



HAL
open science

Modèles multi-agents de déplacement à base d'activités : Enquête et synthèse

Mahdi Zargayouna, Christine Buisson

► To cite this version:

Mahdi Zargayouna, Christine Buisson. Modèles multi-agents de déplacement à base d'activités : Enquête et synthèse. [Rapport de recherche] Université Gustave Eiffel. 2021. hal-03536021

HAL Id: hal-03536021

<https://hal.science/hal-03536021>

Submitted on 19 Jan 2022

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

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

Modèles multi-agents de déplacement à base d'activités : Enquête et synthèse

Rapport d'expertise de l'Université Gustave Eiffel

A l'attention de	Ville de Paris, Direction de la voirie et des déplacements
Auteur	Mahdi Zargayouna (COSYS/GRETTIA) & Christine Buisson (COSYS/LICIT)
Date	18 juin 2021
Diffusion externe	Restreinte (embargo de six mois)

Sommaire

I.	SYNTHÈSE	2
I.1.	ETAT DE L'ART	2
I.2.	PRINCIPALES CONCLUSIONS DE L'ÉTAT DE L'ART ET DES ENQUÊTES	3
	<i>i. Typologie des acteurs</i>	<i>3</i>
	<i>ii. La maturité des modèles</i>	<i>3</i>
	<i>iii. La robustesse des modèles et leur validation</i>	<i>3</i>
	<i>iv. Le calibrage par rapport à Paris :</i>	<i>4</i>
	<i>v. L'interopérabilité avec les systèmes actuels de la VdP</i>	<i>4</i>
	<i>vi. Stade d'avancement des différentes solutions</i>	<i>4</i>
II.	RÉSULTATS DE L'ENQUÊTE WEB	5
III.	COMPTE RENDU DES DISCUSSIONS EN VISIOCONFÉRENCE	20
III.1.	ENTRETIEN DU 16 MARS 2021 AVEC VINCENT LEBLOND (TELLAE, NANTES - FRANCE)	20
III.2.	ENTRETIEN DU 16 MARS 2021 AVEC GÖKNUR SIRIN (GEO TWIN, PARIS - FRANCE), PIETER FOURIE (GEO TWIN, PARIS - FRANCE) ET PIERRE-OLIVIER BAUGUION (GEO TWIN, PARIS - FRANCE)	22
III.3.	ENTRETIEN DU 22 MARS AVEC ATHINA TYMPAKIANAKI ET JORDI CASAS (AIMSUN, BARCELONE, ESPAGNE)	25
III.4.	ENTRETIENS DU 15 MARS AVEC MILOS BALAC (MATSIM, ETZH, ZURICH), JOHANNES MUELLER (MATSIM, AIT, VIENNE), DANIEL KRAJZEWICZ ET MATTHIAS HEINRICHS (TAPAS, DLR, BERLIN) ET DU 23 MARS 2021 AVEC FRANCESCO CIARI (CRT, MONTRÉAL), MONTSERRAT GOMEZ DELGADO (UNIVERSITÉ D'ALCALA, MADRID) SEBASTIAN HÖRL (IRTSYSTEMX, PARIS) DANIEL KRAJZEWICZ ET MATTHIAS HEINRICHS (DLR, BERLIN)	26
IV.	PISTES POUR UNE COLLABORATION ENTRE LA VILLE DE PARIS ET LA RECHERCHE DE L'UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL	28

I. Synthèse

La démarche suivie a consisté tout d'abord à comprendre plus précisément les questions auxquelles la Ville de Paris souhaitait apporter des réponses par cette expertise. Nous abordons ces réponses dans la partie suivante de cette synthèse. Nous avons ensuite associé étroitement une enquête sur l'état de l'art, qui nous a permis d'avoir une mise à jour et un élargissement de notre compréhension des avancées dans les modèles multi-agents au plan international, une enquête par questionnaire web et des entretiens spécifiques.

I.1. Etat de l'art

Dans le rapport état de l'art de 46 pages, nous effectuons un tour d'horizon des modèles multi-agents à base d'activités. Le rapport définit le cadre général des systèmes multi-agents, avant de décrire les principes qui sous-tendent les modèles d'activités et les plateformes de simulation multi-agents à base d'activités (13 principales plateformes recensées). Un accent est ensuite mis sur la création de populations synthétiques, qui forment la base des modèles d'activités. Enfin, le calibrage et la validation des modèles multi-agents à base d'activités sont décrits. Cette étape, souvent négligée, est essentielle pour fonder les décisions d'aménagement et les politiques de mobilité sur des preuves solides.

Plusieurs observations émaillent ce rapport, que nous pouvons synthétiser ici. D'abord, une distinction est nécessaire entre *les modèles d'activités* et *les simulations à base d'activités*. Les modèles d'activités se focalisent sur la création d'une population synthétique et la génération des activités souhaitées des individus et au sein des ménages. Les simulations à base d'activités prennent en entrée ces activités désirées par les individus, les confrontent à la réalité et peuvent les modifier (maintien des activités ou non, leurs durées, leurs temps de départ, etc.). Certaines plateformes effectuent les deux étapes en même temps, mais la majorité ne le fait pas (e.g. MATSim ne le fait pas). Ensuite, les méthodes de création de populations synthétiques se focalisent sur la définition de population à partir de peu de données d'échantillons. Pour le cas français, les données publiques de recensement sont parmi les plus riches à l'échelle internationale. En revanche, les informations sur les activités conjointes sont en général absentes des données disponibles.

De plus, les modèles d'activités et les simulations à base d'activités sont bien plus développés dans les collectivités territoriales américaines qu'elles ne le sont en France (cf. SANDAG à San Diego). En revanche, des enquêtes spécifiques, souvent très coûteuses, sont en général effectuées pour avoir les données les plus fiables possibles. Par ailleurs, les modèles et les simulations à base d'activités sont capables de modéliser finement les changements de comportements, ou les interventions sur les activités, mais ils sont d'une part très gourmands en données et d'autre part difficiles à calibrer et à valider.

Enfin, les travaux sur les modèles et les simulations à base d'activités restent principalement du ressort des académiques en France et en Europe, à l'exception notable de GeoTwin, Odyssee et Tellae en France, et de Senozon en Suisse. Aux Etats-Unis en revanche, ces modèles sont bien entrés dans les mœurs des collectivités territoriales, et sont graduellement en train de remplacer les modèles traditionnels à quatre étapes.

I.2. Principales conclusions de l'état de l'art et des enquêtes

i. Typologie des acteurs

Les acteurs ayant répondu à notre questionnaire et ayant participé à nos réunions sont de trois types : i) les acteurs de la recherche et développement, principalement dans la recherche académique publique ; ii) les cabinets de conseils et agences proposant des études et expertises sur la base de plateformes *open source* ; iii) les sociétés et startups proposant des plateformes propriétaires.

Les objectifs et stratégies de chacun de ces trois acteurs sont différents. Les acteurs de la recherche académique recherchent des partenariats, des collaborations et des projets de recherche fournissant des cas d'étude leur permettant d'affiner leurs modèles et de confronter leurs algorithmes à des problématiques réelles. Leurs efforts participent à l'amélioration des plateformes *open source* disponibles. Les cabinets de conseils et agences ont eux, investi dans la compréhension de ces plateformes *open source* (en général une seule, et en majorité MATSim) et proposent des études particulières pour des territoires. Ils peuvent ainsi profiter des évolutions continues de ces plateformes, mais ne peuvent modifier en profondeur les modèles sous-jacents. Enfin, les sociétés et startups qui ont investi dans une plateforme propriétaire sont rares ; ils valorisent la plateforme en même temps qu'une expertise de l'analyse et l'étude de la mobilité sur des territoires.

ii. La maturité des modèles

Nos interlocuteurs ont une vision hétérogène de la maturité des modèles. Certains les placent dans un niveau de maturité comparable aux modèles à quatre étapes, d'autres avancent qu'ils ne sont pas encore aussi robustes. L'argument en faveur de la maturité de ces modèles est que, à données d'entrée similaires, les modèles multi-agents à base d'activités sont capables *a minima* de reproduire les modèles à quatre étapes. Mais tous s'accordent sur la frilosité ressentie des collectivités face à des modèles *a priori* plus sophistiqués, et demandant plus de travail, notamment sur la collecte des données. Cette frilosité est bien plus prononcée en Europe, alors qu'en Amérique du Nord, les autorités investissent lourdement dans ces modèles depuis une dizaine d'années.

iii. La robustesse des modèles et leur validation

Comme pour les simulations multi-agents en général, et comme pour les simulations de trafic, le calibrage et la validation des simulations souffrent d'une grande hétérogénéité dans la pratique et dans les méthodes utilisées. Une première observation concerne la granularité des données de calibrage et de validation. Elles sont en général à un niveau très agrégé. Concernant les critères utilisés pour calibrer puis pour valider les modèles, ils concernent en général les parts modales simulées par rapport aux parts modales observés, les temps de parcours et les distances parcourues. Les paramètres calibrés concernent en général l'offre de transport, et en particulier les capacités de l'infrastructure. Le calibrage des paramètres de la demande est en général découragé, mais dans certains cas particuliers, les paramètres des modèles de choix des agents sont calibrés. Pour valider

des usages nouveaux, des enquêtes de préférences déclarées sont en général conduites dont les résultats sont comparés aux sorties des simulations pour les valider ou non.

iv. Le calibrage par rapport à Paris :

Si on s'intéresse à la question du calibrage (que l'on peut aussi appeler calage) des modèles, les expériences rapportées par l'équipe MATSim (ETZH, CH et anciens de l'ETZH) ou par l'équipe Tapas (DLR, DE) ne semblent pas témoigner de difficultés particulières, à part la lourdeur du temps de calcul. Par contre, le calibrage est souvent exécuté sur une sous-partie de la population, par exemple 10 %. Cette question du calibrage, même pour une agglomération de très grande taille comme l'Île de France ne semble pas être l'obstacle le plus important. L'indicateur de calibrage utilisé est souvent la proportion des choix modaux par motif et par intervalle de distance entre origine et destination.

En revanche, tous nos interlocuteurs, tant lors des entretiens que dans les réponses au questionnaire, insistent sur le fait que les modèles multi-agents sont intéressants si on dispose de données suffisamment désagrégées pour bénéficier de la segmentation de la population (par préférences, par accessibilité aux différents modes de transports).

v. L'interopérabilité avec les systèmes actuels de la VdP

Cette interopérabilité n'a pas fait l'objet de questionnement spécifique auprès de nos interlocuteurs. Les fichiers de données tant en entrée qu'en sortie de tous les logiciels évoqués, même si leurs formats sont spécifiques, contiennent des informations qui correspondent à celles déjà manipulées. L'intérêt du couplage est indéniable, et des travaux existent sur des expériences l'ayant effectué (e.g. TAPAS avec SUMO).

vi. Stade d'avancement des différentes solutions

Le paysage que notre enquête nous a permis de mieux cerner le stade d'avancement, qui peut être résumé ainsi :

- Il n'y a pas de modèle « sur étagère » disponible pour lequel on pourrait avoir, après l'achat d'une licence, un groupe d'utilisateurs de la collectivité territoriale formés par le vendeur, disposant d'un appui auprès du fournisseur de logiciel et développant et maintenant en interne un modèle répondant aux questions des différents services.
- La plateforme la plus largement répandue est MATSim, avec une communauté d'utilisateurs, principalement académiques, qui s'est fédérée autour de ce logiciel *open source* ayant une grande ancienneté et ayant connu plusieurs applications. L'un des principaux inconvénients de MATSim est que l'interface graphique n'est pas suffisante pour une utilisation par des utilisateurs non spécialistes.
- Des sociétés de service proposent des services d'utilisation et de conseils autour de MATSim, comme Tellae et Odyssee.
- La startup française GeoTwin propose une plateforme Web de type SaaS (*Simulation as a Service*), déployée depuis février 2021.

- Aimsun a une offre de simulation existante, en dehors des modèles multi-agents, tant sur la simulation microscopique que sur la simulation à plus large échelle. La société est en train de travailler à proposer une offre de modèle multi-agents. Les délais qui nous ont été indiqués sont pour l'été 2021.

II. Résultats de l'enquête web

Les résultats présentés dans cette partie sont basés sur les réponses reçues jusqu'au 2 juin 2021, soit après 12 semaines de mise à disposition du questionnaire.

Le questionnaire comporte les questions présentées en annexe. Nous avons choisi de demander rapidement si l'utilisateur est un utilisateur ou un développeur de l'outil et beaucoup de répondants ont commencé leur réponse mais ne sont pas allés au-delà des premières questions.

Nombre total de questionnaires commencés	182
Nombre de questionnaires pour lesquels les répondants ont déclaré ne pas utiliser ni développer d'outil	18
Nombre de questionnaires pour lesquels les répondants ont déclaré utiliser ou développer un outil	34
Nombre de questionnaires pour lequel les répondants ont indiqué quel outil ils utilisent	27
Nombre de questionnaires totalement remplis par des utilisateurs ou des développeurs d'un outil	22

Quel âge avez-vous ?

Les répondants sont relativement jeunes, puisque la majorité d'entre eux ont moins de 40 ans.

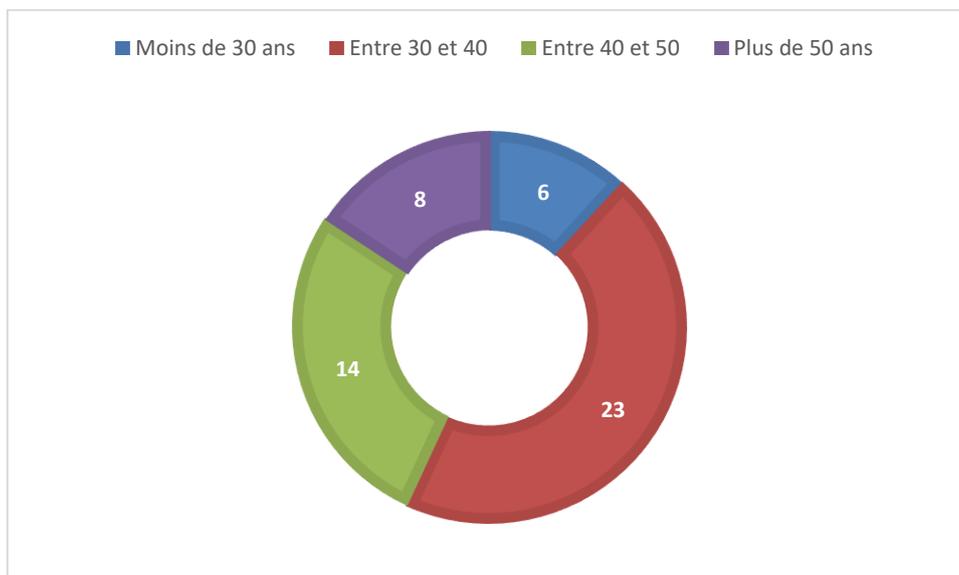


Figure 1 : âge des répondants (51 réponses au total).

Quel est le type de votre emploi ?

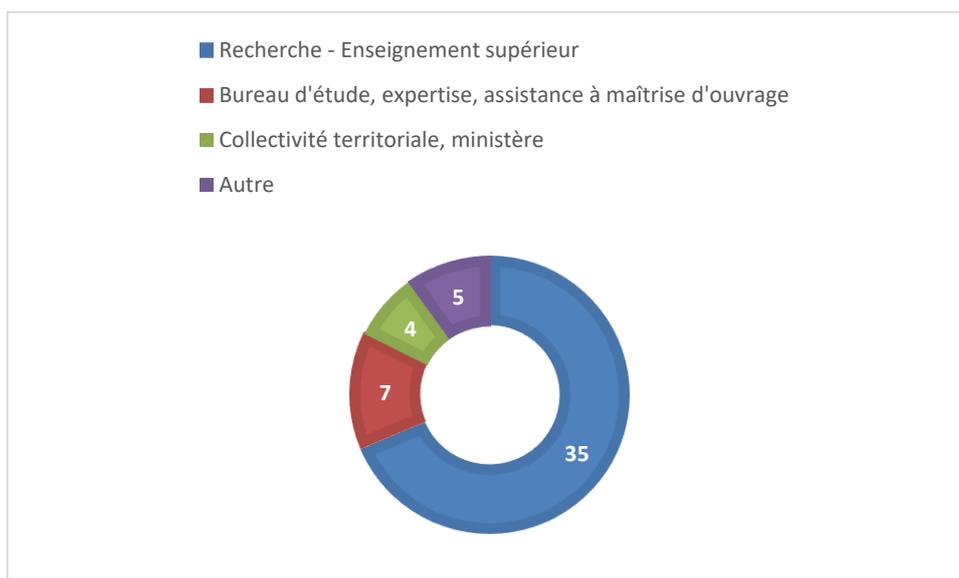


Figure 2 : type d'employeur (51 réponses au total).

Les répondants travaillent, pour près des 3/4 d'entre eux, dans des laboratoires universitaires. A noter, une part des répondants travaillent en bureaux d'étude. Les répondants ayant indiqué « autre » travaillent tous dans des sociétés d'informatique.

Etes-vous impliqué dans le développement ou l'utilisation d'un modèle multi-agent à base d'activité ?

Nous l'avons vu plus haut, 18 répondants ne sont pas impliqués, et 34 le sont. Malheureusement, les 34 qui ont répondu oui à cette question n'ont pour beaucoup d'entre eux pas poursuivi au-delà de

cette question. Il nous reste 27 questions partiellement exploitables, ce qui ne permet pas une étude statistiquement valable, mais qui donne des indications qualitatives fiables.

Pourcentage du temps annuel consacré au développement ou à l'utilisation

Une grosse moitié des répondants sont occupés plus de la moitié de leur temps par le développement ou l'utilisation de ce type de modèles. Nos répondants sont donc des experts du sujet.

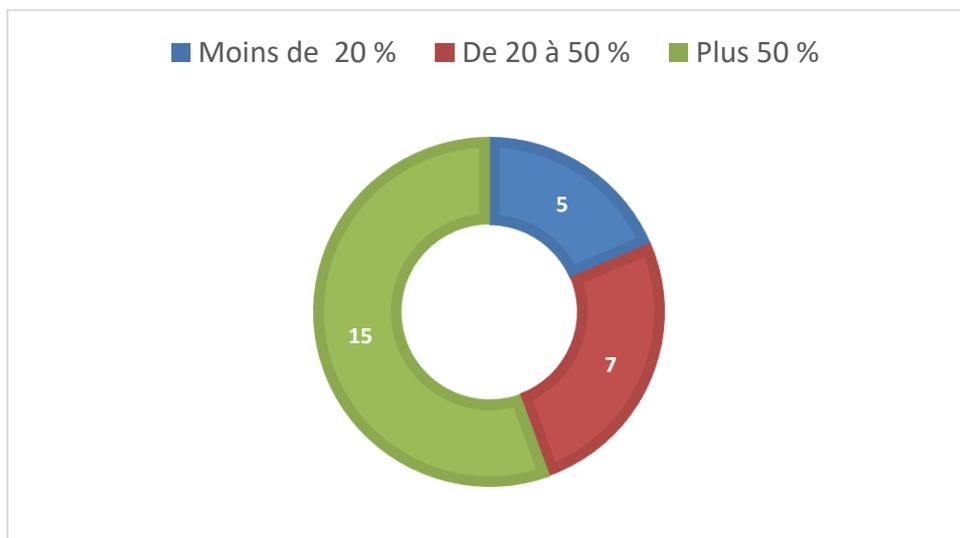


Figure 3 : pourcentage du temps de travail annuel consacré au développement ou à l'utilisation d'outils multi-agents (27 réponses au total).

Quel outil utilisez-vous ?

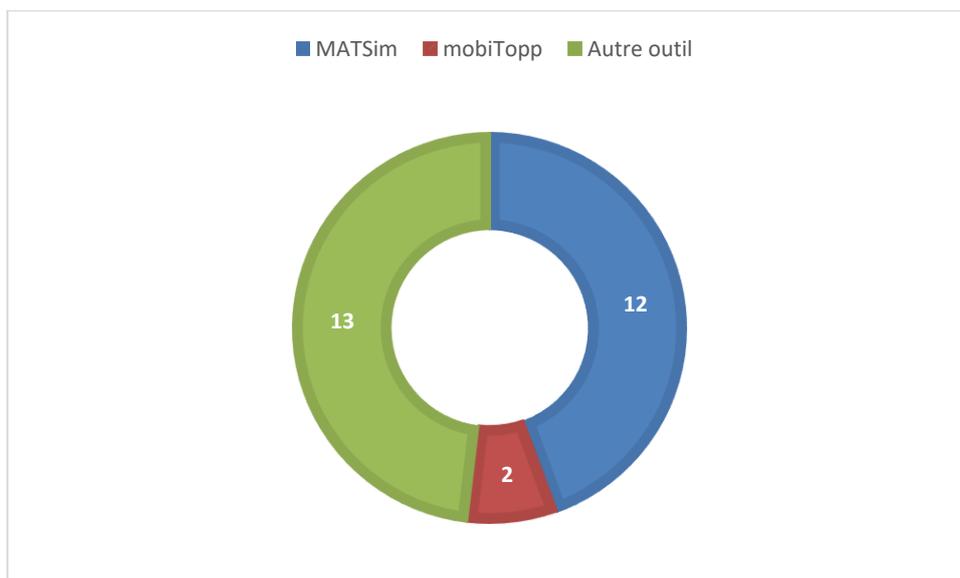


Figure 4 : quels sont les outils utilisés ou développés ? (27 réponses au total).

Un seul outil est cité dans plus du tiers des réponses : MATSim. Les autres outils mentionnés sont listés ci-après. A noter qu'aucun d'entre eux n'est présent plus de deux fois.

Nom de l'outil ou description	Nombre de réponses	Site (le cas échéant).
ActivitySim	1	https://activitysim.github.io/
AMEBA (Agent-based Model for the Evolution of urBan Areas)	1	
Développement d'un modèle pour le Maas qui sera intégré dans un outil commercial	1	
Greater Jakarta	1	
Hermatwin (Simulateur GeoTwin)	1	https://geotwin.io/en/
Intégration de trois composants : CT-RAMP, DYNASMART, NU-TRANS	1	
MobiTopp	2	http://mobitopp.ifv.kit.edu/english/index.php
MURDASP : Mobilité urbaine dans une situation de pandémie	1	
Modèle microscopique de trafic	1	
Starling	1	github.com/starling
Sydney Activity Based Model being developed in TASHA	1	
TAPAS	1	https://github.com/DLR-VF/TAPAS

Tableau 1 : autres outils mentionnés (ordre alphabétique).

Quelle est l'utilisation de l'outil ?

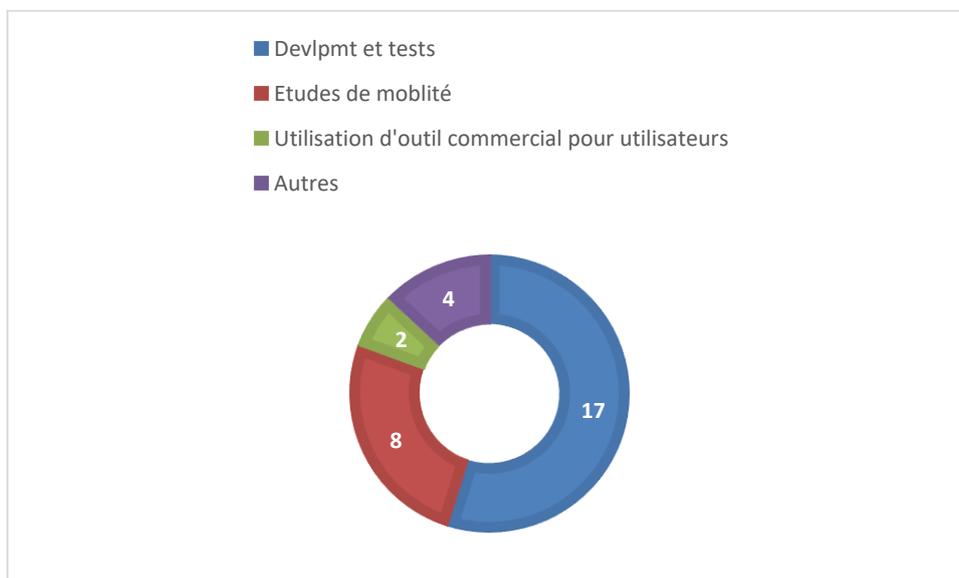


Figure 5 : utilisation des outils (31 réponses car trois des 27 répondants ont mentionné deux réponses)

Parmi les 27 répondants, 3 d'entre eux ont indiqué deux usages. Le développement et les tests sont l'activité majoritaire, 8 utilisent l'outil pour réaliser des études de mobilité (en interne), dont 5 en parallèle avec les activités de développement et de test. Deux l'utilisent pour un ou des utilisateur(s) final(aux) dans un cadre contractuel. Les quatre autres usages comprennent :

- Analyse systémique territoriale,
- Etudes sur la croissance urbaine,
- Mobilité / Territoire / démographie / aménagement et activités,
- Etudes sur le lien entre la mobilité, le territoire, la démographie et l'aménagement et les activités.

Une réponse libre permettait ensuite de préciser cette réponse et plusieurs réponses pouvaient être faites à la question « Quels sont les problèmes que votre modèle résout typiquement ? (par exemple : planification opérationnelle de transports collectifs, tests de nouveaux services de mobilité, planification urbaine sur un temps long, ...) ». les réponses ont été triées par ordre alphabétique et (le cas échéant) traduites de l'anglais par les auteurs du rapport.

- Analyse des transports dans une zone
- Applications nécessitant une utilisation conjointe des outils de modélisation de la demande et de ceux qui permettent une micro simulation
- Calcul de demande (utilisé principalement pour calculer les effets de l'introduction de nouvelles offres ou des mesures politiques)
- Contrôle du trafic par zone pour éviter les congestions en temps normal ou en cas d'événement exceptionnel
- Etudes de flux de l'économie circulaire (énergie, matières, logistique, individus) / Etudes des comportements, démarche de sensibilisation et d'évolution des pratiques (mode de choix) / Prospective territoriale (évaluation de politiques publiques, PLU, PDU, PDM) distribution

activités-population, aménagements, infrastructures et services / Interaction système naturel et système artificiel (urbain) / Sensibilisation et mise en capacité des forces publiques sur les enjeux des numériques, de l'algorithmie et des modèles de population synthétique.

- Etudes de l'adaptation de la mobilité face au coronavirus dans les Hauts-de-France
- Etudes de l'impact du péage de congestion
- Evaluation basée sur les scénarios
- Evaluation de nouveaux services de mobilité et planification stratégique urbaine
- Evaluation de services multimodaux pour alimenter Scot / PDU / Plan marchandise
- Evaluation de politiques d'intermodalité
- Évaluation environnementale de politiques de mobilité
- Evaluation environnementale du Plan climat-air-énergie territorial
- Gestion des urgences et des évacuations
- Impact de nouveaux services de mobilité
- Impact d'un changement d'attractivité des modes par le changement de la fonction d'utilité de chaque mode
- Impacts des politiques de transports sur les choix de mobilité
- Impacts locaux sur le bruit et les émissions de polluants
- Intégration de la stabilité dans la modélisation de la demande de déplacement
- Large éventail d'études de planification ou plus opérationnelles portant sur des systèmes multimodaux
- Modélisation des véhicules automatisés et ou connectés.
- Modélisation de nouveaux services de mobilité
- Modélisation des émissions de polluants (avec prise en compte des régimes moteurs froids ou chauds)
- Modélisation multimodale (bus courte ou moyenne distance, voiture particulière, vélo, marche)
- Modification de la capacité du réseau (fermeture de routes ou de rues, ...)
- Modification du réseau de desserte des bus
- Optimisation des services de mobilités existants
- Planification stratégique du système de transports incluant les services innovants
- Planification stratégique urbaine (deux réponses)
- Planification stratégique urbaine [*avec précision qu'il s'agit de*] l'évaluation d'activités futures et de leurs impacts sur la demande de déplacement dans ce quartier)
- Plusieurs types de problèmes à une échelle urbaine, mais toujours dans une perspective de long terme
- Politiques d'intermodalité dans un réseau multimodal à base d'agents
- Politique de transition énergétique par la pénétration des véhicules électriques dans un réseau multimodal à base d'agents
- Simulation de services de mobilités
- Simulation de services de mobilités et de l'implémentation de péages urbains
- Simulation d'un nouveau service de mobilité sur un territoire existant
- Test de nouveaux services de mobilité (deux réponses)
- Test de nouvelles approches de mobilité [*avec précision qu'il s'agit*] du développement de modèles sur l'estimation de la demande
- Test de transport à la demande

Espace géographique et nombre d'habitants

Les utilisateurs utilisent ces outils pour de grands périmètres, à la fois géographiques et en termes de population : seul l'un d'entre eux s'intéresse à une population de moins de 100 000 habitants ; c'est aussi cette personne qui s'intéresse à une zone géographique de moins de 5 kilomètres de diamètre (le modèle multi-agent utilisé est déclaré comme microscopique par le répondant, par ailleurs).

	Moins de 5 kilomètres de diamètre	Entre 5 et 20 kilomètres de diamètre	Plus de 20 kilomètres de diamètre
Moins de 100 000 habitants	1	1	
Entre 100 000 et 1 million d'habitants			9
Plus d'1 million d'habitants		3	13

Tableau 2 : taille des zones géographiques couvertes et nombre d'habitants concernés (27 réponses).

Génération de la demande

La question de la génération de la demande a été décomposée en deux sous-questions : la méthode de génération et les données d'entrée. Les données d'entrées sont les journaux d'activités, les enquêtes transports, les statistiques nationales et locales. La description de l'offre est également nécessaire, à un niveau détaillé. Les données de flux (VP et TC) sont également utilisées. Sur les méthodes de génération, c'est des méthodes décrites en détail dans le rapport d'état de l'art qui sont utilisées le plus (IPF et IPU).

Quelle méthode utilisez-vous pour générer la population ?	Quel type de données d'entrée utilisez-vous ? De quelle source proviennent-elles ?
Pour la génération de la population synthétique, l'ajustement proportionnel itératif (IPF) et la mise à jour proportionnelle itérative (IPU) sont utilisés.	Les distributions agrégées des attributs des ménages et des individus fournies par les données de recensement ainsi que par les données d'enquête sur les déplacements sont prises en compte. Des matrices de déplacements OD désagrégées provenant de divers services de mobilité partagée sont également utilisées..
Sans objet (l'outil génère la demande à partir de l'utilisation de l'espace)	Données géographiques (population, modèles numériques d'élévation, occupation des sols, routes, hydrographie...)
Réseaux bayésiens, IPF, IPU	Enquête sur les déplacements des ménages, journal des déplacements, recensement global.

Pipeline(s) de Générateur de population synthétique	INSEE, ENTD, BPE, SIREN, MOS et données de téléphonie mobile
Intégré dans CT-RAMP (externe à notre développement). Généré à partir des données de l'enquête.	Statistiques de la population. Enquêtes sur les déplacements. Mesures de débit sur différents systèmes.
pour l'instant de l'existant: https://github.com/eqasim-org/ile-de-france	ces données viennent des open data, souvent fournies par l'INSEE
Mise à jour proportionnelle itérative (IPU)	Exportation de VISUM netfile (basé sur OSM) Données structurelles fournies par les gouvernements (âge, sexe, taille du ménage, emploi, revenu) Données d'enquête (USA : National Household Travel Survey, enquête nationale sur les déplacements des ménages), Allemagne: Mobilität in Deutschland, Deutsches Mobilitätspanel) Attractivité des destinations (basée sur OSM) Echantillon pour la synthèse de la population Bornes de recharge à partir d'OSM Données d'occupation des sols de Corine Landcover Paramètres pour les modèles de choix
Mise à jour proportionnelle itérative (IPU)	Données structurelles (âge, sexe, taille du ménage, revenu, emploi, éducation) VISUM netfile (basé sur les données OSM) Stations de recharge Echantillon de population (USA : National household travel survey, Allemagne : Mobilität in Deutschland, Deutsches Mobilitätspanel) Valeurs d'attractivité basées sur les données OSM
La génération de la population ne fait pas partie de notre simulateur de base. Elle est effectuée en fonction de la disponibilité des données et du cas d'utilisation. Pour certains cas d'utilisation, la génération de population se fait directement par transformation de données. Dans d'autres cas, la fusion de données est nécessaire. Et lorsque nous avons besoin de la demande globale, nous utilisons Eqasim. https://github.com/eqasim-org/ile-de-france/blob/develop/docs/population.md	Cela dépend des cas d'utilisation : recensement de la population, enquête sur les transports publics, billetterie, informations sur l'utilisation des sols en données ouvertes, enquête sur les ménages et les transports, etc.
Modèle propre utilisant IPF/IPU	attributs socio-économiques, lieux de résidence et d'activité, temps de déplacement, prix
Une méthode propre, composée de plusieurs approches de la littérature.	* BPE (Base Permanente des Équipements) destinée à fournir le niveau d'équipement et de services rendus par un territoire à la population.

	<p>Cette base permet de produire diverses données sur les équipements (indicateur de la disponibilité, de la densité d'un équipement) ; toutes ces données étant rapportées à une zone géographique (IRIS, un équivalent de TAZ Traffic Analysis Zone).</p> <p>* INDCVI (Individu Localisé au Canton ou Ville) : c'est un fichier public de recensement, il contient un ensemble d'individus triés par le code du canton, chaque ligne de données décrit un individu (caractéristiques socio-démographiques et du ménage).</p> <p>* MOB-PRO (Mobilité Professionnelle) : données bi-localisées sur les déplacements domicile-travail décrivant les caractéristiques de l'individu, de son ménage et de sa résidence principale ; les données sont triées par (résidence-commune et travail-commune).</p>
PopSyn	Le Bureau australien des statistiques (ABS), qui est l'agence en Australie qui effectue notre recensement quinquennal.
eqasim Échantillonnage direct Appariement statistique	<p>Données de recensement</p> <p>Données origine-destination</p> <p>Informations fiscales</p> <p>Enquêtes sur les déplacements des ménages</p> <p>Recensement des entreprises</p> <p>Base de données d'adresses</p> <p>Réseau routier</p> <p>Horaires des transports en commun</p>
Nous avons développé un algorithme propre pour développer la population. La base de la modélisation de la demande provient de l'enquête nationale sur les déplacements qui répertorie les carnets de voyage au niveau du district. Pour MATSim, il est nécessaire de définir les emplacements spécifiques des points d'arrivée et de départ. Nous avons donc utilisé une méthode de désagrégation pour faire correspondre les temps de trajet répertoriés avec les temps simulés..	<p>Enquête nationale sur les déplacements (Österreich Unterwegs 2013/14)</p> <p>OpenStreetMap</p> <p>Horaires des transports en commun</p> <p>Volumes de comptage du trafic</p> <p>Modèle de choix du mode de transport :</p> <p>Enquêtes sur les préférences modales</p>
IPF / IPU	Recensement, carnets de voyage
N/A	<p>Enquetes Menage</p> <p>GNSS</p> <p>Données téléphonie mobile</p> <p>Données entreprises</p>
Diverses méthodes. Réseaux bayésiens, appariement statistique, IPF/IPU	principalement basé sur des données ouvertes (recensement, enquête sur les déplacements, OpenStreetMap, recensement des entreprises, matrices de migration pendulaire).

L'algorithme Iterative Proportional Updating (IPU) de TransCAD - il s'agit d'une version plus efficace de l'IPU de PopGen.	Enquête sur les déplacements des ménages, données LBS passives (big) origine-destination, données sur les temps de déplacement, comptages de circulation, données de recensement, données sur l'emploi commercial, données sur les horaires des signaux...
Cela dépend des données d'entrée de la population.	Carnets de voyage des ménages, DO, résultats d'autres outils de simulation.

Calibrage et validation

Quelle méthode utilisez-vous pour le calibrage et la validation de votre modèle ?

- Comparaison des principaux indicateurs clés de performance (répartition modale, répartition des longueurs de voies), affectation et comparaison par rapport aux flux
- Comparaison avec les données d'enquête ; comparaison avec les comptages de trafic
- Comparaison avec les comptages de trafic ; comparaison avec les résultats d'enquêtes
- Volumes de comptage et étalonnage par rapport à la répartition modale
- Dépend du sous-modèle (génération de déplacements, distribution des déplacements, choix de l'itinéraire, affectation du trafic).
- Modèle de choix discret
- Pour la calibration et la validation, nous utilisons une comparaison des parts modales entre la simulation et les données réelles (travail en cours sur ce point).
- Manuel ou Cadyts, sur les comptages de trafic
- Validation manuelle ; SPSA ; CMA-ES ; Opdyts
- nombreux, divers
- Multiples.
- De nouveaux modèles de choix de mode sont estimés qui incluent les services de mobilité émergents. La validation de ces modèles est effectuée en comparant les résultats avec des ensembles de données réelles disponibles liées aux nouveaux services.
- Pas encore éprouvé
- Pas pour l'instant
- Analyse de sensibilité
- Différentes approches ont été utilisées dans le contexte de MATSim, notamment SPSA, les outils cadyts et opdyts.
- En général, on utilise des comptages par cordon. Cependant, en fonction de la disponibilité des données, un utilisateur peut effectuer son propre calibrage/validation.
- Nous définissons les KPI de calibration. Ensuite, nous itérons manuellement et explorons les paramètres.

Quels sont les avantages et les inconvénients de votre modèle

Nous avons conduit l'analyse conjointe des deux réponses, en la reliant au logiciel avec deux catégories : MATSim et les autres, afin de préserver la confidentialité des réponses, vu le faible nombre de réponses sur les modèles autres que MATSim. Ceci est présenté dans le tableau suivant.

Globalement, quel que soit le logiciel utilisé ou développé, les avantages mentionnés sont :

- La flexibilité et la possibilité de segmenter la population ;
- La capacité, liée à la nature de paradigme multi-agent de ces modèles, de faire émerger des comportements collectifs avec prise en compte des rétroactions ;
- La nature multimodale du réseau décrit et des choix des usagers et la possibilité de traiter des nouveaux services de mobilité.

Les inconvénients sont le fait d'être gourmands en données (même si, comme on peut le voir dans les discussions en entretien, il y a des méthodes qui permettent de faire des passerelles) et en temps de calcul. La difficulté de l'utilisation : long temps de mise en route et absence d'interface graphique sont très souvent cités. De nombreux retours concernent le fait que les données sur les nouveaux services ne sont pas disponibles, ce qui limite le pouvoir prédictif.

Dans le cas de MATSim, l'avantage mis en avant est lié au fait que ce soit un outil *open source*, avec une très large communauté d'utilisateurs.

	Quels sont les principaux avantages de votre modèle ?	Quels sont les principaux inconvénients de votre modèle ?
MATSim	Peut traiter des scénarios de grande échelle, adapté à des scénarios différents de la réalité actuelle, le modèle le plus testé parmi les modèles du même type et largement connu.	Temps nécessaire pour initier la modélisation d'un nouveau réseau et temps nécessaire aux calculs (mais ceci est vrai pour tous les modèles de ce type, sauf pour ceux qui n'utilisent pas de processus itératif, c'est-à-dire ceux qui renoncent à l'émergence de comportements collectifs (alors que c'est la principale raison pour utiliser ces modèles)
	Grande communauté d'utilisateurs, grand nombre de possibilité, grande flexibilité et facilement adaptable à des besoins spécifiques	Le temps pour avoir une vision d'ensemble et comprendre tous les composants est long. Pas d'interface graphique pour l'utilisateur, pas accessible rapidement sans compétence en programmation. Peu de matériel d'enseignement
	Est open-source avec un nombre satisfaisant d'utilisateurs. A montré ses capacités lors d'études précédentes	Temps de calculs très longs.
	Open-source, modulable, développé depuis de nombreuses années, maintenu	Complexe, nécessitant beaucoup de données, pas d'interface graphique, longue période pour mettre en route le modèle
	Modèle de calcul d'itinéraire spécifique, permettant des trajets multimodaux et qui a des fonctionnalités qui permettent	Nous n'avons pas pour l'instant simulé les transports de marchandise. Prise en compte des déplacements avec origine et destination

	<p>d'accélére le processus de simulation des choix d'itinéraires. Nous utilisons des sous-populations pour spécifier les fonctions d'utilité pour différents groupes d'agents. Plusieurs schémas opérationnels de gestion des transports à la demande ont été testés.</p>	<p>en dehors du réseau simulé. Le stationnement ne peut pas être modélisé. L'augmentation de la population dans les différentes zones n'est pas encore implémentée.</p>
	<p>Grande échelle, basé sur les activités, modifiables</p>	<p>lent</p>
	<p>Open source et capable de gérer des réseaux de grande taille</p>	<p>Ne peut pas simuler la totalité de la population pour les grandes villes, on doit réduire à un sous ensemble de la population</p>
	<p>Flexibilité et adaptabilité à un champ vaste de possibles pour l'analyse territoriale. Compatibilité avec d'autre cadre de simulation tels que GAMA (échelle micro), mutualisant la population synthétique et les protocoles de traitement de données. Un cadre open source abordable pour la force publique et lui permettant de s'appuyer sur son excellence académique locale pour apporter les compétences de pointe requises. Un écosystème de développement global (forces publiques et académique) pour mutualiser des développements sur des problématiques communes, partager des retours d'expérience et répliquer les bonnes pratiques, bâtir une capacité d'analyse et une "intelligence" territoriale riche.</p>	<p>Nécessite des compétences techniques pour mettre en œuvre et produire les éléments d'analyse qui appuieront le processus d'aide à la décision. Nécessite une infrastructure numérique et des processus de collecte et standardisation des données robustes.</p> <p>Notre démarche vise à familiariser, former et mettre en compétence les acteurs publique dans la prise en main de ces outils et l'appréhension des enjeux de l'algorithmie que soulève la nouvelle économie numérique. L'objectif est de bâtir avec les communes et forces territoriales une solidarité numérique, et un écosystème local de développement et d'analyse, plutôt que de tenter d'imposer une solution de plateforme numérique privé</p>
	<p>Ouvert, contributif, adopté par de nombreuses autorités et partenaires industriels.</p>	<p>Des améliorations sont nécessaires pour réduire le temps de calcul, et rendre le développement de scénario plus accessible, mais cela ne semble être qu'une question de temps et de ressources. Si les acteurs de la sphère ABM passait moins de temps à essayer de produire des solutions propriétaires, et plus à contribuer l'amélioration d'une référence de</p>

		la valeur émergerait pour chacun...
Autre	C'est flexible et adaptable. Nous pouvons implémenter le modèle sur une nouvelle zone car il intègre les formats des données habituelles. C'est également facile d'implémenter un nouveau service de mobilité ou un nouveau comportement d'agent	Tout n'est pas possible. Par exemple, le modèle ne peut utiliser les plans d'activité et les changer comme MATSim le fait. Par construction, le modèle n'était pas fait pour gérer les choix de modes. Néanmoins, nous avons ajouté une nouvelle couche pour pouvoir utiliser le simulator comme une librairie. On peut ainsi chercher une convergence par itération.
	Notre modèle propose des possibilités nouvelles pour comprendre et analyser les processus d'expansion urbaine et leurs impacts. Notre prototype a pour objectif de développer trois sous modèles spécifiques, permettant l'interaction des actions des planificateurs, des développeurs et de la population	Besoin de gérer une grande quantité d'information géographique.
	Champ d'action large : permet l'exploration et l'évaluation d'un grand nombre de politiques de déplacement	Temps de calcul très longs : trop de détail.
	Capacités de modélisation et d'évaluation des impacts des nouveaux services.	Manque de données pour les nouveaux services
	auto-adaptatif, décentralisé, basé sur des actions simples	équilibre à trouver entre déterminisme vs probabilités, rigidité vs capacité à s'adapter
	Reproduit les interactions dynamiques offre/demande asynchrones, replanification en temps réel (optimisation online) des véhicules et des personnes, permet de suivre précisément (spatialement et temporellement) les agents sur le territoire. La finesse permet également de simuler l'impact des aléas (Fracture entre l'estimé par les agents de dispatch et la réalité, dans le cas d'une rupture de	La finesse des calculs est consommatrice en temps (optimisation, routage des personnes et simulation des interactions), la demande doit pour le moment être filtrée sur la population.

	route par exemple).	
	Modélisation de la demande de déplacement pendant une semaine. Incorpore la stabilité de la demande de transports (préférences et sensibilité aux différents modes). Génération d'activités. Formalisme modulaire qu'on pourra étendre sur beaucoup d'aspects. Prise en compte du contexte du ménage des agents (la possession d'un véhicule peut être modélisée au niveau individuel ou au niveau du ménage). Formalisme modulaire qui permet d'avoir des modèles substituables. Intermodalité dans la destination et le choix modal. Combinaison de transports privés et de transports de marchandises (paquets).	Il n'y a actuellement pas de choix d'itinéraire. Pour l'instant, le modèle fonctionne encore sur les zones d'analyse de trafic.
	Capacité à modéliser tous les modes de déplacement	Temps de calcul
	Capacité à traiter des questions de dynamique du trafic, à traiter des questions d'équité et à prendre en compte des déplacements non motorisés	Complexité et variabilité d'une simulation à l'autre
	Population synthétique plus riche Reproductible	RAS
	Il étudie un réseau multimodal et plusieurs activités quotidiennes Il s'accompagne d'un GitHub qui lui permet d'être reproductible par ailleurs	Le calibrage doit être amélioré à travers des comptages

Tableau 3 : avantages et inconvénients des différents modèles

TRL (ou niveau de préparation pour le transfert)

Nous avons demandé à une partie des répondants (la version initiale ne contenait pas cette question) d'évaluer le TRL ou *Transferability Readiness Level*. Nous n'avons que 16 répondants à cette question. Compte tenu de la diversité des avis, même parmi les utilisateurs de MATSim (certains indiquant un fort, un moyen ou un faible niveau de transférabilité), nous pensons que l'enquête n'est pas utilisable sur ce point.

Sources documentaires

- Aimsun : Projet européen MOMENTUM: <https://h2020-momentum.eu/> et HARMONY: <https://harmony-h2020.eu/>
- Tapas : <https://github.com/DLR-VF/TAPAS>
- MobiTopp : <https://github.com/kit-ifv/mobitopp>
- GeoTwin : <https://geotwin.io/en/>
- MATSim :
 - <https://matsim.org/>
 - <https://github.com/matsim-org>
 - <https://github.com/matsim-org/matsim-libs>
 - <https://github.com/eqasim-org/ile-de-france>
 - <https://github.com/eqasim-org/eqasim-java>
- Starling : <https://github.com/starling>
- ActivitySim :
 - partie modèle multi-agents <https://activitysim.github.io/>
 - et pour l'affectation dynamique : <https://www.caliper.com/transmodeler/default.htm>
- Odyssee : <http://www.odyssee.co/> <https://github.com/odyssee-co>

III. **Compte rendu des discussions en visioconférence**

Des entretiens ont été proposés dans le cadre de l'enquête Lime Survey décrite ci-dessus (la page de conclusion proposait d'indiquer son adresse électronique si on souhaitait participer). Deux entretiens avec des collègues académiques à l'échelle internationale (situés dans des pays très divers : Inde, Allemagne, Suisse, Espagne, France et Canada) ont été conduits. De plus, trois fournisseurs de logiciels ou de services utilisant ou développant des modèles multi-agents basés activités ont été contactés directement pour des entretiens. Les points principaux de chacun de ces entretiens sont résumés ci-après.

III.1. **Entretien du 16 mars 2021 avec Vincent Leblond (Tella, Nantes - France)**

Question : Quels sont les avantages et les inconvénients des modèles d'activités et des simulations multi-agents à base d'activités ?

Réponse : La grosse difficulté avec les modèles à base d'activités, c'est la nécessité d'avoir beaucoup de données détaillées pour décrire le comportement des agents, leurs localisations leurs trajets, etc. Alors que les modèles statiques et quatre étapes, c'est plus simple, et plus robuste parce que cela reste statistique. La variabilité inhérente aux systèmes multi-agents, on est obligés d'avoir de la stochasticité et de l'incertitude, notamment sur la population synthétique. Cela est d'autant plus complexe qu'on les valide avec des données agrégées. On peut donc avoir des choses incohérentes au niveau microscopiques, mais qui ne se voient pas au niveau agrégé. En revanche, pour des cas particuliers, ou des services particuliers, on peut aisément travailler à l'échelle individuelle d'une manière très pertinente, qu'on peut valider au niveau individuel aussi.

L'un des avantages des modèles à base d'activités est le choix modal qui est totalement intégré dans le comportement des agents, et émerge des simulations et de l'exécution des agents. Dans les modèles à quatre étapes, le rebouclage entre l'étape 3 (choix modal) et 4 (affectation) se fait de plus en plus, surtout pour la prise en compte de la saturation des réseaux. Mais cela reste moins naturel que dans les modèles et les simulations à base d'activités. Le modèle ANTONIN de la RATP ne reboucle pas par exemple. MODUS peut reboucler, mais la DRIEA ne le fait pas beaucoup pour des raisons de performance de l'exécution.

Question : Quid de la scénarisation, une fois un modèle en place : si on veut par exemple intégrer des vélos, des piétons, une nouvelle tarification de stationnement, etc. dans un modèle en place, quel modèle peut le faire d'une manière plus pertinente : à base d'activités ou quatre étapes ?

Réponse : L'impact de la tarification par exemple est fait d'une manière très macroscopique dans un modèle à quatre étapes. D'une part, on n'a pas l'information sur la disponibilité des parkings, et on traite des masses d'individus. Dans MODUS et ANTONIN, le stationnement est intégré comme des niveaux de difficulté de stationnement (4-5 niveaux), défini par défaut en fonction de la densité urbaine (qui ne suffit pas, notamment à Paris – où l'ouest est bien mieux loti en termes de stationnement), et qu'on définit ultérieurement par calibrage. Les modèles multi-agents peuvent être plus pertinents, si on a l'information précise sur les parkings. Sinon, on se retrouve à faire la

même chose que pour les modèles à quatre étapes (spécifier des niveaux de difficulté, définition par calibrage).

La grosse différence entre les modèles à quatre étapes et les modèles multi-agents est la suivante. Le premier est statique, lourd, mais robuste et fournit des informations statistiques, sans rentrer dans le détail, d'assez bonne qualité. Pour jouer des scénarios (par exemple le télétravail), il se fonde sur des hypothèses exogènes construites sur les dires d'experts. En général, il n'y a pas beaucoup de découvertes en sorties, autres que ce qu'a défini l'expert. Le second est dynamique, plus fin, mais moins stable. Pour jouer des scénarios, il fait vivre les agents, selon des règles, construites selon les dires d'experts aussi, mais qui donnent des modèles avec plus de potentiel de découvertes.

Un autre avantage des modèles multi-agents est la représentation fine de la fréquentation à l'échelle d'un moyen de transport (un bus par exemple) et la représentation temporelle de l'ensemble de la journée, alors que les modèles à quatre étapes se focalisent sur les périodes de pic, et fournissent en général des moyennes.

Plus profondément, la justification profonde de l'usage des systèmes multi-agents est une vision politique : une vision des transports où on cherche à satisfaire des besoins de mobilité des individus, et pas aux besoins d'une masse qui va au travail et rentre du travail aux heures de pointe. La mobilité n'est pas qu'en semaine aux heures de pointe, mais toute la journée, le soir, le week-end et pendant les vacances. Les modèles dynamiques multi-agents sont plus capables de représenter cette réalité et de répondre à ce besoin.

Question : Les modèles multi-agents sont-ils assez matures pour fonder les décisions de politiques de mobilité ?

Réponse : La question est l'adoption par les planificateurs de ces modèles. Les modèles multi-agents arrivent après les modèles à quatre étapes, qui ont pris énormément de temps avant de s'imposer. Jusqu'à aujourd'hui, ces modèles ne sont pas complètement adoptés. Les collectivités demandent en général des études, et n'investissent pas elles-mêmes dans des modèles. Certaines viennent tout juste d'acquiescer un modèle à quatre étapes. C'est cela le principal handicap aux modèles multi-agents, c'est le temps nécessaire pour leur adoption, comme cela avait été pour les modèles à quatre étapes.

Question : Pensez-vous qu'il soit aisé, nécessaire et/ou intéressant de coupler une simulation à base d'activités et une simulation de trafic ?

Réponse : J'y crois beaucoup. Il est important de prendre le meilleur de chaque type de simulation. MATSim est pertinent si on n'est pas intéressé par tous les détails d'écoulement de trafic, et qu'on veut rester à un niveau d'abstraction élevé. Mais il est important de pouvoir s'appuyer sur une bonne simulation de trafic si ces détails ont leur importance dans le cas d'étude considéré. Mais je n'ai pas vu grand-chose dessus. Nous comptons nous investir là-dessus à court terme.

Question : Comment calibrer et valider les modèles à base d'activités ?

Réponse : Les données de calibrage et de validation sont en général à un niveau très agrégé, alors que la force du modèle multi-agents est dans son caractère désagrégé. Elles concernent en général les parts modales, les distances parcourues et les temps de parcours, comme pour un modèle à quatre étapes d'ailleurs. Cela correspond d'ailleurs aux habitudes des opérationnels qui sont habitués à ce genre de métriques : ils ne sont pas intéressés par les activités en tant que telles, mais aux indicateurs macroscopiques comme les parts modales. Les paramètres qu'on calibre typiquement sont les coefficients de la fonction d'utilité, surtout la constante, si on voit que les parts modales ne sont pas bonnes. Mais je pense qu'il y a là des pistes d'amélioration énormes dans ce sens, en recherche comme dans le monde opérationnel : comment descendre au niveau désagrégé, autant en calibrage qu'en validation.

Question : Comment fait-on pour faire évoluer la population synthétique pour des situations futures ?

Réponse : En général, on ne fait rien : on ne fait pas évoluer la population synthétique. Et cela s'explique très bien : est-ce que les évolutions fondamentales de comportements ont une variabilité plus grande que celle de l'EGT par exemple, c'est-à-dire dix ans ? Les évolutions dans les déplacements sont plutôt relatives à l'évolution urbaine, et à l'offre de transport. On peut raisonnablement penser que les simulations sont capables de prendre en compte ces évolutions-là, sans remettre en cause les comportements des agents. Entre 2001 et 2010 par exemple, les changements principaux étaient dus à l'évolution de l'offre.

Quelques rares évolutions comportementales ont pu néanmoins être observées sur une décennie. Sur la décennie 2001-2010 par exemple, un changement comportemental de la demande a été observé, celui relatif aux RTT. Le résultat a été par exemple que la différence de fréquentation entre les mardis et jeudis d'une part et le reste de la semaine d'autre part est devenue moins prononcée suite à cela. Le changement comportemental important en cours est d'après moi la propension croissante à utiliser le vélo, ce qui n'est en général pas bien pris en compte actuellement.

III.2. Entretien du 16 mars 2021 avec Göknur Sirin (GeoTwin, Paris - France), Pieter Fourie (GeoTwin, Paris - France) et Pierre-Olivier Banguion (GeoTwin, Paris - France)

Question : Quels sont les avantages et les inconvénients des modèles d'activités et des simulations multi-agents à base d'activités ?

Réponse : Si on est intéressé par les augmentations de capacité de l'infrastructure on choisirait plutôt un modèle à quatre étapes. Ces modèles s'intéressent à la planification de capacités d'une manière agrégée. Si on est intéressé par les changements comportementaux, ou à l'accessibilité individuelle à la mobilité, on choisirait les modèles et les simulations à base d'activités.

Question : Quelles sont les limites des modèles d'activités et des simulations multi-agents à base d'activités ?

Réponse : Ils demandent énormément de données. Ils demandent également beaucoup d'efforts méthodologiques, puisqu'ils doivent modéliser explicitement les mécanismes de décisions individuelles.

Question : Prenons le cas de l'introduction de voies cyclables, il s'agit bien d'infrastructure, quel modèle choisiriez-vous ?

Réponse : Alors, dans ce cas effectivement, il s'agit d'un mode particulier, ne prenant pas beaucoup d'espace, mais ayant une dynamique complexe, serait plus éligible à une modélisation à base d'activités qu'à une modélisation à quatre étapes.

Question : Dans ce cas de l'introduction de voies cyclables, pensez-vous que les données existantes sont suffisantes pour faire tourner le modèle ou aurions-nous besoin d'autres données spécifiques ?

Réponse : Des données additionnelles sous forme d'enquêtes ou de questionnaires spécifiques, ou encore des données issues de simulateurs de vélos sont effectivement nécessaires pour ce genre de scénarios. Cela permettrait de connaître le degré d'affinité du public cible pour ce genre d'infrastructure ou de services, et comment ils réagiraient. Le résultat de cette étape permettra d'ajouter des attributs aux arcs concernés du réseau, et de regarder par simulation ce que cela donnerait à l'échelle macroscopique.

Question : Quel est le degré de maturité de la modélisation à base d'activités ?

Réponse : En réalité, la question est « est-ce que les décideurs et les opérateurs sont prêts à adopter ces modèles » que celle sur la maturité des plateformes et des méthodes existantes. Les utilisateurs potentiels doivent être prêts à des modélisations plus sophistiquées et plus complexes. Les planificateurs sont habitués à des modèles déterministes, et l'idée d'avoir de la stochasticité, ou même du chaos déterministe dans la modélisation peut rebuter. Mais les modèles eux-mêmes sont aussi robustes que les modèles à quatre étapes, et la présence de données massives individuelles telles que les données mobiles militent pour l'utilisation de ces modèles désagrégés. Pieter Fourie avait effectué une modélisation à base d'activités en Afrique du Sud une dizaine d'années plus tôt qui était aussi valide qu'un modèle à quatre étapes pour les comptages, mais bien plus valide pour les temps de parcours. Même avec les mêmes données, on est capable de produire de meilleures décisions avec les modèles multi-agents.

Question : Pensez-vous qu'il soit aisé, nécessaire et/ou intéressant de coupler une simulation à base d'activités et une simulation de trafic ?

Réponse : Oui, cela a d'ailleurs été fait dans quelques projets. Par exemple dans Hermes (<https://www.matsim.org/2020/hermes>). Le couplage de simulations en général est en effet un sujet intéressant et a un intérêt certain, UrbanSim (simulateur d'occupation des sols) a été couplé avec Visum d'une part et avec MATSim d'autre part. Le point important est que les agents dans la simulation à base d'activités doivent utiliser les résultats de la simulation de trafic, sinon cela n'a pas beaucoup d'intérêt. Cette option est d'ailleurs possible dans la plateforme GeoTwin, suivant une architecture maître (activités)/esclave (trafic). Il faut tout de même le faire avec parcimonie, car les

temps d'exécution des deux simulations sont longs, et si elles doivent s'attendre l'une l'autre, cela risque de devenir inutilisable. Attention également à la reproductibilité des simulations dans ce cas particulier : deux simulations pourraient ne pas donner les mêmes résultats.

Question : Dans les simulations à base d'activités, notamment avec MATSim, on ne simule souvent qu'une petite fraction de la vraie population d'un territoire, et on suppose que les résultats sont généralisables à 100% de la population. Effectuez-vous le même choix dans la plateforme GeoTwin ?

Réponse : Lorsqu'on s'occupe d'un segment particulier de la population, comme c'est le cas dans plusieurs de nos scénarios, cela n'a pas beaucoup de sens de simuler l'ensemble de la population. Dans MATSim aussi, lorsqu'on simule un nouveau service de mobilité, il faut aller à 100% lorsque la capacité des véhicules est très petite. C'est toujours un compromis entre le degré de réalisme que l'on souhaite avoir, et l'efficacité de la simulation.

Question : Comment calibrer et valider les modèles à base d'activités ? Il semble que la validation est généralement effectuée à un niveau macroscopique ?

Réponse : Quand vous avez un modèle à base d'activités, vous pouvez le calibrer soit sur les volumes (comptages), soit sur les temps de parcours. Le calibrage ici veut dire l'adaptation de la capacité de certains liens pour avoir les bons volumes ou temps de parcours en sortie de simulation. Mais il est très dur de calibrer les deux : volumes et temps, surtout que pour les modèles multi-agents, les temps de parcours émergent d'une manière *bottom-up*. Pour les paramètres à calibrer dans la simulation, on suppose que si la population synthétique est correctement construite, et que les modèles de choix sont corrects, nous ne devons pas les « bricoler » et appeler cela calibrage. Seuls les paramètres du réseau de transport doivent être calibrés. Certains travaux le font pour des cas particulier, par exemple dans un travail de UCL, ils ont remarqué une propension des conducteurs à éviter les ponts, il a donc fallu adapter le modèle de choix. Mais en règle générale, le calibrage ne devrait pas remettre en question le travail sur la population synthétique et les activités des individus. Pour la validation, nous effectuons des validations assez fines. Dans plusieurs de nos travaux, à Singapour par exemple, nous effectuons des calibrages et des validations sur chaque station, et heure par heure, c'est-à-dire que nous vérifions que les flux et les temps de parcours correspondent à ce qui est observé dans chaque station toutes les heures et non sur toute la journée. Mais en général, selon les données disponibles, on vérifie en effet que les sorties macroscopiques correspondent aux données macroscopiques observées.

Question : Comment prendre en compte les flux qui n'existent pas dans les enquêtes et les recensements (touristes, transport logistique, etc.) ?

Réponse : Deux moyens pour le faire. Le mieux est d'utiliser les données, et elles existent auprès des autorités, sur les touristes, leur budget transport, etc. et sur le fret. Mais cela complexifie évidemment le modèle, et toutes ses étapes y compris le calibrage et la validation. Le second moyen est d'utiliser les données de boucles pour ajouter un « bruit de fond » de trafic, qui sera ajouté dans les simulations, sans avoir à modéliser ces flux manquants d'une manière explicite.

III.3. Entretien du 22 mars avec Athina Tympakianaki et Jordi Casas (Aimsum, Barcelone, Espagne)

L'objectif final d'Aimsum est d'intégrer des modes de transports à la demande, ce qui n'existe actuellement pas comme offre commerciale fiable. Pour cela, Aimsum suit simultanément trois directions qui convergent en un produit unique.

Le premier axe, qui a commencé il y a plus d'un an, vise à développer une plateforme multi agents. Les données d'entrées sont, pour chaque déplacement, l'heure de départ, l'origine et la destination. L'idée est de combiner cela avec un algorithme de gestion de flotte et de rechargement dans le cas de véhicules électriques en libre-service.

La deuxième direction est celle de développer la micro-simulation à des échelles plus grandes que celles habituellement possibles.

La troisième direction (intégrée dans les recherches menées dans le cadre du projet européen Momentum – voir <https://h2020-momentum.eu/> et en particulier en ce qui concerne les développements : <https://h2020-momentum.eu/tools/>) vise à produire une génération synthétique de la population qui donne accès à une demande dynamique de déplacements individuels. Pour la génération de cette population synthétique, la méthode utilisée est celle de l'IPU (voir rapport d'état de l'art). L'équipe projet doit rendre une preuve de concept à son financeur (l'Union Européenne dans le cadre d'un projet H2020) en juillet 2021.

Nous posons des questions concernant la possibilité pour Aimsum de répondre à un appel d'offre sur un outil de simulation multi-agents. A Londres, Transport for London (TfL) a demandé à Aimsum de développer un outil pour remplacer l'outil de modélisation à 4 étapes Saturn (<https://saturnsoftware2.co.uk/>). TfL a identifié que l'algorithme de chargement du réseau de Saturn limite l'usage de cet outil dans le cas où on souhaite comparer différentes stratégies en intégrant au modèle les très nombreuses informations maintenant disponibles. Ainsi Aimsum a proposé un outil intermédiaire entre un modèle à 4 étapes et un modèle multi-agents à base d'activités. Les données d'entrée nécessaires sont les attributs socio-démographiques (comme l'accès à une voiture ou un vélo, ou à des services de mobilité partagée). Lorsque la demande n'est pas trop importante, on peut utiliser les données historiques disponibles pour estimer l'offre des systèmes de mobilité partagée. Par contre, le modèle permet de réestimer l'offre en cas de demande particulièrement forte, sur une base désagrégée.

La question des données d'entrée est de nouveau abordée. Clairement, les donneurs d'ordre souhaitent utiliser le plus possible les données individualisées, notamment celles auxquelles les *smart phones* donnent accès. Cependant, dans l'attente, pour alimenter les modèles avec des données les plus désagrégées possibles, une tendance est d'augmenter le nombre de zones. Ainsi le modèle de San Diego (voir <https://www.sandag.org/index.asp?subclassid=120&fuseaction=home.subclasshome>) en Californie, contient plus de 100 000 zones. Mais cette approche a de lourds impacts en termes de temps de calcul et n'est pas compatible avec les modèles à 4 étapes (ce que n'est pas le modèle de San Diego).

Le passage à un paradigme multi-agents permet de s'affranchir du problème de temps de calcul. Néanmoins des problèmes perdurent dans un système multi-agents, notamment la question de la valeur du temps pour les trajets des cyclistes, ce qui pousse à augmenter le nombre d'attributs des usagers.

En ce qui concerne le calibrage et la validation, nos interlocuteurs rappellent que la validation d'un modèle de demande est toujours indirecte, car on ne connaît pas la demande. On peut le faire en particulier par l'intermédiaire des temps de parcours (des différents modes). Dans le cas où on observe une différence, on se concentre sur le calibrage de l'offre. L'idée est de choisir une partie de la ville sur laquelle cette offre est très bien connue et de viser à un bon calibrage, en associant les approches *data driven / model driven*.

Sur la période de simulation, ce qui est visé c'est une modélisation complète sur la semaine (24h/24h, jours ouvrés et week-end). Pour atteindre cet objectif, une méthode basée sur l'intelligence artificielle est utilisée, qui permet de regrouper les profils identiques. Ainsi les 365 jours d'une année sont simulés pour la ville de Singapour, avec l'aide de 365 machines virtuelles. Ceci permet de réduire les temps de calcul ("*cloud massively distributed simulation*").

III.4. Entretiens du 15 mars avec Milos Balac (MATSim, ETZH, Zurich), Johannes Mueller (MATSim, AIT, Vienne), Daniel Krajzewicz et Matthias Heinrichs (Tapas, DLR, Berlin) et du 23 mars 2021 avec Francesco Ciari (CRT, Montréal), Montserrat Gomez Delgado (Université d'Alcala, Madrid) Sebastian Hörl (IRTsystemx, Paris) Daniel Krajzewicz et Matthias Heinrichs (DLR, Berlin)

A la question de « pourquoi choisir d'utiliser les modèles multi-agents à base d'activité ? » il est répondu diversement suivant les participants :

- « il faut toujours utiliser ces modèles, car il n'y a rien de meilleur. En effet, les autres modèles [NDLR : au sens les modèles à 4 étapes] sont basés sur des régressions linéaires établies à partir d'observations ou à dire d'experts. Ils ne peuvent donc prédire ce qui se passera lorsque l'offre des modes de transports connaîtra de profondes évolutions avec l'apparition de nouveaux modes, par exemple. Les ABM permettent de s'adapter à ces nouveaux modes et d'avoir une représentation de la demande qui est le moins agrégée. De plus, il n'y a pas de problèmes de temps de calcul ».
- « je suis globalement d'accord, mais cela dépend de la question, c'est tout de même une grosse machine à mettre en place, qu'il ne faut pas utiliser pour des problèmes simples. De plus, il faut être conscient des limites de cette approche, qui nécessite beaucoup de données et a beaucoup d'incertitudes. Mais les décisions opérationnelles (par exemple sur l'organisation spatio-temporelle des nouveaux services de mobilité) ne peuvent être traitées que par les modèles à base d'agents. De même la question de l'équité ne peut être approchée que par les ABM. Nous ne sommes pas tous des usagers identiques. Seule la désagrégation de la demande inhérente aux ABM permet de traiter cela. »
- « Si vous avez des données agrégées, utilisez un modèle agrégé, à 4 étapes. La modélisation des activités tout au long de la journée qui est permise par les ABM n'est pas permise par les modèles à 4 étapes qui sont statiques. Ainsi, la modélisation de l'effet d'une variation

journalière des prix du stationnement n'est pas possible avec les modèles à 4 étapes. Seuls les ABM peuvent répondre à ce type de problème. Mais avec les ABM il prend garde à la fausse précision ("*fake accuracy*"), et au sur-calibrage.

- « Les ABM permettent de zoomer et d'avoir une visio fine sur une catégorie d'agents, c'est ce qui peut donner cette fausse précision, car en réalité, nous ne savons pas précisément les types d'agents que nous avons. Nous utilisons 10 classes d'agents avec chacune leur fonction d'utilité. Beaucoup de résultats dépendent de cette fonction d'utilité.

Nous abordons ensuite la question des données d'entrée. Les participants utilisent des données d'enquêtes, des données de recensement, et parfois des questionnaires (journal de bord). Il faut toujours dans ces cas-là s'interroger sur la qualité des données enregistrées.

S'engage alors une discussion sur la différence entre les modèles à base d'activité (*activity-based models* ou ABM) et les modèles basés sur les multi-agents (*agents-based models* ou ABM). Il convient de les distinguer, même s'ils sont identiques à 80 %.

- Les premiers construisent les plannings des différentes activités (le travail de modélisation est basé sur les activités) puis ensuite associent les parcours qui permettent de réaliser ces activités, mais souvent la reproduction des choix d'heures de départ et de mode n'est pas le but principal.
- Les seconds utilisent les activités comme entrées de leur modélisation (on peut donc dire qu'ils sont « à base d'activités »). Ensuite, l'accent est mis sur la représentation des choix d'heures de départ et de mode sur la base des interactions entre les agents. Les activités sont soit issues de journaux de bord d'activité (l'équipe de développement de Tapas a accès à plusieurs milliers de journaux de ce type, c'est aussi le cas de l'équipe d'AIT), soit issues de données individuelles (c'est le cas d'Eqasim, qui alimente le modèle MATSim). Les personnes présentes utilisent toutes cette solution. Il peut arriver que pour obtenir un équilibre, quelques activités soient permutées au sein des chaînes d'activités à l'intérieur du modèle, mais globalement ce sont des entrées des modèles MATSim et Tapas.

La question devient alors le calibrage des facteurs d'extrapolation qui sur la base d'une fraction des journaux d'activités permet d'avoir une estimation des activités de l'ensemble de la population. Ceci est fait par enquête spécifique ou par utilisation de résultats d'enquête de déplacements. A la question de savoir comment modifier ces facteurs lorsqu'il y a un changement sociétal global (comme le recours au télétravail post-covid), les participants répondent qu'il faudrait faire une nouvelle enquête, mais que pour les 30 dernières années, il n'y a pas eu de modification significative des facteurs d'extrapolation.

Matthias Heinrichs précise que le DRL a fait une expérience de « *backcast* ». Sur la base des données de 2008 et de 2017, ils ont utilisé les données de 2017 pour caler les facteurs d'extrapolation et les autres paramètres du modèle (fonction d'utilité) et sur la base de ce calibrage, avec le réseau de 2008 et les populations et répartition des emplois, ils ont réussi à valider très précisément (erreur de 2%) leur modèle sur les données de 2008.

Nous abordons alors la question de la maturité de ces outils pour prendre des décisions dans les collectivités territoriales. Pour JM, la difficulté est de faire comprendre les sources d'incertitudes. MB rappelle qu'aux Etats Unis les modèles comme MATSim sont très largement utilisés¹. La difficulté est de ne pas utiliser ses modèles comme des boîtes noires. Il faut aussi surmonter une relative difficulté à utiliser l'interface qui n'est pas complètement « user-friendly ». Des usages inattendus apparaissent par exemple SBB (les chemins de fer suisses) utilisent MATSim pour leurs prévisions des transports de marchandises sur le premier et le dernier kilomètre. Mettre en route un modèle basé activité dure au moins 4 mois. Tapas est en *open source* depuis 2 mois et peut être couplé avec Sumo (modèle de simulation microscopique du trafic automobile principalement). Ce couplage permet d'avoir de meilleures estimations des temps de parcours (lorsqu'il y a congestion) et converge relativement vite. Cela a été utilisé pour anticiper et quantifier les problèmes de rechargement de véhicules électriques dans Berlin.

Pour MATSim, MB témoigne que l'objectif est plutôt d'aller vers une meilleure prise en compte des activités, mais nous savons que l'Université de New York travaille sur le lien entre MATSim et Sumo.

La difficulté principale pour faire évoluer les collectivités territoriales de l'utilisation des modèles à 4 étapes vers les modèles multi-agents est la question des données d'entrée nécessaires, qui rentre en conflit avec la confidentialité des données personnelles (privacy). Pour cela, il faut montrer quelles sont les nouvelles possibilités. Dès qu'il y a une composante dynamique (péage urbain, variation des tarifs des parkings, ou encore effet de la congestion sur la durée entre deux rechargements des véhicules électriques), les modèles multi-agents sont meilleurs.

Des discussions s'engagent ensuite sur la question de la validation et du calibrage. MB utilise les indicateurs de proportion de choix modal par intervalles de distances parcourues et par type d'activité. Il rapporte à son commanditaire les marges d'incertitudes, même si une quantification de celles-ci est difficile.

Pour estimer les impacts des changements de comportement en faveur du vélo par exemple, MB a utilisé une enquête spécifique sur cet aspect. Sur l'acceptation des véhicules automatisés par les usagers, les répondants utilisent la littérature disponible, tout en étant très réservés sur la transférabilité des résultats d'un pays à l'autre, la culture par rapport à la possession de la voiture étant très variable d'un pays à l'autre.

IV. Pistes pour une collaboration entre la Ville de Paris et la recherche de l'Université Gustave Eiffel

A l'issue de ce travail, nous restons disponibles pour échanger avec la Ville de Paris, soit dans un cadre contractuel, soit dans un cadre d'utilisation des expérimentations qui pourraient être conduites lors de la mise en place des nouveaux dispositifs envisagés.

Dans le cadre contractuel, nous pouvons intervenir en appui à la rédaction du cahier des charges de la prestation de modélisation multi-agents, ainsi que pour la sélection de l'offre.

¹ On pourra par exemple consulter : <https://c2smart.engineering.nyu.edu/>

En dehors de ce cadre, nous sommes intéressés à pouvoir conduire des expérimentations (sur l'interaction entre les voies de covoiturage et les voies générales ainsi que sur la quantification de la congestion des différentes voies), ainsi qu'à utiliser les données collectées pour alimenter notre réflexion sur la prise en compte dans la modélisation multi-agents des effets de la congestion des différents modes sur les choix d'itinéraires et de modes. D'autres collègues de l'Université Gustave Eiffel pourraient également être intéressés par les effets des aménagements d'infrastructures et des évolutions sociétales en faveur de la prise en compte de l'environnement sur les décisions individuelles d'utiliser les modes doux.

Enfin, des thèses CIFRE, ou co-financées avec l'université Gustave Eiffel, sur les questions de la modélisation et de la simulation multi-agents de la mobilité, appliquées à l'environnement parisien, nous semblent être une piste de collaboration très intéressante.

Annexe : questions de l'enquête Lime Survey

Modèles multi-agents à base d'activité

Cette étude contribuera à une cartographie à jour des modèles multi-agents. L'étude concerne aussi bien le développement de nouveaux modèles que l'utilisation des modèles existants.

Nous réaliserons une synthèse des résultats (en anglais). Mais toute information que vous nous confiez restera confidentielle. Pour la recevoir, indiquez votre adresse électronique à la fin du questionnaire.

Nous vous remercions vivement pour votre participation.

Mahdi Zargayouna et Christine Buisson,

Université Gustave Eiffel, France.

Information RGPD : Cette enquête est mise en oeuvre par l'Université Gustave Eiffel. Les informations vous concernant ne seront utilisées que pour l'usage décrit ci-dessus. La responsable opérationnelle des traitements est Christine Buisson. L'ensemble de ces données sont susceptibles d'être conservées pendant une durée de 6 mois.

Conformément au Règlement (UE) 2016/679 du 27 avril 2018 et à la loi n°78-17 du 6 janvier 1978 modifiée relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés, vous disposez d'un droit d'accès aux données vous concernant directement auprès de l'Université Gustave Eiffel ou de sa Déléguée à la protection des données : protectiondesdonnees-dpo@univ-eiffel.fr. Le cas échéant, vous pouvez également exercer vos droits de rectification et d'effacement sur ces données, obtenir la limitation de leur traitement ou vous y opposer pour motif légitime. Si vous pensez que vos droits ne sont pas respectés, vous pouvez introduire une réclamation auprès de la Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL) sur le site internet de la CNIL (<https://www.cnil.fr/fr/plaintes>) ou par courrier postal en écrivant à : CNIL - 3 Place de Fontenoy - TSA 80715 - 75334 PARIS CEDEX 07.

Il y a 19 questions dans ce questionnaire.

1. Quel âge avez-vous ? *

Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Moins de 30
- Entre 30 et 40
- Entre 40 et 50
- Plus âgé

2. Quel est le type de votre emploi ? *

Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Recherche - Enseignement supérieur
- Bureau d'étude, expertise, assistance à maîtrise d'ouvrage
- Collectivité territoriale, ministère
- Autre

3. Dans quel pays travaillez-vous ?

Veillez écrire votre réponse ici :

4. Etes-vous impliqué dans le développement ou l'utilisation d'un modèle multi-agent à base d'activité ? *

Veillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Oui
- Non

Ensuite les questions 5 à 18 incluses étaient accessibles uniquement aux personnes ayant répondu oui à la précédente question

5. Pendant une année représentative, quel pourcentage de votre temps de travail est consacré à l'utilisation ou au développement des modèles multi-agents ? *

Veillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Moins de 20 %
- De 20 à 50 %
- Plus 50 %

6. Quel est le nom du modèle sur lequel vous travaillez ? (si vous travaillez sur plus d'un modèle, choisissez le plus significatif. Les prochaines questions concernent ce modèle en particulier.)

Veillez écrire votre réponse ici :

7. Quel type de travail réalisez-vous avec ce modèle ? *

Veillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Developpements et tests
- Réalisation d'études de mobilité
- Utilisation d'un modèle commercial pour répondre aux besoins d'autre utilisateurs finaux
- Utilisation des résultats pour alimenter les études des sous-traitants
- Autre

8. Quels sont les problèmes que votre modèle résout typiquement ? (par exemple : planification opérationnelle de transports collectifs, tests de

nouveaux services de mobilité, planification urbaine sur un temps long, ...) *

Veillez écrire votre réponse ici :

9. Quelle est la taille (au sens géographique) des problèmes traités par votre modèle ? *

Veillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Moins de 5 kilomètres de diamètre
- Entre 5 et 20 kilomètres de diamètre
- Plus de 20 kilomètres de diamètre

10. Typiquement, combien d'habitants contient cette zone ? *

Veillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Moins de 100 000 habitants
- Entre 100 000 et 1 million d'habitants
- Plus d'1 million d'habitants

11. Quelle méthode utilisez-vous pour générer la population ? *

Veillez écrire votre réponse ici :

12. Quel type de données d'entrée utilisez-vous ? De quelle source proviennent-elles ? *

Veillez écrire votre réponse ici :

13. Quelle méthode utilisez-vous pour le calage et la validation de votre modèle ? *

Veillez écrire votre réponse ici :

14. Quels sont les principaux avantages de votre modèle ? *

Veillez écrire votre réponse ici :

15. Quels sont les principaux inconvénients de votre modèle ? *

Veillez écrire votre réponse ici :

16. Quel est, entre 1 et 9, le niveau de maturation technologique ou TRL du modèle que vous utilisez (1 : définition des principes de base ; 9 : Système réel prouvé en environnement opérationnel) ?

Veillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- 1-3
- 4-6
- 7-9

17. Existe-t-il des références ou lien URL à votre outil (GitHub, ...), à vos articles (DOI, ...), ou à des rapports techniques que vous souhaiteriez partager avec nous ? *

Veillez écrire votre réponse ici :

18. Etes-vous disponibles et intéressé par une discussion collective en visio au cours du mois de mars à propose de cette expérience ?

Veillez écrire votre réponse ici :

19. Nous préparerons une courte synthèse de nos résultats. Si vous souhaitez en être destinataires, merci d'indiquer votre adresse électronique ci-contre.

Veillez écrire votre réponse ici :