approche. Il s'agit d'un réel service, car les propriétaires de véhicules mettent à disposition de conducteurs leur véhicule personnel contre paiement à la durée. Une démocratisation appuyée et soutenue également par les assurances, notamment AXA et Allianz qui sont partenaires officiels de OuiCar et GetAround, une application d'autopartage de particuliers à particuliers.

L'autopartage français actuel fonctionne autour de quatre modes. Dans le cas de la pratique de l'autopartage proposée par des entités économiques, ces quatre modes sont exploités et offrent ainsi un degré de liberté conséquent pour l'utilisateur, malgré une facturation qui se fait souvent par abonnement. En effet, dans le cas du mode One-Way, l'utilisateur peut pratiquer l'autopartage pour faire un trajet longue distance, si sa destination accueille des points de location de véhicules du prestataire de service auquel il a souscrit pour le déplacement en question.

MODE	DESCRIPTION	FACTURATION
Boucle (-retour)	Prendre un véhicule dans une station dédiée et le restituer en fin d'utilisation à cette même station.	Abonnement ou Coût horaire / kilométrique
Free-Floating	Des véhicules en libre-service dans une zone délimitée pour des trajets simples. Réservation et localisation par smartphone.	A la minute
One-Way	Prendre un véhicule dans une station dédiée et le restituer dans une des stations en fin d'utilisation.	Abonnement ou Coût horaire / kilométrique
Inter-Entreprises	A destination des ZA soumise à des congestions urbaines. Une flotte de véhicules en libre-service pour des acteurs partenaires via une plateforme.	Variable

Tableau 1. Différents modes de fonctionnement de l'auto partage

A l'inverse, l'autopartage entre particuliers exploite exclusivement le mode "Boucle (-retour)" car c'est le véhicule d'un particulier qui est loué et donc doit être remis au propriétaire à la fin de son utilisation par un conducteur tiers qui a profité de ce service. Le degré de liberté du déplacement est de fait plus restreint et s'applique plutôt à des déplacements ponctuels urbains, ne dépassant pas quelques heures d'utilisation. S'il nous est impossible de quantifier la pratique de l'autopartage entre particuliers, sa simplicité d'utilisation le rend potentiellement plus populaire que le covoiturage privé organisé, et ce malgré la contrainte du mode "Boucle (-retour)". D'un autre côté, les services de covoiturage en Free-Floating se développent à l'étranger (exemple : Canada, de l'entreprise niçoise Vulog).

Du point de vue environnemental, les avantages de l'autopartage sont très limités, car son fonctionnement correspond peu ou prou à celui de l'automobile personnelle, avec un très faible regroupement de passagers. Le concept d'auto-copartage (mix entre covoiturage et autopartage) a ainsi été développé à l'Université d'Avignon (Ait Ouhamed, 2018).

I.E.3. Acteurs de l'autopartage

En France

Nous avons recensé dans le tableau 2 une liste la plus complète possible de sites, applications smartphones, entreprises, services publics ou coopératives agissant en France.

Privé / Public / Coopérative	Entre Particuliers
BlueCub *(Bordeaux)*	GetAround *(ex-Drivy)*
BlueLy *(Lyon)*	OuiCar
Carfully *(Antilles)*	Carfully *(Antilles)*
CarLili *(location de véhicule livrée à domicile)*	Deways
Clem	
CITIZ *(plus grande coopérative de France)*	
Hertz 24/7	
Koolicar	
Mobility TechGreen *(autopartage pour PDE en Bretagne)*	
Modulauto *(Montpellier)*	
TOTEM Mobi	
TravelCar *(autopartage en gares et aéroports)*	
Renault Mobility	
VuLog	
Ubeeqo *(Paris)*	

Tableau 2. Sites, applications Smartphones, entreprises et services publiques ou coopératives de l'auto partage (au sens large)

Dans l'ensemble de cette liste, à notre connaissance, seul CITIZ dispose de données cartographiques accessibles en lecture, pour les réservations notamment. Nous avons donc été confrontés à un certain manque de données, que ce soit en flotte de véhicules ou en localisation sur le territoire.

Lorsqu'on se penche sur le service d'autopartage entre particuliers, les données sont évidemment non accessibles, afin de protéger la vie privée des utilisateurs. Nous n'avons donc pu obtenir aucune donnée cartographique, ni statistique, excepté le nombre d'utilisateurs approximatif de GetAround et OuiCar, qui revendiquent chacun environ 2 millions d'utilisateurs.

Il est aussi intéressant de s'attarder un instant sur le cas de Mobility TechGreen, car il s'agit d'une société privée bretonne qui met à disposition une flotte de véhicules pour des entreprises dans le cadre des plans de déplacement entreprise, et propose ce service sous forme d'autopartage. Nous n'avons recensé aucune autre société de ce type en France, ni dans la région PACA.

En PACA

Dans le recensement que nous avons pu faire des acteurs actuels de l'autopartage en PACA, pour les entités privées, publiques ou coopératives, il n'en ressort qu'un. Il s'agit de la coopérative CITIZ (Provence), qui est implantée dans deux villes de la région, Avignon et Marseille (Fig. 9). Les deux cartes suivantes localisent les places de stationnement dans chacune des deux villes.

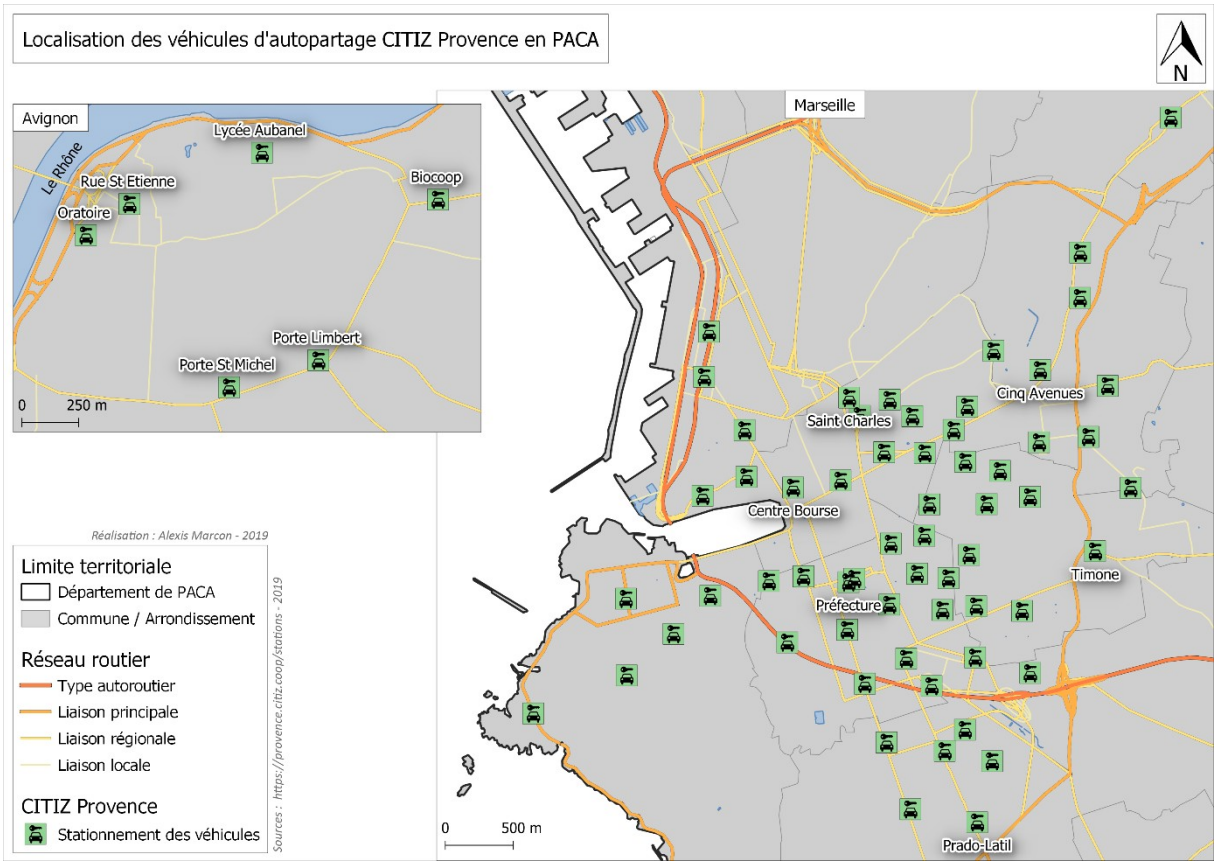

Figure 9. Localisation des véhicules d'auto partage CITIZ en PACA

On compte 67 emplacements d'autopartage CITIZ Provence répartis dans les deux villes, 6 pour Avignon et 61 pour Marseille, avec une flotte d'un peu plus de 100 véhicules. Le détail de la répartition de la flotte à travers les divers points de stationnement et le nombre de véhicules se trouvent dans le document en Annexe.

Il est important de noter également qu'il existait un service d'autopartage dans la ville de Nice, qui a malheureusement disparu en 2018. Le flotte de véhicules Autobleue présente à Nice était gérée par l'entreprise privée VuLog basée à Nice et leader international dans le domaine. Depuis, certaines villes de la Côte d'Azur comme Cagnes-sur-Mer se sont équipées de voitures en autopartage via le système Renault Mobility et ses véhicules électriques Renault Zoé. C'est une occasion pour Renault de démocratiser son modèle de véhicule électrique, ainsi que ses bornes de recharge à travers la région PACA, mais aussi pour tout le reste de la France.

I.F. Covoiturage

I.F.1. Définition

Dans le cadre législatif, l'article L. 3132-1 du code des transports définit le covoiturage comme « l'utilisation en commun d'un véhicule terrestre à moteur par un conducteur et un ou plusieurs passagers, effectuée à titre non onéreux, excepté le partage des frais, dans le cadre d'un déplacement que le conducteur effectue pour son propre compte ».

La pratique du covoiturage est ancienne (auto-stop) et s'effectue principalement de particulier à particulier, mais sa forme actuelle la plus répandue – type covoiturage.com puis Blablacar – date d'une décennie avec l'émergence des réseaux mobiles / smartphones, qui ont facilité la réservation d'une place en covoiturage entre le conducteur et ses passagers. Aujourd'hui, le covoiturage peut être dynamique et optimisé (Ben Cheikh, 2016). Les coûts se partagent et se limitent au carburant, péages (et à une commission si l'organisation du covoiturage est passée par une application dédiée). Il existe cependant un réseau plus discret de forums et de communautés sur internet, permettant de mettre en relation des individus souhaitant covoiturer sans forcément utiliser une plateforme telle que Blablacar. Toujours sur l'aspect financier, le conducteur ne doit dégager aucun bénéfice vis-à-vis du coût du trajet demandé à ses passagers. S'il en dégage un, il est considéré aux yeux de la loi comme exerçant illégalement un transport rémunéré de personnes. Il ne s'agit donc que d'une participation ou d'une mutualisation à ses frais.

On peut identifier jusqu'à quatre pratiques différentes du covoiturage :

- Les déplacements de courte distance concernant l'accompagnement familial ;
- Les déplacements domicile ↔ travail de moyenne distance (entre 20 et 80 kilomètres), estimé à 10% des déplacements, y compris ceux intégrés dans les plans de déplacements d'entreprises ;
- Les autres déplacements de moyenne distance, sans possibilité d'évaluer quantitativement cette pratique ;
- Les déplacements personnels de longue distance dont l'Etat estime qu'ils représentent 1,6 % des déplacements longue distance.

I.F.2. Le covoiturage appuyé par la Loi d'Orientation des Mobilités

On notera qu'actuellement 7 déplacements domicile ↔ travail sur 10 sont réalisés en auto-solisme en France. Pourtant, le covoiturage présente de véritables atouts, en termes de pouvoir d'achat (coûts de transports divisés), de potentiel sur la réduction des congestions du réseau et du stationnement, d'amélioration de la qualité de l'air, par la réduction du nombre de véhicules sur le réseau, et comme solution d'appoint ou de complément lorsque les transports publics sont défaillants ou manquent sur certains territoires.

La loi LOM adoptée en novembre 2019 souhaite encourager le covoiturage en le transformant comme leviers d'actions des Régions et EPCI (possibilité de verser une allocation). En créant des voies réservées au covoiturage sur le réseau routier et en créant un « forfait de mobilités durables » pour les déplacements domicile ↔ travail des employés covoitureurs. En effet, côté environnement, le covoiturage constitue le meilleur mode collectif flexible, puisqu'au minimum le taux de remplissage est de 2, avec un haut-le-pied nul, et que structurellement, il existe une optimisation des tournées due à une minimisation naturelle des détours.

I.F.3. Aires de covoiturage en PACA

L'Etat met sur son site *transport.data.gouv.fr* trois jeux de données sur le covoiturage en France :

- Une base nationale consolidée
- Une base nationale non consolidée avec la participation de Blablacar
- Une base issue de La Fabrique des Mobilités (FDM)

En étudiant chacune de ces bases pour le territoire de PACA, la base « Blablacar » n'apporte aucune information supplémentaire par rapport aux deux autres. C'est pourquoi nous ne l'avons pas exploitée par la suite.

La dernière base listée, construite par la FDM, est en réalité un travail de fouille et de regroupement des données sur le covoiturage en France, à partir de divers sites communautaires sur le covoiturage (souvent non renseignés).

Le problème principal de ces données est l'exactitude limitée, autant géographique que temporelle, notamment dans le dernier cas cité. Le respect des données privées est aussi un frein à l'établissement d'une base exhaustive lorsqu'on apprend que certain individus covoitureurs font de leur propriété privée un parking ou un point relais pour les départs de covoiturage (source FDM).

Dans la cartographie suivante, nous avons fait plusieurs choix. D'abord celui de conserver des points de covoiturage à l'extérieur du territoire de PACA, dans une limite de 10 km (pointillés en violet) car ils peuvent être des relais majeurs pour des individus domiciliés hors de PACA, mais y travaillant. Nous avons identifié en vert pâle les communes et en gris fin les EPCI à 10 km de PACA, toujours dans un souci de considérer les flux domicile ↔ travail, mais aussi dans l'idée d'identifier l'ensemble des entités territoriales limitrophes avec lesquelles échanger pour améliorer le covoiturage « entrant » en PACA.

Ensuite, nous avons affiché dans la figure 10 l'ensemble des points de covoiturage issus de la base nationale consolidée (en bleu) et de la base FMD (en rouge). Cette dernière a été vérifiée et éditée point par point pour obtenir une base la plus complète et à jour possible. Les détails sont visibles dans les tables attributaires des couches disponibles en Annexe.

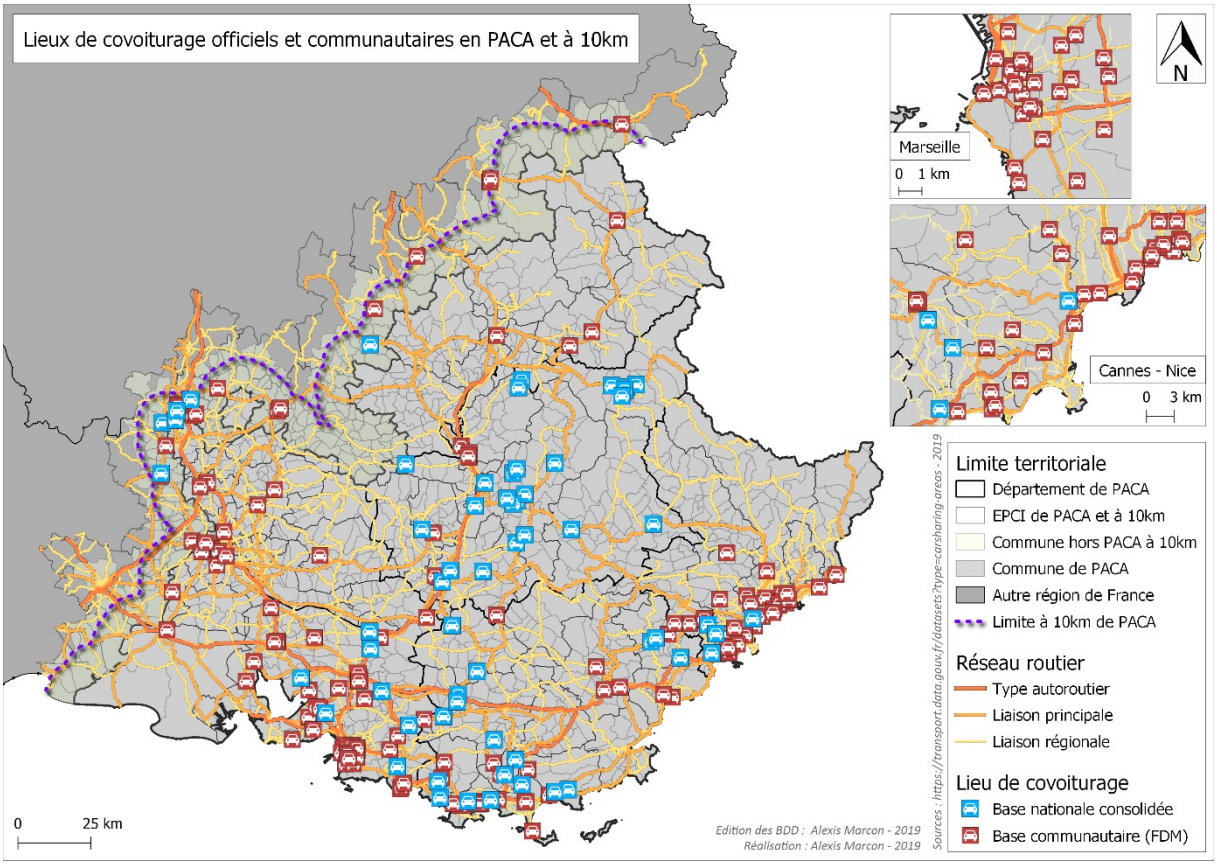

Figure 10. Aires de covoiturage référencées en région PACA

Ce que tend à montrer la base FDM est que les usagers pratiquant le covoiturage se servent beaucoup des parkings de ville comme des points relais. Outre les parkings relais officiellement créés, ciblés ou identifiés sur le territoire, on relèvera dans certains cas des gares, voire des dépôts-minutes. Toujours à partir de cette base, on peut constater dans de rare cas l'existence de la participation de particuliers, qui se servent de leur domicile comme point relais ou parking de covoiturage.

La cartographie met également en exergue le fait que les points de covoiturage se trouvent majoritairement sur le réseau autoroutier principal de PACA. Toutefois, en agglomération, comme à Marseille, Toulon, Nice, ou Avignon, les points relais peuvent se trouver sur un réseau routier plus fin.

I.G. Zoom sur deux sites en PACA (covoiturage)

I.G.1. Nice/Alpes maritimes : migrations alternantes en covoiturage estimées *via* une enquête ménage

Dans le cadre du stage de Louisette Garcin, une étude de l'Enquête Ménage Déplacements de Nice/Alpes-Maritimes de 2009 a permis d'étudier les flux domicile-travail réalisés en covoiturage. Le travail a consisté à mesurer la différence entre les flux décomptés à partir de l'enquête ménage du département et le modèle théorique de taux de covoiturage moyen en région PACA, basé sur un taux de pénétration de 17,2%, tel qu'il est indiqué dans le rapport « Bilan et propositions de développement du covoiturage en Provence-Alpes-Côte d'Azur », paru en 2014.

Ce travail a produit plusieurs cartes (Fig. 11 et 12). Les variations positives, qui représentent une part de covoiturage plus importante que celle attendue théoriquement, sont représentées en dégradé de rouge. Les variations négatives, qui représentent quant à elles une part de covoiturage moins importante que celle attendue théoriquement, sont représentées en dégradé de bleu. Nous avons dans un premier temps isolé l'ensemble des déplacements domicile-travail, en prenant en compte les chaînes de déplacements (par exemple un déplacement domicile-école ou travail) de chacun des individus en fonction de leur zone d'origine. Nous avons également considéré que les déplacements ne sont pas symétriques et avons différencié les déplacements domicile-travail (Fig. 11) et travail-domicile (Fig. 12). Nous avons par la suite mis en relation les individus effectuant les mêmes déplacements origine/destination afin de regrouper des potentiels de covoiturage. Enfin, nous avons comparé ces potentiels de covoiturage avec le modèle théorique publié par la région PACA, énoncé ci-dessus. Ces parts ont été calculées grâce à l'Enquête Ménage Déplacement de 2009. Il serait donc pertinent de mettre à jour ces données au travers d'une EMD plus récente le cas échéant.

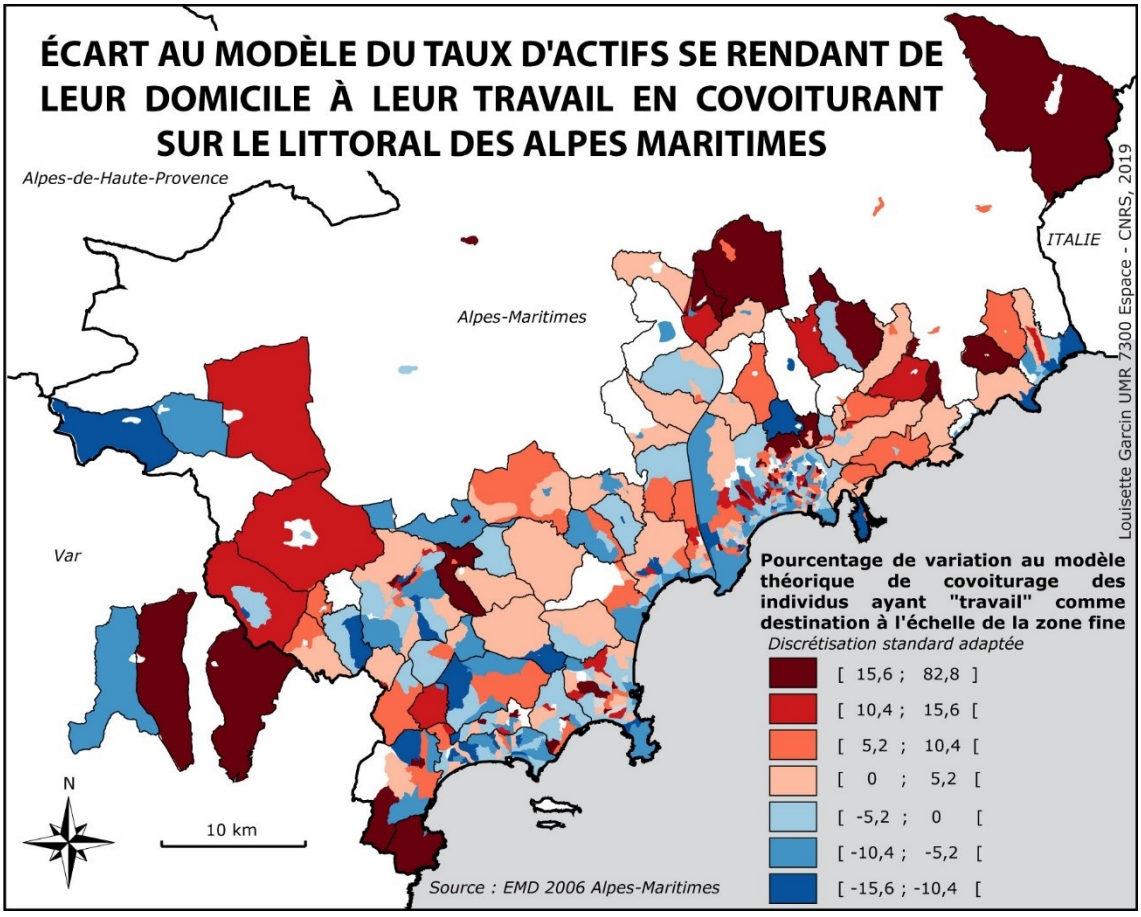

Figure 11. Carte des résidus de covoiturage domicile-travail dans les Alpes Maritimes

Nous pouvons observer que les zones fines, densément peuplées et longeant le trait de côte, sont majoritairement déficitaires en termes de covoiturage. Nous pouvons noter que cette étendue est principalement urbaine et que par conséquent les réseaux de transports en commun et/ou la proximité du domicile/travail des actifs y sont développés. Ils permettent potentiellement une relativement plus faible utilisation de la voiture, et peut-être, par ricochet, du covoiturage. On peut

souligner par ailleurs que l'ensemble de cette zone est desservie par le TER Cannes-Vintimille qui est l'une des lignes les plus fréquentées de la région.

En opposition, les zones de l'arrière-pays possèdent des taux de covoiturage supérieurs au modèle. Il semble en effet plus complexe de se rendre dans les pôles urbains attractifs et l'utilisation de la voiture, et donc le covoiturage, y sont plus importants.

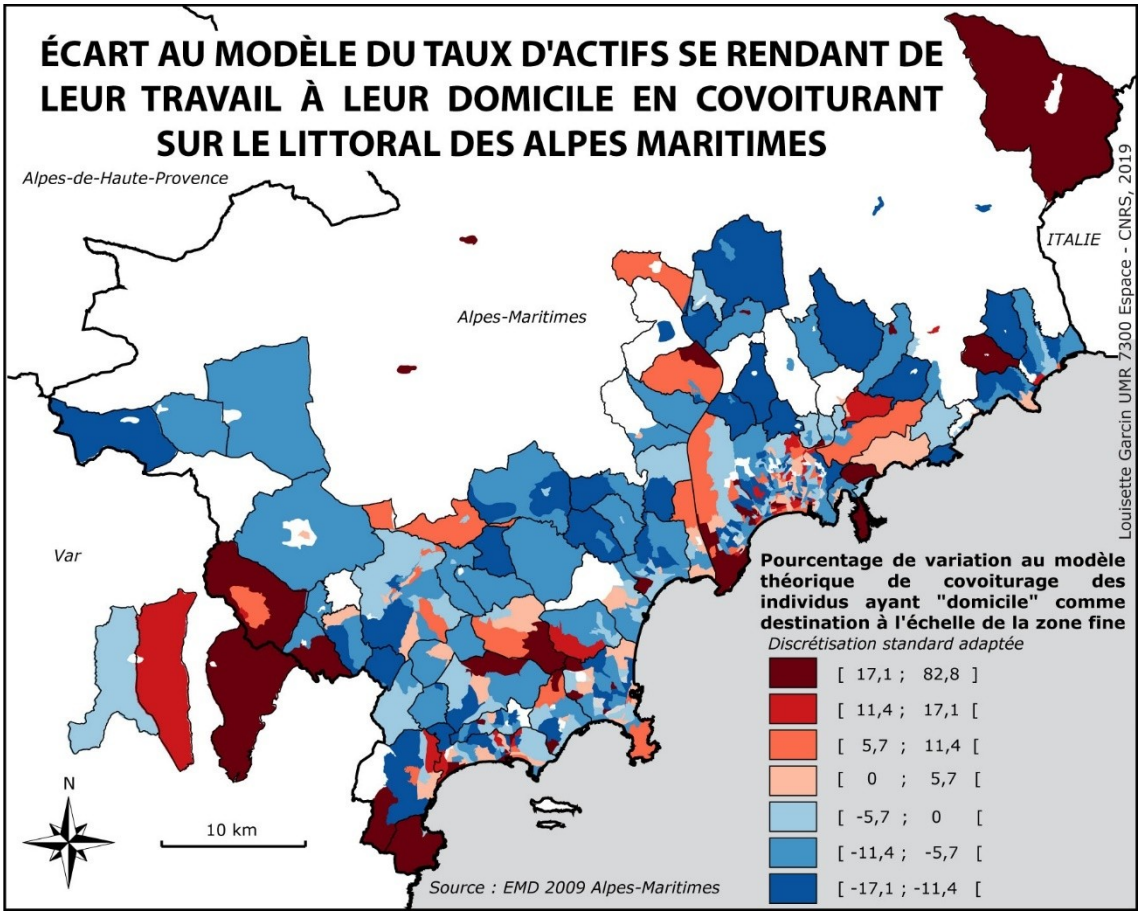

Figure 12. Carte des résidus de covoiturage travail-domicile dans les Alpes Maritimes

Il est également à noter que certaines des communes de l'arrière-pays des Alpes Maritimes possèdent des taux inférieurs au taux de covoiturage attendu, à cause de l'effectif des populations qui peut rendre l'échantillon peu représentatif. Nous pouvons observer que les deux cartes sont très différentes, bien qu'elles concernent les mêmes individus. Les déplacements n'étant pas symétriques, nous pouvons observer que les déplacements travail-domicile suscitent moins de covoiturage que les déplacements domicile-travail : nombre de zones fines sont en dessous du chiffre théorique de covoiturage proposé par la région PACA. Nous pouvons émettre l'hypothèse que cette différence est peut-être due à la complexité des chaînes de déplacements des actifs ayant pour origine leur travail. Durant notre analyse, nous avons pu observer qu'un grand nombre de travailleurs effectuent des déplacements de différents motifs (notamment achats, scolaires, etc.) entre leur travail et leur domicile. De plus, ces déplacements supplémentaires s'effectuent dans diverses zones spécifiques qui rendent le covoiturage des individus possédant la même origine et la même destination finale souvent incompatibles.

I.G.2. Potentiel de covoiturage dans 5 EPCI en zone rurale en PACA

Un travail d'analyse de service de covoiturage a été confié à une classe d'étudiants de licence troisième année de géomatique à Digne-les-Bains. Cinq sites en zone rurale, voire montagneuse, ont été identifiés comme intéressants et porteurs par la Mission Prospective sur ce sujet, en Provence-Alpes-Côte-d'Azur : la communauté d'agglomération Gap Tallard Durance, l'agglomération Provence Verte, la communauté territoriale Sud Luberon, Durance Luberon Verdon Agglomération et enfin, Provence Alpes Agglomération.

Les étudiants étaient chargés de réaliser une description de l'EPCI, un diagnostic territorial concis (localisation et densité de population), un recensement des mobilités, des réseaux et des offres de transports partagés existant, et en synthèse, un bilan et une évaluation du potentiel de covoiturage sur la communauté de communes ou d'agglomérations (points faibles et points forts).

Les résultats des travaux des étudiants sont constitués d'une présentation orale, d'un rapport de synthèse et des bases de données réalisées à cet effet (cf. Annexes).

En synthèse, nous pouvons constater que beaucoup des communes de ces structures intercommunales régionales manquent de services et de moyens alloués aux transports flexibles ou partagés et notamment au covoiturage. Elles possèdent néanmoins des atouts : une augmentation des points et parkings relais pour le covoiturage dans les principales villes, ainsi que les possibilités d'aménagement de ces aires le long des grands axes routiers. Le potentiel n'est donc pas négligeable et le covoiturage peut être considéré comme une solution viable et durable pour le transport partagé en région Provence Alpes Côte d'Azur, même dans les zones de faible densité, conformément à la loi d'orientation des mobilités (LOM, 2019).

I.H. Synthèse - Typologie comparative des transports flexibles et partagés et de leur usage

Mode	Véhicule autonome	TAD	VTC	Autopartage	Covoiturage
Propriétaire	Individu, Secteur privé	EPCI	Secteur privé	Privé, Public, Coopérative, Individu	Individu
Réservation	Non défini *	Oui	Oui	Oui	Oui
Client	Non défini *	Groupe	Individu	Individu	Groupe
Est conducteur	Oui	Non	Non	Oui	Oui
Est passager	Oui	Oui	Oui	Non	Oui
Longueur du trajet	Tous	Petit	> 100km	Tous	Tous

* *expérimentation*

Tableau 3. Tableau comparatif des caractéristiques de fonctionnement des cinq modes de transport flexibles et partagés étudiés

Le tableau 3 résume succinctement pour chaque mode transport, ses différentes spécifications et usages. Le cas du véhicule autonome est particulier dans le sens où, pour l'instant, ce n'est pas un mode de transport flexible actif. Il est toujours à l'état d'expérimentation et des changements peuvent intervenir d'ici la démocratisation des niveaux d'automatisation de niveau 4 et 5.

Mode Effet positif … ?	Véhicule autonome	Transport à la demande	Véhicule de Tourisme avec Chauffeur	Autopartage	Covoiturage
Émission de polluants atmosphériques	Si électrique ou énergie propre et développement des navettes	Favorable si regroupement des passagers (haut-le-pied)	Défavorable car peu de regroupement (haut-le-pied)	Plutôt favorable (véhicules électriques en urbain)	Favorable dès le premier passager et pas de haut-le-pied
Réduction de distance parcourue	A priori non sauf niveau 5	Favorable si regroupement des passagers (haut-le-pied)	Défavorable car peu de regroupement (haut-le-pied)	Défavorable car peu de regroupement	Favorable au passager d'entrée car pas de haut-le-pied, léger détour
Regroupement dans les véhicules	A priori non, sauf navettes à trajets réguliers	Potentiel d'optimisation notamment dans les zones denses	Rare mais en développement (UberPool)	Rare (sauf si développement de l'auto-co-partage)	Favorable structurellement (remplissage minimum = 2)
La ville inclusive	A démontrer (zone spécifique)	Favorable (effet de club, de proximité)	Plutôt favorable (accès à la mobilité)	À démontrer	Favorable car renforcement des réseaux sociaux
La ville intelligente et connectée	Oui : intégration de l'intelligence artificielle et automatisation	À démontrer	Favorable (usage généralisé des technologies mobiles)	À démontrer, lien potentiel avec véhicule autonome	À démontrer, mais plutôt défavorable
Le développement économique	Oui, avec les nouvelles technologies (IOT)	Partiellement	Favorable à l'emploi et à la mobilité professionnelle	À évaluer, intégration possible des technologies	À démontrer (effets spécifiques localisés ?)
L'équité territoriale	À démontrer, mais a priori défavorable	Favorable au désenclavement des zones rurales	Plutôt défavorable (logique d'efficacité)	Possiblement favorable (si accès généralisé)	Favorable car ubiquiste
Le développement des énergies renouvelables	Possible et assez facilement maîtrisable	Sous condition de flexibilité suffisante	Sous réserve d'incitation aux véhicules propres	Plutôt favorable en l'état actuel de l'offre (risque du free-floating)	Variable (suit l'évolution courante des véhicules)
La lutte contre l'étalement urbain	Peu favorable (augmentation probable des distances domicile travail)	Sous condition (tarification, maîtrise des distances)	Plutôt défavorable (drainage de l'ensemble du territoire)	Plutôt favorable (usager urbain captif)	Défavorable sauf contrainte de distance

Tableau 4. Tableau comparatif des cinq modes de transport flexibles et partagés étudiés, du point de vue de leurs effets sur le développement et l'environnement

Le tableau 4 croise, quant à lui, le positionnement de chacun des cinq modes par rapport à certains des enjeux identifiés dans les différents scénarios imaginés par la mission prospective de la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur. On fait l'hypothèse d'un potentiel possible de chacun de ces modes, qui lutteraient efficacement contre l'usage de l'automobile personnelle. Le tableau résume notre vision des différents modes de transport étudié. Pour évaluer avec acuité les impacts positifs de tel ou tel transport sur tel ou tel enjeu du développement territorial, il serait nécessaire de connaître avec précision les interactions entre ces enjeux, compte tenu d'un mode donné, mais aussi les interactions spatiales entre les transports sur le territoire de mobilité (reports modaux, concurrence, etc.).

II. Méthodologie et approche prospective des mobilités et des transports partagés et flexibles en PACA

II.A. Définition

Commençons par donner une définition de la prospective telle que nous l'entendons dans cette étude. On peut identifier trois niveaux pour lesquels la prospective, sous ses différentes formes, constitue un outil d'aide à la décision fertile.

Le premier niveau est très normatif. Il est très présent dans la littérature anglo-saxonne sous les termes de *forecasting* ou *forseeing* (Heliott *et al.*, 2006 ; Kharin Y., 2013). Il s'agit d'analyser les évolutions passées et, par des méthodes de projection, d'imaginer, avec une certaine plausibilité et des marges d'erreur, quel sera l'état probable futur des territoires considérés. Cette approche se situe finalement à la limite de la définition de la prospective. Elle est par exemple largement utilisée en économétrie, via des modèles déterministes complexes et paramétrables, souvent basée sur des utilités et des rationalités individuelles, politiques ou économiques. Il s'agit ici d'*imaginer le futur en fonction du passé et du présent*. Dans ce cas de figure, l'expertise est réalisée à destination des décideurs et le processus prospectif est quelque peu passif : la projection est utilisée comme outil réflexif au même titre que tout autre indicateur sur l'état présent du territoire. On prête souvent à ce type de méthodes de projection une vertu implicite de prévision. Par exemple, les modèles du réchauffement climatique se situent dans ce type d'approche, dont on peut dire aujourd'hui raisonnablement qu'elles ont clairement identifié le problème. Cela est davantage discutable pour les modèles en économie ou en sciences humaines et sociales, dans la mesure où l'inertie des systèmes liés à l'homme et leur vitesse d'évolution sont très différentes et complexes à appréhender. La principale critique que l'on émet à l'encontre de cette approche prévisionniste est son caractère fortement déterministe et son hypothèse sous-jacente de reproductibilité sur différents territoires et temporellement, la rendant souvent sujette à caution.

Le second niveau de la prospective constitue une alternative à cette première approche. On ne parle alors plus d'un futur marqué d'une certaine probabilité d'occurrence, mais plutôt de futurs au pluriel, représentés par des scénarios marqués dans leurs objectifs et leur finalité. La prospective revient ici à *éclairer le présent à la lumière de (plusieurs) futur (possibles)*. Dans cette approche fortement collaborative, la prospective devient un laboratoire à idées, source de discussions riches et ouvertes, et propice à faire bouger les frontières et casser les plafonds de verre. C'est notamment l'approche prônée par l'école française de prospective (Godet, 2007). C'est celle qui a été peu ou prou utilisée

dans la construction des scénarios par la mission prospective de la région Provence Alpes Côte d'Azur. Il n'en reste pas moins que la construction des scénarios se base sur des expertises et des analyses des évolutions qui ont toute leur rationalité, en présentant différents points de vue, parfois opposés, des acteurs. Une première difficulté de cette approche est la nécessité préalable de définir si un scénario correspond à *ce que l'on pense* ou *ce que l'on espère* qu'il va arriver, produisant ainsi un savant mélange de l'objet et du sujet qui le manipule. On aboutit dans cette approche à un paradoxe. Si la variété des scénarios élaborés éclaire plusieurs évolutions des territoires, chacun de ces scénarios, pour qu'il soit crédible, se base sur des proxys et des indicateurs rationnels qui les orientent fortement pour qu'il soit défendables. Ainsi, lorsque les défenseurs de l'approche par scénarios clament que leur approche ne fait aucunement de la prévision, la question se pose alors de la plausibilité et de la validité des scénarios proposés. Si ceux-ci ne portent en eux aucune part de véracité et de prévisibilité, quelle est finalement, pour chacun d'eux et dans leur spécificité, leur part de crédibilité dans l'aide à la décision ?

Une troisième approche pourrait être qualifiée de *méta*, puisqu'elle peut s'appuyer potentiellement sur les deux précédentes (Heurgon & Bailly, 2001, Landrieu & Heugon, 2007). Il s'agit là de *se donner les moyens de construire un futur particulier et ciblé, espéré*, en étudiant des projections de tendance estimées en probabilité, et/ou en comparant des scénarios alternatifs donnant une idée des différentes directions possibles. Cette approche prospective est en fait très politique et volontariste, et relativement peu collaborative à ce stade, dans la mesure où il n'existe qu'un seul objectif (qui perd ainsi le statut de scénario) et que celui-ci peut ne pas correspondre à d'éventuelles prévisions, mais bifurquer d'une ligne d'évolution potentiellement attendue. Toutefois, cette étape dans la démarche prospective constitue la fin en soi de toute aide à la décision, alors que les deux précédentes approches sont davantage des outils avant et pendant le processus politique. Une fois l'objectif fixé par les décideurs pour tendre vers tel ou tel territoire à un horizon donné, il s'agit alors d'activer tous les leviers disponibles et efficaces pour atteindre cet objectif. Là encore, l'aide à la décision ne peut pas faire fi d'une crédibilité minimale dans les projections et scénarios étudiées, puisque ceux-ci servent de substrat à la matérialisation de l'objectif à atteindre et des moyens à mettre en œuvre pour y parvenir.

Pour ce qui est du projet de la Mission Prospective de la région Provence Alpes Côte d'Azur, au moment de la rédaction du présent rapport, nous sommes à l'issue d'une première étape qui a eu recours à un processus hautement collaboratif, ayant réuni beaucoup d'acteurs de la mobilité en région, par le biais de bureaux d'études ayant accompagné la démarche. Ce travail a abouti à une série de cinq scénarios élaborés, discutés puis validés (au sens de leur typicité et de leur crédibilité) servant de référence réflexive à une phase plus opérationnelle et politique qui devrait démarrer dans la foulée. Ainsi, c'est l'approche collaborative par scénario qui a prévalu. Ayant participé activement à ce processus, nous pouvons remarquer que les scénarios proposés sont doublement teintés : ils portent l'espoir d'un futur défendu par les participants aux réunions, et, dans une moindre mesure, restent fortement contraints par les limites de l'acceptable, du plausible et du politiquement possible, voire correct. Dans ce rapport, nous plaçons le « curseur sémantique » de la prospective entre (i) une approche normative prédictive, à laquelle nous croyons en partie, pour peu que l'on pose des gardes-fous, (ii) une approche par scénarios, qui doivent accepter leur capacité heuristique et exploratoire, c'est à dire porter une forte crédibilité, (iii) au service de la troisième phase de mise en mouvement vers un objectif de politique territoriale construit et assumé.

II.B. Recensement des données disponibles pour réaliser les estimations des mobilités

II.B.1. Données d'enquêtes quantitatives vs qualitatives, questionnaires vs entretiens

Les données que l'on peut utiliser pour analyser et estimer les flux sont variées. Elles se répartissent en deux grands groupes : quantitatives et qualitatives.

Tout d'abord, il existe les données que nous qualifions de *quantitatives*, car elles sont nombreuses. Elles peuvent être parfois localisées. Ce peut être des données exhaustives ; rare cas de figure, mais l'on peut s'en approcher avec par exemple les bases de données géographiques numériques (IGN, OSM). Mais la plupart du temps, nous ne disposons que de données échantillonnées. Les échantillons réalisés ont deux objectifs : constituer une image plus petite mais représentative de l'ensemble de la population et ainsi permettre de réaliser des économies lors du recueil de l'information. Ils sont de différents types : *aléatoire* (tirage au sort sans remise selon une loi statistique), *systématique* (tirage régulier d'individus dans une série ou une population connue), *stratifié* (réalisation de sous-échantillons homogènes d'effectifs variables représentatifs), par *grappes* (division de la population en un nombre important de groupes homogènes d'effectifs similaires), par *quotas* (sondage empirique se calant sur les caractéristiques de la population).

Avec l'avènement des *données (géographiques) massives*, d'autres méthodes d'échantillonnage existent et peuvent être sujettes à caution en termes de représentativité : échantillons *arbitraires* ou *Internet* avec vérification postérieure (type Facebook, Twitter etc.), échantillons « *boule de neige* » ou via des réseaux (des personnes sont interrogées est elle-même interrogent d'autres personnes et ainsi de suite…). Ces méthodes visent finalement à se rapprocher de l'exhaustivité. Dans tous les cas, un des enjeux essentiels pour une bonne exploitation des données quantitatives reste la vérification de la représentativité des échantillons, ainsi que l'agrégation des résultats statistiques obtenus via des sous échantillons qui les composent. Une critique régulièrement émise à l'encontre de ce type d'approche est le fait qu'elles permettent de mettre en évidence des grandes tendances déjà connues, en omettant souvent les innovations à la marge. Dans un contexte de recherche prospective sur de vastes territoires régionaux, ces approches quantitatives peuvent être utiles pour évaluer les grandes tendances et mouvements de flux au sein de divers scénarios. Elles se situent au niveau des préférences dites *observées*, c'est-à-dire qu'elles sont mesurées et éventuellement projetées, par exemple pour évaluer des marchés. Elles risquent toutefois d'être limitées pour déceler la percée d'un nouveau mode de transport inattendu, relativement imprévisible.

D'un autre côté, il existe des informations plus *qualitatives*, souvent issus de l'expertise, d'études ou d'enquêtes. Les enquêtes spécifiques constituent une méthode tout à fait intéressante pour cibler un questionnement. Les renseignements peuvent être obtenus soit par *entretien* (semi-)directif, soit à l'aide de *questionnaires* administrés *de visu*. Dans le cas des entretiens directifs, on cherche à appréhender une perception des phénomènes étudiés et, à partir d'un petit échantillon de personnes enquêtées, à dégager les profils types. L'avantage de cette approche est que l'on peut approfondir la connaissance de l'objet traité et le situer sociologiquement. On peut également déceler des signaux faibles révélateurs d'innovations. L'inconvénient, qui constitue une critique récurrente, est la faible représentativité des individus de l'échantillon, amenant à une grande difficulté de généralisation des résultats obtenus. On observe également un mélange problématique

entre objet et sujet, à cause de l'interaction forte entre la personne qui enquête et la personne qui est enquêtée, donnant ainsi un fort degré de liberté à l'interprétation et à la formalisation des connaissances obtenues. Cela dépend en fait de la façon dont l'entretien est mené, si les questions sont générales ou s'il y a une grille plus contraignante, si les questions portent sur des pratiques des comportements ou des intentions, des opinions. On connaît par ailleurs un certain nombre de biais cognitifs : les effets d'interdépendance entre les questions, le fait que la personne interrogée ne réponde pas pour soi, mais en général ou pour les autres, que les opinions soient en général positive à cause d'une forme de désirabilité sociale, les effets de mémoire, etc. Généralement, les entretiens qui aboutissent à des données très qualitatives dans le domaine des offres de transport et des pratiques de mobilité abordent des questions liées aux préférences dites *déclarées*.

Notre positionnement de géographe quantitativiste nous amène à utiliser dans notre étude en priorité des méthodes de recueil d'informations quantitatives ; cela toutefois en cherchant à conserver une forte réflexivité, compte tenu des remarques et critiques émises précédemment, et à éprouver la robustesse de nos indicateurs.

II.B.2. Les migrations alternantes issues du Recensement Général de la Population (INSEE)

En France, les déplacements domicile-travail (ainsi que les déplacements domicile-lieu d'étude ou école) sont notamment renseignés dans le recensement général de la population réalisé par l'INSEE. Les fichiers de détails des « Mobilités professionnelles »[3] fournissent pour chaque individu interrogé, la commune de résidence (supposée être le lieu origine du déplacement), le lieu de travail (supposé être le lieu de destination) ainsi que le mode de transport principal déclaré. Cette base de données est mise à jour de manière annuelle depuis 2006 ; à ce jour les données les plus récentes datent de 2015. Bien que l'établissement de séries temporelles soit faisable, notons qu'il n'est pas possible de suivre un même individu dans le temps, car il n'existe pas d'identifiant commun entre les différentes années.

À partir de ces données individuelles, des matrices d'échange Origine-Destination peuvent être constituées. En fonctions des informations retenues, la résolution spatiale peut aller du carreau[4], aux EPCI, en passant par le niveau communal notamment. Les identifiants communaux permettent notamment de rattacher les lieux d'origine et de destination à la nomenclature des aires urbaines, pour analyser ensuite les flux selon ce découpage fonctionnel de l'espace géographique, qui distingue des espaces plus ou moins denses, selon leur relation à une ou des villes-centres. Ces données géolocalisées permettent un certain nombre d'appariements avec des données contextuelles utiles à l'analyse des flux (par exemple des taux de chômage localisé, des données d'accessibilité, etc.). Elles permettent également la segmentation des matrices de flux par mode de transport, ce qui est utile pour la calibration des modèles (notamment des modèles gravitaires, inclus ou non dans une démarche de modélisation en 4 étapes).

L'ensemble de ces données est disponible par simple téléchargement, sans autre formalité. Si leur accès est simple, leur manipulation reste délicate, notamment en raison de la taille des fichiers, et suppose une bonne expertise dans le domaine de l'analyse de données (géographiques).

3 https://www.insee.fr/fr/information/2383243

4 https://www.insee.fr/fr/statistiques/4176305

II.B.3. Comptages routiers et données de trafic

Les données de comptage routier correspondent à des informations recueillies sur des durées et des étendues variables par des capteurs localisés sur la voirie. Elles permettent de connaître la *charge* (quantité de passages) des tronçons de route et d'estimer des modèles probabilistes de flux. On connaît le nombre et, *grosso modo*, les types de véhicules qui passent à un endroit donné, mais on ne sait pas d'où ils viennent, ni où ils vont. En lien avec la théorie des graphes, ce type de mesures peut être utile, si elles sont comparées à des calculs théoriques de centralité intermédiaire (indicateur issu de la théorie des graphes), c'est-à-dire permettant d'identifier quel tronçon de route est particulièrement attracteur, de par sa topologie (sa position relative par rapport aux autres tronçons de route) dans l'ensemble du réseau routier. Ces tronçons peuvent d'ailleurs être identifiés comme autant de points de sensibilité structurelle du réseau impactant sa résilience. Dans le cas de l'estimation des flux, on peut utiliser ces informations pour savoir *a priori*, à l'aide de calculs de plus court chemin, quels seraient, en principe, les cheminements les plus usités.

Notons par ailleurs l'existence de données de trafic en temps réel, construites à partir des observations dynamiques des flux et des historiques statistiques de la charge sur le réseau (congestion). Des entreprises comme Google ou Waze, ou Géoconcept les utilisent, voire les commercialisent. Leur utilité est plutôt le monitoring et l'optimisation dynamique des transports.

II.B.4. Les Enquêtes Nationales sur les Transports et les Déplacements (ENTD)

Depuis 1967, plusieurs enquêtes portant sur les transports et les comportements de mobilité des français ont été réalisés par le ministère des transports à travers l'INSEE et l'IFSTTAR (1967, 1974, 1982, 1994, 2008, 2019)[5]. Il s'agit d'enquêtes représentatives au niveau national, effectuées sur un échantillon important de répondants : par exemple pour l'enquête 2008, plus de 20 000 ménages ont été interrogés. Bien que cette échantillon soit conséquent, il ne permet pas d'envisager des analyses géographiques à des échelles fines (cette réserve varie selon les régions, car l'échantillon a été augmenté pour certaines régions). L'intérêt de ces enquêtes repose notamment sur le grand nombre de variables disponibles, la représentativité de l'échantillon au niveau national, ainsi que l'existence d'une série temporelle longue. Si elles ne constituent pas nécessairement la meilleure base pour une analyse des flux, elles représentent une source d'information précieuse en ce qui concerne les comportements (choix modal, budgets-temps, etc.) et le parc automobile et sont en cela très complémentaires des matrices origines-destinations issues du recensement de l'INSEE.

II.B.5. Enquêtes Ménages Déplacements (EMD)

Le détail des comportements de mobilité sont renseignés, en France, avec une certaine régularité. Les enquêtes Ménages Déplacements sont produites, sur des périmètres variables, depuis le milieu des années 70. Elles se basent sur un protocole reproductible, appelé « standard Certu », qui est régulièrement mis à jour (Fig. 13). Elles sont aujourd'hui commanditées et conduites par les collectivités territoriales avec l'appui méthodologique du Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA). Elles sont réalisées selon une périodicité d'environ dix ans, mais ne présentent pas de caractère synchronisé sur l'ensemble du territoire national et sont rarement menées conjointement, même aux échelles régionales.

5 https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/enquete-nationale-transports-et-deplacements-entd-2008

Ces enquêtes ont des périmètres qui peuvent évoluer dans le temps. Ils s'étendent au minimum sur le périmètre des transports urbains, mais sont souvent plus étendus. Ils correspondent parfois à des limites fonctionnelles (aires urbaines, bassins de vie), parfois à des limites administratives (départementales). En conséquence, les Enquêtes Ménages Déplacement ne couvrent pas l'ensemble du territoire national, se concentrant principalement sur les grandes agglomérations (carte de la Fig. 13). Elles ont cependant été élargies, depuis les années 2000, à des agglomérations de taille moyenne avec une méthodologie adaptée. Les enquêtes de déplacements des villes moyennes ont ainsi été mises en place pour les agglomérations dont le pôle urbain n'excède pas 100 000 habitants. De même, le CERTU a défini une méthode adaptée pour des territoires plus larges à travers les enquêtes déplacements des grands territoires, visant à associer au sein d'un même protocole des territoires densément peuplés, des territoires péri-urbains et des territoires ruraux.

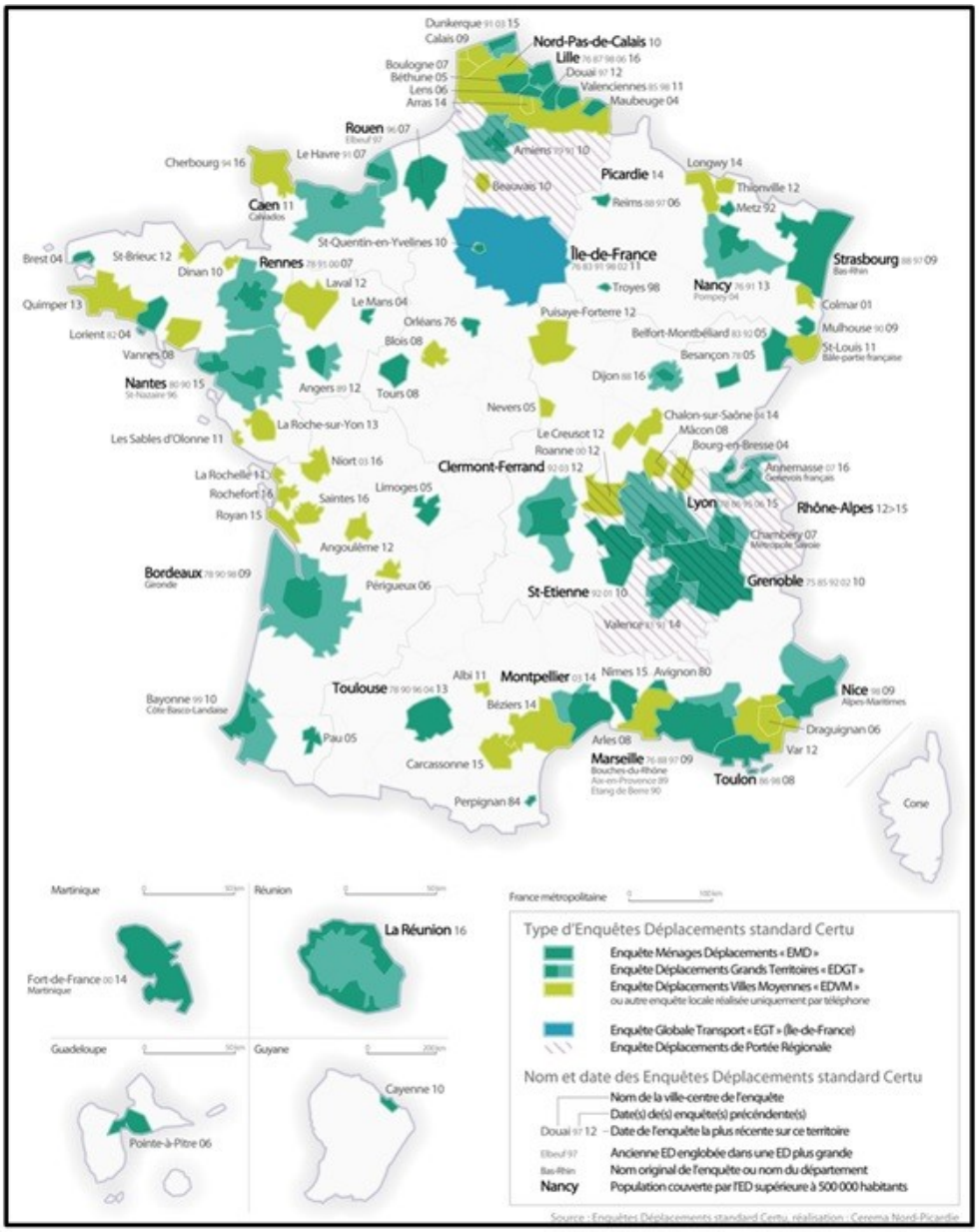

Figure 13. Carte de couverture des Enquêtes "Standard Cerema" en France métropolitaine et Outre-mer (Source : Cerema)

Les EMD sont basées sur un échantillonnage représentatif établi par secteur de tirage sur l'ensemble des ménages de chaque secteur. Les secteurs peuvent être agrégés en zones fines, correspondant en grande partie aux découpages par IRIS de l'INSEE. Il est ainsi possible d'apparier les données des EMD avec des données de recensement.

Ces enquêtes renseignent de manière exhaustive l'ensemble des déplacements des membres d'un même ménage sur une période hebdomadaire. Elles sont par ailleurs composées de plusieurs fichiers, renseignant les caractéristiques du ménage (logement, stationnement, motorisation…), les caractéristiques des individus (profil socio-démographique, motilité…), un descriptif détaillé de chaque déplacement, ainsi que différents modules complémentaires, pas toujours réalisés dans leur totalité : un fichier d'option standard, un spécifique sur les perceptions des questions de logements, un sur les mobilités de week-end, un sur la perception des différents modes de transport.

L'ensemble de ces données est disponible, sur demande écrite, auprès de l'ADISP (Archives de Données Issues de la Statistique Publique). Leur utilisation nécessite cependant un très gros travail de traitement préalable et implique un traitement spécifique pour les mettre en relation avec d'autres données spatialisées, dépendant de périmètres souvent différents.

II.B.6. Traces mobiles et réseaux sociaux

A l'heure d'Internet et des gros flux de données associées, les scientifiques et les aménageurs auraient tort de se priver de la richesse potentielle des données massives, pour peu que leur qualité soit vérifiée. Ces données peuvent être géographiques (données collaboratives type Open Street Map issues du « produsage ») ou venant des opérateurs de téléphonie mobile, ou partiellement localisées quand elles sont issues des réseaux sociaux (Facebook, Twitter, etc.). Elles peuvent être exhaustives ou le résultat d'échantillonnages aléatoires ou systématiques. Leur qualité est très variable. On note par exemple une nette amélioration de la précision et de la couverture des données géographiques collaboratives. A tel point que ces informations constituent aujourd'hui une alternative crédible aux bases de données géographiques des opérateurs classiques (IGN, Ivanovic, 2018), qui d'ailleurs se sont lancés eux aussi dans la collecte de données en crowdsourcing.

D'un autre côté, les données issues d'opérateurs privés tels que les GAFA ou les opérateurs de téléphonie, sont largement sujettes à caution, à la fois en termes de qualité (précision, complétude, validité) et de représentativité statistique. Il paraît aujourd'hui extrêmement risqué de se baser sur ce type d'information pour généraliser des comportements de mobilité. En effet, la qualité intrinsèque des mesures n'est pas fournie par les producteurs de ces informations. Un traitement que nous avons réalisé sur les données de Twitter sur les attentats lors de l'épisode terroriste de « Je suis Charlie » et un autre sur des traces massives de téléphones d'abonnés d'Orange dans le cadre du challenge D4D au Sénégal, montrent la non représentativité des premières et le caractère très bruité des secondes, notamment en termes de précision spatiale et de complétude temporelle.

II.B.7. Observation de services

Les opérateurs de services de transport réalisent un suivi régulier et complet de leurs clients (enquête de satisfaction), afin d'améliorer l'offre. Dans le cadre des délégations de service public, ces informations sont disponibles pour les autorités organisatrices de transport qui peuvent constater, ou non, la progression des transports publics, et les ajuster à la demande et à l'évolution des pratiques de mobilité. Si ces observations restent spécifiques à un territoire et à un service, elles n'en demeurent pas moins très riches d'informations et de bonne qualité. Elles constituent ainsi une

ressource tout à fait intéressante et valide pour appréhender les mobilités sur un territoire. À noter qu'elles associent souvent une approche quantitative et qualitative, via des enquêtes ciblées. Cela offre ainsi la possibilité d'une certaine généralisation et de détection de nouvelles pratiques potentielles exprimées par les clients.

II.B.8. Tableau comparatif des principales données pour analyser les flux

Toutes les données présentées ici sont localisables dans des systèmes de projection géographique. Elles peuvent être géocodées à la commune, à la route, voire potentiellement à l'adresse. Elles possèdent des caractéristiques propres et leur combinaison peut amener à une vision multi-échelle relativement complète de la mobilité sur le territoire (Tableau 5).

Intitulé	Exhaustivité	Coût	Attribut	Propriété	Granularité	Usage principal	Qualité
Insee « mobilités professionnelles »	Exhaustif jusqu'en 1999, puis échantillon au quart	Elevé pour collecte, gratuit à l'usage	Préférence révélée Origine destination travail études	Libre	Individus, iris, communes	Régional, national (uniformité)	Bonne représentativité
Enquêtes Nationales sur les Transports et les Déplacements (ENTD)	Non, échantillon	Elevé pour collecte, gratuit à l'usage	Individus, ménages, équipements, trajets	Accès sur demande	Individus, ménages	National	Représentativité nationalité, pas d'exploitation possibles à des échelles fines
Enquête Ménage Déplacements	Non exhaustif, mais représentatif sur les aires concernées	Elevé	Ménage, individus, déplacement	Accès sur demande	Individus, zone de tirage	Local	Bonne représentativité
Comptage flux et trafic	Oui sur période et lieux donnés	Faible (matériel)	Mesures, fréquences	Publique non libre, partenariat	Tronçon routier	Local (département)	Exhaustif mais locale et peu généralisable
Traces mobiles et réseaux sociaux	Partielle, big data non validées	Intégré au service, élevé pour l'usager et en traitement	Pas d'attributs sociaux Trace géométrique observée	Privée, accès variable sur demande	Série de points, couverture antennes ou précision GPS	Potentiel national (données massives)	En quantité, mais peu précis et peu représentatif
Observation de service	Normalement oui (opérateur)	Faible, suivi marketing	Possible profils utilisateurs Préférences révélées	Privée RGPD-CNIL	Variable selon service et clients	Local, évaluation et suivi	Non généralisable mais détaillé
Enquête quantitative	Non mais on vise échantillon représentatif	Assez élevé	Possible profils utilisateurs Préférences déclarées	Variable RGPD-CNIL	Variable (possible à l'adresse)	Local, recherche de tendances et lois	Potentiellement généralisable, non exhaustif
Entretiens qualitatifs	Non	Variable	Possible profils-types Préférences déclarées	Variable RGPD-CNIL	Variable (possible à l'adresse)	Local, recherche de signaux faibles, innovations	Non généralisable mais très détaillé

Tableau 5. Principales sources de données pour analyser les flux à une échelle régionale

II.C. Modèles pertinents en géographie pour l'estimation spatialisée des flux personnes

II.C.1. Modèles gravitaires

Le modèle gravitaire découle de la propriété très générale selon laquelle deux masses s'attirent ou entretiennent des échanges privilégiés d'autant plus fortement qu'elles sont importantes et proches. Waldo Tobler la définit en 1970 comme la première loi de la géographie à savoir *« tout interagit avec tous, mais deux objets qui sont proches ont davantage de chances d'interagir que deux objets qui sont éloignés »*. Cette propriété se décline dans l'espace, qu'il soit intersidéral ou géographique. Elle impacte directement les flux entre les masses, et donc, à l'échelle géographique qui nous occupe, les mobilités entre les villes. Évidemment, les formes de cette interaction et de cette attractivité sont largement différentes selon le contexte considéré. Cela peut en effet se traduire par une force d'attraction, comme par des flux entre les masses.

Plus particulièrement, dans l'espace géographique apparaissent plusieurs éléments : la friction, c'est à dire la difficulté à se déplacer, qui est différenciée à cause de l'anisotropie spatiale (fait que les territoires ne sont pas homogènes, dans leur topographie et leur population résidente), mais également à cause de la non symétrie des échanges entre deux masses équivalentes (des villes ou des stations de service de transport, par exemple) et de l'effet de la topologie d'un ensemble de masses en interactions concurrentielles, constituant un réseau particulièrement complexe à appréhender. Autrement dit, le modèle gravitaire peut être utilisé pour estimer les mobilités, via l'analyse des couples de masses en interaction, ou comme un système d'interactions entre un ensemble de masses. Dans le cas des flux terrestres de personnes et des migrations individuelles à l'échelle d'une région, le support de la mobilité est le réseau viaire et les lieux d'attractivité sont représentés par les villes. L'espace est découpé en communes ou en IRIS de l'INSEE, dont le poids est quantifié par leur population.

Auteur	Objectif	Formule	Masses M_i et M_j	Distance (d_{ij}>0)	Commentaire
Tobler	Estimation de flux pendulaires	$F_{ij} = \frac{1}{d_{ij}^{\gamma}}$	Produit de masses ; asymétrique si exposants ; effet positif	Effet négatif	Calcul log-linéaire ; problème de division par 0, pas d'unité
Reilly	Détermination de bassin d'attraction	$B_{ij} = \frac{d_{ij}}{1+\sqrt{\frac{M_j}{M_i}}}$	Rappot de masse j/i ; effet inverse	Au numérateur ; effet positif car calcul de bassin et frontière	Pas de calcul de flux, mais de bassin
Newton	Estimation de flux pendulaires	$F_{ij} = k\frac{M_i^{\alpha} M_j^{\beta}}{d_{ij}^{\gamma}}$	Produit de masses ; asymétrique si exposants différents ; effet positif	Effet négatif	Calcul des élasticités avec modèle loglinéaire, pas d'unité, problème de division par 0
Wilson	Estimation de flux migratoires	$F_{ij} = aM_i\frac{M_j f(C_{ij})}{\sum_{i=1}^{k} M_k f(C_{ik})}$	Produit de masses normalisé ; effet positif	Effet indirect (à travers une fonction de coût ou friction F) ; effet négatif	Introduction indirecte des opportunités interposées
Stouffer	Estimation de flux par comptage des occasions interposées dans un rayon R	$F_{ij} = -a.log(f(s)) + c$	À travers f(s) ; s= nombre cumulé d'occasions interposées X dans le cercle de rayon R	Effet négatif	Pas d'explicitation de l'effet de la distance ; occasions interposées

Tableau 6. Différents modèles gravitaires pour estimer les flux (Amarouch et al., 2019)

En géographie, deux grands types de modèles existent pour les approches gravitaires (cf. Tab. 6).

Modèles basés sur les interactions par couple d'entités

Le premier regroupe les modèles qui considèrent les interactions entre deux masses (par couple). A la base, la probabilité de partir d'une commune d'origine vers une commune de destination est directement liée aux deux masses en présence et à la distance qui les sépare. S'agissant du modèle d'attraction universelle de Newton, le flux établi entre la ville d'origine et la ville de destination est le produit de leurs populations respectives, divisé par la distance au carré, facteur important de réduction de l'interaction. Mais on voit rapidement un premier défaut d'un tel modèle. La relation entre les deux villes est symétrique, ce qui ne se vérifie pas dans l'espace géographique : par exemple des grandes villes offrent des quantités et des qualités élevées de formations, qui sont plus attractives pour les étudiants des petites villes n'en possédant pas. Un second défaut apparaît également dans la littérature (Nicot & Josselin, 2003) : l'impact de la distance sur les flux est variable. L'exposant de 2 affecté à la distance peut donc changer selon les flux qui sont considérés.

Suite à ces constats, les scientifiques ont adapté le modèle de Newton en le généralisant et en affectant aux masses (c'est-à-dire les populations urbaines), comme pour la distance, un exposant variable. En transformant en *log* les flux et la formule généralisé de Newton pour les estimer, on obtient une relation log-linéaire dans laquelle les poids de chaque critère considéré (distance, population de la commune d'origine, population de la commune de destination, etc.) représente une élasticité et identifie le poids de chaque critère dans l'explication des flux. Notons que ces coefficients peuvent être estimés par une régression multiple. Une autre difficulté réside dans l'unité résultant du calcul de flux, qui reste difficilement comparable avec les flux observés quantifiés, car elle dépend notamment du coefficient multiplicateur K, une constante à définir pour le modèle. Enfin, on notera la difficulté de prendre compte les courtes distances proches de zéro, qui souvent correspondent à des flux relativement importants et pourtant mathématiquement incalculables (soit une division par zéro est impossible, soit le chiffre au dénominateur est tellement petit que la valeur du flux estimé explose). Ainsi, pour évaluer si un modèle gravitaire de type Newton généralisé à la géographie a correctement estimé des flux, il convient de réaliser une régression linéaire entre les flux théoriques et les flux réels. Si l'on voit apparaître un nuage allongé qui peut être correctement résumé par une droite avec un bon coefficient de corrélation, c'est que le modèle a un relativement bon pouvoir prédictif.

En complément, le modèle de Reilly (1931), se basant également sur un couple de masses, permet de déterminer l'aire d'influence d'une ville par rapport une autre (modèle de Converse, 1951). Pour tous ces modèles, la distance est un facteur explicite clé et joue un rôle de frein ou de délimitation de frontière, lié aux différences d'attractivité, réciproques ou relatives, des villes en présence.

Modèle intégrant les occasions interposées

Le second groupe de modèles estime la relation entre des villes prises dans leur contexte. Ils diffèrent des précédents dans le sens où, d'une part, leur formule mathématique intègre les autres masses environnantes (concrètement, les villes qui se trouveraient dans le périmètre d'étude et d'influence), d'autre part, la distance est considérée comme une fonction clé dans la construction même du modèle. De fait, les modèles de Wilson et de Stouffer intègrent respectivement une forme de friction liée à la distance et aux interactions topologiques des villes avoisinantes, en prenant en compte l'environnement et les occasions interposées (c'est à dire les entités spatiales disposées dans un cercle d'un rayon d'influence donné autour de la ville d'origine). Ces villes proches ou dans le cercle

d'influence constituent potentiellement une source de captation de flux théoriques non négligeable, en fonction de l'organisation spatiale des masses et des populations en présence, qui déterminent leur attractivité. Plus précisément, on retrouve par exemple dans le modèle de Wilson une forte analogie avec le modèle gravitaire de Newton, à la différence près que le flux est centré sur la ville d'origine et redressé (normalisé) par l'ensemble des flux que cette même ville peut avoir avec les autres destinations possibles. De cette façon, plus les échanges d'une ville avec des villes environnantes sont grands, plus l'échange de celle-ci avec une ville en particulier est faible. Par ailleurs, une fonction de friction, riche et modulable, permet de calculer les contraintes de déplacement en fonction de la distance.

Comme nous le verrons, à partir du fichier des migrations alternantes intercommunales de l'INSEE de 2015 en PACA, nous avons réalisé un modèle gravitaire d'estimation des migrations alternantes, en utilisant les modèles de Newton et de Wilson généralisés.

II.C.2. Modèle à 4 étapes

C'est à l'origine pour faire face aux problèmes liés à la modélisation intra-urbaine qu'a été fait le choix de segmenter la modélisation du trafic. C'est ainsi que sont mis au point aux Etats-Unis d'Amérique, dans les années 50, les premiers modèles à quatre étapes. Cette modélisation marque une rupture par rapport aux modèles précédents, conçus originellement pour prévoir les réactions du trafic face à des projets d'infrastructure. Elle conserve une continuité par son but qui reste fortement orienté pour l'automobile et le calibrage des infrastructures de déplacement. En effet, jusqu'à une date récente, les modèles à quatre étapes ont pour fonction la reproduction et le développement du système automobile.

Le modèle à quatre étapes (Bonnel, 2008) a segmenté, pour des raisons pratiques, la modélisation de trafic en fonction des différentes problématiques rencontrées dans la simulation des déplacements de personnes. Ces différentes problématiques peuvent se résumer, du point de vue de l'individu mobile par les questions suivantes :

- Faut-il effectuer un déplacement ?
- Où se rendre ?
- Quel moyen de transport utiliser ?
- Quel itinéraire emprunter ?

auxquelles s'ajoute une question liée directement ou indirectement à ces différentes interrogations :

- A quelle heure effectuer mon déplacement ?

Ces questions correspondent chacune à des étapes de modélisation visant à comprendre et décrire le processus de choix de l'individu au cours de son déplacement.

La première étape consiste en une phase de génération qui a pour but de considérer, pour chaque zone géographique pré-établie, le nombre d'attractions et d'émissions. La deuxième étape correspond à la problématique de distribution qui répartit les émissions et attractions sur les destinations et origines correspondantes. La troisième étape répond à la question de la répartition modale et distribue le trafic entre les différents modes de transport. La quatrième étape, quant à elle, affecte les déplacements au réseau et fixe ainsi l'itinéraire emprunté.

Les modèles gravitaires, présentés précédemment, s'inscrivent par exemple dans l'étape de distribution de trafic. De même, la modélisation à quatre étape, dans son ensemble, sert, dans nombre de cas, à alimenter des modèles multi-agents ou des LUTI que nous présentons par la suite.

II.C.3. Les modèles d'interactions transport-urbanisme (LUTI)

La période récente a vu se développer, à la suite des modèles classiques en quatre étapes, des modèles d'interactions transport-urbanisme (en anglais *LUTI : Land Use Transport Interaction models*). La littérature sur les LUTI attribue, en général, aux recherches de Ira Lowry (1964) l'origine de cette approche centrée sur les interactions transport-urbanisme. Le modèle économique qu'il a développé est en effet l'un des premiers à intégrer, au sein d'un modèle mathématique formel, les réseaux de transport comme un facteur structurant du développement urbain. À partir de modèles gravitaires, permettant de modéliser la répartition des populations et des services, ce modèle place l'accessibilité au centre des logiques de répartition spatiale. Suite à ces travaux pionniers, d'autres modèles d'interaction transport-urbanisme ont été élaborés à partir de la logique des modèles de transport dits « en quatre étapes ».

C'est en particulier le cas des modèles TRANUS (De la Barra, 1989) ou MEPLAN (Echenique *et al.*, 1990). Développés dans une optique d'étude d'impact préalable à l'installation de nouvelles infrastructures de transport, ces modèles affectent les individus et les activités à des zones en fonction de matrices d'interactions et d'un frein de la distance. Une seconde génération de modèles s'appuie sur la théorie de la rente foncière urbaine de William Alonso (1964), Richard Muth (1969) et Edwin Mills (1972) – intégrant ainsi de manière plus explicite le marché foncier – ainsi que sur la théorie de l'utilité aléatoire de Daniel Mc Fadden (1980) – intégrant de ce fait les choix individuels (localisation résidentielle, choix modal ou encore choix des lieux d'activités). Il s'agit notamment des modèles METROSIM (Anas, 1982) ou MUSSA (Martinez, 1996). Par la suite, face notamment au problème de l'insuffisante finesse de la résolution spatiale de ces modèles, des travaux articulant microsimulation, Systèmes d'Information Géographique et modèles de choix discrets ont récemment vu le jour. C'est notamment le cas des modèles UrbanSim (Waddell, 2002), ILUMASS (Wagner et Wegener, 2007) ou encore MobiSim (Antoni et Vuidel, 2010). S'appuyant notamment sur le développement des systèmes multi-agents, ils permettent d'introduire explicitement les niveaux individuels et spatiaux (selon une résolution fine) dans des modèles de simulation intégrés.

Si elles sont séduisantes par leur nature systémique, multi-niveau et intégrative des différentes dimensions, ces approches de couplage de modèles, au sein d'une interaction globale transport-urbanisme, posent plusieurs difficultés majeures. La plus évidente réside sans doute dans l'important besoin de données de calibrage que supposent de tels modèles, si on les envisage dans une optique opérationnelle de simulation d'espaces réels. Une autre difficulté notable est celle du couplage de processus ayant des temporalités très différentes : le temps long pour l'évolution des réseaux et de l'occupation des sols ; des temporalités plus brèves pour les mobilités résidentielles ou les changements d'emploi ; des temporalités très rapides pour les déplacements quotidiens. Enfin, la plupart de ces modèles s'appuyant sur les modèles de transports en quatre étapes, ils conservent bien souvent des étapes préalables d'agrégation des individus.

II.C.4. Modèles multi-agents

Les systèmes multi-agents sont apparus il y a un peu plus de 20 ans (Ferber, 1997). Ils constituent aujourd'hui une approche intéressante d'exploration des données géographiques. Basés sur les concepts d'émergence et de distribution des connaissances, ils permettent de modéliser des

comportements centrés sur des individus et observer l'apparition de structures liées à l'agrégation et aux interactions de ces comportements. Par exemple, la fourmi ouvrière n'a pas de vision globale de la fourmilière mais, par un comportement normé et reproduit des milliers de fois, et grâce à une répartition organisée des taches au sein de la communauté, pour une même espèce et dans un même contexte, toutes les fourmilières construites suivent les mêmes règles et se ressemblent ainsi fortement. Par analogie, les structures des villes avec un centre, une périphérie et des zones moins denses associées à des structures de réseaux maillés ou en étoile, peuvent potentiellement émerger de comportements individuels ou des ménages en termes de stratégie de localisation résidentielle, d'accès aux aménités et au lieu de travail, de pratiques de mobilité conséquentes. La plupart de ces modèles nécessitent le recours à des agents *réactifs* (dont le comportement s'adapte en fonction de leur environnement) ou *cognitifs* (dans leur propre comportement, sont intégrées des capacités d'échanges et d'envoi d'information à l'ensemble des autres agents en interaction). On pressent immédiatement tout l'intérêt de ces modèles pour l'analyse des flux et des mobilités, ainsi que des structures urbaines qui peuvent en émerger : si les réseaux influencent les flux, en boucle rétro-active, les flux, par la localisation de la population qui les induit, orientent les politiques urbaines d'aménagement et de développement des réseaux.

C'est donc ce système complexe qui peut être avantageusement appréhendé par les systèmes multi-agents. Dans la littérature, on identifie plusieurs logiciels dédiés à la modélisation multi-agents (Netlogo, MatSim, Gamma…) dont certains ont des applications en modélisation et simulation urbaines : Mobisim, MIRO, TransCulturalTransportSimulator, etc. Leur mise en œuvre est assez lourde et nécessite beaucoup de ressources informatiques. On peut avoir à leur égard plusieurs stratégies : soit on modélise les systèmes de façon ultra simplifiée en appliquant le rasoir d'Okham (modèles de type *KISS* Keep it Simple Stupid ou *KIDS* Keep it Descriptive Stupid) de façon à en extraire la substantifique moelle des structures et des comportements de mobilité, soit on tend vers une exhaustivité et une précision au niveau des individus, dont on pense pouvoir maîtriser la complexité et la systémique. Dans tous les cas, les systèmes multi-agents constituent des outils riches et fructueux de modélisation, d'exploration et de compréhension des processus spatiaux, même si leur usage en termes d'aide à la décision n'est, en l'état actuel des connaissances en géographie et en aménagement, pas directement opérationnel.

II.C.5. Tableau comparatif des principaux modèles de flux

Le tableau 7 synthétise les conditions d'usage des modèles présentés ci-dessus.

Modèle	Mise en œuvre	Domaine	Données	Granularité	Opérationnalité
Gravitaire	Simple	Migration, mobilité	OD, matrice de distances	Partition spatiale, pôles	Variable
Modèle en 4 étapes	Lourde	Mobilité, flux	Enquête, flux agrégés, OD, parts modales, réseaux	Fine	Forte
LUTI	Complexe	Urbanisme, transport	Populations synthétiques, réseaux, OD, occupation du sol	Fine	Variable
Multi-agents	Souvent complexe	Comportements de mobilité, structures réticulaires	Pérégrinations, activités	Agents de différents niveaux (individu, espace)	Faible, simulations, émergence de formes

Tableau 7. Tableau comparatif des principaux modèles d'estimation des flux et de leurs conditions d'usage

II.D. Méthodes et indicateurs robustes prospectifs

II.D.1. Analyse multicritère robuste

Approche robuste par rang, méthodes « objectives »

La *robustesse* est, dans sa définition la plus large, la capacité d'un estimateur ou d'une estimation à rester fiable, dans des conditions d'usage ou de traitement des données qui dévient sensiblement du modèle théorique sous-jacent, ou qui sont entachées d'une certaine erreur, de variabilité maîtrisable (Josselin, 2010).

Dans l'analyse multicritère des scénarios, on a souvent coutume d'embrasser un certain nombre de critères, de quantifier leur importance dans le scénario en question (score) et de pondérer chacun d'entre eux selon leur importance dans la décision ou dans le choix final. Par exemple, l'approche la plus utilisée pour valider un scénario ou pour trouver, parmi un ensemble de sites candidats, le meilleur compte tenu d'un ensemble d'objectifs, est la somme des valeurs de chaque critère pondérée par leur importance respective. Cette valeur numérique finale permet de classer les résultats. Elle est simple à comprendre et à mettre en œuvre, notamment par les décideurs et les parties prenantes de l'aménagement. Mais elle reste très déterministe et sensible aux valeurs extrêmes des scores des paramètres. En analyse multicritères, on peut généraliser cette approche par la théorie de l'utilité des attributs multiples (MAUT, Multiple Attributes Utility Theory, Keeney & Raiffa, 1976), qui peut soit additionner les critères, soient les multiplier, la difficulté résidant toujours dans l'estimation de l'utilité.

Il existe en fait d'autres méthodes, moins déterministes, car basées sur des rangs, qui produisent des résultats plus robustes. Ces méthodes peuvent être employées à plusieurs niveaux dans le processus de construction de scénario dans une démarche prospective. Un premier niveau permet d'identifier quels sont les critères déterminants dans la construction d'un scénario donné. Par exemple, il s'agit d'accompagner tout le processus d'échanges et de discussion autour des enjeux territoriaux dans le cadre du scénario, par des méthodes quantitatives de validation des préférences explicitées par chacun des acteurs participant à la réunion de concertation. Un second niveau correspond à la combinaison des critères à considérer, une fois que leur liste a été établie. Dans ce cas, les scénarios (par exemple les cinq produits par la Mission Prospective de la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur) sont en quelque sorte des candidats à une politique que vise à mettre en œuvre la région. Ils sont donc en concurrence et chacun d'entre eux est décrit par un vecteur de valeurs quantifiant un ensemble de critères provilégiés dans le cadre du scénario choisi.

Au-delà de la classique et éprouvée méthode de somme pondérée, on peut baser le choix des critères ou des scénarios sur une approche les considérant par rang ou par couple. Un niveau introductif de cette approche réside dans le front de Pareto. Imaginons que nous ayons une série de scénarios et que nous ayons à choisir parmi eux le meilleur selon deux critères : la qualité de vie des personnes et l'impact positif environnemental pour la région. On peut alors positionner les scénarios dans un graphique (un nuage de points) croisant ces deux critères. On verra alors que certains scénarios ne sont bons sur aucun des deux critères : ils sont alors éliminés. Généralement il n'y en a aucun qui est bon sur les deux critères et qui surpasse les autres. En revanche, il peut y avoir des scénarios qui sont les meilleurs seulement sur un des deux critères. Ils sont donc équivalents en termes d'optimalité et constituent un « front » de solutions optimales. Par exemple, un scénario bas carbone maximise l'impact positif, alors qu'un scénario Smart City pourrait le mieux contribuer à la

qualité de vie. Ils sont donc équivalents du point de vue de Pareto, mais correspondent à des formes d'optimisation opposées.

Prenons l'exemple d'un ensemble de scénarios à classer. Il existe dans la littérature et dans les outils disponibles des méthodes aptes à prendre en compte ce type d'approches (Gourion & Josselin, 2012). La première est la méthode de Borda. Elle consiste à déterminer les rangs des scénarios selon un ensemble de critères. Le scénario qui « gagne » est celui qui possède la somme maximale des rangs, c'est-à-dire celui qui en fréquence a été le mieux classé face à ses concurrents. Plus élaboré, la méthode de Condorcet fonctionne par analyse des duels (c'est-à-dire dans notre cas des confrontations entre deux scénarios selon certains critères). Le scénario qui est le gagnant est celui qui a gagné le plus de duels. Toutefois, ces approches ne considèrent pas la pondération des critères. La méthode Électre (Roy, 1985) affine le classement par rang en le pondérant par l'importance des critères. Le scénario gagnant est alors celui qui a gagné plus d'un certain pourcentage de duels, et en a perdu le moins possible, compte tenu des poids des critères (méthode par rang pondéré). C'est celui qui « surclasse » les autres. En complément, la méthode Prométhée (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) évalue des actions de décision par paires selon plusieurs critères, et permet de visualiser les degrés de préférence, les conflits et les synergies entre ces critères.

Méthodes participatives « subjectives »

Notons que toutes ces méthodes sont plutôt objectives et quantitatives, c'est-à-dire qu'elles reposent sur une évaluation quantifiée des critères et de leur poids, qui en théorie sont partagées par les acteurs. Mais la réalité est souvent toute autre. Et, dans ce contexte, l'analyse multicritères peut également servir à mettre en évidence des points de vues marqués et fortement subjectifs (tout comme les scénarios produits par la mission prospective le sont). Il devient alors possible, à partir d'une base commune de critères identifiés collectivement, de pondérer de manière « personnelle » ces critères, de façon à orienter les scénarios pour mieux les défendre. Par exemple, un écologiste préférera un scénario environnemental, un entrepreneur un scénario économique, un élu un scénario visant à réduire les dépenses publiques, etc. La méthode de processus hiérarchique analytique (AHP, Analytic Hierarchy Process, Saaty, 1980) permet ce travail. Traduite géographiquement, on peut même obtenir une mise en évidence des zones d'intérêt particulier, des zones de conflit, ou des zones d'aptitude et de compromis. Chacune de ces visions sera mise en exergue via l'explicitation d'une matrice de préférences entre les critères retenus. Elle constitue une réelle méthode d'animation multicritère et peut naturellement s'intégrer dans les nouvelles approches didactiques et participatives, tel que les jeux sérieux.

Tableau comparatif des analyses multi-critères

En guise de synthèse intermédiaire, nous proposons dans le tableau 8 une comparaison des différentes méthodes présentées qui évalue si celles-ci sont robustes, déterministes, participatives, et, dans quelle mesure, applicables.

Approche	Robuste ?	Déterministe ?	Participative ?	Applicable ?
Somme pondérée	Non car sensible aux valeurs extrêmes	Oui	Non, sauf si fixation concertée des poids	Très facilement
MAUT	Peu robuste, mais basée sur des utilités	Oui	Non, sauf si fixation concertée des utilités	Facilement
Borda	Méthodes par rang assez robuste	Non	Non	Assez facilement
Condorcet	Méthode par duels robuste	Non	Non	Assez facilement
Electre	Méthode par duels, robuste avec intégration des poids	Non	Plus ou moins, à travers les poids concertés et les seuils de surclassement	Assez complexe
Prométhée	Relativement robuste	Plus ou moins, mais intégration du surclassement	Plus ou moins, par les conflits et les synergies	Très complexe
AHP	Sans objet	Non	Totalement	Assez complexe

Tableau 8. tableau comparatif des analyses multicritères potentiellement utilisables pour les scénarios régionaux

II.D.2. Indicateurs d'incertitude et de sensibilité des cartes et des résultats

Méta information, cartographique duale

Dans tout processus d'analyse ou de modélisation, il est possible de produire une méta information qui donne des indications précieuses sur les informations ou les connaissances manipulées ou générées. Dans les bases de données, on parle de métadonnées. Il existe ainsi des formes duales d'information qui renseignent avantageusement les résultats obtenus via un traitement des données. Ces informations sont de complexité variable. Elles s'appliquent en géographie comme dans d'autres disciplines. Leur particularité ici est que l'on peut les cartographier, si elles sont localisables précisément.

Par exemple, certains auteurs (Arnaud & Davoine, 2009) proposent des *indicateurs d'incertitude* associée aux cartes de risque. Il peut s'agir d'indicateurs statistiques (des variances par exemple, montrant la variabilité des mesures en un point donné) ou d'évaluation des perceptions sur ce territoire (vulnérabilité estimée par la population lors d'enquêtes). En cartographie, on analyse fréquemment les *résidus*, afin d'expliquer géographiquement les raisons des écarts au modèle théorique moyen. En statistiques spatiales, on peut représenter des *intervalles de confiance*, construits à partir des échantillons manipulés. Il s'agit d'un intervalle de valeurs autour de

l'estimation, dans lequel il est très probable que la valeur réelle se trouve effectivement, avec un risque statistique de se tromper, fixé et assumé par l'analyste ou le décideur.

Il est important de savoir qu'avec la loi des grands nombres, pour peu qu'un échantillon soit effectivement représentatif d'une population, les valeurs statistiques de référence (moyenne, médiane, écart type) convergent rapidement. D'où l'impérieuse nécessité d'obtenir des échantillons à l'image des populations qu'il représentent, afin de réduire le nombre d'individus recensés ou enquêtés. Ces méthodes permettent de donner un degré de confiance à l'information mesurée et constituent en soi un outil tout à fait intéressant pour les décideurs, malgré qu'ils aient tendance parfois à déstabiliser le processus de décision et sortir le décideur de sa zone de confort. A noter que l'incertitude affectant l'information peut provenir des données et des traitements eux-même, ou de la validité accordée à ceux-ci par les utilisateurs. Elle peut également être *aléatoire* (liée à la variabilité interne du phénomène observé) ou *épistémique* (due à un manque de connaissance) (Batton-Hubert et al., 2019). Différents aspects et propositions de méthode de prise en compte de l'incertitude dans les indicateurs prospectifs régionaux ont été explorées et proposées lors d'une semaine de travail sur le sujet avec les étudiants de Master 2 de géographie à Avignon (cf. Annexes). Suite à la définition des scénarios prospectifs de mobilité au niveau régional, une approche pourrait consister à réaliser un travail distancié rétrospectif sur le processus de construction de ces scénarios, afin d'essayer d'affecter à ceux-ci des niveaux d'incertitude aléatoire ou épistémique.

Analyse de sensibilité

Un second grand volet méthodologique mobilisable pour renforcer la fiabilité de l'analyse des données de mobilité réside dans l'analyse de leur sensibilité. Cet aspect rejoint les préoccupations de robustesse en analyse spatiale (Josselin, 2010). Dans le domaine de l'analyse de sensibilité, on utilise en statistiques trois grands types de méthodes. Le principe est à peu près toujours le même : on modifie aléatoirement, ou de manière orientée, le jeu de données manipulées et on observe l'influence de ce changement sur l'indicateur produit.

Une première manière de procéder est de construire ce que l'on appelle une « *fonction d'influence* ». Cette fonction dessine la variation de l'indicateur suite à l'arrivée dans les données d'une information quantifiée qui passe d'une valeur minimale à une valeur maximale et traverse le jeu de données existant. Si la fonction d'influence est stable, cela veut dire que l'arrivée de cette nouvelle information n'a pas grevé la qualité de l'indicateur. Si ce n'est pas le cas, et que la courbe obtenue montre un changement notable, c'est que l'indicateur n'est pas robuste, car il sur-réagit et est très sensible à l'arrivée d'une donnée dans le jeu de initial.

Une autre approche très liée à la précédente, consiste à modifier légèrement les individus-aléatoirement dans le jeu de données observées jusqu'à ce que la valeur de l'indicateur soit modifié. Ce seuil alors identifié correspond à ce que l'on appelle le *point d'effondrement*, c'est-à-dire le moment, représenté par la quantité maximale d'individus modifiables dans les données, où le modèle collapse, bifurque ou perd sa propriété de résilience et produit une information radicalement différente, suite à un changement de quelques-unes des données qu'il représente.

Enfin, la troisième approche est une *analyse systématique statistique* (*robustness of efficiency*) du comportement de l'indicateur fasse à une série d'échantillons variés, mais dont nous connaissons statistiquement les propriétés (distributions connues, telles que de Gauss, de Cauchy, etc.). Si un scénario prospectif se base sur un corpus de données en particulier, on peut évaluer sa solidité en appliquant cette méthode systématique. Dans la même fibre, on peut déstructurer les données par

des méthodes de ré-échantillonnage ou de permutation (type Monte-Carlo) et observer les résultats, de façon à voir le comportement de l'indicateur prospectif face au même jeu de données, mais ces dernières étant cette fois-ci mélangées (c'est-à-dire que toutes les relations statistiques entre les variables qui le décrivent sont supprimées).

Par la suite, nous présenterons comment nous avons ajusté le modèle gravitaire des flux domicile travail quotidiens en PACA par une analyse de sensibilité.

II.E. Prospective en PACA

II.E.1. Les transports flexibles et partagés dans les scénarios de la Mission Prospective PACA

La mission prospective de la région Provence Alpes Côte d'Azur a défini cinq scénarios typés d'évolution de son territoire. Ils sont le fruit de plusieurs ateliers, dont certains étaient des réunions d'échanges et de réflexion sur quatre sites, Marseille, Avignon, Sophia-Antipolis et Digne les Bains, représentant respectivement les espaces provençal, rhodanien, littoral et alpin. Ces scénarios sont décrits dans le fascicule « *Quels transports de voyageurs et de marchandises et quelles pratiques de mobilité en Provence-Alpes-Côte-d'Azur aux horizons 2030 et 2050 ?* ». Nous en reprenons les termes et les grandes lignes ci-dessous.

Un scénario catastrophiste

Un des scénarios se dénomme « Crises sociales et environnementales ». Il s'agit du scénario considéré comme le plus fortement probable, voire tendanciel. On parle d'effondrement et on assiste au recul de l'État-providence. Dans ce scénario, la région Provence Alpes Côte d'Azur est traversée par des crises sociales, exacerbées par les phénomènes de dérèglement climatique. Les seniors, dominants en nombre, vivent dans des quartiers fermés sécurisés (tel que Sun City en Arizona aux Etats-Unis). Pour les jeunes, ce scénario est synonyme de difficultés de logement et d'instabilité dans l'emploi, en d'autres termes une vie dans la précarité. Les centres-villes continuent à se paupériser. On assiste à des migrations très importantes de population (misère économique, refuge climatique, conflits armés…). La population continue à se concentrer en zone littorale, générant une hyper urbanisation. Le climat qui s'ensuit est marqué par une dégradation sociale et de l'image de marque de la région. L'économie est également affectée. En termes de transport, les phénomènes de ségrégation et de fermeture de certains territoires rendent les déplacements et l'accès aux transports très compliqués.

Pour ce scénario, il est difficile d'envisager la place des modes de transport alternatifs, flexibles et partagés. En effet, il redessine une carte de l'accessibilité spatiale très délicate à appréhender. On pourrait dans l'absolu considérer que les cinq modes puissent se développer à niveau et à vitesse équivalente, que l'impact sur leur développement pourrait surtout avoir lieu sur leur emprise spatiale respective, selon les milieux considérés (rural, périurbain, urbain) ou les quartiers dans les zones urbanisées. La privatisation des accès urbains peut aussi avoir un effet important sur la ségrégation socio-spatiale et sur les formes et les moyens d'accessibilité, via le réseau de transport.

Deux scénarios ancrés dans l'économie

Deux autres scénarios sont davantage orientés vers le développement économique, notamment des technologies numériques.

Ainsi, le second scénario, « Business as a model », imagine la poursuite de la croissance et de la rentabilité économiques dans un système capitaliste classique, où l'activité tire le développement et où la sphère publique reste en retrait. On développe toutes les filières d'excellence, tout en maintenant les filières classiques. Les activités continuent de s'implanter en périphérie des métropoles. Des investissements massifs sont réalisés sur les pôles d'échange avec des partenariats public-privé, augmentant d'autant les flux logistiques. Le développement du numérique et des technologies associées permet l'apparition de nouvelles filières dans les énergies et accompagne la transition. Le poids des métropoles, où se trouve la majorité de l'activité économique, s'est renforcé et l'accessibilité d'un territoire à un autre est très contrastée. En mobilité, les plates-formes de services de mobilité privées sont largement développées, préférentiellement dans les zones territoriales les plus denses, là où se trouve majoritairement la population. Celle-ci s'approprie de manière très différente l'offre proposée selon ses capacités financière et sociale. Ce scénario porte en lui une contradiction forte, puisqu'il a été jugé pendant les ateliers à la fois comme peu désirable, mais très probable, compte tenu des moyens financiers publics en baisse.

Le troisième scénario, estampillé « Smart territoire » prône l'arrivée en masse et la généralisation des nouvelles technologies qui s'imposent dans la fabrique urbaine, dans les modes de vie et dans l'offre de mobilité. Ces technologies sont innovantes et participent au développement des services à la personne, notamment à destination des seniors. Il s'agit d'un virage très High Tech qui promet la sécurité offerte par un territoire connecté. Les GAFA y sont omniprésents. Les capteurs sont généralisés dans l'espace public et l'environnement est surveillé en permanence pour anticiper et gérer les crises, notamment dans le cadre des aléas climatiques et de leurs impacts. L'intelligence artificielle et l'économie des plates-formes ont pris le dessus sur les collectivités, les opérateurs de transport et les constructeurs. On assiste à la profusion de plates-formes de services de mobilité, ainsi qu'au développement des drones, des véhicules autonomes, etc. Ces nouvelles avancées amènent, par ricochet, à une réduction des services de transport public. En parallèle, on assiste à une mobilité inversée au bénéfice des territoires peu denses. Le télétravail et l'accès distant à tous les services et aux biens de consommation permettent une nouvelle qualité de vie. La population s'est progressivement appropriée les nouvelles technologies. Pour beaucoup de participants, ce scénario a été décrit comme très probable, puisque de nombreuses avancées technologiques ont déjà eu lieu. Il est toutefois perçu comme angoissant à cause de la montée de l'individualisme et de destruction potentielle des liens sociaux, tout en laissant entrevoir une amélioration potentielle du confort de vie et un meilleur accès à la mobilité choisie.

A ces deux scénarios construits sur le développement économique, nous pouvons potentiellement associer le développement des véhicules autonomes personnels et d'autopartage, ainsi que les véhicules de tourisme avec chauffeur. En effet, ceux-ci se rapprochent le plus de l'usage de la voiture personnelle, avec sa relation particulièrement individualisée, tout en combinant un service de mise à disposition de véhicules, par un tiers ou par l'entreprise. Dans ces deux scénarios, nul n'est besoin de regrouper les passagers, selon une fonction d'utilité économique qui, de toute façon, s'oppose à la mutualisation des moyens, puisqu'elle vise une croissance des services de transport. En revanche, l'offre de transport flexible pourrait être démultipliée, notamment dans les centres urbains pour améliorer potentiellement le caractère inclusif de la ville.

Deux scénarios orientés vers l'environnement

Un quatrième scénario a été baptisé « Proximité ». Il est apparu assez peu probable lors des ateliers et supposerait des ruptures majeures, notamment sociétales. En 2050, « les citoyens auront opéré des changements majeurs dans leur mode de vie, afin de répondre à leur aspiration à une vie plus apaisée et résiliente ». Ce scénario sous-tend une amélioration de la qualité de vie, via l'optimisation des déplacements, une meilleure conciliation du travail avec la vie de famille, mais aussi le rapprochement de la production et de la consommation des produits, afin de protéger les espaces naturels et agricoles et de réduire les empreintes écologiques. Il s'agit ici de renoncer à des technologies et aux services énergivores et consommateurs de ressources. Ce modèle se développerait sur l'ensemble de la région. Dans ce scénario, les circuits de mobilité de proximité sont structurants et organisent une logistique vertueuse sur le plan environnemental. On constate un engouement pour les modes actifs et partagés et une forte désaffection de la voiture. La part de la voiture individuelle dans les trajets quotidiens diminue y compris dans les périurbains. En parallèle, les politiques de mobilité sont durables et inclusives, via la promotion de la « démobilité » l'encouragement au covoiturage, le développement de l'offre de transport en commun, la prise en compte de la capacité de résilience des réseaux et des infrastructures dans les marchés publics, etc.

Un cinquième et dernier scénario (« Bas carbone »), relativement en phase avec le premier, vise à réduire drastiquement les émissions de carbone. Ce scénario imagine une accélération de la transition énergétique, via le développement d'un « mix énergétique ». Ce modèle suppose la mise en place de leviers d'action telles que la taxation et la réglementation, en appui au déploiement de la filière des nouvelles énergies. Les efforts de réduction d'émission de carbone et de consommation d'énergie concernent aussi le tourisme, l'économie, le fret international et les voyages en longue distance, qui diminuent sous l'effet de la taxation des énergies et des émissions. Les ménages sont accompagnés par la puissance publique, afin d'adopter massivement de nouveaux gestes en faveur de l'environnement. On assiste également à un renouvellement global de la flotte de véhicules de transport en commun qui roule à l'électricité ou au BioGnv. Ce scénario redessine le territoire en une myriade de pôles économiques de taille intermédiaire, facilitant les pratiques d'économie circulaire et des boucles énergétiques locales. Il invite également les collectivités à passer entre elles des contrats de réciprocité, notamment entre les zones rurales et urbaines, afin d'assurer une bonne (re)distribution des moyens sur tout le territoire. Lors des ateliers, il a été pointé le fait que l'autonomie énergétique ne doit pas se faire seulement à l'échelle régionale, mais également un niveau infra-régional.

Nous noterons que ces deux scénarios sont nettement en faveur des transports en commun, des cycles courts énergétiques et des modes de consommation locale. Ils prônent également une réduction de l'usage de la voiture personnelle et des longues distances parcourues. Ils paraissent donc globalement ouverts aux modes alternatifs que nous avons étudiés dans notre mission, pour peu que leur mise en place réponde aux enjeux qu'ils se sont fixés. Dans ce contexte, ces scénarios verraient, en complément d'un renforcement sensible des transports publics, la multiplication et la généralisation de services de transport à la demande et de covoiturage, puisque ceux-ci permettent de regrouper les voyageurs et de réaliser des économies de distances parcourues et de véhicules affrétés. Par ailleurs, les transports flexibles et partagés permettent de réaliser quasiment des services en porte-à-porte et sont donc des alternatives crédibles à l'usage de l'automobile personnelle. Dans une moindre mesure, on pourrait assister au développement des véhicules autonomes, de tourisme avec chauffeur ou d'auto partage, si ceux-ci mettent en œuvre des

stratégies effectives de regroupement de passagers et fonctionnent comme des navettes souples de transport en commun.

II.E.2. Analyse de flux intercommunaux en région Provence Alpes Côte d'Azur

Analyse cartographique et exploratoire

Une analyse des flux domicile-travail a été réalisée à partir du fichier de migrations alternantes quotidiennes intercommunales (et entre arrondissements pour Marseille) de 2015 de l'INSEE (Fig. 14). Parmi les méthodes que nous avons listées précédemment, nous avons choisi d'utiliser une méthode éprouvée dans le domaine : les modèles gravitaires. Plusieurs calculs ont été réalisés et nous vous livrons dans ce rapport une synthèse des résultats marquants. Un poster et son résumé long ont également été publiés dans une conférence nationale (SAGEO'2019, cf. poster et résumé en Annexe) et un papier va être soumis avec les résultats étendus dans une revue de géomatique canadienne (*Geomatica*).

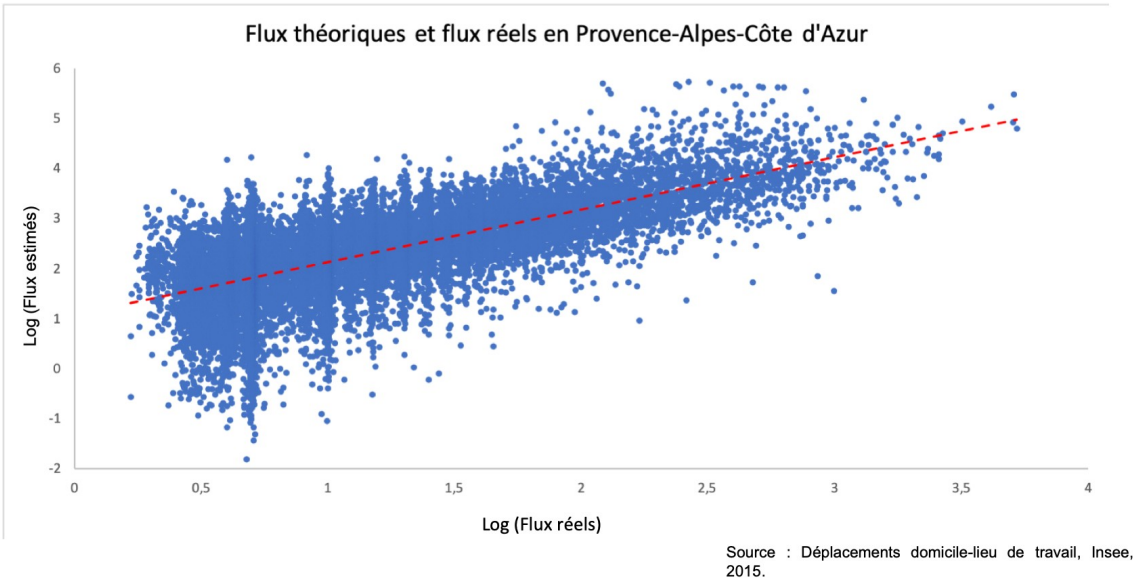

Figure 14. Nuage de points croisant les flux domicile-travail théoriques (estimés) et les flux réels (observés) pour la région PACA avec un modèle de Newton

L'observation directe des données des 23 000 flux observés croisée avec leur estimation par différents modèles montre que, globalement, une enveloppe d'estimation se dessine. Pour les régressions (log-)linéaires opérées, croisant les flux théoriques et les flux observés, les contraintes de normalité des résidus, de non-colinéarité des variables explicatives sont assez bien respectées. Toutefois, on constate une forme relativement dissymétrique du nuage de points, présentant une variabilité forte sur les petits flux, induisant des résidus relativement élevés à certains endroits de la régression. Au cœur de la distribution, c'est-à-dire dans les quantités agrégées moyenne de flux (de 20 à 100), la prédiction est relativement bonne, pour se dégrader à nouveau dans les grandes valeurs de flux. En d'autres termes, il est plus délicat d'estimer les petits flux ou les grands flux, et ce en dépit du fait que les petits flux sont les plus nombreux. En effet, avec la loi de Tobler (des individus proches dans l'espace géographique ont davantage d'échanges) et la contrainte de Zahavi (un budget temps

maximal moyen de temps de mobilité est considéré par les individus, entre 30 et 60 minutes selon les espaces urbains considérés, Joly, 2005), la plupart des déplacements domicile travail sont limités dans l'espace et dans le temps.

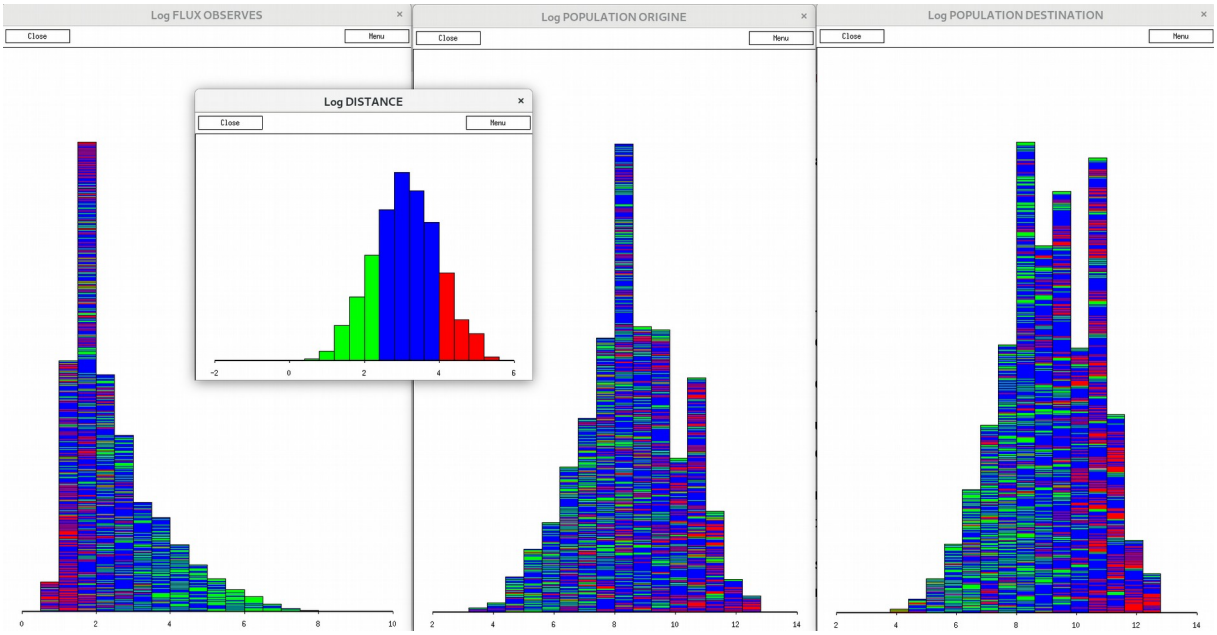

Figure 15. Distributions statistiques croisées (en log népérien) des flux observés, de la distance et des populations des communes origine et destination

L'analyse exploratoire (Fig. 15) des flux observés croisant les trois attributs en log, que sont la distance et les populations respectives des communes d'origine et de destination, montre que les flux de courte distance (en vert) sont en grande quantité (d'où les marques vertes prépondérantes en densité dans la distribution statistique des flux observés). Il correspondent plutôt à des communes de faible nombre d'habitants. À l'inverse, les flux de longue distance (en rouge) sont nombreux, mais correspondent davantage à des valeurs de flux faibles (ils se situent sur la gauche de la distribution statistique des flux observés) et plutôt à des communes densément peuplées (à droite dans la distribution statistique des populations communales).

Modèles utilisés : Newton et Wilson généralisés

Nous avons testé deux types de modèles gravitaires généralisés : le modèle de Newton et le modèle de Wilson. Chaque paramètre, à savoir pour les deux populations des villes d'origine et de destination et la distance, a été affecté d'un exposant variable et spécifique au paramètre. On obtient ainsi respectivement les deux formules suivantes pour la calcul des flux F_{ij} avec k une constante, M_i et M_j les populations des communes (avec leurs exposants respectifs *alpha* et *beta*) et d_{ij} la distance (avec son exposant *gamma*) séparant les deux communes :

Modèle de Newton généralisé :

$$F_{ij} = k\frac{M_i^{\alpha} M_j^{\beta}}{d_{ij}^{\gamma}}$$

Ce modèle peut par ailleurs se linéariser par une transformation globale en *log*. Les exposants deviennent des élasticités qui identifient les poids respectifs des critères dans l'estimation des flux. On peut alors appliquer des régressions log-linéaires multiples. Par ailleurs, les distributions de la population communale et des distances étant hyperboliques, une transformation en *log* leur permet de devenir des distributions symétriques relativement proches de distributions gaussiennes.

$$ln(F_{ij}) = \alpha.ln(M_i) + \beta.ln(M_j) - \gamma.ln(d_{ij})$$

Modèle de Wilson généralisé, avec les mêmes notations mathématiques, auxquelles on ajoute *a* qui remplace *k* dans le modèle de Newton et $f(C_{ij})$ qui est la fonction de coût de déplacement en fonction de la distance ; les exposants sont conservés dans la forme généralisée du modèle de Wilson :

$$F_{ij} = aM_i^{\alpha} \frac{M_j^{\beta} f(C_{ij})^{\gamma}}{\sum_{i=1}^{k} M_k^{\beta} f(C_{ik})^{\gamma}}$$

Pour les deux modèles, une méthode empirique d'optimisation a été utilisée pour ajuster les exposants des paramètres, et ainsi faire peser, plus ou moins, la masse de la commune d'origine, la masse de la commune de destination ou l'effet inverse de la distance. Cette approche équivaut à une régression log-linéaire où les exposants modifiables correspondraient aux élasticités des différents paramètres considérés. Elle est davantage exploratoire et permet également de modifier la façon dont les critères se combinent entre eux. Ainsi, pour ce qui concerne le modèle de Wilson, nous avons transformé la distance par une fonction logistique inversée, de façon à réduire le poids des flux longues distance, que les pratiques de mobilité et la contrainte de Zahavi réduisent fortement.

Comparaison des résultats

Les résultats obtenus par ces différentes approches convergent et s'expriment différemment selon les deux modèles. Le poster scientifique produit par les étudiants de Master de géographie montre que l'élimination pure et simple des distances parcourues de plus de 100 km rend partiellement comparable les structures spatiales des flux domicile-travail. Si l'on veut toutefois conserver ces flux dans le corpus de données, il est possible d'ajuster les exposants des paramètres du modèle, afin d'obtenir une régression linéaire d'une qualité correcte, qui mathématiquement réduit l'effet des longues distances sur le modèle, sans toutefois les considérer comme des valeurs aberrantes.

C'est ce que nous avons réalisé tout d'abord avec le modèle gravitaire de Newton. On obtient avec celui-ci un assez bon coefficient de détermination (R^2) de 0.46, correspondant à un coefficient de corrélation de 0.68, avec des poids (exposants) de 1 de la commune d'origine, de 3 de la commune de destination et de 7 de la distance. Concrètement, cela signifie, d'une part, que les communes qui attirent les flux (les communes des lieux de travail) sont prégnantes dans les processus de mobilité par rapport à l'origine des flux (habitation des ménages), et, d'autre part, que l'effet de la distance est très important comme frein à la mobilité (puisque, rappelons-le, la distance se trouve au dénominateur de la formule, c'est-à-dire qu'elle a un effet inverse). On passe tout de même d'un coefficient de 2 suggéré dans la littérature (modèles de Newton initial et de Reilly) à un coefficient trois fois plus élevé.

Ces éléments sont confirmés par une transformation des distances en *log* (plus les distances sont élevées et plus leur impact est moindre dans la quantité de flux estimée), qui aboutit à un modèle gravitaire de Newton de qualité sensiblement équivalente (coefficient de détermination de 0.45 et coefficients de corrélation de 0.66). Notons toutefois que les exposants ont changé : leur valeur est de 1 pour la commune d'origine et pour la distance, de 2 pour la commune de destination, soulignant une fois encore le fait que la destination explique grandement les flux dans le modèle.

Enfin, le modèle généralisé de Wilson amène lui aussi aux mêmes conclusions. En ajustant l'effet des distances sur le modèle par une fonction sigmoïde (logistique) inverse, mimant la chute du nombre de flux contraints par le budget temps, et avec des poids importants pour les populations des communes d'origine et de destination (respectivement 3 et 7) et un poids de 1 pour la distance, on obtient un coefficient de détermination de 0.5 et donc un coefficient de corrélation de 0.7, ce qui est correct.

Voici la formule de transformation logistique inverse (sigmoïde) appliquée à la distance d_{ij} dans le modèle de Wilson, valant fonction de friction C_{ij} et avec k_1, k_2, k_3, k_4 et k_5 des coefficients modifiables selon la forme de la courbe attendue :

$$C_{ij} = k_1 - \frac{k_2}{k_3 + k_4 e^{-k_5 d_{ij}}}$$

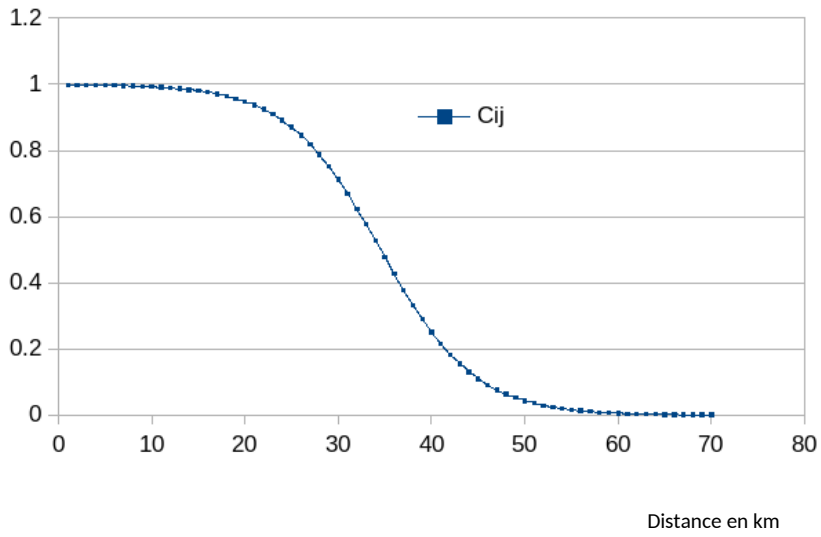

Figure 16. Estimation d'un coût de déplacement par transformation des distances observées des flux par une fonction sigmoïde inverse (en X) : au-delà de 60 km, les flux sont ignorés dans le modèle.

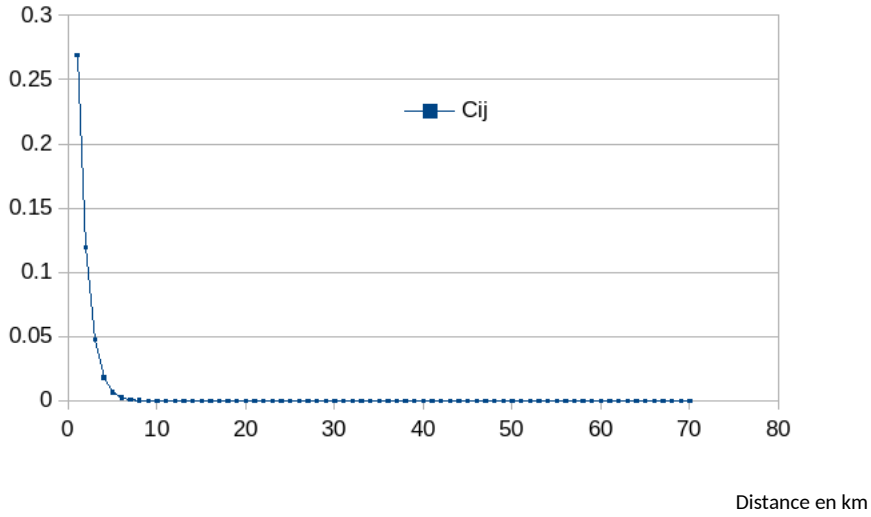

Figure 17. Estimation d'un coût de déplacement par transformation des distances observées des flux par une fonction sigmoïde inverse (en X) : dès 10 km, les flux sont ignorés dans le modèle.

Par exemple, les deux graphiques des figures 16 et 17 présentent deux exemples de courbes de transformation des distances. C'est la seconde (Fig. 17) qui a été utilisée pour ajuster le modèle des migrations alternantes régionales en PACA avec le modèle de Wilson.

Voici les trois fonctions résultant des ajustements des élasticités pour le modèle des migrations alternantes quotidiennes sur l'ensemble de la région Provence Alpes Côte d'Azur, pour des modèles dont le coefficient de corrélation se situe entre 0.6 et 0.7 :

* pour le modèle de Newton généralisé :

$$F_{ij} = k\frac{M_i M_j^3}{d_{ij}^7}$$

* pour le modèle de Newton généralisé avec une transformation préalable des distances par le log :

$$F_{ij} = k\frac{M_i M_j^2}{log(d_{ij})}$$

* pour le modèle de Wilson généralisé avec une transformation préalable des distances par une fonction sigmoïde :

$$F_{ij} = aM_i^3\frac{M_j^7 f(C_{ij})}{\sum_{i=1}^{k} M_k^7 f(C_{ik})}$$

Usage des modèles gravitaires pour la Région Provence Alpes Côte d'Azur

Ces résultats montrent quelques éléments méthodologiques intéressants, pour ce qui concerne les migrations alternantes régionales, c'est-à-dire les flux dont les motifs sont les études et le travail et sont réalisés au sein même des communes et des villes de la région Provence Alpes Côte d'Azur :

- les modèles de type gravitaire sont utilisables, avec une qualité globale de prédiction relativement correcte, pour autant que les modèles soient ajustés avec des coefficients pondérant les effets des différents critères ; cela valide les effets croisés de l'émissivité et de de l'attractivité des communes et de la friction liée au déplacement de l'une vers l'autre ; cette méthode peut d'ailleurs s'adapter à tout type d'analyse de migration et de mobilité ;
- l'analyse exploratoire des flux révèle que plus la distance est grande et moins les flux sont importants, ce qui semble relativement évident d'un point de vue pratique ;
- la grande quantité de petits flux intercommunaux (sans préjuger des distances parcourues pour les réaliser), dans des communes ayant peu d'habitants, amène à une plus grande variété de valeurs dans cette classe particulière, on y entrevoit les effets de frontières, c'est-à-dire la proximité de petites communes ou de villes-dortoirs périphériques aux métropoles, qui génèrent probablement cette variabilité ;
- les flux d'effectifs intermédiaires, entre 20 et 100 par jour, structurent la forme statistique de l'analyse, car ils sont suffisamment nombreux pour tendre vers une certaine fiabilité et reproductibilité, et suffisamment fins pour être discriminants ; ils se situent par ailleurs préférentiellement dans des courtes et moyennes distances en deçà de la contrainte du budget temporel et rendent robuste le modèle ; ils représentent en quelque sorte une forme de rationalité spatio-temporelle d'*homo mobilis* ;
- les flux longues distance, quant à eux, sont plus exceptionnels, et participent ainsi à la catégorie des flux de faible effectif : ils sont difficilement prévisibles de ce fait ;
- si l'on considère maintenant les types de flux analysés (domicile travail et domicile études), on pourrait appliquer une interprétation différenciée : ce qui s'applique sur le travail ne s'applique pas forcément pour les études, notamment lorsque celles-ci se déroulent dans le supérieur, où il n'est pas rare de sortir de sa région d'origine, grevant en conséquence l'impact potentiel du budget temps ; malgré tout, les études supérieures pèsent relativement peu dans l'ensemble des flux, et ces flux sont rarement journaliers ;
- enfin, notons que les résultats ne portent que sur les migrations alternantes, ne représentant qu'une relativement faible part de l'ensemble des mobilités dans leur ensemble, et que les pérégrinations (déplacements à arrêts et motifs multiples) ne sont pas appréhendées ; une prise en compte de l'ensemble des flux en PACA constituerait un travail de plus grande envergure.

II.E.3. Exemple d'analyse de sensibilité du modèle d'estimation des flux domicile-travail

Comme nous l'avons vu précédemment, l'analyse de sensibilité peut consister en une augmentation graduelle de certaines valeurs d'une des composantes du modèle, toutes choses égales par ailleurs. C'est ainsi que nous avons pu étalonner les courbes de coefficient de corrélation en fonction (i) des paramètres de la fonction sigmoïde de transformation des distances pour le modèle de Wilson ou (ii) des élasticités des critères considérés pour le modèle de Newton.

Sensibilité du modèle aux variations des paramètres de la fonction C_{ij} de transformation de la distancedu modèle de Wilson

Commençons par l'étalonnage de la fonction de transformation des distances (Fig. 18). L'idée était de déterminer avec précision, et pour chacun des paramètres du modèle (k_1, k_2, k_3, k_4 et k_5), les valeurs de ces paramètres qui permettaient de maximiser la capacité d'estimation du modèle théorique, et observer leurs variations. La plupart des paramètres n'ont pas eu d'influence notoire sur la qualité de l'ajustement. Seul le facteur multiplicatif de la distance (k_5) est déterminant, notamment sur le modèle de Wilson pour lequel les exposants ont été ajustés (cf. Fig. 8 « corrélation k_5 transformé »).

On constate en effet que le coefficient de corrélation passe de 0.3 à 0.7, lorsque ce paramètre tend vers 1 (courbe orange). Cette dernière valeur correspond d'ailleurs à une élimination des distances supérieures à environ 10 km. Si l'on souhaite conserver davantage de flux de longues distances (par exemple de 20 km), on observe une chute importante du coefficient de corrélation à 0.55.

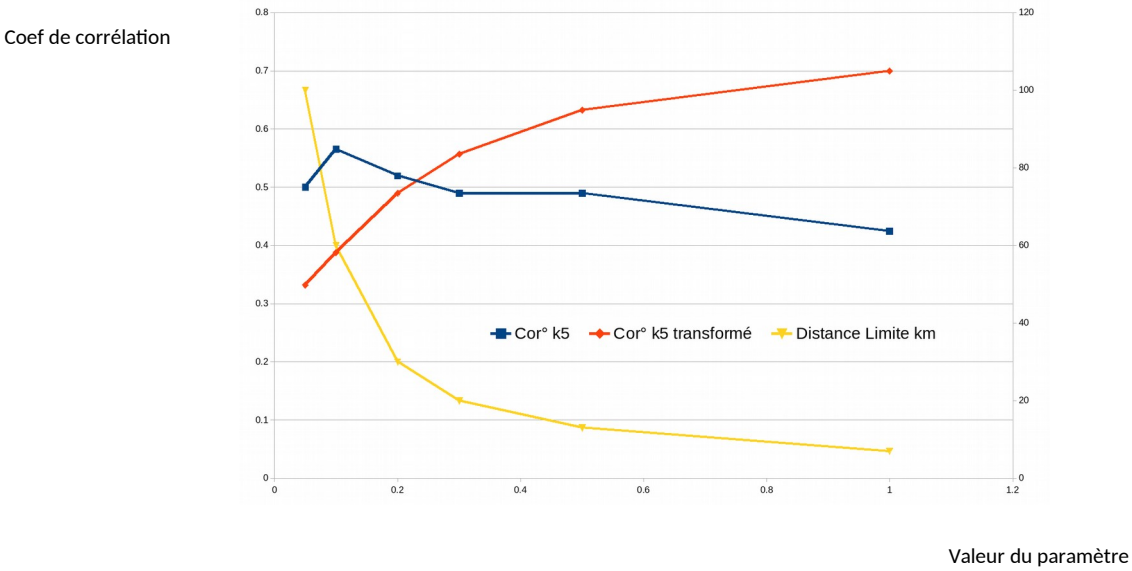

Figure 18. Variations du paramètre k_3 (en X, courbes bleue et orange) et impact sur le coefficient de corrélation de la régression du modèle gravitaire de Wilson généralisé et ajusté. On observe également l'impact sur le seuil de prise en compte des distances des flux (courbe en jaune).

Sensibilité du modèle aux variations des élasticités des critères explicatifs des flux dans un modèle gravitaire généralisé de Newton

Pour ce qui est de la sensibilité du modèle aux variations des élasticités *alpha*, *beta* et *gamma* des paramètres gravitaires, que sont les populations des communes origines et destinations et la distance qui les sépare, on procède de la même façon, mais sur des échelles de valeurs différentes (Fig. 19, 20, 21). On retrouve dans les différents graphiques les valeurs de ces élasticités qui maximisent le coefficient de corrélation, notamment pour *gamma* (le coefficient de la distance) qui, selon les modèles, prend la valeur de 3 ou de 7.

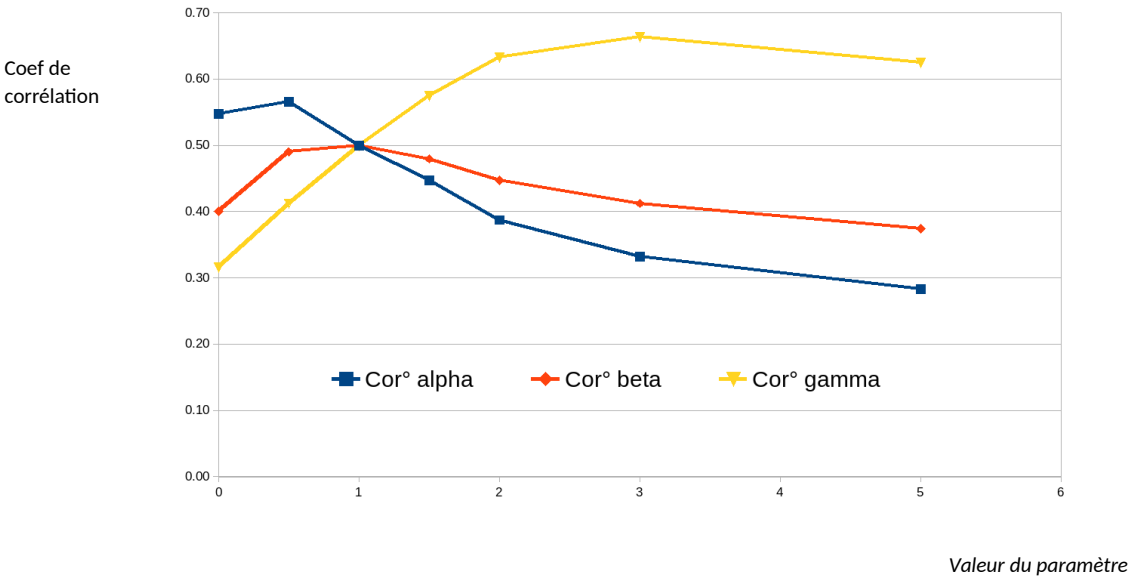

Figure 19. Variations (en X) des paramètres alpha (bleu), beta (orange) et gamma (jaune) et impact sur le coefficient de corrélation (en Y) de la régression du modèle gravitaire de Newton généralisé et ajusté. Le meilleur coefficient est obtenu avec un poids de 3 pour la distance.

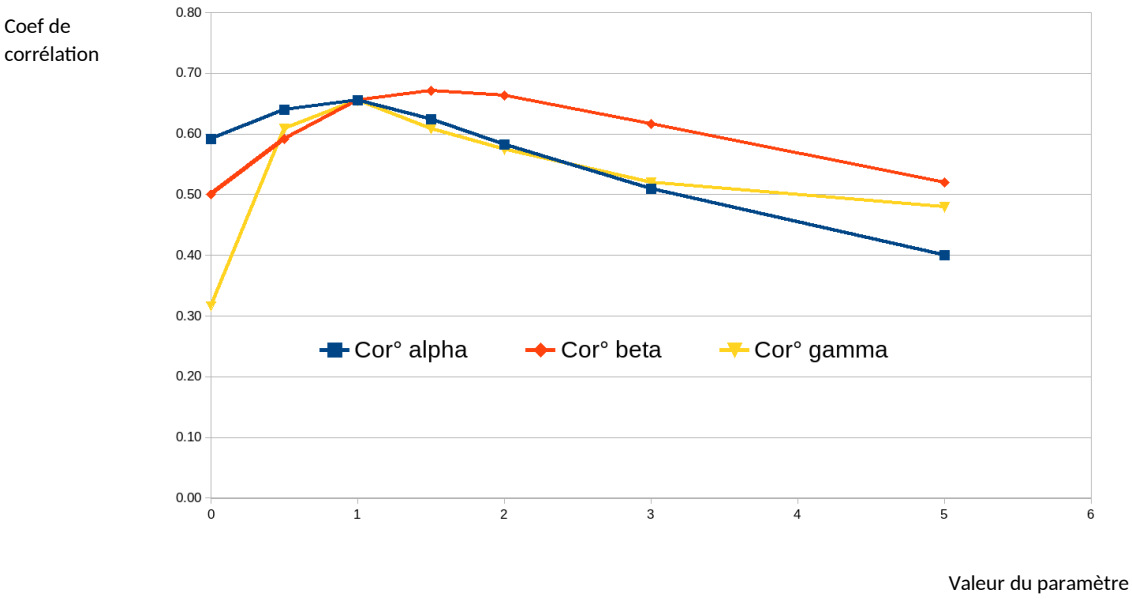

Figure 20. Variations (en X) des paramètres alpha (bleu), beta (orange) et gamma (jaune) et impact sur le coefficient de corrélation (en Y) de la régression du modèle gravitaire de Newton avec les distances en log.

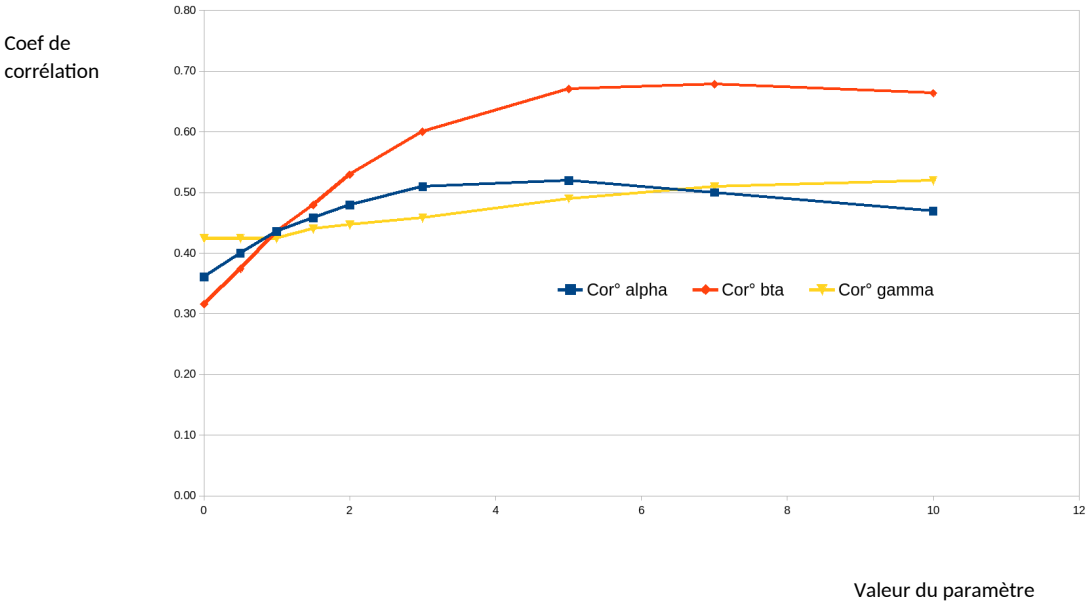

Figure 21. Variations (en X) des paramètres alpha (bleu), beta (rouge) et gamma (jaune) et impact sur le coefficient de corrélation de la régression du modèle gravitaire de Wilson généralisé et ajusté. Le meilleur coefficient, proche de 0,7 est obtenu avec un poids de 7 pour la population de la commune de destination.

L'analyse de la sensibilité du modèle aux différents paramètres permet, comme on le voit, d'observer le comportement du modèle face a une variation simple d'un critère. Elle ne permet toutefois pas d'obtenir les meilleurs résultats des modèles (combinaison systémique des meilleures valeurs de paramètres). En ce sens, elle reste complémentaire des méthodes automatiques, comme par exemple la régression log-linéaire évoquée précédemment, qui permet d'identifier la combinaison des élasticités du modèle permettant le meilleur ajustement possible. Mais elle constitue toutefois une méthode d'analyse approfondie de la robustesse du modèle. Nous l'avons utilisée pour affiner la modélisation de l'estimation des migrations alternantes quotidiennes en région Provence Alpes Côte d'Azur. D'autres méthodes évoquées dans le paragraphe sur les indicateurs robustes prospectifs pourraient être mises en œuvre pour améliorer l'intelligibilité des modèles de flux.

Conclusion

À l'issue d'une année de travail collaboratif, universitaire et opérationnel, les pistes d'investigation suivies ont été multiples et fructueuses.

Du point de vue pédagogique, ce ne sont pas moins de 50 étudiants de géographie et de géomatique qui ont été impliqués dans ce projet, et ce à différents niveaux de la licence première année, jusqu'à la dernière année de Master. La problématique abordée est très riche et a été beaucoup appréciée, en termes de contenu, comme de formation, par les étudiants et par leurs encadrants. Quoi de plus intéressant que de travailler sur les grandes orientations stratégiques de nos territoires de proximité de demain ?

Du point de vue scientifique, on notera deux éléments saillants dans cette étude qui ont marqué l'activité des (enseignants-)chercheurs : la comparaison des différents modes de transport flexible et partagé du point de vue environnemental et l'adaptation du modèle gravitaire de Wilson (ajout des exposants sur les populations et la distance, réduction de l'effet de la distance) pour l'estimation des flux. Nous espérons valoriser ces deux avancées scientifiques dans des articles de bon niveau dans des revues nationales, voire internationales. Cela constitue également un des objectifs de la participation des chercheurs dans la fabrique des connaissances scientifiques à l'échelle régionale.

Enfin, nous espérons avoir pu accompagner, autant que faire se peut, le processus de création et d'émergence des scénarios portés par la mission prospective de la région Provence Alpes Côte d'Azur, grâce à, d'une part, notre (celle des chercheurs encadrant comme des étudiants) participation active aux réunions de concertation et d'échange qui ont eu lieu tout au long de l'année, et d'autre part, aux résultats intéressants obtenus dans cette étude, notamment un état de l'art comparatif assez complet des modes de transport flexibles et partagés et des préconisations méthodologiques pour la mise en œuvre des méthodes d'estimation des mobilités (données mobilisables, modèles existants, approches robustes de la prospective).

Dans la phase qui va suivre, toujours en concertation avec la mission prospective, nous espérons pouvoir mettre en œuvre plus concrètement, sur des territoires choisis et suivis, plusieurs aspects des méthodes proposées, et également ajouter à la liste des transports étudiés d'autres modes complémentaires de déplacement, auxquels on ne pense pas immédiatement (modes électriques actifs, déplacements par voie maritime et fluviale, etc.).

Nous entrons bientôt dans la phase que nous avons qualifiée, dans nos définitions, en quelque sorte de « méta-prospective », c'est-à-dire celle qui, d'un ensemble d'observations, de scénarios et d'ancrages réflexifs, amènera la Conseil Régional de PACA à déterminer sa politique des transports dans les 30 ans à venir. C'est particulièrement là que les partenaires scientifiques et opérationnels peuvent coopérer avec efficacité pour explorer toutes les pistes vertueuses et envisager le meilleur des futurs, dans un environnement respecté et un tissu social apaisé.

Bibliographie

Ouvrages, thèses, articles et rapports publiés

ADEME (1918). Climat, air et énergie, chiffres-clés. Faits & Chiffres, ADEME

Air-PACA (2017). Bilan 2017 Alpes Côte d'Azur. Ensemble, préservons notre air. Air-PACA

Ait Ouhamed M. A. (2018). *Optimisation dans l'auto-partage à un seul sens avec voitures électriques et relocalisations.* Thèse d'Informatique. Avignon Université.

Alonso, W. (1964). *Location and Land Use. Toward a Genarl Theory of Land Rent*. Harvard University Press, 204 p.

Anas, A. (1982). *Residential Location Models and Urban Transportation: Economic Theory, Econometrics, and Policy Analysis with Discrete Choice Models*, New York, Academic Press.

Andreu L. (Dir.) (2018). *Des voitures autonomes. Une offre de loi.* Essai. Dalloz.

Antoni, J.-P., Vuidel G. (2010). MobiSim : un modèle multi-agents et multi-scalaire pour simuler les mobilités urbaines. *in* Antoni J-P. (dir.), *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica, Méthodes et approches, Paris, pp. 50-77.

Arnaud A., Davoine P.-A.. (2009). Approche cartographique et géovisualisation pour la représentation de l'incertitude. SAGEO, Nov 2009, Paris.

Banos A. (2001). *Le lieu, le moment, le mouvement. Pour une exploration spatio-temporelle désagrégée de la demande de transport en commun en milieu urbain.* Thèse de Géographie. Université de Franche-Comté.

Batton-Hubert M., Desjardin E., Pinet F. (2019). *L'imperfection des données géographiques 1. Bases théoriques.* ISTE.

Ben Cheikh S. (2016). *Optimisation avancée au service du covoiturage dynamique*. Thèse d'Informatique, Centrale Lille.

Bolot J. (2006). Le transport à la demande, une piste pour le développement urbain durable. Approche géographique et mise en oeuvre d'un système opérationnel à Besançon. Thèse de Géographie. Université de Franche-Comté.

Bonel P. (2008). *Prévision de la demande de transport*. Habilitation à Diriger des Recherches, Laboratoire d'Economie des Transports, Lyon

Castex E. (2007). *Le Transport A la Demande (TAD) en France : de l'état des lieux à l'anticipation. Modélisation des caractéristiques fonctionnelles des TAD pour développer les modes flexibles de demain*. Géographie. Université d'Avignon. Français. <tel-00199865v2> https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00199865v2/document

Chevrier R. (2008). *Optimisation de transport à la demande dans des territoires polarisés.* Thèse de Géographie. Avignon Université.

Elliott G., Granger C. W.J., Timmermann A. (2006). *Handbook of Economic Forecating*, vol. 1, Series Handbooks in economis 24, Vol 1, Arrow K. J., Intriligator M. D. (Eds), North Holland, Elsevier

De la Barra, T. (1989). *Integrated Land Use and Transport Modelling*. Cambridge University Press.

Converse, Paul D., (1951). Development of Marketing: Fifty years of Progress, in H. G. Wales, *Changing perspectives in Marketing*, University of Illinois.

Echenique, M., Flowerdew, A., Hunt, J., Mayo, T., Skidmore, I., Simmonds, D. (1990). The MEPLAN models of bilbao, leeds and dortmund. *Transport Reviews*, 10(4): 309-322. http://dx.doi.org/10.1080/01441649008716764

Ferber J. (1997). *Les systèmes multi-agents. Vers l'intelligence collective.* IIA, InterEditions.

Garaix T. (2007). *Étude et résolution exacte de problèmes de transport à la demande avec qualité de service.* Thèse d'Informatique. Avignon Université.

Godet M. (2007). *Manuel de prospective stratégique.* tome 1 (une indiscipline intellectuelle), tome 2 (l'art et la méthode), Dunod.

Gourion D., Josselin D. (2012). Aide a la décision robuste pour la localisation d'un centre de traitement des déchets. *Publications de l'Institut de Statistique de l'Université de Paris, Institut de statistique de l'Université de Paris, 2012, Numéro spécial Robustesse, 56 (2-3), pp.17-36.*

Heurgon E., Bailly J.P. (Eds) (2001). *Nouveaux rythmes urbains : quel transport ?* Rapport du conseil national des transports. collection Société et Territoire, Editions de l'Aube

Houghton J. (2011). *Le réchauffement climatique. Un état des lieux complet.* Planète en Jeu. De Boeck.

Ivanovic S. (2018). *Mise à jour de référentiel géographique par fusion multi-source de données collaboratives.* Thèse de doctorat en géomatique soutenue en 2018 (IGN, Université Paris-Est)

Joly I. (2005). *L' allocation du temps au transport : de l'observation internationale des budgets-temps de transport aux modèles de durées*. thèse de doctorat d'économie, LET, Lyon 3

Josselin D., Nicot B. (2003). Un modèle gravitaire géoéconomique des échanges commerciaux entre les pays de l'U.E., les PECO et les PTM. *Cybergeo : European Journal of Geography*.

Josselin D. (2010). *Robustesse en analyse spatiale. Essai.* Habilitation à Diriger des Recherches. Géographie, Avignon Université.

Keeney R.L., H. Raiffa H. (1976). *Decisions with Multiple Objectives - Preferences and Value Tradeoffs*, John Wiley. Cambridge University Press.

Kharin Y. (2013). *Robustness in Statistical Forecasting.* Springer.

Landrieu J., Heurgon E. (Eds). (2007). *L'économie des services pour un développement durable : nouvelles richesses, nouvelles solidarités (prospective)*. Éditions l'Harmattan

Lammoglia A. (2013). *Analyse et modélisation multi-agents de transports flexibles. Comparaison de services français et sénégalais.* Thèse de Géographie. Avignon Université.

Lowry, I. S. (1964). *A Model of Metropolis*. Research Memoranda No. RM-4035-RC. RAND Corporation. http://www.rand.org/pubs/research_memoranda/RM4035.html

Martínez, F. (1996). MUSSA: Land Use Model for Santiago City. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1552, 126-134. http://doi.org/10.3141/1552-18

McFadden, D. (1980). Econometric Models for Probabilistic Choice Among Products. *Journal of Business*, 53(3): 13-29. http://www.jstor.org/stable/2352205

Mills, E. S. (1972). *Studies in the Structure of the Urban Economy*. The Johns Hopkins University Press, 151 p.

Muth, R. F. (1969). *Cities and housing: the spatial pattern of urban residential land use*. University of Chicago Press, 355 p.

Prud'homme J. (2014). *Estimation et analyse spatiales des émissions de polluants de transports individualisés : évaluation des performances environnementales d'un Transport à la Demande.* Thèse de Géographie. Avignon Université.

Reilly W. (1931).*The law of retail gravitation*. Knickerbocker Press.

Roy B. (1985). *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision.* Economica.

Saaty T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning*, *Priority Setting*, *Resource Allocation*, McGraw-Hill

Stouffer S. A. (1940). Intervening opportunities: A theory relating mobility anddistance. *American Sociological Review*, vol. 5, no6, p. 845–867.

Thevenin T. (2002). *Quand l'information géographique se met au service des transports publics urbains. Une approche spatio-temporelle appliquée à l'agglomération bisontine.* Thèse de Géographie. Université de Franche-Comté.

Tobler W. (1970). A computer movie simulating urban growth in the detroit region. *Economic Geography*, vol. 46, n°2, p. 234–240.

Veyret Y. & Arnoud P. (2019). *Atlas du développement durable.* Société, économie, environnement : un monde en transition. Editions Autrement.

Waddell, P. (2002). UrbanSim: Modeling Urban Development for Land Use, Transportation, and Environmental Planning. *Journal of the American Planning Association*, 68(3), 297-314. http://doi.org/10.1080/01944360208976274

Wagner, D. P., Wegener, D.-I. M. (2007). Urban Land Use, Transport and Environment Models. *disP - The Planning Review*, 43(170), 45-56. http://doi.org/10.1080/02513625.2007.10556988

Wilson A. (1971). A family of spatial interaction models, and associated develop-ments. *Environment and Planning*, vol. 3, p. 1-31.

Webographie

Autopartage :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Autopartage

https://france3-regions.francetvinfo.fr/provence-alpes-cote-d-azur/alpes-maritimes/cagnes-sur-mer/voitures-autopartage-sont-arrivees-cagnes-mer-1641254.html

https://www.mobilitytechgreen.com/

Covoiturage :

https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/covoiturage-en-france

Véhicule autonome :

https://www.flashmemorysummit.com/English/Collaterals/Proceedings/2017/20170808_FT12_Heinrich.pdf

https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/developpement-des-vehicules-autonomes-elisabeth-borne-annonce-soutien-letat-16-nouvelles

https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/vehicules-autonomes

http://www.scoop.developpement-durable.gouv.fr/les-5-sites-pilotes-scoop-a4.html

https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/90p%20VDEF.pdf

https://formations.univ-amu.fr/FHUDVA.html

https://madeinmarseille.net/53715-une-navette-autonome-va-circuler-a-aix-debut-2020/

VTC :

https://bible-du-vtc.com/secteur-vtc-connaitre-croissance-fulgurante-prochaines-annees/

https://www.sixt.fr/ride/vtc

https://www.monsieurvtc.fr/vtc-taxi-statut-choisir-17/

https://www.journaldunet.com/economie/transport/1423222-vtc-qui-a-la-plus-grosse-audience-en-france/

https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/vtc-registre-des-voitures-transport-chauffeur

Données – Fond de carte :

Découpage communal : https://public.opendatasoft.com/explore/dataset/contours-geographiques-des-communes-et-arrondissements-municipaux-2019/information/

Découpage EPCI : https://public.opendatasoft.com/explore/dataset/contours-geographiques-des-epci-2019/information/

Réseau routier : http://professionnels.ign.fr/route500#tab-3

Données – Modes de transport :

Autopartage : https://provence.citiz.coop/stations

Covoiturage : https://transport.data.gouv.fr/datasets?type=carsharing-areas

VTC/Uber : https://www.uber.com/global/fr/cities/

Annexes

Les données et cartes sont disponibles dans une archive numérique (« Annexes ») organisée comme suit :

- « *BDD-Transports-Flexibles-Partages* » contient les données géographiques, les cartes des différents transports flexibles et partagés recensés en PACA et les sources des fichiers de données communales
- « *Covoiturage-Rural-L3-Geomatique-Digne* » contient le rapport, la présentation et les cartes et sources de données des travaux sur le covoiturage sur les 5 sites ruraux en PACA
- « *Posters-CMI* » contients les posters des transports flexibles et partagés (L2 et L3 CMI) et le poster sur l'estimation des flux (M1 CMI)
- « *Travaux-Recherche-Indicateurs-Prospectifs-Robustes-M2* » contient les recherches exploratoires sur les indicateurs prospectifs robustes des étudiants de M2 Géomatique et conduite de projet d'Avignon