



HAL
open science

Un cadre basé sur les scénarios du futur au service de la simulation multi-agents de la mobilité urbaine de demain

Tjark Gall, Tarek Chouaki, Bernard Yannou, Flore Vallet

► To cite this version:

Tjark Gall, Tarek Chouaki, Bernard Yannou, Flore Vallet. Un cadre basé sur les scénarios du futur au service de la simulation multi-agents de la mobilité urbaine de demain. 18ème Colloque national S.mart, Groupement d'Intérêt Scientifique GIS S.MART, Apr 2023, Carry le Rouet, France. hal-04012211

HAL Id: hal-04012211

<https://hal.science/hal-04012211v1>

Submitted on 12 Aug 2023

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.

Un cadre basé sur les scénarios du futur au service de la simulation multi-agents de la mobilité urbaine de demain

T. Gall ^{a,b,*}, T. Chouaki ^{a,b}, B. Yannou ^a, F. Vallet ^{a,b}

^a Laboratoire Genie Industriel, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, 3 Rue Joliot-Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, France

^b IRT SystemX, 660 Rue Noetzlin, 91190 Gif-sur-Yvette, France

* e-mail : tjark.gall@urban-framework.com

1. INTRODUCTION

Concevoir des solutions pour des systèmes complexes de mobilité urbaine présente de nombreux défis pour les praticiens. L'un des plus importants est de disposer d'informations nécessaires pour concevoir des solutions qui prennent du temps pour aller du stade de l'idée au marché (p. ex., véhicules motorisés), ou des solutions qui vont rester fonctionnelles pendant une longue période (p. ex., lignes de métro). Dans cet article, nous posons donc la question « Comment considérer des *incertitudes futures* et *tendances* dans la SMA de la mobilité ? »

De nombreuses solutions existent déjà pour répondre aux défis de la mobilité urbaine, tels que la pollution, l'accessibilité inégale, l'impact négatif sur le bien-être physique, l'économie locale, ou les matériaux rares [1-4]. Il s'agit notamment de solutions technologiques, telles que les voitures électriques, et d'approches sociales, telles que des campagnes et des politiques publiques visant à encourager la mobilité active ou à convaincre les automobilistes d'utiliser les transports en commun. Cependant, la sélection et la conception détaillée de telles solutions, ainsi que l'adaptation à un contexte local, restent difficiles. Souvent, la question est de savoir quelles solutions sont les plus efficaces, lesquelles privilégier (c'est-à-dire dans lesquelles investir) ou quels sont les effets systémiques négatifs potentiels. Ces questions gagnent en importance dans la conception à moyen (5-10 ans) et à long terme (10 ans et plus).

Notamment, une compréhension des futurs utilisateurs, tel que leur nombre, leurs caractéristiques et leurs préférences, est essentielle pour prendre des décisions de conception adéquates aujourd'hui. Pour les modéliser, différentes méthodes ont été développées. Nous avons choisi de travailler avec la simulation multi-agent (SMA) car, par rapport à d'autres, elle permet 1) d'incorporer des individus en tant qu'agents avec des profils et des préférences de mobilité variés, et 2) de

modéliser le système de mobilité urbaine sur une période de temps avec une interaction de différents modes et composants de système. La SMA permet de modéliser les interrelations des systèmes de mobilité urbaine et de tester l'impact des solutions futures. Par exemple, une simulation peut permettre de déterminer combien de personnes pourraient faire le choix de prendre les transports en commun, combien d'émissions de gaz à effet de serre (GES) seraient évitées ou combien de personnes vivraient une meilleure accessibilité si un service spécifique était mis en place, comme l'ouverture d'une nouvelle ligne de métro.

Même si les simulations de la mobilité actuelle deviennent de plus en plus précises [5], il reste des défis à relever pour modéliser de manière robuste les futurs systèmes de mobilité, notamment en termes d'intégration des tendances futures et des incertitudes futures. Les scénarios du futur ont un fort potentiel d'opérationnalisation des tendances et incertitudes futures pour la conception et la prise de décision. Cependant, les scénarios dominent plutôt dans les approches d'immersion et d'idéation. Si nous pensons aux scénarios quantitatifs existants, tels que les scénarios d'émissions du GIEC [6] ou les scénarios de mobilité du Gouvernement français [7], ceux-ci sont avant tout issus de modélisations technico-économiques. Ces scénarios ne mettent pas en avant le travail avec les incertitudes futures.

D'autre part, les approches qualitatives ont jusqu'à présent peu été intégrées dans les simulations. Répondant à ce défi, nous développons une approche appliquée à une étude en collaboration avec la Communauté d'Agglomération Paris-Saclay (CPS) et le secteur privé. Cet article présente les grandes lignes de cette méthode. Il s'agit d'un travail en cours et les résultats présentés ici sont préliminaires.

2. ETAT DE L'ART

Cette section présente les trois éléments-clés de l'étude et de l'approche développée. Le premier paragraphe décrit les particularités de la conception de solutions dans le contexte de systèmes complexes, tandis que le second introduit les approches de conception à base de scénarios, suivi par des principes de base des SMA.

2.1. Conception de solutions pour les systèmes complexes

La conception de solutions pour les systèmes complexes est un domaine qui implique la création et l'optimisation de structures organisées et interconnectées [8]. Cela peut inclure des éléments tels que des infrastructures, des réseaux et des processus. La clé de la conception de systèmes complexes réside dans la compréhension des relations entre ces différents éléments et comment ils peuvent fonctionner ensemble de manière efficace et adaptée aux divers besoins.

Un des défis majeurs de la conception de systèmes complexes est de garantir que tous les éléments du système fonctionnent de manière cohérente et qu'il n'y a pas d'effets inattendus. Cela nécessite des analyses approfondies et des simulations pour tester différentes configurations et trouver celle qui offre les performances en cohérence avec les objectifs. Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons au système de mobilité urbaine (Fig. 1) défini comme un système urbain complexe et sociotechnique [9].

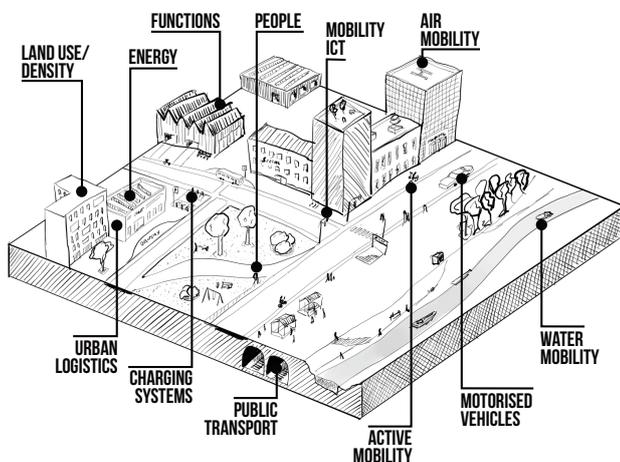


Figure 1 : Visualisation du modèle de système de mobilité urbaine

Le système est constitué principalement d'infrastructures, de véhicules, de services de mobilité, d'usagers, mais aussi d'éléments moins tangibles comme l'environnement numérique.

2.2. Conception basée sur des scénarios

Les scénarios font partie d'une gamme d'outils qui permettent de travailler stratégiquement avec de multiples futurs possibles. Spaniol et Rowland [10] définissent les caractéristiques clés des scénarios : comme ayant une propriété temporelle enracinée dans le futur, font référence à des forces externes dans ce contexte

et estiment que les scénarios doivent être possibles et plausibles tout en prenant la forme d'une histoire ou d'une description narrative. En plus, les divers scénarios coexistent dans un ensemble et constituent des alternatives significativement différentes [10]. Plus spécifiquement, nous nous référons aux scénarios exploratoires qui montrent différents futurs alternatifs à envisager dans le présent, par rapport à des scénarios normatifs ou prédictifs [11]. L'avantage comparatif de travailler avec des scénarios du futur par rapport à d'autres méthodes est que la création de scénarios est un exercice stimulant pour explorer différentes possibilités qui pourraient se dérouler à l'avenir. Cela peut être particulièrement utile pour l'idéation, la conception et la planification de solutions futures, telles que de nouveaux produits, services ou même des politiques de mobilité.

Les scénarios du futur sont généralement fondés sur des tendances et des hypothèses sur l'évolution future de certaines variables clés. Ils prennent en compte des incertitudes futures et des événements imprévisibles qui pourraient avoir un impact sur les développements futurs [12]. Dans le cadre de la mobilité, il existe principalement des exemples des transports de demain [13], immersifs [14] et spatiaux [15]. Pour organiser les incertitudes futures, nous pouvons par exemple créer des scénarios dits « archétypaux » [16]. Miskolczi et al. [17] ont examiné des scénarios pour 2030 et les ont regroupés en quatre scénarios archétypaux : Good-old-Transport, Mine-is-yours, At-an-easy-pace et Tech-eager. Good-old-transport fait référence à la poursuite des tendances actuelles, tandis que Mine-is-yours se concentre sur la diminution de la propriété individuelle et sur un système de servicisation et de partage. At-an-easy-pace décrit une transition durable lente tandis que Tech-eager met l'accent sur les solutions technologiques pour résoudre les problèmes actuels de mobilité urbaine.

Ces types de scénarios du futur peuvent être utilisés pour évaluer les conséquences possibles des différents choix de conception d'aujourd'hui et pour trouver des solutions pour faire face aux défis futurs. Ils peuvent également aider à identifier les opportunités et les menaces susceptibles d'apparaître à l'avenir. Les scénarios du futur sont donc un outil utile pour anticiper les développements futurs et les prendre en compte en conséquence dans les processus de conception.

2.3. Simulations de mobilité multi-agents

Il existe différentes manières de modéliser les systèmes de mobilité urbaine et d'aider à la conception de solutions. Une méthode de plus en plus utilisée est la SMA qui simule les choix et actions de tous les individus dans une zone donnée en fonction des diverses interactions. Contrairement à d'autres types de modélisation, où le niveau de granularité, c'est-à-dire le niveau de détail, est trop agrégé, une SMA de mobilité modélise individuellement chaque agent et son comportement.

Par conséquent, nous travaillons avec la SMA car elle permet d'intégrer, entre autres, différents profils de choix, de comportements de mobilité et de ressources (p. ex., voiture, permis de conduire), donc certains des facteurs

centraux de la performance du système de mobilité [18] Une autre contribution majeure de la SMA est que nous pouvons considérer qu'un agent de mobilité réalise plusieurs trajets au cours d'une journée. On peut prendre en compte différentes préférences de choix de mode et l'interaction optimisée entre les choix agrégés de tous les individus dans un environnement vaste et complexe avec de multiples options. Nous utilisons MATSim, un outil adapté à la mobilité pour la SMA, qui est "open source" et combine une modélisation « échelle extrême » [18,19].

Les options que les agents peuvent choisir dépendent de leur emplacement ainsi que de leurs caractéristiques intrinsèques. Par exemple, pour utiliser une voiture, un permis est nécessaire et l'accès à une voiture est requis ; pour être un passager dans une voiture, un membre du ménage avec un véhicule et un horaire de voyage aligné est nécessaire. De plus, les transports publics, la mobilité active et les nouveaux modes tels que la mobilité à la demande [20] peuvent être intégrés comme options de mobilité. Ensuite, chaque agent prend une décision pour chaque déplacement en fonction des paramètres qui impactent le choix. Par exemple, le coût et les ressources financières, le temps qu'il faut ou l'impact négatif aggravé des longs délais d'attente ou de plusieurs changements intermodaux.

Cela peut conduire à des résultats plus précis et réalistes de la façon dont les gens se déplacent par rapport à d'autres approches de la simulation de mobilité. La SMA est donc un outil innovant et utile pour comprendre et améliorer les systèmes de mobilité urbaine, en tenant compte des comportements individuels et des interactions entre les agents. Elle peut être utilisée pour tester différentes versions des systèmes de transport, planifier des transports en commun, optimiser les itinéraires en fonction des besoins des usagers et des contraintes du réseau, ou évaluer l'impact des politiques de mobilité durable sur la congestion et la pollution de l'air. Nous l'utilisons avant tout pour tester l'impact d'une solution future spécifique sur l'ensemble du système ; par exemple quel serait l'impact d'une nouvelle ligne de métro.

3. METHODE ET APPLICATION

Dans cette section, nous décrivons la méthodologie proposée pour intégrer les incertitudes futures dans les SMA afin d'améliorer les processus de conception de solutions pour les systèmes de mobilité urbaine. Notre étude est appliquée au contexte de la Communauté d'Agglomération Paris-Saclay (CPS) comprenant 27 communes au sud de Paris, limitrophe de la Métropole du Grand Paris (Fig. 2). Sa particularité réside en la différence entre les zones nord très urbanisées et les zones agricoles rurales du sud ; le plateau de Saclay en altitude est traditionnellement difficile d'accès. C'est un projet d'intérêt national qui abrite de plus en plus d'universités, de centres technologiques et d'entreprises. Le métro 18, l'une des lignes de métro du Grand Paris Express (GPE) qui est le plus grand projet d'infrastructure

européen, vise à relier les zones périphériques autour de Paris sans nécessiter de transiter par le centre [21].

Dans ce contexte, les enjeux de mobilité s'étendent au déplacement d'un nombre croissant d'étudiants et d'employés vivant plus loin, tout en accompagnant la transition des comportements des habitants, de l'usage de la voiture vers des modes plus durables, ainsi qu'en ciblant la déconnexion historique des zones périurbaines vers les opportunités économiques et services de base situés dans des zones plus centrales.

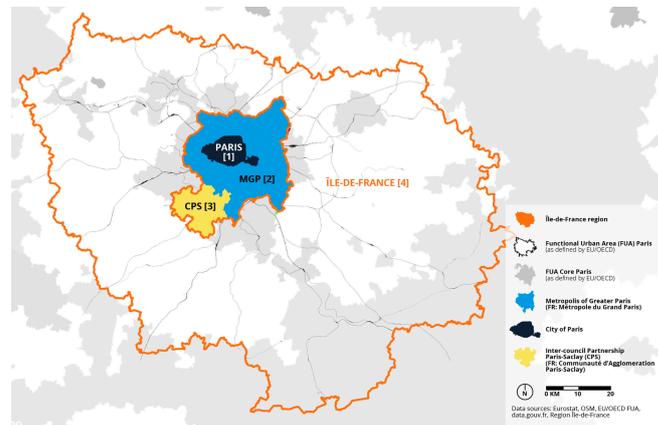


Figure 2 : Zone d'étude (jaune) dans le contexte de la région Ile-de-France (orange), de la Métropole du Grand Paris (bleu clair) et de la ville de Paris (bleu foncé)

Pour cette application, nous explorons l'impact d'une intervention particulière : les Véhicules Électriques Partagés Autonomes (VÉPA) en tant que service de mobilité à la demande, visant à permettre aux ménages ruraux et périurbains d'accéder aux transports en commun existants (Réseaux Express Régionaux (RER) B et C) et en projet (métro 18, tram 12) dans la région. Le but est d'utiliser la SMA pour tester quel serait l'impact du service en 2030 couplé avec la nouvelle offre de transport en commun. Les scénarios sont ajoutés pour tester la robustesse des solutions et explorer leur potentiel.

La méthode développée se compose de cinq étapes (Fig. 3). Tout d'abord, et en parallèle, 1) un jeu de scénarios du futur localisés sur la zone d'étude est créé ainsi que 2) une simulation de base pour la zone étudiée. Dans l'étape suivante, 3) les scénarios sont traduits en informations quantitatives qui peuvent alimenter les simulations. Ensuite, 4) les simulations de scénarios sont effectuées. Enfin, 5) les sorties quantitatives sont utilisées pour compléter les scénarios initiaux.

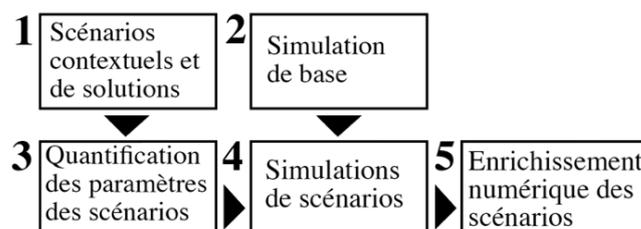


Figure 3 : Diagramme de processus de méthode

3.1. Cas d'application

Les paragraphes suivants décrivent chacune des étapes de l'application de notre méthode dans ce contexte. Nous mettons un accent particulier sur l'étape 3 car c'est la principale nouveauté de l'approche développée. Pour chacune des autres étapes, nous fournissons des références supplémentaires pour une description méthodologique plus détaillée.

Étape 1 : Création des scénarios du futur

Dans un premier temps, nous créons les scénarios de mobilité urbaine en contexte. Nous utilisons pour cela quatre scénarios archétypaux pris comme base [17]. Ceux-ci sont adaptés au contexte local à l'aide de la littérature comprenant des rapports et des plans locaux, d'un ensemble de 16 entretiens d'experts et de plusieurs ateliers d'experts dans lesquels des méthodes de conception collaborative ont permis d'extraire les connaissances intégrées spécifiques à la localité. Cela nous permet d'avoir un ensemble de quatre scénarios qui sont des alternatives distinctes les uns des autres, constitués de descriptions qualitatives, de visuels, de localisation via des cartes et d'autres éléments immersifs, ainsi que de certaines informations quantitatives supposées, telles que l'impact d'émissions de GES par personne.



Figure 4 : Photo de l'atelier d'experts sur la localisation de scénarios archétypaux de mobilité urbaine dans le contexte du plateau

Étape 2 : Simulation multi-agent de base

Une étape simultanée et préalable à la simulation de scénarios futurs est la SMA dans les conditions actuelles. Pour cela, il est nécessaire de construire une population d'agents artificiels qui est représentative de la population en termes de caractéristiques de mobilité, dite population synthétique. Dans nos travaux, plusieurs sources de données socio-économiques sont utilisés. Notamment le recensement [22], l'enquête sur la mobilité des personnes [23] et différents ensembles de données spatiales et liées au transport.

Pour le cas d'application de VÉPA, nous avons plusieurs paramètres que nous pouvons utiliser pour l'optimisation comme, par exemple, le nombre de véhicules, l'endroit où

ceux-ci sont stationnés en début de journée, comment et quand ils sont rechargés, où ils se déplacent entre les trajets, etc. En plus, il faut définir la façon dont l'optimisation globale est effectuée. Des indicateurs peuvent être l'accessibilité (p. ex., augmenter le pourcentage de la population qui peut accéder à 10% du marché du travail en moins que 30 minutes sans utiliser de véhicules privés), l'impact environnemental (moyenne des émissions GES par personne en fonction de voyageurs-kilomètres selon les modes) et critères économiques (pourcentage du revenu dépensé pour la mobilité). Pour des descriptions plus détaillées de la population et de la SMA de base, voir [5] et [24].

Étape 3 : Quantification des paramètres des scénarios et transfert aux entrées de la simulation

Cette étape est la plus importante : traduire les scénarios en paramètres spécifiques. Nous pourrions potentiellement travailler avec un ensemble presque infini de paramètres tirés des scénarios. Cependant, l'objectif est de s'adapter au SMA. Nous nous limitons donc aux paramètres pouvant être pris en compte dans la simulation. Nous pouvons distinguer trois catégories d'informations évolutives, issues d'un travail continu de modélisation de la mobilité urbaine en tant que système sociotechnique (Fig. 1) : les personnes, les services et les infrastructures. En lien avec les scénarios, cela se traduit par une approche d'adaptation progressive des différentes composantes du système de mobilité urbaine à différents scénarios (Fig. 5).



Figure 5 : Extrait de méthode d'utilisation de scénarios et modèle de système à trois couches pour adapter la mobilité urbaine aux situations futures

Concernant les personnes, nous utilisons une approche par persona pour adapter les populations synthétiques qui sont une des entrées du SMA. 28 personas sont générés à partir des données d'aujourd'hui et ensuite repondérés dans les différents scénarios pour intégrer les tendances et les incertitudes futures [voir référence 24]

pour la méthode détaillée]. Il en résulte une taille de population différente selon l'emplacement, ainsi qu'une constellation différente de celle-ci. Par exemple, dans un scénario, il y a plus de personnes qui préfèrent prendre les transports en commun qu'un autre mode. De plus, leurs ressources peuvent varier. Par exemple, on a une probabilité réduite ou accrue de posséder une voiture personnelle selon le scénario. Enfin, le modèle de choix peut varier. Par exemple, nous pouvons intégrer les valeurs environnementales en augmentant la préférence pour des modes durables par rapport aux autres modes, ou en diminuant la valeur du coût ou du temps dans le processus de prise de décision.

Ensuite, l'infrastructure peut être adaptée aux hypothèses concernant l'endroit où les gens vivraient et travailleraient à l'avenir, entre autres. Cela peut signifier, par exemple, d'étendre le réseau routier, de densifier les zones déjà développées ou d'adapter les usages mixtes entre les quartiers en fonction du scénario et de l'hypothèse sous-jacente aux principes d'urbanisme et de conception (comme la ville de 15 minutes, qui fait actuellement partie de la politique publique parisienne).

Enfin, le service de mobilité peut être adapté en fonction des hypothèses précédentes aux évolutions population/usagers et infrastructures. D'une part, il y a des changements qui sont censés se produire pour tous les scénarios (voir tendances). Dans le cas de Paris-Saclay, cela signifie que chacun des scénarios intègre la présence du métro 18 et du tram 12. Cependant, pour les différents scénarios, nous pouvons supposer la variabilité, par exemple, des horaires et des itinéraires de bus variables ou encore des offres de services de mobilité à la demande.

Étape 4 : Simulation des scénarios

Dans cette étape, la simulation des différents scénarios est répétée en utilisant l'outil MATSim comme décrit à l'étape 2. La principale différence est l'entrée de différents paramètres qui résultent de la troisième étape. Dans notre étude de cas, cela signifie que nous avons une augmentation des agents à travers les scénarios, mais aussi des poids différents des divers profils selon le scénario. En outre, certains des scénarios conduisent à un développement urbain plus dense, tandis que d'autres conduisent à un développement moindre. Enfin, les agents prennent des décisions différentes selon le scénario, en tenant compte des caractéristiques potentiellement modifiées décrites dans la section précédente, tels que la préférence pour un mode par rapport à un autre, les ressources disponibles ou l'évolution du poids de paramètres tels que les coûts ou le confort.

La création de quatre SMA pour 2030 nous permet d'avoir une représentation large et multidimensionnelle des états futurs possibles et plausibles du système de mobilité urbaine, en tenant compte des tendances et des incertitudes futures et de leur impact sur le système local. Dans une deuxième sous-étape du SMA, le service de mobilité à la demande de VÉPA décrit précédemment pour alimenter les transports publics peut être testé et

calibré pour chacun des scénarios. Il en résulte un ensemble d'indicateurs caractérisant l'impact. Par exemple, combien de passagers-kilomètres en moins par personne sont conduits en voiture si la même taille et la même configuration de flotte sont mises en œuvre dans tous les scénarios. Cela nous permet 1) de réaliser un test de robustesse des produits et services plus développé pour les situations futures et 2) de tester comment les différentes tendances et incertitudes futures, agrégées en scénarios, influencent l'utilité d'un service donné.

Étape 5 : Enrichissement quantifié de scénarios

Dans la dernière étape, les scénarios contextuels sont alimentés par les sorties numériques des simulations. Sans indiquer de valeurs numériques réelles, la Figure 6 fournit un exemple de visualisation possible pour les divers scénarios.

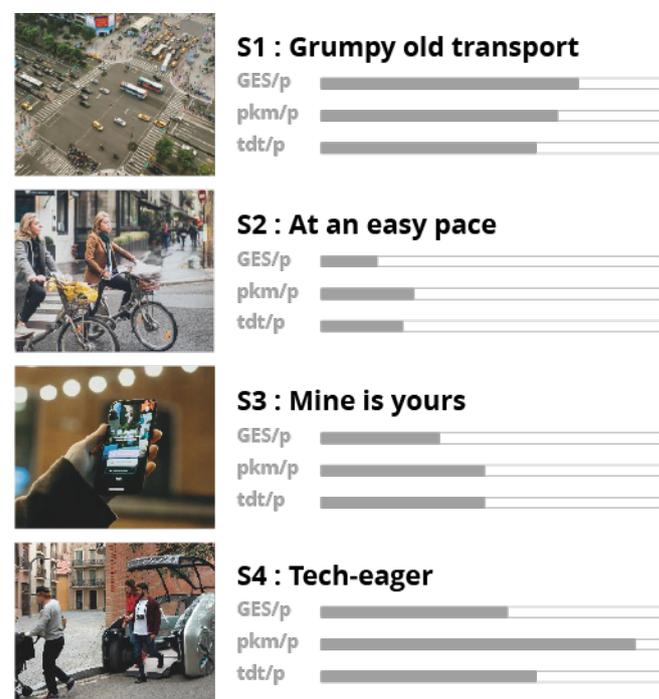


Figure 6 : Exemple de visualisation enrichie de scénarios (pkm/p : passagers-kilomètres moyens par personne, tdt/p : temps de trajet moyen par personne)

4. DISCUSSION ET CONCLUSION

Nous avons pour intention de trouver de nouvelles façons de mieux concevoir des solutions « prêtes pour l'avenir » en utilisant des SMA, alimentées par des entrées en provenance de scénarios futurs, créés qualitativement dans un contexte local spécifique. Dans le dernier paragraphe, nous avons proposé une méthodologie qui tire avantage de deux méthodes traditionnellement déconnectées et identifie les moyens par lesquels celles-ci peuvent s'alimenter mutuellement. Nous avons testé l'approche dans le cadre d'une conception de solution de VÉPA à Paris-Saclay à échelle de temps de près d'une décennie (horizon 2030). La méthode, bien qu'encore en phase d'expérimentation, montre que la SMA pour la conception de solutions futures peut être rendue plus

robuste grâce à l'utilisation de scénarios. Les premiers résultats et discussions avec des experts en mobilité, simulation et urbanisme et des utilisateurs potentiels ont suscité des réactions fortement positives, conduisant entre autres à une réplique dans le contexte de la zone métropolitaine du Caire. Ainsi, bien qu'une validation plus approfondie reste à opérer, nous avançons que l'approche proposée n'a, à notre connaissance, pas été appliquée de manière aussi structurée et peut donc contribuer à la conception de solutions pour des systèmes complexes en cette période d'incertitude croissante concernant l'avenir.

Il reste des limites sur lesquelles nous travaillons actuellement, et qui semblent inhérentes à la démarche. Premièrement, l'avenir est inconnu, donc tout travail sur celui-ci est soumis à de nombreuses hypothèses. Nous ne nions pas cela, mais proposons plutôt une méthode de travail intégrant plusieurs futurs alternatifs pour augmenter les chances de concevoir des systèmes mieux adaptés à différentes facettes de l'avenir. En outre, toute approche quelque peu fiable pour élaborer des scénarios futurs se fonde sur des études qualitatives, des compilations de tendances et des contributions d'experts. Comme il n'existe aucun moyen quantitatif de mesurer le futur, il s'agit d'une limitation qu'il n'est pas possible d'éviter. Enfin, les simulations, y compris celles basées sur des agents, ne sont que des représentations abstraites de la réalité, donc présentant des limites. Pourtant, il s'agit actuellement d'un modèle proche du fonctionnement réel du système de mobilité urbaine, ce qui, associé à un ensemble de scénarios futurs quantitatifs, peut nous aider aujourd'hui à concevoir des solutions plus satisfaisantes et « prêtes pour demain ».

REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par le gouvernement français dans le cadre du programme « France 2030 » à l'Institut de Recherche Technologique SystemX. Les auteurs expriment leur gratitude aux participants des ateliers et aux partenaires de la Chaire Anthropolis. Nous remercions les trois relecteurs pour leurs commentaires détaillés et constructifs.

REFERENCES

- [1] CDC (2020) Road Traffic Injuries and Deaths – A Global Problem. <https://www.cdc.gov>
- [2] Cebr (2014) The future economic and environmental costs of gridlock in 2030. An assessment of the direct and indirect economic and environmental costs of idling in road traffic congestion to households in the UK, France, Germany and the USA. Centre for Economics and Business Research (Cebr).
- [3] Climate Watch (2020) Historical GHG Emissions. <https://www.climatewatchdata.org>
- [4] Metabolic (2019) Metal Demand for Electric Vehicle: Recommendations for fair, resilient, and circular transport systems, Amsterdam: Metabolic.
- [5] Hörl, S. et Balac, M. (2021) Synthetic population and travel demand for Paris and Île-de-France based on open and publicly available data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 130, 103291. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103291>
- [6] IPCC (2021) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.
- [7] CGEDD (2022) Prospective 2040-2060 des transports et des mobilités. 20 ans pour réussir collectivement les déplacements de demain. Rapport de Synthèse, février 2022.
- [8] Le Moigne, J.-L. (1990) *La modélisation des systèmes complexes*. Paris : Dunod.
- [9] Geels, F. W. (2011) The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Vol. 1, pp. 24-40. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.02.002>
- [10] Spaniol, M. J. et Rowland, N. J. (2019) Defining scenario. *Futures Foresight Science*, 1:e1. <https://doi.org/10.1002/ffo.2.3>
- [11] Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekvall, T. et Finnveden, G. (2006) Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, Vol. 38/7, pp. 723-739. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002>
- [12] Gall, T., Vallet, F. et Yannou, B. (2021) How to visualise futures studies concepts: Revision of the futures cone. *Futures*, 143/103024. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.103024>
- [13] Banister, D. et Hickman, R. (2013) Transport futures: Thinking the unthinkable. *Transport Policy*, Vol. 29, pp. 283-193. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.07.005>
- [14] Futura Mobility (2021) Prospective scenarios for 2030. <https://futuramobility.org/en/prospective-scenarios/>
- [15] Pucci, P. (2021). Spatial dimensions of electric mobility – Scenarios for efficient and fair diffusion of electric vehicles in the Milan Urban Region, *Cities*, Vol. 110/103069. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103069/>
- [16] Dator, J. (2019) What Futures Studies Is, and Is Not, in: Jim Dator: A Noticer in Time. *Anticipation Science*, Vol. 5, Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-17387-6_1
- [17] Miskolczi, M., Földes, D., Munkácsy, A. et Jászberényi, M. (2021) Urban Mobility Scenarios until the 2030s. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 72/103029. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103029>
- [18] Burmeister, B., Haddadi, A. et Matylis, G. (1997) Application of multi-agent systems in traffic and transportation. *IEE Proceedings – Software*, 144/1. <https://doi.org/10.1049/ip-sen:19971023>
- [19] Abar, S., Theodoropoulos, G. K., Lemarinier, P. et O'Hare, G. M. P. (2017) Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review*, 24, pp. 13-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.001>
- [20] Chouaki, T., Hörl, S. et Puchinger, J. (2022) Implementing reinforcement learning for on-demand vehicle rebalancing in MATSim. The 13th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT), Mar 2022, Porto, Portugal. pp. 134-141. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.03.020>
- [21] Société du Grand Paris (2023) Grand Paris Express, le nouveau métro. <https://www.societedugrandparis.fr>
- [22] INSEE (2021) Recensement de la population. Individus localisés au canton-ou-ville en 2018. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5542859>
- [23] EMP (2021) Résultats détaillés de l'enquête mobilité des personnes de 2019. Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/resultats-detailles-de-lenquete-mobilite-des-personnes-de-2019>
- [24] Gall, T., Hörl, S., Vallet, F. et Yannou, B. Integrating future trends and uncertainties in urban mobility design via data-driven personas and scenarios. [prépublication, à paraître]