HAL
open science

Méthodologie du modèle ouvert pour la conception d'un système d'aide à la décision stratégique : le cas de la logistique urbaine

Arthur Gaudron

To cite this version:

Arthur Gaudron. Méthodologie du modèle ouvert pour la conception d'un système d'aide à la décision stratégique : le cas de la logistique urbaine. Apprentissage [cs.LG]. Université Paris sciences et lettres, 2020. Français. NNT : 2020UPSLM025 . tel-03007393

HAL Id: tel-03007393

https://pastel.hal.science/tel-03007393v1

Submitted on 16 Nov 2020

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.

PSL UNIVERSITÉ PARIS

THÈSE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ PSL

Préparée à MINES ParisTech

Méthodologie du modèle ouvert pour la conception d'un système d'aide à la décision stratégique : le cas de la logistique urbaine

Soutenue par

Arthur Gaudron

Le 1er Juillet 2020

École doctorale n° 621

Ingénierie des Systèmes, Matériaux, Mécanique, Energétique

Spécialité

Mathématiques, Informatique Temps-Réel, Robotique

Composition du jury :

Mme Laetitia Dablanc Directrice de recherche, Université Gustave Eiffel	*Présidente*
M. Jésus Gonzalez-Feliu Professeur, Excelia Group La Rochelle Business School	*Rapporteur*
M. Olivier Péton Professeur, IMT Atlantique	*Rapporteur*
M. Éric Ballot Professeur, MINES ParisTech	*Examinateur*
Mme Milena Janjevic Chargée de recherche, Massachusetts Institute of Technology	*Examinatrice*
Mme Hélène Wiedemann Ingénieur, Renault	*Examinatrice*
M. Arnaud de La Fortelle Professeur, MINES ParisTech	*Directeur de thèse*

MINES ParisTech | PSL

Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier mon directeur de thèse Arnaud de La Fortelle qui m'a accompagné et guidé tout au long de cette thèse. Sa bienveillance et sa vision ont été les piliers qui m'ont permis une exploration libre, mais cadrée d'idées pour le développement d'une démarche interdisciplinaire. Une démarche qui n'aurait pu probablement pas naitre dans un autre lieu que le Centre de Robotique pour mener une réflexion sur les outils de modélisation dans le contexte spécifique de la logistique. Et c'est pour son aide dans la compréhension des enjeux de cette spécificité que je remercie Frédéric Fontane qui m'a encouragé à développer un projet original.

Je remercie aussi Simon Tamayo pour son enthousiasme et son énergie qui m'ont poussé à m'intéresser à la logistique urbaine et à me lancer dans cette thèse.

Mes remerciements vont bien sûr aussi à la communauté scientifique pour les travaux sur lesquels j'ai pu m'appuyer et leurs retours sur mes propres travaux. Plus particulièrement, je remercie les membres de mon jury de thèse pour leur aide au travers de leurs commentaires, questions et remarques ayant permis l'amélioration de ce manuscrit.

Je voudrais remercier Laetitia Dablanc d'avoir présidé ce jury de thèse. Les travaux de Laetitia Dablanc ont été importants pour comprendre la logistique urbaine et ses évolutions. C'est la pertinence des approches des sciences humaines et sociales qui m'a amené à considérer le développement d'une approche interdisciplinaire.

Je remercie Jesús González Feliu d'avoir rapporté cette thèse. Ses connaissances fines des outils de modélisation pour la logistique urbaine ont permis de mieux intégrer les contributions de la thèse au sein de la littérature.

Je remercie également Olivier Péton d'avoir rapporté cette thèse. Les discussions sur les contributions techniques de la thèse et les usages de la méthodologie ont été bénéfiques à la mise en valeur des apports de ce manuscrit.

Je remercie Milena Janjevic pour sa participation au jury avec en particulier l'apport de son expérience sur la prise en compte des perspectives des différentes parties prenantes pour de nouveaux modèles en logistique urbaine.

Je remercie Éric Ballot pour sa participation au jury et pour son éclairage par ses connaissances en sciences de gestion nécessaire à l'approche interdisciplinaire pour cette thèse.

Je remercie Hélène Wiedemann pour sa participation au jury, mais aussi au cours de ce travail de thèse, pour des apports précieux sur les questionnements opérationnels et stratégiques de l'industrie.

Je remercie les représentants des mécènes de la Chaire Logistique Urbaine : Gilles Abdelaziz, Emmanuel Bonnaud, Mourad Bensadik, Malou Charenton, Grégory Checkroun, Pierre Eykerman, Matei Gulea, Laurence Morin, Alain Schnapper, Yann Tremeac et Martine Vasquez. Les comités de pilotage réguliers ont été autant d'occasions d'apprécier les réalités industrielles ont nourri ce travail de thèse.

Je remercie chaleureusement Christine et Christophe pour m'avoir initié aux arcanes de la gestion du Centre et pour leur soutien indéfectible.

Je remercie l'ensemble de mes collègues après ces presque six années au sein du Centre, pour la constante bonne humeur, les repas (ou débats) au ministère, le Pantalon, le WOS, le feu CCC, le ski et tous les moments d'échanges informels. Je remercie les « permanents », Alexis, Alina, Amaury, Bogdan, Brigitte, Cyril, David, Fabien, François, Jacky, Jean-Emmanuel, Joël, Kelly, Myriam, Sébastien, Sotiris, Silvère, avec qui la collaboration a toujours été fluide et agréable que ce soit « stimulant » (parler science) ou « rébarbatif » (démêler un millefeuille administratif). Je remercie également les « doctorants », Daniele, Edgar, Éva, Florent, Guillaume, Grégoire, Hassan, Houssem, Hugues, Jun, Mathieu, Marion, Martin, Michele, Paul, Philip, Xavier, auprès desquels j'ai pu apprendre la réalité d'un travail de thèse avant de me jeter dans le grand bain.

Je remercie ma famille, mes amis Nicolas, Ludo, Aubrey et Mohammed pour leur aide dans les moments les plus durs et bien sûr leur présence dans les meilleurs moments.

La liste des remerciements ne saurait être complète sans toi, Élise. En plus d'un soutien inconditionnel dans les moments d'errance d'une thèse (et d'une vie), ton éthique de travail (et de vie) a été un exemple et une contribution majeure à la réussite de cette thèse.

Table des matières

Remerciements 2

Chapitre 1 — Introduction 8

1 Contexte de recherche 8

2 Approche de la thèse 9

3 Question de recherche de la thèse 11

Chapitre 2 — Entre croissance infinie et ressources limitées : l'espoir du numérique pour la maitrise de la complexité 15

1 La nécessité de la décision pour la logistique urbaine 15
1.1 Un système complexe et dynamique 15
1.2 La tentative de description d'un système 17
1.3 Le statuquo, une position de plus en plus intenable 18

2 Une diversité d'acteurs et de motivations 19
2.1 Les autorités publiques 19
2.2 Les acteurs privés 21
2.3 Les impactés 23
2.4 Conclusion sur la diversité d'acteurs et leurs motivations 23

3 Différentes stratégies de limitation des externalités négatives 24
3.1 Mesures de restriction et réduction d'accès 24
3.2 Mesures d'aménagement du territoire 25
3.3 Conclusion sur les stratégies de limitation des externalités négatives 26

4 Outils pour la logistique urbaine : gouvernance publique et expérimentations 26
4.1 Gouvernance publique 26
4.2 Expérimentations 29
4.3 De l'analyse à l'action, de l'action à l'analyse 34

5 Conclusion du chapitre 34

Chapitre 3 — État de l'art des systèmes d'aide à la décision pour la logistique urbaine 36

1 Introduction 36

2 Système d'aide à la décision 39
2.1 Introduction 39
2.2 Simulation macroscopique 41
2.3 Simulation microscopique 45
2.4 Modèles mésoscopiques 50
2.5 Les écueils pour la conception d'un Système d'Aide à la Décision 51

3 Processus de validation d'un système d'aide à la décision 52
3.1 Qu'est-ce qu'un modèle ? 53
3.2 Validation du modèle 55
3.3 Validation d'un système d'aide à la décision 57

4 Conclusion 59

Chapitre 4 — Méthodologie du modèle ouvert pour la conception d'un Système d'Aide à la Décision 60

1 Introduction 60

2 Modélisation participative 60

3 Modèle ouvert 62
3.1 Ouvrir le modèle pour l'expliquer 62
3.2 Un modèle ouvert : équilibre entre simplicité (utilisation) et complexité (représentation) 63
3.3 Conclusion 68

4 Simulation interactive 68
4.1 Motivations 68
4.2 Principe fondateur 69
4.3 Interface 70
4.4 Interactivité 71
4.5 Conclusion 72

5 Processus de la méthodologie du modèle ouvert 72

6 Conclusion du chapitre 74

Chapitre 5 — Expérimentations pour la Méthodologie du Modèle Ouvert 76

1 Introduction 76

2 Première expérimentation : l'ouverture de la boîte noire 78
2.1 Cas d'étude pour l'expérimentation 78
2.2 Choix de modélisation pour un modèle ouvert 82
2.3 Protocole d'expérimentation 84
2.4 Discussion sur l'expérimentation 85

3 Seconde expérimentation : la construction d'un consensus pour un modèle 88
3.1 Cas d'étude pour l'expérimentation 89
3.2 Choix de modélisation pour la proposition d'un modèle 93
3.3 Protocole d'expérimentation 95
3.4 Discussion sur l'expérimentation 97

4 Conclusion du chapitre 102

Chapitre 6 — Conclusion de la thèse 104

1 Contexte de la question de thèse 104
1.1 Un système complexe 105
1.2 Un outil à la fois mathématique et de management 106

2 Recommandations pour la mise en œuvre de la méthodologie du modèle ouvert : capter le savoir de l'expert 109
2.1 Réunion des rôles : intégrer les participants à l'ensemble de la chaîne algorithmique 109
2.2. Modélisation et décision dans environnement instable 110

3 Méthodologie du modèle ouvert : discussion de la méthodologie et perspectives futures 111
3.1 Le modèle ouvert 112
3.2 Le modèle ouvert et les boîtes noires 115

4 Conclusion 118

Annexe A : Techniques et données utilisées dans les expérimentations 121

Annexe B : Contributions des publications pour la thèse 122

1 État de l'art sur les outils de simulation pour la logistique urbaine. 122

2 Simulation des impacts réglementaires sur la livraison de restaurants 123

3 Localisation et utilisation des aires de livraison 125
4 Machine learning pour l'analyse de texte 127
5 Marchés de la Ville de Paris 128
Publications 129
Références 131

Chapitre 1 — Introduction

1 Contexte de recherche

Cette thèse s'inscrit dans le programme de recherche de la Chaire Logistique Urbaine MINES ParisTech. La Chaire regroupe cinq mécènes : l'ADEME, la Maire de Paris, le groupe La Poste, le groupe Pomona et le groupe Renault.

La Chaire est accueillie au sein du Centre de Robotique où sont développés des technologies et concepts liés aux systèmes de transport intelligents dont la logistique urbaine fait partie. Le Centre de Robotique est plus largement investi dans la thématique de la logistique puisqu'il anime l'option "système de production et logistique" pour les ingénieurs civils MINES ParisTech en coopération avec le Centre de Gestion Scientifique, et le Mastère Spécialisé MINES ParisTech "Management Industriel et Systèmes Logistiques".

Au travers de la Chaire, le Centre de Robotique souhaite proposer une vision de la logistique combinant ses aspects relatifs aux mathématiques appliquées (avec la simulation et la science des données) et ses aspects organisationnels que traitent plus amplement les sciences de gestion.

2 Approche de la thèse

Face à une problématique de décision complexe relative à la logistique urbaine, le but de la thèse est de proposer une méthodologie pour amener les parties prenantes à converger vers une solution commune prenant en compte les objectifs et les contraintes de tous. La méthodologie vise à la collaboration des parties prenantes d'une problématique pour aboutir à un outil accepté par tous et maitrisé par les décideurs. Pour cela, l'outil se veut convivial pour permettre au plus grand nombre sans connaissance préalable en modélisation de le maitriser rapidement. La Figure 1 est une proposition d'interface pour ce type d'outil. Les décideurs peuvent directement interagir avec la simulation pour estimer l'impact de différentes décisions. Les paramètres de la simulation sont modifiables via des curseurs, tandis que les résultats de la simulation sont calculés : les itinéraires apparaissent sur la carte et la segmentation temporelle de l'activité de chaque véhicule sont projetés dans un graphique.

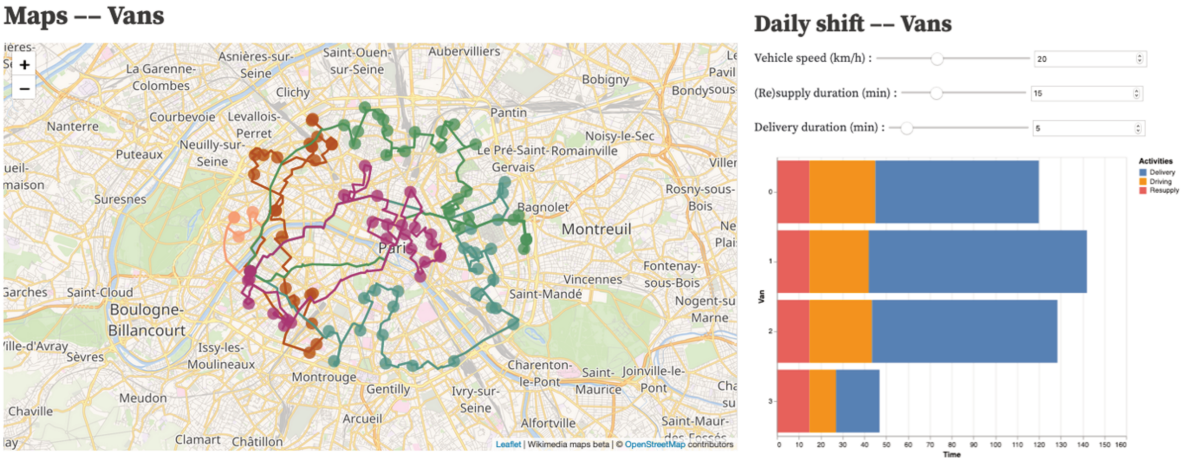

Figure 1 Interface d'une simulation interactive.

Nous considérons la logistique urbaine comme un système complexe et chaotique, c'est-à-dire un ensemble constitué d'un grand nombre d'entités en interaction (Ladyman et al., 2013) qui empêchent l'observateur de prévoir son comportement ou sa rétroaction suite à un évènement ponctuel. Exprimé de manière très pragmatique, cela se traduit par la difficulté pour l'observateur à prendre une décision puisqu'il est incapable de prédire avec un niveau de confiance satisfaisant les impacts de cette dernière sur le système. Pourtant, la logistique urbaine est un domaine où il est essentiel de prendre des décisions et de faire des choix. En effet, la logistique urbaine est essentielle dans le fonctionnement de nos villes largement importatrices de marchandises, et par extension de nos sociétés urbaines ; sa gestion exige une vision fine à cause de la diversité des activités et des acteurs et du fait de la génération d'externalités négatives significatives et inévitables.

Malgré cette complexité, nous souhaitons étudier la possibilité d'une description quantitative de ce système. L'objectif est de pouvoir prédire l'évolution du système avec un niveau de confiance satisfaisant en vue d'une prise de décision. Le système est caractérisé par ses mécanismes internes sous la forme d'un modèle mathématique. Nous distinguons trois grandes approches de simulation. La première approche, dite macroscopique, propose à l'observateur une vision du fonctionnement global du système

de logistique urbaine. La seconde approche, dite microscopique, propose à l'observateur une vision du fonctionnement précis d'une fraction bien délimitée du système logistique urbain. La troisième approche, intermédiaire, sera décrite dans le paragraphe suivant. L'approche, macroscopique donne une vision stratégique à long terme, par exemple les flux physiques et financiers dans la ville, tandis que l'approche microscopique donne une vision opérationnelle à court terme, par exemple l'itinéraire des véhicules de livraison. Pourtant, dans un système complexe comme la logistique urbaine une décision stratégique doit inévitablement tenir compte du niveau opérationnel pour s'assurer de son effet réel, et inversement une décision locale peut avoir un effet global sur le système (Chapitre 2).

Ces interactions, parfois subtiles, motivent la troisième approche, dite mésoscopique. Cette approche a pour objectif d'évaluer les impacts d'une décision à la fois à l'échelle de la ville (macro) et à l'échelle d'un acteur (micro) comme un transporteur, un commerçant ou un résident. Les techniques de simulation actuelles sont généralement concentrées sur l'une de ces deux échelles (Chapitre 3). La compréhension du processus de modélisation permet d'identifier que les motivations d'une approche seulement macro ou micro tiennent dans la difficulté d'élaborer une approche mésoscopique (Chapitre 4). En effet, pour relier ces deux échelles, il faut rassembler les expertises pour la gestion d'une ville (macro) et les expertises "*métiers*" (micro) de la logistique urbaine de manière à créer un modèle cohérent. À l'inverse, dans les deux premières approches, l'échange d'expertises n'était pas indispensable pour construire un modèle, car il était suffisant que le modèle soit cohérent à une seule échelle.

Cette troisième approche impose ainsi de bâtir un dialogue entre des communautés d'experts possédant différents langages et différentes visions de la logistique urbaine. Nous proposons de renverser l'utilisation habituelle de la simulation : plutôt qu'un pourvoyeur de solutions optimisées, la simulation devient un outil partagé entre les différents experts pour estimer ensemble les conséquences probables d'une décision. L'outil est alors une base commune et comprise par tous pour échanger. Inspirés par le concept de la modélisation participative, nous avons développé la méthodologie du modèle ouvert (Chapitre 4) dans le but d'impliquer les experts dès la conception de la simulation. Cette méthodologie s'appuie sur le concept de modèle ouvert et de la simulation interactive pour que les différents acteurs deviennent moteurs dans le processus de modélisation (conception, validation, utilisation). Dans une première expérimentation (chapitre 5), nous nous sommes assurés de la capacité des utilisateurs à se saisir de la simulation interactive pour comprendre un modèle avec l'objectif de l'utiliser pour prendre une décision. Dans une seconde expérimentation (chapitre 5), nous avons mis en situation plusieurs groupes d'utilisateurs (néophyte et expert en logistique urbaine) dans une démarche de modélisation participative. En particulier, nous nous sommes intéressés à leur comportement de collaboration et l'utilisation faite du simulateur interactif dans ce contexte. Nous conclurons sur cette approche (chapitre 6) en décrivant les perspectives et les limites.

3 Question de recherche de la thèse

L'approche mésoscopique développée dans cette thèse s'appuie sur la méthodologie du modèle ouvert, ce qui permet de résoudre certains problèmes difficiles, en particulier l'adéquation d'un modèle particulier avec la réalité des systèmes logistiques urbains. Les modèles sont indispensables à l'analyse scientifique d'objets comme une poutre pour les mécaniciens, une cellule pour les biologistes ou une organisation pour un sociologue. Le modèle étant aussi un objet, il émerge de grandes interrogations quant à son maniement ou sa capacité à représenter d'autres objets. En particulier, comme nous l'avons énoncé plus haut, la logistique urbaine présente un caractère chaotique qui semble prévenir l'usage d'une modélisation fine (microscopique) sur un long horizon temporel, celui des décisions. La théorie ergodique affirme que seules des quantités macroscopiques, des moyennes, seraient accessibles. Pourtant, il semble qu'on puisse faire un autre usage des modèles.

Par exemple, George Box (statisticien de renom) énonce : "tous les modèles sont faux, mais certains sont utiles" (Box, 1979). Il parait contre intuitif qu'un modèle puisse à la fois ne pas dépeindre la réalité (être faux) et être un support d'analyse (être utile). Pourtant, nous nous accommodons aisément tous les jours de ce fait. Dans notre société industrielle, un travailleur s'apparente facilement à une machine de production. Pourtant comme le souligne le philosophe Castoriadis, un travailleur a sans doute plus de ressemblance avec un hibou qu'avec une machine-outil. Cet exemple montre que la modélisation simplifie : le travailleur est un outil de production. Le modèle est utile, il permet d'analyser aisément un problème : l'usine a besoin de 5 travailleurs pour fournir 15 tonnes de marchandise pour un coût de 5 néo-bitcoins. Mais en simplifiant, le modèle est faux, il occulte une partie de la réalité : le travailleur est avant tout un être vivant. À penser le travailleur comme une machine, la planification du temps de travail des salariés ne prennent parfois pas en compte leur santé et leur bien-être[1]. Le risque est la déconnexion du modèle avec la réalité : la bonne décision dans le modèle n'est pas nécessairement la bonne décision dans la réalité.

Nous nous intéressons au système d'aide à la décision dans le contexte d'un système complexe comme la logistique urbaine. Nous définissons un système d'aide à la décision comme un outil basé sur un modèle mathématique pour accompagner des décideurs face à une problématique. Ces systèmes sont mis en œuvre dans des problématiques où un grand nombre de variables est à prendre en compte. Comme énoncé dans la section précédente, nous considérons la logistique urbaine comme un système complexe, car les interactions sont nombreuses à différents niveaux (opérationnel, tactique et stratégique) et entre différentes parties prenantes dont les objectifs sont difficilement énonçables et potentiellement contradictoires.

Dès lors, une première interrogation émerge : est-ce qu'une problématique propre à un système complexe peut être figurée par un modèle ? Cette question renvoie directement à la notion de vérification de la validité du modèle. Cette validation peut être relativement

---

[1] Le projet Shift étudie les effets de la planification à la demande des emplois du temps pour s'aligner avec la demande client https://shift.berkeley.edu/

aisée lorsqu'elle a trait à des particularités physiques observables. Par exemple, le modèle de déformation d'une poutre sous l'effet d'une force peut être vérifié expérimentalement en comparant la déformation estimée et mesurée. Si la déformation est équivalente, le modèle est valide pour ce cas de figure. Au contraire, pour un système touchant au social comme la logistique urbaine, il n'est pas aisé d'observer une modification du système à la suite d'une perturbation. En effet, si nous pouvons extraire la poutre de son environnement (par exemple la charpente d'une maison) pour en éliminer l'influence, mettre une ville sous quarantaine sera une perturbation supplémentaire par rapport à son état normal.

Dans cette thèse, nous considérons que la conception d'un modèle pour une problématique de la logistique urbaine est possible dans le sens donné par la citation de George Box. Si nous savons que le modèle sera forcément faux, il pourra au moins être utile. Nous formulons la question de la validité d'un modèle pour prendre en compte les particularités d'un système d'aide à la décision autour de trois questions :

Comment faire générer de la connaissance relative à une problématique de la logistique urbaine par les parties prenantes ?

Le postulat initial est que la création d'un modèle mathématique nécessite la fine compréhension du système et de la problématique attenante, et que cette compréhension passe nécessairement par l'expérience des parties prenantes. La logistique urbaine regroupe une diversité d'acteurs dont les enjeux ne sont pas forcément alignés. Pour le concepteur d'un modèle, il faut aller chercher les données auprès des parties prenantes, les contextualiser pour les transformer en informations pour aboutir au développement de connaissances du système.

Le défi est que les fortes interactions de cette diversité d'acteurs imposent au concepteur lors de la production de connaissances des allers-retours entre les parties prenantes. À la manière d'une démarche scientifique où la connaissance produite est critiquée par les pairs, la connaissance nouvelle du système de la logistique urbaine doit être considérée par les autres parties prenantes. D'autant plus que le système est évolutif, les connaissances produites doivent être reconsidérées régulièrement.

Comment intégrer ces connaissances dans un modèle pour un système d'aide à la décision ?

Armé de données, d'information et de connaissance, le concepteur commence un modèle avec une page blanche. C'est cette liberté de description qui permet de voir le travailleur comme une machine ou comme un hibou selon le besoin d'analyse. Un choix de modélisation plutôt qu'un autre pourra avoir des effets importants sur l'analyse de la problématique et les décisions prises à partir du système d'aide à la décision. Un choix d'apparence minime, celui d'un mot plutôt qu'un autre, peut orienter radicalement l'analyse des données d'un problème. Cela a été montré par (Thibodeau & Boroditsky, 2011) dans une expérimentation où l'utilisation d'une métaphore pour désigner le crime (une bête ou un virus) a orienté le plan d'action (répression ou réforme) pour un public non expert.

Les choix sont nombreux et difficiles car ils sont difficiles à évaluer. La complexité du système empêche une validation a posteriori comme pour le modèle de déformation d'une

poutre. Pour tester l'application d'une nouvelle force, on préféra utiliser une poutre neuve avec des propriétés mécaniques similaires. En effet, la précédente poutre pourrait être dotée de nouvelles propriétés mécaniques si elle a subi une déformation au-delà de son domaine élastique. Pour un système d'aide à la décision, si la décision a eu les effets escomptés lors de son exécution, il n'est pas garanti que la même décision produise les mêmes effets plus tard. Le système, comme la poutre déformée au-delà de son domaine élastique, peut changer de propriétés suite à la décision ou la déformation : c'est le risque d'obsolescence du modèle.

La question de l'intégration des connaissances fait écho à l'ambition du domaine l'Intelligence Artificielle telle qu'elle fut définie en 1956 lors de la conférence de Dartmouth qui était alors de pouvoir décrire tout aspect de l'intelligence de l'homme de manière à ce qu'une machine puisse le reproduire en le simulant (Russell & Norvig, 2016). Le renouveau de l'IA aujourd'hui capable de reconnaître des chats, écrire des articles de presse, conduire des voitures ou gagner à des jeux contre des joueurs humains, ne doit pas cacher l'immensité du chemin restant à parcourir pour arriver à la hauteur de cette ambition. Si l'apprentissage automatisé privilégie les données d'un système pour extraire des connaissances et reproduire des comportements experts, nous souhaitons proposer une approche permettant de redonner une place plus importante aux connaissances des experts d'un domaine.

Comment les parties prenantes participant à la modélisation peuvent s'assurer que le modèle décrive fidèlement leur expérience du système ?

Une fois les connaissances des parties prenantes exprimées, le concepteur peut naturellement faire de nouveau appel à eux pour valider ses choix de modélisation, et ainsi valider le modèle. Dans le contexte opérationnel d'un système d'aide à la décision, la validation par les parties prenantes permet la justification d'une décision basée sur le modèle. Si les parties prenantes sont convaincues par la pertinence du modèle, elles devraient être aussi convaincues de la pertinence de la décision proposée.

Le défi est d'amener les parties prenantes à avoir suffisamment d'informations sur le modèle et de connaissances sur la modélisation pour que les parties prenantes puissent évaluer sa pertinence. En effet, la mesure des effets de l'application d'une force sur une poutre dans un environnement contrôlé est relativement simple : c'est le déplacement la flèche en centimètres. Au contraire, dans le cas de la logistique urbaine, les grandeurs estimées par le modèle sont à la fois nombreuses (Produit Intérieur Brut, taux de CO_2, qualité de vie, taux de remplissage, etc.) et équivoques. Le choix de la mesure est double : il faut sélectionner les indicateurs nécessaires et définir leur méthode de calcul. Nous montrons ainsi que la validation du modèle se fait à travers lui-même : ce sont les indicateurs choisis lors de la modélisation qui serviront à sa validation.

Si la validation du modèle relève de la responsabilité du concepteur, nous avançons que l'expérience des parties prenantes joue un rôle déterminant pour assurer la validité du modèle. Dans la présentation de ces premières questions de recherche, nous avons mis en évidence (1) la difficulté de la validation d'un modèle a posteriori et (2) la nécessité des parties prenantes à comprendre le modèle et la modélisation pour exprimer un avis sur le système d'aide à la décision. Dans cette thèse, nous montrons qu'une validation a priori du modèle par les parties prenantes peut être une solution face à la difficulté ou

l'incapacité à réaliser une validation a posteriori. Ce peut être vu comme un pis-aller, mais cela remet en question certains modes d'utilisation actuelle des modèles de simulation pour l'aide à la décision.

Dans le cas d'un système d'aide à la décision pour un système complexe, la validation du modèle (si elle est possible) par les parties prenantes est une condition nécessaire, mais elle n'est pas suffisante pour obtenir un haut niveau de confiance dans ce dernier. Le modèle est un dessin quasi statique[2] d'un système évoluant au gré d'innombrables paramètres et décisions. Dès lors, un modèle ne peut être validé définitivement, c'est un exercice de constante remise en question. Premièrement, face à l'évolution constante du système, ce dessin peut devenir obsolète. Deuxièmement, le modèle pourrait être mal interprété : il pourrait donner l'illusion de figurer certaines propriétés du système qu'il n'intègre pas.

Finalement, les profondes relations entre les trois questions nous amènent ainsi à considérer la validation d'un système d'aide à la décision dans un sens plus large. Si la question initiale était de savoir si le modèle décrit la réalité, il s'agit maintenant de s'assurer que l'utilisation d'un modèle « valide » ne déforme pas la réalité pour ses utilisateurs. Nous proposons ainsi la question de recherche suivante :

***Question de recherche** : comment s'assurer qu'une décision stratégique recommandée par un système d'aide à la décision aura les effets escomptés ?*

Nous déplaçons ainsi la question de la modélisation avec la participation des experts vers l'emploi du système d'aide à la décision par les parties prenantes. Les parties prenantes ne sont pas omniscientes : elles ne peuvent pas être expertes dans tous les domaines de la logistique urbaine. De fait, ce qu'elles ne connaissent pas, elles l'apprendront via le modèle en risquant d'être formatées par ce dernier. Certains représentants et décisionnaires des parties prenantes n'ont pas la vision globale du système. Ainsi leur vision du système et leur interaction avec ce dernier se fait par l'unique prisme de modélisation d'une problématique. Il en résulte deux risques pour l'emploi du système d'aide à la décision : (1) d'occulter le décalage entre le modèle et la réalité et (2) de formater la pensée des utilisateurs empêchant les utilisateurs de sortir du cadre du modèle pour proposer des solutions originales.

Dans un contexte où la donnée est rare, et le système trop complexe pour l'expérimentation, la décision n'en reste pas moins nécessaire. Dans le cadre de cette thèse, nous motivons la création d'une méthodologie de conception d'un système d'aide à la décision dont l'objectif est de garantir sa capacité à accompagner les parties prenantes vers la meilleure décision pour une problématique.

---

[2] Le modèle peut être mis à jour avec des nouvelles données, mais le comportement restera globalement identique.

Chapitre 2 — Entre croissance infinie et ressources limitées : l'espoir du numérique pour la maitrise de la complexité

Ce chapitre propose une vision de la logistique urbaine dans son contexte global et les réponses actuelles et futures pour sa régulation compte tenu de deux caractéristiques du système : des ressources limitées et un jeu d'acteurs complexe.

À mesure que les ressources (par exemple énergétiques ou foncières) se raréfient, les villes sont confrontées à des décisions de plus en plus difficiles. Ces décisions sont en réalité des arbitrages pour le partage de ressources entre toutes les activités de la ville à travers un jeu d'acteurs. L'objectif des acteurs en présence est de tirer le meilleur parti des ressources disponibles. Ainsi, comprendre les interactions entre les acteurs, c'est se donner les moyens d'anticiper les conséquences d'une décision à leur échelle, celle de la logistique urbaine et celle de la ville.

Toutes les décisions n'ont pas le même effet à différentes échelles. Si à l'échelle macroscopique des villes certaines interactions peuvent paraître insignifiantes, elles peuvent être indispensables pour comprendre les acteurs à l'échelle microscopique, et donc comprendre le fonctionnement de la ville. Cette relation entre les échelles macroscopique et microscopique est indispensable pour estimer les conséquences d'une décision. Sinon les conséquences d'une décision prise à une échelle ne pourront être estimées dans l'autre échelle. Par exemple pour une ville, c'est le risque d'une décision sans effet, car contournée, ou bien avec des effets non désirés, car détournée.

1 La nécessité de la décision pour la logistique urbaine

1.1 Un système complexe et dynamique

Dans cette thèse, la logistique urbaine est l'objet d'étude. Avant de définir ce terme, nous proposons de présenter la logistique urbaine comme un système pour mettre en valeur la question d'une frontière entre ce qui appartient et ce qui n'appartient pas au système étudié.

Si nous regardons la logistique urbaine comme un système, elle s'inscrit dans le système plus large du transport. À l'échelle européenne, le système de transport est gigantesque : il emploie directement près de 10 millions de personnes et représente environ 4.5% de son PIB (European Commission, 2014). Avec un zoom arrière plus important, tout cela s'inscrit dans un système social. En effet, la Commission Européenne définit le transport comme un facteur d'unification et d'amélioration de la qualité de vie des Européens. Mais il faudrait aussi considérer que nos sociétés sont aussi de plus en plus intégrées dans un système mondialisé par des échanges commerciaux internationaux. Enfin les conséquences du transport sur la planète, nous amènerait potentiellement à considérer le système Terre (Bonneuil & Fressoz, 2013). À l'échelle de la Terre, l'achat, la fabrication et le transport d'un produit de Suzhou en Chine à Vesoul en France peuvent sembler insignifiants. Mais cet échange international répond à un choix de société dont les impacts sont multiples et importants : hier à propos des délocalisations et aujourd'hui sur le

climat. Le système de la logistique urbaine évolue dans une articulation de systèmes plus grands. Pour son analyse à petite échelle, il faut l'extraire du reste, tandis qu'à grande échelle, il faut l'insérer dans le tout. C'est la caractéristique principale d'un système complexe : l'impossibilité de sa discrétisation.

La compréhension d'un système complexe est un défi vraisemblablement insurmontable. Au-delà du plaisir intellectuel à s'attaquer à un problème dur, la compréhension de la logistique urbaine est une nécessité au regard d'un système dans laquelle elle s'inscrit. Le transport, et donc la logistique urbaine, est confronté à l'épuisement des ressources fossiles, le dérèglement climatique, la saturation des infrastructures, l'augmentation de l'urbanisation, etc. Pourtant il est estimé que la demande de transport de fret atteindra une croissance de 80% d'ici 2050 par rapport à 2014. Et dans le même temps, la Commission européenne vise une réduction de 60% des émissions liées au transport pour 2050. La nécessité de compréhension naît du besoin de décision : quels moyens peuvent être mis en place pour allier croissance et réduction des émissions ? Est-ce que ces objectifs sont atteignables ? Et dans l'horizon de temps imparti ?

La notion de décision, c'est-à-dire le pouvoir d'influence sur le système, révèle son caractère dynamique. La logistique urbaine n'est pas figée dans le temps. Bien sûr, la logistique urbaine atteint des équilibres stables. Par exemple, les journées d'un livreur sont les mêmes, mais ne se ressemblent pas. Mais de nouvelles contraintes (environnementales ou sociales) ou de nouveaux services (e-commerce) viennent bouleverser les équilibres en place. Ce pouvoir d'influence est cependant relatif : à l'aune d'une décision prise ou subie, il est difficile de prédire quelle direction prendra le système. Pour cette raison, il faut augmenter le zoom afin d'étudier le système en profondeur.

L'emploi de l'expression "logistique urbaine" sera préféré à celle de "transport de marchandises en ville". La logistique représentant l'analyse, la planification, la gestion des flux physiques et des flux d'informations. L'expression "logistique urbaine" englobe ainsi un périmètre plus important où le transport n'est qu'une des composantes. La logistique urbaine est définie comme une vision intégrée des activités de transport dans les zones urbaines en prenant en compte des facteurs comme le trafic, la concurrence ou la coopération entre acteurs du transport (Taniguchi et al., 2001). Son objectif est de diminuer les nuisances associées au transport de marchandises dans les zones urbaines tout en soutenant le développement économique et social des villes (Crainic et al., 2009). Ces visions de la logistique urbaine porte un regard avec des notions d'optimisation, et se démarquent des visions organisationnelles (Anderson et al., 2005; Dablanc, 2007). Pourtant ces visions se répondent l'une à l'autre : la première fournissant généralement les outils et la seconde le cadre d'analyse. La conjonction des efforts de recherche se retrouvent dans la définition de (Gonzalez-Feliu et al., 2014) où la logistique urbaine est défini comme un champ pluridisciplinaire qui vise à comprendre, étudier et analyser les différentes organisations, les schémas logistiques, les parties prenantes et les actions de planification relatives à l'amélioration du transport des différentes marchandises dans une zone urbaine et les relier de façon synergique pour réduire les nuisances principales induites.

Dans ce chapitre, nous souhaitons montrer que la logistique urbaine est profondément liée à la ville et par extension à la société de plus en plus urbaine. Cette société dont les exigences environnementales et les attentes de services évoluent. Une société à la fois

actrice de la modélisation du système de la logistique urbaine et à la fois modelée par l'image créée du système pour comprendre les flux, et les acteurs et leurs interactions.

La logistique urbaine est un système complexe et dynamique dont la compréhension est indispensable face à la difficulté des décisions devant nous.

1.2 La tentative de description d'un système

Pour une première approche, nous nous proposons de regarder la logistique urbaine comme un problème descriptif. Le système peut être caractérisé par le service qu'il rend et par les effets négatifs qu'il génère. Une décision pour l'amélioration du système serait synonyme de l'amélioration du service et la minimisation des effets négatifs.

La logistique urbaine est considérée utile, car c'est une activité essentielle pour le dynamisme économique et l'attractivité d'une ville (Allen et al., 2000). Le guide de bonnes pratiques pour le transport de marchandises en ville du projet européen BESTUFS (Allen et al., 2007) donne les principales raisons de la nécessité d'une logistique urbaine efficace :

- Le coût total des activités de transport et de logistique est significatif et a un impact direct sur l'efficacité économique.
- Elle joue un rôle essentiel dans le maintien d'activités industrielles et commerciales en ville pour l'acheminement de matières premières ou de produits finis
- Le secteur est lui-même pourvoyeur d'emplois.
- Son efficacité contribue à la compétitivité de l'industrie des territoires concernés.
- Elle est indissociable de nos modes de vie.

La considération de cette seule liste d'éléments positifs met déjà au défi notre capacité de description quantitative du système pour guider une décision. D'une part, les définitions de concepts économiques (p. ex. un coût ou la compétitivité) sont à manipuler avec précaution, car les interprétations peuvent différer. D'autre part, d'autres notions comme le mode de vie sont difficilement quantifiables. À la difficulté de la description, s'ajoute la difficulté de les relier à leurs conséquences négatives.

La logistique urbaine est génératrice d'externalités négatives comme le bruit, la congestion ou la pollution de l'air. L'équilibre entre l'attractivité économique face aux considérations sociales et environnementales est difficile à arbitrer (Allen et al., 2007). Les externalités négatives de la logistique urbaine sont les mêmes que celles de la logistique traditionnelle, mais les contraintes sont exacerbées par la densité des activités et les contraintes opérationnelles spécifiques (p. ex. difficulté de massification des livraisons). Elles peuvent être classées en trois catégories (McKinnon, 2011) :

- Économie : congestion, inefficacité et gaspillage des ressources.
- Environnement : émissions de polluants et de gaz à effet de serre, utilisation de carburant fossile, de terrains et de matériaux non renouvelables, et production de déchets (pneus, huile, etc.).

- Société : effets des polluants sur la santé publique, blessures et décès engendrés par les accidents de circulation, nuisance sonore, gêne visuelle et autres aspects relatifs à la qualité de vie (p. ex disparition d'espaces verts au profit de l'infrastructure de transport).

Les externalités négatives sont diverses et elles sont les conséquences directes de l'activité liée à la logistique urbaine. Par exemple, la multiplication des livraisons à domicile impactera logiquement la circulation dans une ville. Cette description utilité/externalité négative permet d'illustrer la difficulté de faire croître ce système et dans le même temps de diminuer son impact négatif.

Mais cette première description de la logistique urbaine montre aussi ses limites. Les étroites relations entre les indicateurs d'efficacité du système et les indicateurs d'externalités négatives produites par celui-ci ne sont pas explicitées par cette description. Si nous pouvons à priori estimer les conséquences probables d'une décision, il est difficile de la quantifier pour savoir si l'impact d'une décision est significatif pour le système. Par exemple, dans quelle mesure la multiplication des livraisons à domicile détériore la circulation des véhicules ? La complexité du système empêche de se satisfaire d'une simple description macroscopique, il est nécessaire de comprendre finement le système.

1.3 Le statuquo, une position de plus en plus intenable

Pour faire face à une population de plus en plus urbaine, ainsi que des contraintes économiques et environnementales exacerbées, la logistique urbaine doit s'adapter pour réduire ses externalités négatives. Dans un monde aux ressources finies, des choix — des arbitrages — sont nécessaires.

D'autant plus que nous avons vu que le système est dynamique, la société change et avec ses attentes aussi bien environnementales que de services. Les autorités publiques ont le plus grand mal à se positionner par rapport à de nouveaux acteurs privés initiateurs d'un nouveau marché (VTC, livraison de repas à domicile, trottinette électrique) plébiscités par la société, mais qui remettent en cause un fonctionnement ou des valeurs (micro-entrepreneur payé à la pièce). Dès lors, le statu-quo acceptable pour le système tel qu'il était hier peut devenir insupportable pour le système dans sa nouvelle forme.

L'exercice de lister les aspects positifs et négatifs de la logistique urbaine semble plutôt consensuel. En revanche, la quantification (outil de prédilection pour un arbitrage) de ces différents éléments promet de longues tergiversions. Par exemple, comment arbitrer un choix entre "l'indissociabilité de la logistique urbaine à nos modes de vie" face aux "émissions polluantes" ? Une hypothèse pour expliquer la difficulté de cette question pourrait être la diversité d'acteurs ayant chacun des opinions parfois différentes, partagées, ou opposées entre eux.

Afin d'imaginer la possibilité de ces arbitrages difficiles, il faut indubitablement comprendre comment les enjeux de la logistique urbaine sont vus par les parties prenantes. Dans la suite de ce chapitre, nous nous intéresserons à cette diversité d'opinions pour montrer que la vérité au sujet de la logistique urbaine sera toujours vraisemblablement inaccessible, mais celle vers laquelle il faut tendre.

2 Une diversité d'acteurs et de motivations

Au fil des années, la présence et l'augmentation des externalités négatives ont démontré la difficulté de l'action pour l'amélioration de la logistique urbaine. La diversité d'acteurs et la multiplicité de leurs intérêts peuvent être une explication du manque de réussite dans les politiques de la ville dans ce domaine. Trois grandes catégories peuvent être retenues (Quak 2008) : les autorités publiques, les acteurs privés et les impactés. Cette typologie illustre la divergence de la perception des enjeux entre les parties prenantes et en particulier au sein de chacune d'entre-elles.

2.1 Les autorités publiques

Les autorités publiques peuvent être définies par leurs responsabilités. Elles sont en charge d'assurer le développement social, économique et environnemental des régions sous leur autorité (van den Bossche et al., 2017). Ce sont les élus, les services techniques des villes, les gestionnaires de transport et d'infrastructure, les services techniques régionaux ou nationaux et elles ont un rôle d'encadrement légal de l'activité (Gonzalez-Feliu et al., 2014).

Le groupe autorité publique est cependant hétérogène, non seulement à cause des différentes missions attribuées à ses éléments constitutifs, mais aussi à cause des différents périmètres de responsabilité qu'ils peuvent avoir, ou de la spécificité des territoires dont ils sont en charge. La description de ces différences est primordiale pour comprendre les variations de positionnements lors de la prise de décision. En effet, ces responsabilités et territoires hétérogènes ont pour conséquence que les objectifs de ces éléments constitutifs ne sont pas toujours alignés par exemple entre une ville et sa région, ou entre deux communes limitrophes.

À l'échelle de la ville, la Mairie, en tant que gestionnaire de la voirie, est responsable de la logistique urbaine. Mais la Mairie est aussi soumise à d'autres responsabilités : mobilité des personnes, espaces de loisirs, protection de monuments historiques, etc. L'arbitrage dans une problématique de logistique urbaine va probablement dépasser les parties prenantes directes comme un commerçant ou un transporteur. Par exemple, la décision d'installer une aire de livraison se fera au détriment du parking résidentiel, d'une voie cyclable, d'un territoire pour les piétons, etc. La surface de la voirie est la ressource de différentes fonctions de la ville, et la Mairie doit arbitrer un choix parfois épineux sur une décision impopulaire, mais considérée nécessaire. On observe que la taille de la ville explique que la question soit plus ou moins abordée. Les grandes villes sont généralement plus en pointe sur ce domaine. Les principales raisons exposées pour les petites et moyennes villes sont : hiérarchisation face à d'autres problèmes plus urgents, moins de travaux de recherches menées sur ces territoires, poids moindre dans les échanges avec des opérateurs nationaux, impact limité sur le trafic, et le manque de sensibilisation (Gardrat, 2017). Certains projets, comme le projet européen Novelog (Halatsis et al., 2016), proposent des outils d'aide à la décision pour choisir les mesures appropriées par rapport aux spécificités de la ville.

Les villes peuvent se distinguer par l'importance politique donnée à la logistique urbaine par rapport à d'autres prérogatives. Une enquête réalisée en 2004 (Huschebeck, 2004)

montre que 66% des villes d'Europe de l'Ouest n'ont pas de personnel dédié à la logistique urbaine. Cette proportion atteint 77% des villes des nouveaux États de l'Union européenne (états devenus membres en 2004). L'enquête montre aussi des différences importantes dans les problèmes de logistique urbaine qui préoccupent ces villes. Enfin, l'activité de recherche est peu développée dans les pays en développement, malgré des problématiques nouvelles du fait de la taille importante de ces nouveaux foyers de consommation et de leur forte croissance (Behrends, 2016).

Au-delà de la démographie ou du niveau de développement, une caractéristique géographique particulière peut provenir de l'activité économique comme c'est le cas pour les villes portuaires (Allen & Eichhorn, 2007). Ces villes reçoivent de grandes quantités de marchandises qui ne sont pas destinées à leurs habitants ou leurs entreprises. Dans le port de Bologne, 75% des marchandises débarquées ont pour destination l'Italie (hors Bologne) et l'Europe. Les villes sont ainsi fortement impactées par un trafic traversant. Dans la ville portuaire de Gdynia (Pologne), 20% du trafic sur les axes principaux proviennent des activités portuaires.

À l'échelle des agglomérations ou des régions, la logistique urbaine est aux intersections de différents périmètres de responsabilité. Comme nous l'avons évoqué précédemment, toutes les villes ne considèrent pas la logistique urbaine de la même façon, ainsi il en découle parfois un manque d'harmonisation entre les réglementations de villes limitrophes. Le patchwork réglementaire impose alors des contraintes opérationnelles fortes aux professionnels. Par exemple, le même véhicule peut être autorisé dans une ville et interdit dans une ville limitrophe. De plus, ce patchwork décourage les professionnels de construire une vision stratégique à long terme pour repenser le transport de marchandises en ville (c.-à-d. organisation, immobilier, flotte). La conséquence est l'impact limité des politiques publiques en matière de logistique urbaine (Dablanc, 2007; Debrie & Heitz, 2017). En revanche, l'exemple français montre que le manque d'intérêt ne s'explique pas seulement par un manque de moyens d'étude. La problématique de la logistique urbaine est bien documentée et étudiée par rapport à d'autres pays mais la problématique peine à être identifiée par les autorités publiques. En effet, même s'il est observé que la morphologie des espaces métropolitains évolue également sous l'effet des activités logistiques (Dablanc & Frémont, 2016), la logistique urbaine est souvent absente des questions d'aménagement du territoire local (Debrie & Heitz, 2017).

Enfin à l'échelle nationale, les objectifs de la ville et du pays peuvent être contradictoires. Par exemple, la priorité de la réduction de CO_2 au niveau national n'est pas forcément compatible avec une réduction de la quantité de particules fines recherchée par les villes. Dans l'état actuel de la technologie, l'interdiction des motorisations diesel aura vraisemblablement un effet positif sur les particules fines, mais l'augmentation des externalités négatives des motorisations alternatives est généralement hors du périmètre des villes : potentielle augmentation des émissions de CO_2 pour les véhicules essences (Bonnafous, 2019) ou pollution de l'environnement par l'exploitation des terres rares pour les batteries des véhicules électriques.

2.2 Les acteurs privés

2.2.1 Quatre sous acteurs

De prime abord, pour agir sur la logistique urbaine, il suffirait de se pencher sur la compréhension de la manière dont circulent les marchandises, or les transporteurs ne sont pas décisionnaires, ils sont même plutôt sous la contrainte des clients, des destinataires et des autorités publiques dont nous avons déjà présenté les potentielles divergences d'objectifs.

Il est nécessaire de décomposer le groupe des acteurs privés qui rassemble les expéditeurs, les transporteurs, les grossistes, les propriétaires fonciers, et l'industrie tertiaire (Gonzalez-Feliu et al., 2014). Les acteurs privés focalisent leurs démarches d'amélioration vers la baisse des coûts et l'amélioration de la qualité de service. La logistique urbaine est souvent considérée d'un point de vue national, par conséquent avec des indicateurs qui rendent peu compte des spécificités locales, ainsi leur organisation est généralement indépendante de la structure des villes (Ambrosini et al., 2010; Dablanc, 2007).

De manière équivalente à la logistique *classique*, la littérature décrit les quatre grands acteurs liés aux villes et à sa chaîne d'approvisionnement (Russo & Comi, 2010; van den Bossche et al., 2017), de la manière suivante :

- expéditeur ;
- grossiste ;
- transporteur ;
- destinataire.

L'**expéditeur** est responsable de la production des biens pour le destinataire. Cet acteur peut aussi être responsable des opérations de conditionnement et de chargement. Il y a une tendance pour les expéditeurs à sous-traiter de plus en plus les opérations logistiques qui sont confiées à des tierces parties. Ces sous-traitants sont nommés de 1PL (First Party Logistics) à 4PL (Fourth Party) en fonction de leur degré d'intégration avec leur client (du transport à la gestion complète de la chaîne d'approvisionnement). Cet acteur pousse le transporteur à diminuer ses charges pour rester compétitif tout en proposant des délais courts au client final.

Certains expéditeurs ont leur propre flotte de véhicule. Ils réalisent leur distribution "en compte propre". Ce type de livraison s'oppose à la distribution "pour autrui" qui serait réalisée par un transporteur. Le compte propre est généralement considéré comme ayant un taux de remplissage moins élevé, car il ne bénéficie pas de la possibilité de mutualiser à la manière d'un transporteur.

Le **grossiste** est un intermédiaire entre l'expéditeur (p. ex. fabricant) et le destinataire. Il consolide des biens provenant de différents expéditeurs pour livrer le destinataire. Pour l'expéditeur, il facilite la vente en grande quantité. Pour le destinataire, il est un interlocuteur unique disposant une large gamme de produits. Ces acteurs possèdent ou gèrent des espaces de stockage important proche des grands axes de communication et

des bassins de consommation. Le grossiste peut lui aussi intégrer la fonction de transporteur, son activité, essentiellement consacrée à la massification, contribue à l'amélioration du taux de chargement. C'est un exemple que le compte propre n'est pas forcément synonyme de faible taux de chargement.

Le **transporteur** est chargé par l'expéditeur de transporter la marchandise jusqu'au destinataire. Il cherche à satisfaire le destinataire et l'expéditeur avec un transport de qualité tout en minimisant ses coûts. La difficulté de la livraison en ville a amené les grands transporteurs à recourir à la sous-traitance avec des conséquences sur les conditions de travail (Dablanc 2007). Les transporteurs sont les acteurs les plus visibles de la logistique urbaine. Le marché est hétérogène : petites entreprises (quelques véhicules) à des entreprises internationales (centaines de véhicules).

Le **destinataire** génère les mouvements logistiques dans la ville. Généralement, le destinataire est un commerçant, il cherche à maximiser son espace de vente en réduisant son espace de stockage. De ce fait, il aura besoin d'être livré régulièrement pour ne pas être en rupture de stock. Le destinataire peut réaliser la livraison en compte propre avec son véhicule. Ce mode de livraison est décrié, car le taux de chargement sera faible (Bourlon et al. 2014).

La typologie d'acteurs privés, avec leur fonction et leurs intérêts, esquisse la difficulté de l'énumération et la compréhension de tous les échanges dans une ville. Pourtant la logistique urbaine n'existe pour une large partie que par l'interaction complexe entre ces acteurs. De ce fait, la politique d'une ville ne peut faire l'économie de la prise en compte ces acteurs et leurs spécificités.

2.2.2 Les filières : un marché fragmenté aux contraintes spécifiques

Les acteurs privés regroupent plusieurs fonctions bien distinctes comme l'expéditeur, le transporteur et le destinataire. Cette segmentation permet de comprendre la dynamique globale des échanges pour l'approvisionnement des marchandises en ville. En revanche, derrière ces fonctions, il y a différents métiers comportant des contraintes propres à leur domaine d'activité. De plus, deux acteurs privés avec la même fonction et le même métier peuvent aussi avoir des stratégies radicalement différentes en fonction de leur clientèle. Par exemple, les magasins "bios" accepteraient facilement un surcoût du transport pour diminuer leur impact environnemental, au contraire d'une enseigne de grande distribution dont le but est de proposer à ses clients des produits au meilleur prix.

La notion de filière est utilisée pour définir le domaine d'activité ou le type de marchandise d'un ensemble d'acteurs privés. Elle permet d'affiner la classification des acteurs privés au lieu de se limiter à leur rôle dans la chaîne d'approvisionnement. La nécessité de traiter la logistique urbaine en différentes filières semble évidente aujourd'hui, tant les différences dans les objectifs, leurs valeurs et les contraintes opérationnelles sont multiples. La littérature montre que le découpage de la logistique urbaine en filières diffère selon les méthodologies. Par exemple, la typologie proposée par le LAET (Laboratoire Aménagement Economie Transports CNRS/Université Lumière Lyon 2/ENTPE) dans l'outil d'aide à la décision FRETURB décompte huit grandes filières : agriculture, artisans services, industrie, commerce de gros, grands magasins, petit commerce, tertiaire et entrepôts.

La diversité des filières dans leurs opérations rend difficile la collaboration entre les acteurs de la logistique urbaine, cela peut provenir d'une culture différente, d'un modèle d'entreprise différent, ou encore de contraintes opérationnelles différentes. Pourtant la collaboration entre les acteurs est une piste récurrente pour les mesures et expérimentations visant à diminuer les externalités négatives de la logistique urbaine. Par exemple, des acteurs de différentes filières pourraient mutualiser leurs moyens de livraisons pour réduire le nombre de véhicules, car leurs marchandises possèdent des caractéristiques similaires.

2.3 Les impactés

Le groupe des impactés représente les acteurs qui ne bénéficient pas directement de la logistique urbaine, mais en subissent les externalités négatives plus ou moins fortement. Il peut s'agir des résidents, des personnes travaillant à proximité de zones de livraison, des clients des commerces et des centres commerciaux, et des touristes.

La classification de ces acteurs se révèle compliquée, car ces différents groupes se recoupent. Une personne réside dans un quartier, travaille dans un autre et part faire ses courses dans un dernier. En revanche, il est clair que les impactés sont aussi utilisateurs de la logistique urbaine. Cela peut être de façon directe, ce groupe achète des produits dans des supermarchés, des pharmacies, des librairies, ou via internet. Cela peut être aussi de façon indirecte, ce groupe utilise l'infrastructure de la ville dont la construction et l'entretien sont des activités importantes de la logistique urbaine(Bourlon et al., 2014).

Ce groupe est aussi très influent sur la politique de la ville par leur pouvoir électif vis-à-vis des autorités publiques. Les attentes des impactées, qui ont un poids électoral plus important, reçoivent ainsi plus d'attention que les professionnels (Van Binsbergen & Visser, 2001). De plus, les personnes représentant les autorités publiques appartiennent elles-mêmes à ce groupe, et ne maitrisent pas forcément les concepts logistiques (Debrie & Heitz, 2017).

2.4 Conclusion sur la diversité d'acteurs et leurs motivations

Dans cette section, nous avons défini trois grands acteurs et nous avons mis en évidence que leur hétérogénéité oblige à procéder à une description plus fine pour comprendre le jeu d'acteurs.

Les autorités publiques représentent le premier groupe d'acteurs, elles doivent opérer des arbitrages sur la logistique urbaine qui est en concurrence avec d'autres problématiques comme le logement ou la santé publique. Nous avons aussi montré qu'une concurrence peut exister entre des objectifs au sein de ce groupe. Par exemple, la diminution du CO_2 est un objectif sur le long terme porté généralement par les États alors que la diminution des émissions de particules fines est un objectif de court terme pour les villes. Enfin, la description révèle que les autorités publiques gèrent des territoires qui diffèrent par leur tissu économique ou leur modèle social et politique.

La description du deuxième groupe des acteurs privés montre la profusion d'activités relatives à la logistique urbaine. Nous avons mis en évidence la nécessité d'utiliser une échelle de description fine pour comprendre les relations entre les différents sous-acteurs

de ce groupe. Cette multiplicité de relations fait croître exponentiellement la difficulté à se figurer la logistique urbaine à une unique échelle.

Le groupe des impactés dévoile l'omniprésence de l'activité de logistique urbaine dans une ville alors même que ce groupe est ignorant de son existence, ou du moins de son importance et de sa complexité. C'est un groupe qui possède un poids politique fort sur les autorités publiques, mais aussi un poids économique important sur les acteurs privés, car les habitants ou les touristes peuvent infléchir la demande.

Dans le cadre de cette thèse, nous utiliserons la notion de filières pour segmenter les acteurs privés. Par contre, nous limiterons les autorités publiques aux villes et aux métropoles qui ont la responsabilité de la logistique urbaine. Pour les impactés, nous considérons leurs intérêts alignés avec ceux des autorités publiques grâce à leur pouvoir sur ces organisations à travers le processus électoral.

3 Différentes stratégies de limitation des externalités négatives

La diminution des externalités peut être un objectif partagé entre les acteurs privés et les autorités publiques. En effet, la baisse du nombre de véhicules pour un acteur privé peut représenter une économie substantielle. Et dans le cas de la pollution atmosphérique, l'utilisation d'un véhicule plus propre donne une image "plus verte" au transporteur ou à son client. Ces initiatives privées sont les bienvenues pour les autorités publiques, mais elles ne sont pas suffisantes pour changer toute la logistique urbaine. L'investissement humain et financier nécessaire pour remettre en cause des organisations en place n'est pas à la portée de toutes les entreprises.

Les autorités publiques peuvent provoquer ces changements par une modification du cadre légal ou par un soutien financier. C'est dans ce but que les autorités publiques lancent des initiatives pour réaliser les livraisons avec des véhicules plus propres, mieux remplis et minimiser les perturbations sur le trafic. En d'autres termes, ces mesures visent à limiter les externalités négatives générées par le transport pour le bénéfice de la société. La difficulté est de proposer des mesures ne diminuant pas la qualité de service et n'augmentant pas considérablement les coûts opérationnels.

3.1 Mesures de restriction et réduction d'accès

La restriction ou la réduction de l'accès est l'une des premières mesures prises dans le cadre de la logistique urbaine. L'objectif est de diminuer la pollution, la sécurité des usagers vulnérables de la route, augmenter la sécurité, les vibrations et le bruit (Anderson et al., 2005).

Les mesures ciblent généralement le poids total autorisé en charge et la taille (surface au sol) du véhicule pour interdire leur accès à la ville. Les villes peuvent conditionner l'accès des véhicules à certaines zones comme les centres-villes. Par exemple, les véhicules de livraison ont besoin d'une autorisation pour entrer dans les Zones de Basses Émissions ou Zone à Circulation Restreinte. C'est un ensemble de contraintes supplémentaires à

respecter pour le transporteur pour réaliser ses tournées. Et ces contraintes ne sont parfois pas harmonisées avec les communes limitrophes.

La restriction d'accès peut aussi être régulée financièrement. Les zones peuvent aussi être soumises à un péage urbain pour les véhicules : une démarche théorisée dans le rapport Smeed (Great Britain. Ministry of Transport & Smeed, 1964) mais mise en place la première fois par Singapour dès 1975 (Seik, 2000) . L'objectif de ce type de mesure est d'internaliser des coûts externes (p. ex. coûts hospitaliers, dégradation de la route) générés par le transport (McKinnon, 2011). Ces mesures sont potentiellement impopulaires comme cela a pu être observer avec le mouvement de « bonnets rouges ». La lutte contre les portiques de l'écotaxe était devenue un symbole pour les revendications de l'industrie agro-alimentaire bretonne.

La restriction d'accès peut se faire dans le temps. Les livraisons sont parfois soumises à des horaires pour limiter le nombre de véhicules encombrants les opérations pendant les heures de pointe. Certaines villes encouragent les livraisons de nuit pour limiter les nuisances pendant la journée (Holguín-Veras, 2008). L'impact global de cette initiative reste difficile à établir : augmentation des coûts liés au travail de nuit, diminution de la consommation énergétique, augmentation de la vitesse des véhicules, etc. L'un des obstacles majeurs est l'acceptation par le destinataire. Il faut aussi que ce dernier ait une relation de confiance avec le transporteur pour que les livraisons soient faites en son absence. De plus, certaines livraisons bruyantes (p. ex. un camion frigorifique) sont interdites la nuit pour la tranquillité des résidents.

Ces limitations d'accès peuvent être associées à la création de Centres de Distribution Urbains (CDU). Ils se font souvent à l'initiative des villes pour encourager la coopération entre les transporteurs pour assurer un taux de chargement élevé des véhicules entrant dans la ville, et permettre de mutualiser le coût des livraisons utilisant des véhicules plus propres (motorisation GNV ou électrique). De plus, la plus faible distance à parcourir pour ces véhicules permet de libérer de la contrainte d'une potentielle faible autonomie des motorisations électriques. Plus d'une centaine de CDU ont été créés dans le monde, mais il est estimé que près de 96% des CDU ont échoué (Vahrenkamp, 2013). L'étude approfondie des CDU développés dans le monde (Allen et al., 2012) met en lumière les difficultés organisationnelles, financières et opérationnelles de ce type d'initiative.

3.2 Mesures d'aménagement du territoire

Certaines mesures peuvent aussi être aussi à l'avantage des acteurs logistiques pour faciliter leurs opérations. Par exemple, les aires de livraison sont un outil réglementaire permettant d'aider directement les opérations logistiques dans la ville et mieux prendre en compte les besoins en amont. La rareté de l'espace des villes limite la possibilité de stationnement proche du lieu de livraison. Il a été observé dans les villes que cette contrainte pousse les transporteurs à stationner en double file ou illégalement, réduisant ainsi la capacité du réseau (Abel & Karrer, 2006). Ces modifications réglementaires peuvent être en concurrence avec d'autres objectifs (par ex. développement des voies cyclables) ou empêchées par le cadre légal (par ex. code de la route ou Plan Local d'Urbanisme).

La réglementation n'est pas le seul outil, les villes prennent aussi des initiatives pour le développement de nouvelles solutions de livraison. Les villes encouragent le développement des plateformes comme la Chapelle International et Beaugrenelle (voir section 4.2). Ces initiatives soutiennent l'activité logistique en réservant du foncier dédié à la logistique dans le plan de développement urbain et consentent à des loyers subventionnés pour le développement de schémas logistiques alternatifs. L'infrastructure pour l'énergie fait aussi partie des mesures considérées par les villes, notamment pour accélérer l'adoption de motorisations alternatives (Gaz Naturel pour Véhicules ou électrique) par les transporteurs.

3.3 Conclusion sur les stratégies de limitation des externalités négatives

Dans cette section, nous avons présenté les mesures les plus répandues dans les villes. Cette description met en évidence à la fois la difficulté et la nécessité de bien maitriser le contexte économique et légal pour aboutir à une mesure efficace. Cette section montre qu'une mesure a forcément un coût soit pour l'autorité publique qui doit réaménager un espace, soit pour l'acteur privé qui doit investir dans de nouveaux outils et une nouvelle organisation. Pour l'autorité publique, la question est bien de prédire les effets d'une mesure. Tandis que les acteurs privés cherchent à faire valoir leurs contraintes opérationnelles pour ne pas être pénalisés par une mesure ou remettre en cause leur mode de fonctionnement.

4 Outils pour la logistique urbaine : gouvernance publique et expérimentations

Pour faire face aux défis de la logistique urbaine, les parties prenantes prennent leur disposition pour observer et contrôler leur environnement. La gouvernance publique est un point de départ de l'action en logistique urbaine par la production de travaux de synthèse et la collecte de donnée, dont découle la planification urbaine de la ville et les choix sociaux. Les expérimentations dont l'initiative peut être publique ou privée sont aussi des moyens d'action pour trouver des alternatives dans l'organisation actuelle de la logistique urbaine.

4.1 Gouvernance publique

4.1.1 Analyse et collecte de données

Les rapports de synthèse sont une source d'informations importantes pour les responsables de l'aménagement des villes. Ces rapports sont commandés par les villes (Bourlon et al., 2014), les régions (Adam & Ropital, 2018), les états (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2016) ou la Commission européenne (van den Bossche et al., 2017) à différents experts du domaine. Les rapports sont réalisés par des cabinets d'urbanisme publics (Institut Paris Région, APUR) ou privés, des cabinets de conseil et des chercheurs.

Ils peuvent aussi être à l'initiative d'un effort conjoint de tous les acteurs, à l'exemple des plateformes technologiques européennes ALICE (Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe) ou ERTRAC (European Road Transport Research Advisory Council) regroupant les acteurs de la logistique en Europe (ERTRAC & ALICE, 2015). La commission européenne soutient la création de plateformes pour réunir les différents acteurs d'une problématique pour construire une feuille de route commune sur la recherche et s'accorder sur les actions à mener (ALICE, 2016).

Ces rapports s'appuient sur des observations de terrain, des entretiens et sur des enquêtes marchandises. En France, les premières enquêtes marchandises ont débuté entre 1995 et 1997 dans trois villes françaises (LAET, 2019). La seconde phase d'enquête a concerné la région Île-de-France (2010-2012) et l'agglomération bordelaise (2012-2013). Ces enquêtes constituent une importante source d'information pour comprendre les mouvements et les opérations de livraison pour une ville et pour différentes activités. Malheureusement, ces enquêtes sont coûteuses et complexes : la seconde phase de l'enquête marchandises en ville a coûté un million d'euros (Dablanc, 2013). Par conséquent, seules les plus grandes villes ont les moyens de déployer des enquêtes marchandises. Il est ainsi difficile d'identifier comment les pratiques de la logistique urbaine changent en fonction des villes. La collecte des données prend du temps et la complexité des enquêtes demande du temps pour l'analyse. L'enquête peut ainsi devenir ainsi obsolète rapidement pour les filières en forte croissance (e-commerce ou livraison de repas à domicile). Le renouvellement de la méthodologie pour les Enquêtes Transport de Marchandises en Ville est un axe de recherche actuel du LAET. En France, d'autres enquêtes complètent les informations comme le recensement Régional des Entrepôts Logistiques (Debrie & Heitz, 2017) ou la carte collaborative wikimap'PROJETS[3] réalisé par l'IAU où sont répertoriés les projets urbains de la région.

Le recensement des projets logistiques dans les projets urbains (Debrie & Heitz, 2017) témoigne de leur place minoritaire occupée par les projets : seuls 9 % de ces projets urbains intègrent une activité logistique, le plus souvent dans le cadre d'un projet de mixité (p. ex. bureaux et service logistique).

Ces analyses et ces bases de données sont aussi utiles pour la création d'outils d'aide à la décision. Par exemple, ils permettent d'estimer les effets d'une mesure de manière quantitative.

4.1.2 Planification urbaine

La question de la logistique urbaine est un sujet nouveau pour la planification urbaine (Adam & Ropital, 2018). Celle-ci se réfléchit à différentes échelles ce qui conduit à la production de plusieurs documents d'urbanisme suivant une hiérarchie géographique.

Au niveau des communes et des intercommunalités, les plans de déplacement urbain (PDU) ou Plans Mobilité traitent du déplacement des personnes et des marchandises. Ces plans s'appuient sur les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU). Le PLU est un document

[3] https://geoweb.iau-idf.fr/webapps/projets/

réglementaire qui définit les différents types de zones : urbaine (U), agricole(A), naturelle (N), à urbaniser (AU). Les zones peuvent être réservées pour une activité spécifique comme le logement ou les entrepôts. Cet outil permet d'orienter le développement urbain d'une commune ou intercommunalité en désignant le type d'activité qui pourra être implanté sur une parcelle de terrain. La désignation d'une seule activité par parcelle empêche la mixité d'activités en un lieu. Pour se libérer d'une contrainte, la Ville de Paris a créé une nouvelle catégorie : les espaces logistiques urbains pour par exemple accueillir des activités logistiques et de la location de bureaux dans le même bâtiment à l'instar du concept d'hôtel logistique. Cela permet de proposer des loyers adaptés à une activité peu rémunératrice comme la logistique.

Au niveau de la région, le SRADDET (schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires) donne une orientation urbaine pour l'insertion du territoire dans le contexte national et international. Debrie et Heitz décrivent largement l'évolution de la place de la logistique urbaine dans les documents de planification au sein des différentes instances : de la région Île-de-France aux villes (Debrie & Heitz, 2017). Malgré une volonté d'une planification à l'échelle de la région, il est observé que le pouvoir d'aménagement est avant tout du ressort des communes et intercommunalités via les Plans Locaux d'Urbanisme, les Plans de Mobilité et les permis de construire. Il apparaît que le principe de charte de bonnes pratiques signé entre les autorités locales, les gestionnaires d'infrastructure, les transporteurs et les chargeurs devient un outil pour une meilleure collaboration entre les acteurs. L'imbrication de ces outils réglementaires et de gouvernance pour la mobilité des marchandises est détaillée dans un rapport commandé par la Confédération du commerce de gros et international (Heitz & Dablanc, 2019).

4.1.3 Ville intelligente

La ville intelligente (*smart city* en anglais) est souvent présentée comme une solution à tous les maux de nos villes. La ville intelligente se définit par une intégration des technologies de l'information et de la communication pour améliorer le fonctionnement de la ville. Le PDG de l'entreprise américaine de télécommunication Cisco parle lui "d'enrichir la vie des citoyens" grâce à la technologie (Chambers & Elfrink, 2014). La ville intelligente se définit clairement par ses moyens : développement de l'Internet des objets pour la collecte et d'outils d'analyse des données pour la prise de décision. Les promoteurs de la ville intelligente présentent ce concept comme étant au service de la ville pour qu'elle puisse conduire sa politique. La technologie est présentée comme une solution pour résoudre les problématiques de la logistique urbaine. L'apparente évidence de cette solution se heurte aux réalités de la complexité de la ville.

Dans son ouvrage, Ben Green présente un argumentaire contre le discours habituel de promotion des villes intelligentes (Green, 2019). Il montre que si la technologie peut être un outil pour le progrès social, l'approche technologiste (*technology driven* en anglais) pour le progrès social est condamné à des bénéfices limités et des conséquences inattendues. La ville intelligente suit une approche quantitative qui est critiquable par la difficulté de reproduire objectivement une ville. Green souligne en particulier la difficulté de ce type d'approche pour mesurer les impacts sociaux et politiques d'une décision.

Cette approche technologiste est d'autant plus acceptée qu'elle revêt la connotation positive de la technologie, c'est-à-dire du futur, et par extension du progrès. En effet,

l'argument habituel soutient l'idée de la neutralité des systèmes d'information qui seraient alors des outils au service du progrès. Cet argument est exprimé par Samuel Palmisano (PDG de IBM) lors du forum 2011 SmarterCities à Rio de Janeiro (Palmisano, 2011). Dans sa présentation, il avance que les décisions relatives aux systèmes de transport, au réseau électrique, à l'approvisionnement en nourriture et en eau ne répondent pas à une idéologie. Green donne trois contre exemples intéressants pour lesquels les victimes sont issues en majorité de communautés pauvres et afro-américaines. Le premier exemple décrit comment la ville de Syracuse, New York a utilisé le budget fédéral pour détruire les bidons-villes grâce au développement des autoroutes (Semuels, 2016). Le deuxième exemple rappelle la crise sanitaire de Flint, Michigan en 2014 qui est la conséquence d'un changement de source d'eau potable motivée par des considérations budgétaires (NY Times, 2016). Le dernier exemple est celui de la construction d'un pont anormalement bas pour empêcher les bus (utilisés majoritairement par les minorités pauvres de New York) d'accéder aux plages (Winner, 2010).

Ces exemples pourraient sembler anecdotiques par rapport aux projections positives que promettent les villes intelligentes. Pourtant, de manière plus proche, nous pourrions par exemple nous interroger sur les impacts sociaux et politiques de la ville intelligente sur une population peu connectée à Internet (Brygo, 2019). Cette population n'aurait pas accès aux horaires de bus ou à certains services publics faute d'accès à un smartphone. Il est nécessaire de s'assurer de la cohérence d'une technologie avec l'ensemble de la politique de la ville.

Cette cohérence entre une technologie et la politique ne pourra s'exprimer qu'au travers d'une compréhension complète du fonctionnement du système. Dans le cadre de la logistique urbaine, en l'absence d'une vision globale de ce système, l'intégration de nouvelles technologies doit être réfléchie avec d'autant plus d'attention qu'il est difficile d'anticiper la réaction d'un système complexe à un changement.

4.2 Expérimentations

De nombreuses expérimentations ont été lancé pour proposer des alternatives à la logistique urbaine actuelle : le transport par la route reste prédominant. C'est le moyen de prédilection par sa flexibilité, fiabilité, et de fait tout le système logistique s'est organisé autour de celui-ci. Cependant, cette vision pourrait être biaisée. En effet, dans la mesure où, selon certains les camions ne payeraient pas le coût réel généré par leur activité, on ferait alors face à une compétition injuste par rapport à des modes de transports alternatifs. D'ailleurs la difficulté de mener une analyse des coûts et bénéfices ne se limite pas à la comparaison de la route à ses alternatives, elle s'étend à tous les projets urbains à cause de la complexité des relations entre ces derniers et la ville.

Nous proposons de présenter les expérimentations plus emblématiques pour comprendre les motivations de chacune et les limites pour leur déploiement à l'échelle d'une ville.

4.2.1 Repenser les schémas logistiques actuels

Il existe une volonté des autorités publiques de ramener la logistique dans les zones denses et de massifier les flux. L'analyse des projets immobiliers fait ressortir deux stratégies pour minimiser le coût foncier. La première est de développer des bâtiments accueillant

différents types d'activités. Cette flexibilité permet de proposer des loyers abordables pour une activité logistique grâce à une compensation venant des autres activités de logements résidentiels ou pour des bureaux. La deuxième stratégie, potentiellement complémentaire de la première, est d'utiliser la verticalité des bâtiments pour minimiser la surface au sol. Chacune de ces stratégies s'est heurtée à des contraintes réglementaires et opérationnelles. D'une part la mixité des activités au sein d'un même bâtiment était en contradiction avec la réglementation en place. D'autre part, la stratégie de verticalité induisait des problèmes opérationnels : le matériel doit être adapté aux locaux, c'est pourquoi les entrepôts sont généralement à plat, et les schémas de distribution doivent être appliqués pour recevoir des flux massifs éclatés sur des modes plus petits. Ces initiatives pour repenser la logistique, potentiellement coûteuse, peuvent être soutenues par les autorités publiques qui possèdent une capacité d'aménagement via les établissements publics comme l'EPA ORSA ou l'EPF Île-de-France, ou des établissements privés comme la SOGARIS détenue par la Ville de Paris, le Groupe Caisse des Dépôts, les départements des Hauts-de-Seine, de Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne. Ces structures donnent la capacité aux autorités locales de s'investir dans des projets d'expérimentation, par exemple avec un espace à Beaugrenelle pour Chronopost ou l'Hôtel Logistique de la Chapelle International. Les autorités publiques, responsable du cadre légal, rendent possibles des initiatives en adaptant les normes comme pour la mixité d'activité dans un bâtiment ou en réservant des emprises foncières à des activités logistiques.

La plupart des initiatives visent à améliorer la performance du système existant, d'autres comme le concept d'Internet Physique (Montreuil et al., 2013) propose de repenser totalement l'organisation de la logistique et de s'inspirer du fonctionnement d'Internet. Les colis circuleront à la manière des paquets d'information sur Internet : l'infrastructure est commune et interopérable entre tous les acteurs. L'objectif est de permettre une meilleure mutualisation des moyens de transport, stockage et coordination. L'effet principal mis en avant est l'augmentation de taux de chargement des véhicules avec pour conséquence une diminution des émissions polluantes et des coûts de transport. Il y a encore des défis importants pour mettre en place ce système : convaincre des acteurs de changer d'organisation voire de métier, définir des tailles de conteneurs standardisés, gérer efficacement les ruptures de charge. Néanmoins, la plateforme de technologie européenne Alice (Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe) (ALICE, 2016) voit dans l'Internet Physique le moyen pour atteindre les objectifs de zéro émission pour 2050.

4.2.2 Modes de transport massifiés

Nous illustrons la volonté d'un report modal de la route vers le fleuve ou le rail à travers trois expérimentations. La première expérimentation concerne la livraison des Franprix parisiens en utilisant Le Port de la Bourdonnais (Paris 7e). La deuxième expérimentation concerne la livraison des Monoprix en utilisant la gare de Bercy (Paris 12e). La troisième concerne l'entreprise de Vert chez vous pour la livraison de colis par triporteur via une barge remontant la Seine. Le fonctionnement de ces expérimentations sera présenté pour comprendre leurs atouts, mais aussi les inconvénients qui ont conduit à l'arrêt des deux dernières expérimentations. Les autorités publiques soutiennent les initiatives pour une

plus grande utilisation du fleuve et du rail. L'objectif est de diminuer les externalités négatives comme les embouteillages et l'émission de polluants.

Les embouteillages sont un problème récurrent à la fois pour les autorités publiques et les transporteurs. L'utilisation d'un de ces modes alternatifs permet de soulager l'infrastructure en évitant d'augmenter le nombre de camions. Pour la livraison des Franprix, l'utilisation d'une barge permet l'acheminent de 46 caisses mobiles (Adam & Ropital, 2018) au pied de la Tour Eiffel dans Le Port de la Bourdonnais. Le prestataire logistique XPO responsable du transport estime une économie de 9 000 mouvements de camions par an. Pour la livraison des Monoprix utilisant un train arrivant en gare de Bercy, le nombre de camions économisés était estimé entre 10 000 et 12 000 par an. Les transporteurs trouvent aussi un avantage à ce report modal : du temps économisé en évitant les bouchons et une flotte de véhicules réduite.

Les émissions polluantes seraient à la baisse grâce à la massification du flux lors de la phase d'approche (du lieu de stockage vers le centre-ville). Pour la distribution des magasins Franprix, le prestataire logistique XPO assure une réduction de 35 % des émissions de CO_2 en utilisant le fleuve. De son côté, Monoprix annonçait une diminution de 47 % des émissions de CO_2 via le rail. Cependant, il n'y a pas une analyse de cycle de vie indépendante permettant de comparer les bénéfices du report modal pour ces expérimentations. Toutefois, l'action est identifiée comme une mesure écologique et innovante, le gain d'image est évident pour les autorités publiques, les transporteurs et les expéditeurs. À l'image des caisses mobiles siglées XPO et Franprix mettant en avant l'utilisation d'une barge pour l'acheminement dans Paris.

L'acheminement des marchandises au cœur de la ville permet l'utilisation de nouveaux véhicules et d'autres modes d'organisation. Par exemple, les magasins Franprix sont livrés par une flotte de onze camions acheminant 46 caisses mobiles. Ainsi les camions réalisent plusieurs tournées, ce qui aurait été économiquement difficile si le lieu stockage était en dehors de la ville. De plus, la distance réduite des tournées peut aussi permettre d'utiliser des véhicules avec une autonomie restreinte comme les véhicules électriques et les triporteurs. Par exemple, l'entreprise Vert chez Vous avait choisi d'utiliser des triporteurs pour acheminer des colis d'une péniche qui remontait la Seine jusqu'au destinataire final.

Malheureusement le report modal a un coût important. Premièrement, la rupture de charge entraîne des coûts supplémentaires (estimé entre 15 % et 20 % pour Monoprix), la manutention pour décharger la marchandise de la barge ou du train, pour ensuite la charger dans un autre véhicule. Pour limiter la rupture de charge, Franprix utilise des caisses mobiles qui peuvent être directement montées sur le plateau des camions. Deuxièmement, la barge et le train n'offrent pas la même flexibilité que des camions. Ils sont plus difficiles à remplir et ils sont soumis aux aléas du trafic fluvial (écluse) et ferroviaire (partage des sillons avec le transport de passager). Troisièmement, le prix foncier est très élevé dans le centre d'une ville dense, et il n'est pas compatible avec des activités de faible valeur ajoutée comme le stockage.

La pérennité de ces projets est soumise à leur écosystème. D'abord, ces projets reçoivent ou ont reçu des subventions pour leur démarrage ou leur activité. Autrement dit, le projet peut ne pas être viable si les subventions s'arrêtent, ou les projets ne verront le jour qu'avec une subvention ce qui est un frein à une généralisation. Ensuite, la viabilité du projet peut

être soumise à la stratégie des acteurs autour du projet. En 2010, Monoprix revendiquait une priorité identique entre leurs trains de fret et les TGV. Rien n'indique que le gestionnaire du réseau (SNCF Réseau en France) a poursuivi ou poursuivra cette politique vis-à-vis du fret en concurrence avec le transport de passager. Enfin, ces projets coûteux sont (ou étaient) des paris sur le long terme : hausse du prix du gazole, réglementation importante pour l'accès au centre-ville et internalisation des externalités négatives. D'autres acteurs comme Amazon ou Carrefour ont aussi exploré la possibilité d'utiliser le fleuve, mais ils ont renoncé après la réalisation d'avant-projets (*Gennevilliers, le nouveau grenier de Paris,* 2019).

En somme, la non-émergence de ces modes massifiés pose la question de la capacité d'offrir un meilleur niveau de service que les camions et la possibilité de la mise en place d'une réelle internalisation des coûts pour permettre l'émergence de solutions alternatives, et quels acteurs supporteront ces coûts internalisés : transporteur, expéditeur, consommateurs, etc.

4.2.3 Modes de transport légers

Nous réunissons sous le terme de modes de transport légers tous les modes avec une faible capacité de chargement et potentiellement une motorisation. Nous retrouvons les modes doux (sans motorisation) qui désignent la livraison à pied ou à vélo, les vélos et les triporteurs équipés d'une assistance électrique, et les deux roues motorisées.

Les modes légers sont déjà bien présents dans les villes françaises, ils sont essentiellement utilisés par les coursiers pour la messagerie express et la livraison de repas. On peut observer le renouvellement des flottes des grandes chaînes de livraison de pizza. Les scooteurs équipés de moteur thermique ont été remplacés par des scooteurs électriques ou des vélos à assistance électrique. Cette volonté d'écoblanchiment ou le verdissage peut s'explique par l'image véhiculée par les deux roues motorisés (p. ex. le bruit et la pollution). Le bilan environnemental des deux roues motorisées (2RM) est très critiquable malgré une consommation d'essence moindre. Les 2RM avec une faible cylindrée (50 cc et 125 cc) se sont révélés très polluants avec des émissions très supérieures aux voitures dotées d'une motorisation récente EURO 5 et EURO 6 (Collet & Pillot, 2017). Un scooteur 50 cc doté un moteur à quatre temps peut émettre 72 à 116 fois plus de NO_x, tandis qu'un scooteur 125 cc entre 0,5 et 2,6 fois plus qu'un véhicule EURO 5 ou 6. Par contre, les deux roues motorisées gardent un avantage sur les voitures en termes d'émission de CO_2. La question de la production et du recyclage des batteries, ainsi que de la génération de l'électricité, fragilise l'idée d'un simple remplacement pour satisfaire les objectifs de réduction de la pollution. En réalité, la motorisation électrique possède l'avantage principal de délocaliser la pollution hors de la ville.

Ces modes de transport sont de plus en plus présents pour des services récents ou dont la proportion a largement augmenté récemment comme la livraison de courses à domicile, la livraison de repas à domicile et la livraison e-commerce. Ces modes s'intègrent bien aux contraintes de la ville, ils permettent un accès facile aux zones denses, et ils produisent peu de nuisances sonores et de pollution. Et surtout, ces modes sont des investissements faibles comparés à des voitures, Véhicules Utilitaires Légers ou des poids lourds.

Nous observons qu'à l'heure actuelle, les modes légers existent déjà sous forme thermique, ou bien qu'ils soient utilisés pour des services nouveaux : ils ne remettent pas en cause les organisations existantes. Ces modes légers ont des limitations importantes, la faible capacité de chargement de ces modes entraîne un plus grand besoin en ressources humaines pour une même quantité de colis. D'où la volonté de développer des robots mobiles pour limiter la masse salariale des flottes de livraison.

4.2.4 Modes de transport automatisés

Les progrès en robotique ces dernières années ont ouvert de nouvelles perspectives pour la logistique urbaine. Le développement de ces modes de transport automatisés est une tentative de réponse à l'augmentation du nombre de livraisons et à une recherche d'un délai de livraison toujours plus court. L'automatisation permettrait d'apporter ce service en limitant les coûts par l'absence de main d'œuvre humaine. De nombreuses expérimentations ont vu le jour, on retrouve généralement les drones volants, les robots mobiles, robot humanoïde et le véhicule autonome.

De nombreux transporteurs ou expéditeurs explorent la possibilité d'utiliser des drones volants autonomes. Les expérimentations les plus courantes à ce jour concernent les drones légers. Par exemple, le projet Amazon Prime Air vise au développement d'un futur service de livraison permettant d'acheminer des colis en moins de 30 minutes. Les vidéos commerciales montrent que le service se destine à des livraisons de produits peu volumineux et légers (un système multimédia Amazon Fire TV avec un paquet de pop-corn) et dans un environnement peu urbanisé. À ce jour, seul le projet de l'entreprise Zipline est en fonctionnement et semble durable. L'entreprise utilise des drones pour livrer des poches de sang et de médicaments à des hôpitaux et des localités peu accessibles. Un cas d'usage particulier, car les drones évoluent dans des zones peu denses, et où le modèle économique est cohérent, car les solutions alternatives sont onéreuses et que ces produits sont de nécessité vitale. D'autres entreprises comme Boeing, Natilus, Sichuan Tengden Technology, et Elroy Air projettent plutôt une utilisation de drones pour transporter plusieurs centaines de kilos. Une technologie qui permettrait de diminuer le coût d'un vol grâce un chargement important, et qui serait plus adaptée pour relier deux centres de distribution. Un cas d'usage qui rappelle d'ailleurs les expérimentations (dans la première moitié du 20e siècle) et le service vite abandonné (en 1959) visant au transport de courrier utilisant des missiles (Wikipedia, 2019).

Le Groupe La Poste a développé un robot mobile. Le robot doté d'une capacité de suivi du facteur permet d'augmenter la capacité de chargement habituel. Le véhicule autonome est aussi une piste pour le développement de nouveau service de livraison. Le véhicule peut devenir un dépôt mobile pour les colis où les clients ou les coursiers viendraient récupérer les colis. D'autres projets imaginent la collaboration avec des robots mobiles (*Mercedes-Benz to Show Drone Mothership Vision Van at CES,* 2017), volant (Eliot, 2019) ou humanoïdes (*Autonomous Vehicle Robot Delivery,* 2020).

Cependant, il reste des obstacles majeurs au développement de ces modes. Premièrement, la faisabilité technique n'est pas assurée à ce jour, la plupart sont des expérimentations dans des environnements contrôlés. Deuxièmement, ces nouveaux modes de livraison doivent s'intégrer dans le schéma logistique des transporteurs en termes d'organisation,

de niveau de service proposé et de coût. Les systèmes robotisés sont généralement peu amènes à s'adapter à une situation inconnue, et ils représentent un coût financier important à l'achat et pour la maintenance. Troisièmement, le cadre légal devra être adapté pour encadrer le déploiement de ces systèmes dits autonomes.

4.3 De l'analyse à l'action, de l'action à l'analyse

Les expérimentations montrent qu'il existe des solutions alternatives à la logistique urbaine telle que nous la connaissons. En revanche, nous avons montré qu'elles se heurtent à des difficultés importantes d'ordre organisationnel, économique, social et légal. En particulier, les solutions alternatives partent avec un retard, elles doivent d'une part s'intégrer dans le réseau logistique existant et d'autre part proposer un niveau de service similaire sinon supérieur à l'existant. Par exemple, nous avons vu que le développement de la livraison à vélo s'est fait par l'augmentation considérable d'une nouvelle activité (livraison de repas à domicile), et par sur une activité existante utilisant un Véhicule Utilitaire Léger ou un poids lourd.

Du point de vue de l'évaluation des expérimentations, les exemples montrent le caractère contextuel important des projets : la présence d'un fleuve aménagé ou d'une gare en centre-ville avec un espace de stockage ou de transbordement. C'est une limite pour l'évaluation, la réussite d'une expérimentation sur un territoire ne préjuge pas de sa réussite ailleurs dans un autre quartier, une autre ville ou un autre pays.

Pour les autorités publiques, il est nécessaire de pouvoir choisir les projets et de contrôler le système logistique pour servir leur stratégie urbaine. C'est dans ce contexte que nous avons montré la difficulté pour l'analyse des choix de gouvernance et des expérimentations dans le cadre de la logistique urbaine. Premièrement, nous avons exposé les limites de la collecte de données, à la fois coûteuse et parfois obsolète. Deuxièmement, nous avons présenté les contraintes de gouvernance produites par le caractère multi-échelle et qui se retrouvent dans les outils de planification. De plus, nous avons montré la nécessaire prise de recul dans la proposition d'un outil d'aide à la décision pour ne pas subir des effets inattendus et éviter de biaiser inconsciemment l'outil en faveur d'un groupe. Troisièmement, nous avons mis en évidence la difficulté à remettre en cause les schémas logistiques existants (utilisation de de VUL ou de camions) et à généraliser les expérimentations dans d'autres filières ou villes.

5 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a introduit la notion de logistique urbaine, son contexte et les défis qui réunissent des problématiques sociales (qu'est-ce qui est nécessaire ou superflu pour la ville ?), économiques (comment fournir un service à un prix raisonnable ?) et environnementales (est-ce que le système logistique est durable ?). Nous avons défini les décisions comme des arbitrages sur les ressources disponibles, arbitrages qui dépendent des villes, et qui sont liés à leur contexte socio-économique et à leur orientation politique.

Nous avons montré que la logistique urbaine est un problème multi-acteurs. Elle doit être analysée sous la perspective des différents acteurs qui ne partagent pas les mêmes objectifs comme les autorités publiques et les acteurs privés. L'analyse doit aussi être

multi-échelle, car il est nécessaire de comprendre comment une décision prise à l'échelle macroscopique (p. ex. fin de la tolérance sur le stationnement en double file pour la ville) peut être répercutée à l'échelle microscopique (p. ex. nouvelle politique de l'entreprise pour les livraisons). En considérant les mesures et les expérimentations sous ces différentes perspectives, il apparaît qu'il n'y a pas de solution miracle qui serait "gratuite". Pour changer le système afin de répondre à des exigences environnementales fortes et maintenir ou améliorer le niveau de service, l'investissement des acteurs publics et/ou privés est inévitable.

Ce chapitre fait aussi apparaître la difficulté pour la ville de contrôler la logistique urbaine. En plus de la complexité des relations entre acteurs, la logistique urbaine est un système dynamique. En d'autres termes, la nature des relations existantes avant une décision peut changer après l'application d'une décision : l'analyse élaborée en amont devient alors obsolète. Pour illustrer l'effet de rebond impliquant la capacité d'un système à changer de paradigme, imaginons un nouveau type de livraison. Ce nouveau type de livraison serait tel que son coût unitaire aussi bien financier qu'environnemental serait bien moindre pour le client. Cependant, cela pourrait provoquer une augmentation du nombre de livraisons menant à une détérioration du bilan environnemental global du nouveau type de livraison.

Ce chapitre illustre la difficulté de créer un modèle fidèle à la réalité du terrain, ou du moins l'image que nous pouvons nous en faire. Dans le cas d'une description symbolique sous une forme mathématique, l'espoir de l'optimisation pour donner ***la*** solution est de courte durée. En effet, l'optimisation reposera sur l'explicitation de certains objectifs contradictoires. Nous avons vu que cette explicitation sera difficile d'un point de vue moral et politique (par ex. santé publique vs dynamisme économique). De plus, le caractère dynamique du système empêche une visibilité à long terme afin d'établir une stratégie pour prioriser les objectifs entre eux. Et quand bien même un hypothétique modèle mathématique complet pourrait être construit, le temps de calcul nécessaire pour le résoudre empêcherait toute tentative d'optimisation. C'est pour cette raison que les modèles actuels tentent de reproduire le système ou bien à une échelle microscopique permettant de conserver un grand nombre de détails ou bien à une échelle macroscopique qui permet une forte agrégation des données.

Malgré ces difficultés techniques, nous avons montré l'intérêt des acteurs publics et privés envers une remontée systématique des données à travers le concept de la ville intelligente. Dès lors, la modélisation et la simulation deviennent des outils d'autant plus incontournables pour la prise de décision. De plus, les avancées de l'Intelligence Artificielle ouvrent des perspectives pour la compréhension et la gestion des villes. C'est avec ces conclusions à l'esprit que le prochain chapitre présente un état de l'art des outils d'aide à la décision pour la logistique urbaine et leurs possibles évolutions

Chapitre 3 — État de l'art des systèmes d'aide à la décision pour la logistique urbaine

1 Introduction

Les systèmes d'aide à la décision sont des outils à la disposition des décideurs pour les accompagner dans la prise de décision. Dans cette thèse, nous considérons les systèmes d'aide à la décision reposant sur des modèles mathématiques. Nous pouvons distinguer deux grandes utilisations pour ces outils.

Ces systèmes peuvent être mis en place pour assister des décisions opérationnelles ou tactiques : gestion de stock, ordonnancement de commandes, gestion des emplois du temps, prise de rendez-vous pour des livraisons, etc. Ces opérations sont complexes dans une dimension sociale — elles sont soumises à des aléas inhérents à la vie — et dans une dimension mathématique — une bonne solution peut être très difficile à trouver et il n'y a généralement pas de garantie sur son optimalité. Dans le contexte de décisions opérationnelles et tactiques, les décideurs disposent d'un savoir-faire (compétences) issu d'un retour sur expérience suffisant pour maîtriser la complexité de ce type de décisions. Le caractère routinier et la similarité des problèmes rencontrés font que le décideur peut s'appuyer sur son expertise. Le décideur considère alors les recommandations d'un système d'aide à la décision avec précaution parce que, d'après son expérience, il sait que le système n'est pas infaillible. Ainsi le livreur expérimenté préférera définir sa tournée plutôt que d'utiliser celle proposée par un algorithme. Cette préférence est aussi liée à des questions de flexibilité : un humain expérimenté disposera d'une capacité à intégrer de nouvelles informations : contrainte d'un client, accès pour les livraisons différentes, travaux sur la voirie, etc. À l'inverse, un système ne pourra pas nécessairement gérer ces aléas qui prennent la forme d'une information manquante ou erronée.

Dans cette thèse, nous nous intéressons aux systèmes destinés aux décisions stratégiques dont les effets seraient observables à l'échelle d'une ville. Dans ce cadre, les décideurs sont généralement désarmés par la quasi-absence de savoir-faire (pratique) et de connaissances (théorie). Le manque de savoir-faire pour les décideurs provient de la faiblesse du retour d'expérience : une problématique stratégique est rare et se place toujours dans un contexte particulier. La problématique peut être suffisamment nouvelle pour ne pas avoir d'équivalent. Ou bien, la problématique est similaire mais dans un environnement différent : dans le passé ou dans une autre ville. L'approche pratique est limitée par le manque de données.

Une approche théorique pourrait consister à utiliser les connaissances de problématiques à plus basse échelle pour les agglomérer à une échelle stratégique. La connaissance de chaque partie prenante des différents métiers et des différentes filières permettrait d'accéder à la connaissance de l'ensemble. L'approche théorique pour comprendre la ville dans son ensemble est empêchée par la diversité et le nombre d'acteurs à considérer, et surtout leurs interactions : le tout est plus grand que la somme des parties selon la théorie de la complexité.

Nous visons à montrer que la compréhension du système par l'expérience ou par la théorie est difficile. Ainsi, nous pouvons légitimement nous interroger sur la capacité à simuler le système.

Pourtant la fonction d'un Système d'Aide à la Décision n'est pas la reproduction du système, mais l'accompagnement du décideur vers la meilleure décision. Ainsi les choix de conception d'un système d'aide à la décision devraient être motivés par son objectif (l'aide à la décision) et non par ses moyens (la modélisation). Cette approche est similaire à celle d'une représentation « purpose-oriented » pour l'évaluation comptable pour les entreprises telle que présentée par (Mattessich, 2003), où il s'agit de s'autoriser à sortir des définitions strictes du revenu ou du capital pour mieux servir l'objectif de l'évaluation d'une entreprise.

Ce renversement permet d'aborder la question de la figuration sous un angle différent : celle de l'utilité pour l'aide à la décision. Le concepteur ne cherche pas à créer une image de la logistique urbaine, il cherche à créer un Système d'Aide à la Décision permettant d'aller vers la meilleure décision. Dans cette logique, le Système d'Aide à la Décision sera un bon portrait ede la problématique si nous pouvons montrer qu'il est utile au décideur. Nous parlerons de validité du système d'aide à la décision.

Dans ce chapitre, nous motivons la nécessité de nous éloigner de modèles complexes pour obtenir un Système d'Aide à la Décision dont la validité nous satisferait. Nous n'entendons pas la validité d'un Système d'Aide à la Décision comme une caractéristique absolue et éternelle, mais plutôt comme une caractéristique relative à une problématique spécifique à un moment donné. La validité est une assurance relative à sa capacité à remplir sa fonction : amener le décideur à être orienté vers la meilleure décision possible.

Pour illustrer cette nécessité, nous proposons d'imaginer l'existence d'un modèle sous la forme d'un oracle. Nous n'avons pas accès à la conscience de ce dernier : les mécanismes internes nous sont inconnus. Mais nous savons que l'oracle n'est pas omniscient : il dispose uniquement des éléments mis à sa disposition, bien qu'il se souvienne des éléments des questions précédentes. Bien sûr, l'oracle ne se trompe jamais, il est toujours en mesure de proposer la meilleure décision compte tenu des éléments en sa possession. À la sortie d'une entrevue avec la Pythie de la logistique urbaine, trois grands doutes nous assaillent :

- Avons-nous donné suffisamment d'informations à l'oracle ?
- Est-ce que l'oracle aura raison pour ce nouveau problème ?
- Est-ce que nous comprenons ce qu'a dit l'oracle ?

L'oracle nous propose une solution en cohérence parfaite avec les données en notre possession, pourtant nous restons dubitatifs face à ces recommandations. La parfaite explication de l'oracle quant à la cohérence d'un ensemble de données n'est pas suffisante pour garantir une bonne approximation de la réalité. L'explication pourrait simplement être fortuite, et pourrait être mise à mal avec l'ajout de données supplémentaires. Maintenant, imaginons que nous avons la certitude que toutes les données nécessaires sont à la disposition de l'oracle. Malheureusement, nous n'avons pas accès à sa façon de résoudre le problème, dès lors on ne peut estimer la confiance qu'à partir de ses

performances antérieures. Si l'oracle a toujours eu raison, ce n'est pas une garantie qu'il le sera à nouveau. Pire, nous ne sommes pas à l'abri de mal interpréter le conseil de l'oracle. A la manière du roi Crésus demandant conseil à l'oracle de Delphes avant de prendre le chemin de la guerre. Cette dernière prédit la chute d'un grand empire, mais celle-ci n'avait pas dit de quel empire il s'agissait, et ce fut celui de Crésus.

Figure 2 John Collier, Prêtresse de Delphes, 1891, musée national d'Australie-Méridionale (Adélaïde)

Nous illustrons ainsi qu'un modèle ne pourra pas être une meilleure approximation de la donnée utilisée, et l'interprétation sera toujours propre à son auteur, de fait potentiellement différent de l'oracle ou du Système d'Aide à la Décision. Il peut alors exister un double décalage : entre le modèle et la réalité, et entre les interprètes des résultats. Ce double décalage empêche d'aboutir à ce que nous considérons comme un Système d'Aide à la Décision valide. Si un modèle parfait imaginaire ne nous convient pas, que penser de nos modèles forcément imparfaits mais bien réels ?

Dans la première partie de ce chapitre, nous détaillerons les limites des approches de modélisation pour les systèmes d'aide à la décision actuels. Pour cela, nous tenterons à chaque fois d'évaluer la mesure dans laquelle ceux-ci permettent de résoudre les questions que notre oracle avait ouvertes, donc nous évaluerons ces systèmes suivant trois axes : données d'entrée, modèle et données de sortie. D'une part, nous montrons que les Systèmes d'Aide à la Décision actuels ne permettent pas de répondre de manière satisfaisante à ces questions. D'autre part, nous montrons que ces questions ne peuvent pas être considérées indépendamment les unes des autres.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous proposons une approche globale de la conception d'un Système d'Aide à la Décision pour montrer que ces questions sont inhérentes à l'exercice de modélisation, et non pas seulement aux Système d'Aide à la Décision actuels. Cette approche globale réaffirme d'une part la nécessité de considérer ces questions comme dépendantes les unes des autres, et d'autre part que leurs réponses ne peuvent venir que des concepteurs des Système d'Aide à la Décision et des parties prenantes. À partir de là, nous montrons l'intérêt de la transparence du modèle (en opposition à un oracle ou une boite noire) pour donner une réponse cohérente afin de s'assurer de la validité d'un Système d'Aide à la Décision.

2 Système d'aide à la décision

2.1 Introduction

Dans cette thèse, nous intéresserons aux techniques de simulations numériques développées dans la deuxième moitié du 20e siècle et utilisées dans les Systèmes d'Aide à la Décision. La simulation numérique a permis de penser la modélisation autrement qu'à travers des modèles analytiques ou symboliques. L'arrivée des ordinateurs a ouvert la possibilité de manipuler de grandes bases de données et de réaliser des calculs coûteux en temps, et ce faisant, la simulation numérique a animé l'espoir de modéliser des systèmes complexes.

Avant l'avènement de l'informatique, un système complexe comme la ville était déjà un sujet de modélisation. Dès le 19e siècle, le développement de modèles est poussé par la recherche de la compréhension de l'organisation spatiale de la ville (Antoni 2011). Par exemple, le modèle de von Thünen aborde la question de la distance des activités par rapport aux centres urbains. Le modèle relie la décision de l'emplacement d'une activité au coût du foncier et du transport des marchandises pour atteindre le centre-ville (le lieu de consommation). Le modèle propose une explication aux données observées sur le terrain, et par exemple il pourra permettre de prédire pour un emplacement quel type

d'activité pourrait potentiellement s'installer. L'élaboration et l'analyse d'un modèle aboutit à la création de connaissances : (1) en faisant sens des données collectées sur le terrain, mais aussi (2) en projetant ce que le système pourra être. Mais le modèle est une représentation fixe d'un système qui évolue : le modèle reste valide tant que le système ne change pas d'état. Dans le cas d'un changement d'état du système, par exemple, si certaines marchandises dont la production est délocalisée venaient à être taxées, il faudrait au moins revoir les données d'entrée et le modèle. Pour estimer l'effet d'une taxe, le modèle de von Thünen pourrait être modifié par le simple ajout de la taxe aux coûts opérationnels totaux. A posteriori, le modèle modifié pourra être vérifié en comparant les estimations du modèle aux données collectées sur le terrain.

Les modèles utilisés pour des simulations numériques servent le même objectif que le modèle de von Thünen : représenter un système pour aboutir à la création de connaissances relatives à ce dernier. Le saut conceptuel entre un modèle analytique et la simulation numérique est la possibilité d'utiliser de grandes bases de données et/ou de générer de grandes quantités de données artificielles (considérées comme représentatives du système). La simulation est un moyen d'atteindre une granularité plus fine dans la tentative de représentation d'un système. La génération de données artificielles permet de de minimiser la collecte de données pour la représentation d'un acteur dans le système actuel et de projeter un acteur dans un système qui n'existe pas encore. La simulation, définie comme la tentative de représenter un système, permet une évaluation ex-ante pour comparer différentes décisions. Dans cette thèse, nous nous intéresserons à l'usage de la simulation les Systèmes d'Aide à la Décision.

L'objectif d'un Système d'Aide à la Décision est d'accompagner un décideur face à un problème non trivial : il est souvent impossible d'estimer les conséquences de plusieurs (ou une infinité) de décision. Le Système d'Aide à la Décision simule les différentes décisions et leurs conséquences. Le Système d'Aide à la Décision peut aussi parfois recommander une décision par un arbitrage entre les conséquences. Par exemple, on peut choisir une décision ayant le maximum d'effet sur la congestion, ou une décision ayant un effet modéré sur la congestion mais avec un effet sur le coût de la livraison.

Un Système d'Aide à la Décision est un système d'information qui se distingue par trois caractéristiques (Power, 2002) :

1. Les Systèmes d'Aide à la Décision sont conçus pour faciliter les processus de décision
2. Les Systèmes d'Aide à la Décision devraient aider la décision plutôt que l'automatiser
3. Les Systèmes d'Aide à la Décision devraient être capable de répondre rapidement aux besoins changeants de la décision

Le Système d'Aide à la Décision est un lien entre la théorie (une représentation du système) et la pratique (les décisions prises sur le système) (Keen, 1980). Dès lors, Keen souligne qu'un système d'information est un Système d'Aide à la Décision à la condition de décrire un système réel utilisé par des organisations réelles pour des problèmes réels. Cette définition illustre la difficulté de la littérature dans le sens où le Système d'Aide à la Décision n'existe qu'au moment de son utilisation par des décideurs réels. Avant la

décision, il n'existe pas : c'est seulement un modèle théorique. Selon cette définition, l'état de l'art devrait alors se limiter à des Systèmes d'Aide à la Décision dont l'utilisation a été documentée. Malgré les nombreuses publications dans ce domaine (Bozzo et al., 2014; Gonzalez-Feliu, 2018; Parra Herrera et al., 2017), les retours sur l'utilisation concrète de ces systèmes sont peu documenté dans la littérature.

Pour pallier à cette définition trop restrictive, nous avons choisi de discuter le concept de simulation, à travers des exemples de la logistique urbaine, pour mettre en avant les limites de deux approches d'un problème de décision : macroscopique et microscopique. Nous proposons cette segmentation pour montrer les risques systématiques de l'utilisation de la simulation pour appuyer une décision se révèlent davantage par rapport à l'approche de modélisation plutôt qu'à un modèle (ou une technique) de simulation particulier.

Dans cette thèse, et au cours de ce chapitre, nous nous focalisons principalement sur la troisième caractéristique d'un Système d'Aide à la Décision : leur capacité à être adapté à un changement de contexte. Autrement dit, dans le cas d'un système évoluant sans cesse, comment assurer que le Système d'Aide à la Décision sera toujours à même d'aider correctement le décideur ? Dans un premier temps, nous concentrerons notre propos sur la difficulté d'obtenir un modèle valide dans la durée et par rapport à une problématique définie en discutant différents travaux de simulation. Dans un second temps, nous montrerons que le modèle doit être étudié par rapport à son usage pour assurer que son utilisation est valide : la mauvaise utilisation d'un bon outil est toujours possible, et elle n'orientera pas vers la meilleure décision possible.

2.2 Simulation macroscopique

Nous considérons comme macroscopique, les modèles qui s'attachent à la représentation de la logistique urbaine à l'échelle d'une ville (plutôt que d'une filière ou d'un acteur). Ces modèles prennent parfois l'angle de l'offre (Anand et al., 2016; Cattaruzza et al., 2017; Crainic, 2008; Jlassi et al., 2017; Mancini, 2013; Taniguchi et al., 2001, 2020) ou de la demande (Ambrosini et al., 2008; Comi, 2012; Comi & Rosati, 2015; Gonzalez-Feliu & Routhier, 2012; Holguín-Veras et al., 2013). Les modèles d'offre vise à estimer le niveau de service à partir des caractéristiques et de la demande, tandis que les modèles de demande se concentre sur l'estimation des mouvements de marchandises à partir des caractéristiques des industries et des résidents, et du niveau de service (Taniguchi et al., 2001). Il apparait que les modèles sont complémentaires pour offrir une vision globale de la logistique urbaine. Nous nous concentrerons sur les modèles de génération de trajets (Gonzalez-Feliu & Sánchez-Díaz, 2019; Holguín-Veras et al., 2013), c'est-à-dire l'estimation des trajets de fret attiré ou produit par un établissement.

Cette une approche couramment utilisée dans la logistique urbaine, elle est inspiré du modèle à quatre étapes (*four-step model*) utilisé fréquemment pour l'analyse des systèmes de transport. Cette approche développée dans l'après-guerre au Chicago Area Transportation Study a pour objectif d'expliquer les comportements de déplacement au sein une ville. Cependant la différence de fonctionnement entre le trafic passager et la logistique urbaine a appelé à l'utilisation d'approche distincte (Stopher and Meyburg).

L'histoire de l'évolution de ces modèles pour la logistique urbaine est présentée par Toilier et al. (2018).

Le succès de cette approche de modélisation tient principalement à la création d'enquêtes d'envergure sur le transport de marchandises (Ambrosini et al., 2010). Ces enquêtes ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de la logistique urbaine par une étude large et comparative de différentes villes. L'augmentation de la quantité de données a été un facteur important pour l'émergence de ces approches de modélisation macroscopique. L'héritage du modèle à quatre étapes (Toilier et al. 2018) se retrouve dans différents logiciels comme FRETURB, Wiver (Meimbresse and Sonntag 2000) devenu VISEVA (Friedrich, Haupt, and Noekel 2003) dont certaines parties ont été intégrées dans VISSUM (Boyce and Williams 2015), GoodTrip (Boerkamps and Binsbergen 1999), et CityGoods (Gentile and Vigo 2013).

L'architecture générale de ces modèles macroscopiques est commune. Avant toutes choses, la ville est découpée en zones. La première étape consiste à générer le besoin logistique et la production logistique de chacune des zones pour différents types de marchandises. Lors de la deuxième étape, la matrice origine-destination des marchandises est estimée. Cette matrice représente les échanges de marchandises entre les différentes zones de la ville qui peuvent être productrices ou consommatrices de certains flux. Dans la troisième étape, à partir de ces flux de marchandises, le modèle va estimer les modes de gestion (compte d'autrui/compte propre), le type de véhicule et les organisations (tournée/trace directe) (Van et al., 2016). La quatrième étape utilise ces estimations pour construire une matrice origine-destination (OD) des trajets des véhicules, c'est-à-dire le nombre de trajets qui relient deux zones. Certains modèles possèdent une cinquième étape où le trafic est estimé à partir de la matrice OD des trajets. L'estimation des trajets entre les zones est ainsi utilisée dans une simulation à l'échelle macroscopique pour modéliser le trafic dans la ville.

Pour illustrer l'approche macroscopique, nous concentrerons notre propos sur FRETURB (Routhier & Aubert, 1999). Cette solution est effectivement déployée pour des municipalités en France, et sa longévité permet de comparer les résultats au fil des années.

2.2.1 Données d'entrée et modèle

Les données d'entrée d'un modèle sont en général le point de départ. Mais l'exemple de FRETURB montre qu'au contraire le modèle était sans doute antérieur à la collecte des données : les enquêtes françaises ont été menées pour alimenter le processus de modélisation (Toilier et al., 2018). Cette volonté s'illustre dans une réflexion méthodologique préliminaire à FRETURB (Bonnafous et al., 2013) :

« we started from a simple observation: the relative efficiency of surveys on personal mobility that fuel urban mobility models relied on the fact that these surveys were designed progressively as according to the specifications of the models. Thus there was a strong correlation between the increasingly less questionable pertinence of successive models and that of statistical information. A historic pact was therefore achieved between surveys and models, since the success of one mutually strengthens the other. »

Cette réflexion traduit la nécessité de réaliser des enquêtes qui permettront de collecter des données pertinentes par rapport au contexte de la logistique urbaine. Par exemple, la transposition de modèle du fret inter-régional utilisant des données en tonnes-kilomètres n'a pas de sens pour l'approvisionnement des pharmacies en ville (Bonnafous et al., 2013). Les premières enquêtes en France ont été réalisé entre 1995 et 1997 (Ambrosini et al., 2010) dans les villes de Marseille, Bordeaux et Dijon. Une seconde vague d'enquêtes a été réalisée à Paris et à Bordeaux entre 2011 et 2015. Le périmètre des enquêtes est très grand, pour donner un ordre de grandeur sur la ville de Bordeaux, l'enquête de 2013 estime qu'il y a plus de 360 000 opérations de fret chaque semaine pour presque autant de véhicules (Toilier et al., 2018). La quantification et la mesure un système aussi grand est effectivement un défi pour sa représentation.

Par la proposition d'un cadre pour la collecte de données, Holguín-Veras & Jaller (2014) éclaire sur cette problématique des données d'entrée. Les auteurs mettent ainsi en avant le besoin évident de la représentative de la diversité des rôles (transporteurs, expéditeur, etc.), mais aussi la difficulté du choix de l'unité de modélisation (valeur de la marchandise, quantité transportée, etc.). En regard à cela, les auteurs précisent que la donnée doit répondre aux besoins des techniques de modélisation. Dans le contexte d'un système complexe, nous considérons que le « pacte » entre la collecte de données et le modèle est une approche discutable pour la création d'un Système d'Aide à la Décision.

Dans le contexte générale des modèles de génération de trajets de fret, il est intéressant de noter que si le niveau d'agrégation des données (collecte des données) aurait peu d'impact sur la précision, la forme fonctionnelle pour chaque type d'établissement (reliant le nombre d'employés d'un établissement à son nombre d'opérations générées) aurait un impact positif pour la précision du modèle (Gonzalez-Feliu & Sánchez-Díaz, 2019). Cette analyse met en évidence le lien entre les données d'entrée et le modèle : la connaissance du modèle permet d'éviter une collecte de données inutile.

Nous avons vu que la collecte des données a été orientée pour répondre aux besoins du modèle. Le postulat de base est que le modèle est en mesure de représenter de manière convenable le système. La conséquence est la proposition d'une vision normative de la logistique urbaine. C'est un choix méthodologique pragmatique pour permettre la réalisation d'enquêtes cohérentes à l'échelle d'un territoire, mais ce choix est un facteur de biais pour la collecte de données. Cependant, cela ne permet pas de tester si les données définies comme pertinentes lors de la création du modèle, donc en amont de la collecte le sont effectivement. En effet, certaines données ne sont pas collectées car elles ne sont pas recherchées. Ainsi, il sera impossible de savoir si ces données n'auraient pas été plus utiles que celles définies en amont. De plus, les méthodes de collectes normalisées peuvent déformer les données.

2.2.2 Données de sortie

Ces modèles macroscopiques sont généralement utilisés lors d'études sur le transport de marchandises. Ces études sont commandées par les autorités locales à des experts du domaine. L'analyse rendue sera utilisée pour orienter des décisions opérationnelles, tactiques (p. ex. emplacement des aires de livraison), et surtout stratégiques à travers les Plans de Déplacements Urbains pour les villes, ainsi l'analyse doit être robuste pour orienter des décisions à long terme. Dans cette section, nous utilisons les résultats d'une

enquête récente à Bordeaux reprise dans (Toilier et al., 2018) pour estimer la validité des données de sorties décrites dans (Ambrosini et al., 2013).

	Number of weekly freight operations
Survey results	360,278
Freturb results	378,170
Deviation	+5%

Tableau 1 – Résultats de l'enquête et de FRETURB pour le nombre global d'opération pour Bordeaux en 2013 (Toilier et al., 2018)

La seconde enquête réalisée en 2013 à Bordeaux permet de comparer l'estimation du modèle Freturb (basé sur l'enquête réalisée entre 1995 et 1997) par rapport aux observations faites en 2013 (Toilier et al., 2018). L'envergure de la logistique urbaine, et de fait des enquêtes marchandises, rend difficile de réaliser ce type de validation.

	Types of vehicles (weekly operations)		
	LGV	Rigid trucks	Articulated
Survey results	248,584	78,809	32,847
Freturb results	208,532	128,125	41,514
Deviation	-16%	+63%	+26%
	Management modes (weekly operations)		
	Third party	Own account consignee	Own account consigner
Survey results	189,552	54,830	115,896
Freturb results	157,733	79,415	141,020
Deviation	-17%	+45%	+22%

Tableau 2 – Résultats de l'enquête et de FRETURB pour les types de véhicules et les modes d'organisation pour Bordeaux en 2013 (Toilier et al., 2018)

Nous pouvons observer que l'estimation de Freturb est bonne pour le nombre de livraisons par semaine (déviation de 5%) (cf. Tableau 1), mais les estimations relatives aux types de véhicules et aux modes d'organisation se sont révélés assez éloignées de la réalité (déviation entre 16% et 63%) (cf. Tableau 2). Ces résultats montrent que le modèle n'a pas pu anticiper les changements organisationnels de la logistique urbaine pour Bordeaux sur l'espace d'une quinzaine d'années : l'échelle de temps pour des décisions d'infrastructures importantes. Bien sûr, cela semble illusoire dans nos sociétés en constante évolution de prévoir sur un aussi long terme, mais il est nécessaire de s'interroger sur l'utilisation du modèle. Comment la ville ou la région peut prendre en compte cette marge d'erreur ? Est-

ce que la ville ou la région est capable d'apprécier cette incertitude à travers les recommandations des experts ?

La manière de répondre à ces questions est très liées au fonctionnement des organisations utilisant les modèles (Ortuzar & Willumsen, 2002) mais aussi aux organisations (entreprise de conseil ou chercheur) développant les modèles (Meinard & Cailloux, 2020). Ainsi les auteurs cités montrent la pluralité de styles de décision, et la difficulté à définir le choix d'un style pour la multiplicité de situations décisionnelles.

Maintenant que nous avons vu que la validation macroscopique était difficile, et qu'elle faisait apparaître des questions sur la validité du Système d'Aide à la Décision, intéressons-nous à une validation à une échelle opérationnelle ou tactique. Une question importante pour les villes est la gestion du trafic. Avec un Système d'Aide à la Décision macro, la matrice origine destination des trajets peut être utilisée pour réaliser une simulation du trafic. Seulement, cette matrice ne peut être validée de façon empirique : il n'y a pas assez d'enquêtes sur les chauffeurs et le comptage de trafic ne permet pas de séparer l'activité de service de celle du transport de marchandises (Toilier et al., 2018).

Si la capacité des Systèmes d'Aide à la Décision macro à représenter certaines variables (p. ex les temps d'arrêts des véhicules ou la distance parcourue par opération) a pu être validée de façon empirique, les Système d'Aide à la Décision macro peinent à faire valoir leur validité sur d'autres questions : quel sera le mode d'organisation dominant d'ici dix ans ? quel est l'impact d'un changement organisationnel sur le trafic dans l'année ? Nous illustrons ainsi que le Système d'Aide à la Décision macroscopique peut être plus approprié pour répondre à certaines questions plutôt qu'à d'autres.

2.3 Simulation microscopique

La modélisation à l'échelle microscopique utilise des données très proches du terrain : les lieux de livraison sur une carte, les commandes de tous les restaurants d'une ville. Les simulations portent sur des systèmes avec des périmètres limités pour maîtriser la masse de données à traiter. La finesse de la modélisation permet de mieux prendre en compte des événements opérationnels (p. ex. une rupture de stock) ou tactiques (p. ex. apparition d'un nouvel entrant sur le marché).

Les revues de littérature (Schroeder et al. 2012; Karakikes and Nathanail 2017; Nuzzolo, Persia, and Polimeni 2018; Jlassi, Tamayo, and Gaudron 2018) montrent l'importance de ces approches pour la simulation dans le domaine de la logistique urbaine. La majorité des travaux portent sur l'effet d'une politique publique (gestion du parking, taxe sur la route, restriction d'accès, etc.) sur la chaîne logistique en simulant les différentes parties prenantes (transporteurs, expéditeurs, commerces, et habitants). Par exemple, les simulations de trafic (Chiabaut et al., 2016; Grzybowska & Barceló, 2012; Lopez, 2017) sont importantes pour étudier l'impact des décisions sur la congestion de la ville. La simulation microscopique permet d'estimer des interactions à une échelle fine comme le stationnement en ville (Aiura & Taniguchi, 2005; Cuevas et al., 2017; Dezi et al., 2010; Lopez et al., 2019) ou le planning collaboratif (Rabe et al., 2016).

Nous prenons une définition large des simulations par agents pour désigner les simulations multi-agents et les modèles basés sur des techniques dites de recherche opérationnelle comme l'optimisation ou les méthodes de Monte Carlo.

La technique de simulation par agents repose sur une modélisation de plusieurs entités, ces entités sont désignées par le terme "agent". Un agent représente un acteur du système étudié, ce peut être un individu (p. ex. le consommateur) ou un groupe d'individus (p. ex. un fournisseur ou une ville). Chaque type d'agent possède des objectifs spécifiques, des contraintes et un fonctionnement particulier. Dans le cas d'un consommateur, il peut être représenté par le besoin de se nourrir, il pourrait avoir plusieurs choix pour atteindre son objectif : aller faire des courses, aller au restaurant ou commander un repas à domicile. Il possède des préférences orientant ses choix, il n'aime pas cuisiner et le restaurant n'est pas très cher. La microsimulation peut considérer les agents indépendamment comme les transporteurs dans la simulation de Wisetjindawat & Sano (2003), ou dans le cas d'une simulation multi-agents (Schroeder et al., 2012), les agents orienteront leurs choix en fonction des autres. Par exemple, si de nombreux autres consommateurs vont au restaurant, le temps d'attente sera long. Certains consommateurs seront peu enclins à attendre et décideront d'aller vers des courses ou se faire livrer un repas. L'ensemble des acteurs sont ainsi liés par leurs interactions respectives pour décrire les comportements globaux de consommation d'une population à partir de la modélisation de choix individuels des agents.

Dans l'exemple, le consommateur va changer ses habitudes alimentaires. En cela, la simulation multi-agents se rapproche de la technique de dynamique des systèmes (Gui et al., 2005; Qiu et al., 2015) par l'utilisation de feedback du système avec une modélisation plus fine de l'entité. L'avantage est la souplesse de modélisation pour le concepteur. Si la description de l'agent est assez générale, il peut réagir dans de multiples cas auxquels le concepteur n'a pas forcément pensé. La simulation multi-agents est largement développé dans la littérature de la logistique urbaine (Jlassi et al., 2018). Le déploiement s'est appuyé sur les logiciels généralistes comme Netlogo (Tisue & Wilensky, 2004) ou Anylogic, mais aussi sur des développements spécifiques au transport et à la logistique urbaine comme avec MATSIM (Joubert et al., 2011; Schroeder et al., 2012)

Un état de l'art réalisé sur les outils de simulation pour la logistique urbaine au cours de cette thèse (Jlassi et al., 2018) a illustré le manque de justification des choix de modélisation : pour les données d'entrées, le modèle et les données de sortie. Les publications font généralement une description de leur modèle, mais elles n'exposent pas la motivation des choix de modélisation comme par exemple le choix d'un indicateur plutôt qu'un autre. Dans la suite de chapitre, nous avons choisi d'utiliser les travaux au cours de cette thèse pour justement être en mesure de présenter des choix de modélisation à un niveau macroscopique.

2.3.1 Données d'entrée : cohérence de la validité

Pour la conception d'un modèle pour un Système d'Aide à la Décision, il est nécessaire de s'assurer que les données d'entrée soient valides : elles doivent être une bonne approximation de la réalité. Par contre, s'assurer de cette validité aura un coût financier (pour réaliser la collecte ou l'achat d'une base de données) et un coût de modélisation (pour s'assurer que le modèle ne compromette pas la validité des données).

Nous nous basons sur le modèle (Tamayo & Gaudron, 2017) pour illustrer le caractère relatif de la validité des données d'entrée, et donc l'impact sur la décision de prendre en compte certaines de ces données. Le Système d'Aide à la Décision est basé sur un modèle d'optimisation à variable booléenne qui se concentre sur la problématique du choix de la localisation des aires de livraison. Dans un premier temps, le besoin logistique d'un quartier a été estimé par une enquête terrain pour identifier les commerces. Les profils logistiques, le nombre d'opérations logistiques par semaine de ces commerces ont été estimés par une enquête du CERTU (CERTU 2009). Ensuite, les commerces et les emplacements potentiels pour installer des aires de livraison ont été intégrés sous la forme de données cartographiques permettant d'estimer les distances réelles entre les points d'intérêts. Enfin, un modèle d'optimisation a été conçu pour identifier les emplacements pour les aires de livraison minimisant la distance à parcourir par les livreurs : la distance entre la place de livraison et le commerce.

Certaines données d'entrée comme les emplacements et le type d'activité des commerces sont facilement vérifiables. En revanche, d'autres données sont moins accessibles comme par exemple l'estimation du besoin logistique de chaque établissement. La vérification des données de la littérature utilisées pour ce modèle demande des moyens importants pour enquêter auprès des commerçants ou pour observer les comportements de livraison sur une durée suffisamment longue.

Les données dans la littérature ne sont pas forcément suffisantes pour être une bonne approximation de la réalité. Par exemple, la taille d'un établissement peut avoir un effet sur le nombre d'opérations logistiques réalisées. Il faut ainsi réaliser un choix entre réaliser une enquête, ignorer cette variable ou trouver un moyen de l'estimer. Dans le cas de ce modèle, nous avons choisi d'ignorer l'effet de la taille d'un établissement car nous étions déjà peu confiants sur les données de la littérature sur le nombre de livraisons réalisés par type d'établissement. Ainsi le caractère valide d'une donnée d'entrée est relatif aux autres données d'entrée : le modèle aura au maximum la validité de la donnée d'entrée la plus incertaine.

La relativité de la validité d'une donnée d'entrée rend difficile le choix de leur prise en compte par le concepteur. Nous avons vu que la validité d'une donnée est relative aux données d'entrée, mais la perception de cette validité peut aussi être influencée par les outils de simulation. Les logiciels de simulation comme Anylogic et Arena disposent d'une interface graphique facilitant la création de modèles de simulation. Le concepteur peut être tenté de prendre en compte largement des données d'entrée car le coût d'implémentation est bas : tout semble modélisable.

Cette facilité nous amène à illustrer l'importance de la connaissance métier dans la prise en compte de certaines données d'entrée. Dans le cadre de cette thèse, un modèle de simulation (Jlassi et al., 2017) a été développé pour mesurer l'impact de différentes réglementations sur les décisions d'un transporteur livrant des restaurants, en particulier sur la composition de leur flotte.

L'expertise métier permet d'aider le concepteur dans ses choix. Les restaurants ne sont pas tous identiques par leur nombre de couverts servis. L'intégration du nombre de couverts pose aussi la question de la quantité de nourriture livrée par couvert. Un restaurant à volonté et un restaurant traditionnel n'auront sûrement pas la même

demande logistique. Plus la typologie des restaurants du système est précise, plus le besoin en données est grand, et plus il y aura besoin d'une connaissance métier pour analyser les résultats. Il est facile de dérouler le fil pour exprimer les subtilités, il est difficile de s'arrêter au moment opportun. Une discussion avec un expert du transport nous a permis d'identifier deux types de restaurants : traditionnel et collectif (p. ex. restaurant administratif). Pour ce Système d'Aide à la Décision, nous avions décidé de nous concentrer sur les restaurants traditionnels, et donc la demande des restaurants a été modélisée comme une unique distribution de probabilité.

L'expertise métier est aussi nécessaire pour découvrir un système : le concepteur ne peut modéliser ce qu'il ne sait pas, et l'expert métier a déjà réfléchi à certaines questions de modélisation dans sa pratique. Par exemple, la livraison peut être modélisée par sa masse, alors que la livraison se fait généralement par palette. De fait, le taux de remplissage peut être médiocre en regardant l'indicateur de masse, et il peut être élevé par rapport au nombre de palettes. De plus, tous les produits ne sont pas les mêmes, certains sont surgelés, frais ou secs. Ils nécessitent différents véhicules adaptés ou un véhicule tri température. Ces exemples sur ce modèle de simulation montrent l'importance de la connaissance métier de la livraison de restaurant pour comprendre les phénomènes importants en jeu.

2.3.2 Modèle

Le concepteur d'un modèle microscopique est souvent confronté à un problème difficile à résoudre d'un point de vu computationnel, et à un problème multi-objectifs.

Les modèles utilisés pour les simulations d'agent sont généralement gourmands en ressources de calcul. La non agréation des données à l'échelle microscopique expose le Système d'Aide à la Décision à une complexité algorithmique importante. En particulier pour notre Système d'Aide à la Décision pour les aires de livraison (Tamayo & Gaudron, 2017), la résolution de ce problème n'est pas triviale, car c'est un problème mathématique dur (NP-complet). Si la solution proposée apparaît satisfaisante, elle n'est probablement pas la meilleure solution, la garantie d'optimalité est difficile à démontrer pour ce type de problème. D'une part, il est difficile de s'assurer d'avoir une « bonne » solution. D'autre part, la faible performance algorithmique empêche la mise en œuvre du modèle à l'échelle de la ville. La décision optimale semble déjà s'éloigner du décideur, alors que le modèle est encore simple : il ne prend pas en compte les horaires de livraison.

Nous illustrons le choix du concepteur à garder un niveau complexité computationnel acceptable avec un second Système d'Aide à la Décision s'appuie sur la méthode de Monte-Carlo pour estimer le taux d'occupation des aires de livraison (Gaudron et al., 2018). Le modèle vise à évaluer une infrastructure existante d'aires de livraison. Une simulation Monte-Carlo a été développée pour représenter le stationnement des véhicules de livraison dans un quartier au cours d'une journée. Ce modèle permet d'estimer le taux d'occupation d'aires de livraison pour guider la ville dans le choix de ses emplacements d'aires. En effet, les commerces n'ont pas les mêmes horaires de travail. Une boulangerie aura besoin de l'aire de livraison tôt le matin, tandis que certains commerces n'accepteront de livraison qu'après leur horaire d'ouverture vers dix heures du matin. Pour le concepteur, il semblait naturel de vouloir coupler le moteur d'optimisation présenté

précédemment (Tamayo & Gaudron, 2017) à une simulation Monte Carlo permettant d'estimer l'utilisation des aires.

Les premiers essais de couplage ont révélé la nécessité d'optimisation du code pour réaliser des simulations Monte Carlo beaucoup plus rapidement. Dès lors, la question est d'évaluer l'investissement du travail de modélisation (ici de l'optimisation du code) par rapport aux résultats espérés. Face à la difficulté de validation de la simulation Monte Carlo, il n'a pas été jugé nécessaire de poursuivre cette opportunité de coupler optimisation et simulation.

Dans la plupart des Système d'Aide à la Décision, les objectifs sont dépendants : l'amélioration d'un objectif sera faite forcément au détriment d'un autre. C'est au décideur de choisir où placer le curseur entre les objectifs : une réglementation forte pour privilégier l'environnement au détriment du dynamisme économique ; ou bien une réglementation permissive pour dynamiser l'économie au détriment de l'environnement.

Le développement du e-commerce associé au désir d'une livraison plus rapide pousse les transporteurs à envisager de nouveaux schémas de distribution. Un modèle d'optimisation a été développé (Gaudron et al., 2017) pour comparer le coût et l'impact environnemental de deux schémas de distribution. Le modèle est un problème d'optimisation dérivé de la forme standard du « problème de tournées de véhicules » (*Vehicle Routing Problem*). Le premier schéma traditionnel utilise des véhicules utilitaires légers, et le second utilise un camion et des coursiers à vélo. Les résultats de simulation montrent une réduction importante de l'impact environnemental du schéma alternatif (de l'ordre de 30%) ainsi qu'une plus grande rapidité pertinente pour une livraison express : typiquement dans l'heure (H+1) ou pour le lendemain (J+1). Par contre, ce schéma alternatif entraînera une augmentation significative des coûts de livraison.

D'après ce Système d'Aide à la Décision, l'augmentation de la performance écologique entraînera une hausse du coût de la livraison : les deux objectifs sont liés. Deux approches ont été développées pour aider à la prise de décision dans ce cas de figure : l'analyse coût-bénéfice (Sartori & Europäische Kommission, 2015) et l'analyse multicritère (Lootsma, 1990). Dans la première approche utilisée par (Beria et al., 2012; Gonzalez-Feliu, 2016; Raicu et al., 2012; van Duin et al., 2007), tous les objectifs sont ramenés à une grandeur commune qui est généralement l'argent. Pour concilier environnement et finance, il suffirait de monétiser l'environnement. Par exemple, l'agence européenne pour l'environnement propose une estimation financière des externalités négatives (p. ex. hospitalisation pour une insuffisance respiratoire) par kilomètres parcouru d'un véhicule. Par cette approche, il ne reste plus qu'à maximiser l'estimation de profit d'un projet pour orienter la décision. Dans la deuxième approche utilisée par (Kapros et al., 2005; Macharis et al., 2010; Verlinde & Macharis, 2016), la distinction entre les objectifs est conservée en leur assignant des préférences pour aboutir à une décision via un algorithme pour satisfaire les préférences. Ces deux approches sont en fait un prolongement de la modélisation et donc hérite de ses limites en termes de validation. La quantification d'un coût environnemental sera toujours soumis à la controverse, tandis que pour la seconde méthode l'élaboration de préférences peut aboutir à des recommandations différentes selon l'algorithme utilisé. Mais au-delà des considérations méthodologiques, ces approches se heurtent au même obstacle : la frontière de Pareto. L'optimisation ne peut

alors proposer une solution : il faut décider sur un ensemble de solutions ou repenser un nouveau modèle.

2.3.3 Données de sortie

La validation d'un Système d'Aide à la Décision, et l'analyse de la solution proposée par un Système d'Aide à la Décision se font généralement par les données de sortie.

L'analyse d'un modèle est de plus en plus complexe à mesure que le modèle grandit. L'ajout d'une variable ou d'un paramètre oblige à évaluer son impact sur l'ensemble du système. Dans le cas du Système d'Aide à la Décision pour l'effet de la réglementation sur les transporteurs pour les restaurants (Jlassi et al., 2017), nous avons évalué 48 scénarios au travers de 6 indicateurs pour déterminer les facteurs déterminants dans la prise de décisions. L'analyse des résultats de simulation requiert alors une double expertise : celle de la modélisation pour comprendre le modèle et celle du métier pour faire le lien entre le modèle et la réalité du terrain.

Le Système d'Aide à la Décision sur les nouveaux schémas de distribution avec des dépôts mobiles (Gaudron et al., 2017) illustre la relation parfois ambiguë entre les données de sortie et les données d'entrée. Afin de savoir si le projet de dépôts mobiles est viable économiquement, il se pose la question de savoir si le consommateur acceptera une hausse du coût de livraison, ce qui se présente comme une donnée d'entrée, et qui impactera la donnée de sortie (coût de la hausse). Répondre à cette question est toujours difficile pour le concepteur du modèle et même pour un transporteur doté de la connaissance métier. La réponse des consommateurs à un service qui n'existe pas sera forcément à prendre avec précaution. En effet, si la question est posée directement ("*accepteriez-vous une hausse du coût de la livraison ?*"), il est probable que les consommateurs s'y opposeront. Par contre, si la question est accompagnée d'une explication sur le caractère vertueux de cette livraison permettant aux consommateurs de comprendre l'enjeu derrière cette hausse, il est aussi probable que certains changeront d'avis. De plus, la qualité de l'explication grâce à un modèle clair aura peut-être un effet positif sur l'acceptation de cette hausse. La donnée d'entrée (l'acceptation de la hausse) dépend de la clarté des explications illustrés par le modèle (explicitation du mode de calcul) et les données de sortie (coût de la hausse).

2.4 Modèles mésoscopiques

Les modèles mésoscopiques sont plus rares dans la littérature. Ces modèles visent à réunir la vision globale des approches macroscopiques (avec la génération des trajets, matrice Origine-Destination, etc.) et la vision locale des approches microscopiques pour prendre en compte des contraintes opérationnelles fines comme le réapprovisionnement des stocks ou la performance du réseau routier (Comi & Rosati, 2015). Cette approche a été déployé notamment dans le cas de l'approvisionnement des cantines scolaires du Grand Lyon (Palacios-Argüello et al., 2018) pour évaluer d'un point de vue économique et environnemental le planning tactique à court terme et à long terme. Les modèles mésoscopiques résultent généralement de l'assemblage de plusieurs modèles (par exemple, un modèle pour l'offre et la demande), ainsi les modèles souffriront des mêmes limitations et il sera difficile de valider la relation entre la stratégie et l'opérationnel. La

validation est réalisée par une vérification de la cohérence du modèle par des experts et la comparaison avec un autre modèle (Palacios-Argüello et al., 2018).

2.5 Les écueils pour la conception d'un Système d'Aide à la Décision

Les descriptions des modèles précédents soulignent le défi de la modélisation microscopique. Plus le modèle opère dans le détail plus la quantité de données nécessaires est importante, et plus le travail de validation des données s'en trouve augmenté, ainsi que la validation du système dans son ensemble. De fait, l'ajout constant de données n'est pas une garantie de tendre vers une bonne représentation du système.

L'atout de la modélisation microscopique est de prendre en compte les contraintes opérationnelles importantes mais invisibles à une échelle macroscopique. Par contre, c'est un désavantage pour traiter des décisions stratégiques de la ville. Le travail de modélisation est considérable pour tenter de valider une représentation à l'échelle microscopique, il faudra redoubler d'effort pour la validation des estimations des effets macroscopiques de tels modèles. A l'inverse, pour l'établissement d'une décision macroscopique (stratégique), il est nécessaire d'identifier comment la décision se matérialisera au niveau opérationnel.

Nous avons montré par la description de Système d'Aide à la Décision avec une approche macroscopique ou microscopique qu'il est difficile de donner une réponse claire et définitive aux questions relatives aux données d'entrée, au modèle et aux données de sortie : (1) est-ce que nous disposons de suffisamment de données pour construire le Système d'Aide à la Décision ? (2) est-ce que le modèle du Système d'Aide à la Décision est une bonne approximation de la réalité ? (3) est-ce que la solution proposée par le Système d'Aide à la Décision est la meilleure ? Il est ainsi difficile de s'avancer sur la validité d'un modèle. Ackoff (1977) prévenait déjà de ces écueils, et il mettait en garde les praticiens de la recherche opérationnelle vis-à-vis du risque d'un modèle qui ne serait plus prise avec la réalité recommandant une décision « optimale » sans intérêt pour le décideur (à la condition qu'il s'en aperçoive).

Cette première partie du chapitre révèle aussi le caractère très artificiel de la segmentation proposée : données d'entrée, modèle et données de sortie. Il semble nécessaire de devoir répondre aux trois questions à la fois. Nous proposons une généralisation des principaux points évoqués.

Premièrement, la justesse d'une frontière autour des éléments d'un système complexe restera toujours en question. Une nouvelle réglementation ou l'émergence d'une technologie révolutionnaire sont par essence difficilement modélisables puisque ces événements n'existent pas encore. En revanche, si les capacités de cette technologie peuvent être imaginées (système de transport sans impact sur l'environnement), l'adoption de la technologie et donc de ses effets seront spécifiques aux besoins des différentes filières et métiers (capacité de chargement, autonomie, coût, etc.). Ainsi, le faible niveau d'abstraction possible oblige à un travail important pour modéliser tous ces effets hypothétiques sur l'ensemble des activités de la logistique urbaine.

Deuxièmement, la réduction de la complexité du système étudié pose une question importante sur notre capacité à valider un modèle. Par exemple, la simulation de tous les véhicules connus, les itinéraires estimés de la simulation et les itinéraires réels seront sûrement différents. Du point de vue de la distance parcourue, les itinéraires sont comparables à l'échelle de la ville. Mais du point de vue de la répartition du trafic dans la ville, les itinéraires réels et simulés peuvent complètement diverger. Une réflexion importante doit se porter sur les métriques de validation du Système d'Aide à la Décision afin de le considérer dans son ensemble. Pour les itinéraires simulés, la distance parcourue ne sera pas toujours une métrique suffisante pour valider un Système d'Aide à la Décision selon la problématique.

Les outils peuvent aussi voiler la complexité de la modélisation, sans pour autant la réduire en pratique. Par exemple, les outils populaires pour la simulation d'agents (p. ex. ARENA ou Anylogic) disposent d'une interface graphique pour représenter le système. Le modèle des agents est construit à partir d'un diagramme logique. Cette particularité a vraisemblablement joué sur la popularité des outils, car il n'est pas nécessaire de maîtriser la programmation pour réaliser un modèle de simulation. Cependant, la conception d'un Système d'Aide à la Décision repose sur une validation dont nous avons montré les difficultés méthodologiques importantes même pour les concepteurs les plus aguerris.

Troisièmement, la complexité d'un modèle microscopique pour envisager la logistique urbaine globalement réside dans la conception et la récolte de données. Nous avons aussi montré que ces modèles reposent généralement sur des problèmes NP-complets comme dans le cas des aires de livraison ou les tournées de véhicules. Autrement dit, si un modèle microscopique préconçu existait, nous n'aurions pas les ressources de calcul pour effectuer la simulation.

Les Système d'Aide à la Décision sont généralement des boites noires pour les décideurs. De fait, l'analyse et les recommandations sont principalement faites par les experts possédant la connaissance du Système d'Aide à la Décision. Il y a ainsi un décalage possible entre l'analyse des experts qui ne sont pas au courant des enjeux stratégiques plus larges à la logistique urbaine : le décideur doit prendre en compte d'autres problématiques qui ne sont pas simulés dans le Système d'Aide à la Décision (p. ex. la ville doit arbitrer des choix entre les voies cyclables et les aires de livraison).

L'ouverture de la boite noire par les décideurs nécessiterait une double expertise en logistique urbaine et en modélisation, mais la barrière à l'entrée est trop haute avec les outils actuels. En conséquence, les décideurs n'ont pas de voix directe dans la représentation du système. Si nous avons montré que la validation du modèle était difficile sinon impossible, la méconnaissance du modèle par les utilisateurs finaux doit nécessairement aboutir à porter une confiance limitée dans le Système d'Aide à la Décision.

3 Processus de validation d'un système d'aide à la décision

Dans cette deuxième partie, nous proposons de présenter le processus de validation d'un système d'aide à la décision dans une perspective globale.

En partant de la définition de la notion de modèle, nous soulignons le caractère subjectif d'un modèle. Cette subjectivité fait écho aux questionnements de la première partie sur les données d'entrée, le modèle et les données de sortie. En effet, ces questionnements portent sur des choix de représentations, des choix humains forcément influencés par les connaissances, les compétences, les objectifs des concepteurs et des parties prenantes. Plutôt qu'à tendre vers un idéal d'objectivité, allons vers un but pragmatique d'intersubjectivité : une vision commune.

Si nous considérons la subjectivité du modèle comme un fait, nous la considérons seulement comme une contrainte pour l'approximation de la réalité du système : il est possible de construire un système d'aide à la décision. C'est-à-dire une approximation de la réalité qui soit utile à prise de décision. Pour cela, nous devons nous assurer que le Système d'Aide à la Décision soit une représentation de l'intersubjectivité de toutes les parties prenantes, et pas d'un sous-groupe des parties prenantes.

Le développement de la notion d'intersubjectivité, nous permettra de montrer que la validité du Système d'Aide à la Décision réside dans les liens entre les enjeux microscopiques et macroscopiques des différentes parties prenantes. Ces enjeux peuvent être interne à une partie prenante. Dans une entreprise le Président Directeur Général d'une entreprise répondra à une problématique de logistique urbaine sur les bases de recommandations d'experts (micro) au regard de sa stratégie d'entreprise (macro) sur d'autres problématiques (marketing, production, etc.). Et ces enjeux peuvent être entre les parties prenantes : l'interdiction d'une motorisation à l'échelle de la ville (macro) aura des impacts différents sur les différents acteurs concernés (micro).

3.1 Qu'est-ce qu'un modèle ?

Pour proposer une description d'un modèle, nous citons Bernard Roy qui définit un modèle comme "un schéma qui, pour un champ de questions, est pris comme représentation d'une classe de phénomènes, plus ou moins habilement dégagés de leur contexte par un observateur pour servir de support à l'investigation et/ou à la communication." (Roy 1985). Si le but d'un modèle est clair — l'analyse de phénomènes représentant un système à étudier — en revanche, le moyen de l'atteindre comprend des subtilités importantes.

La définition possède une notion de restriction : le schéma existe par rapport à un champ de questions. Un modèle est un schéma, c'est une représentation mentale, symbolique (une carte, une équation) ou physique (par exemple une maquette) d'un ensemble phénomènes. Ce champ de questions représente la perspective de l'observateur, celle selon laquelle il regarde les phénomènes d'un système. La définition souligne aussi l'aspect quasi artistique de l'exercice de modélisation : celui-ci reposerait sur l'habilité, une qualification surprenante dans le domaine des mathématiques appliquées où l'on aurait tendance à penser que tout n'est que rigueur. Enfin, le terme "plus ou moins" dans la définition laisse peu de doute sur la variabilité d'un modèle en fonction de l'observateur.

Cette variabilité de la représentation pose la question de sa neutralité et de l'objectivité du modèle (Roy 2013). Le résultat de la modélisation pour répondre à une problématique peut varier en fonction de l'observateur par sa capacité à décontextualiser des phénomènes et les moyens mis à sa disposition, ainsi que par son ancrage mental face à la

problématique. Par exemple, la ville et le transporteur ne partagent pas la même vision de la logistique urbaine, car leurs intérêts peuvent diverger. Face à une problématique apparemment identique, les modèles issus de chacun des acteurs seront probablement différents et refléteront en priorité leurs intérêts propres. Ce n'est pas forcément l'œuvre d'une mauvaise foi : l'observateur peut être sincère mais ignorant des contraintes des autres parties prenantes.

Le concepteur peut être lui aussi sincère dans sa démarche et aboutir à un modèle favorisant une partie prenante. Et dans le cas d'un très grand modèle et dans un contexte changeant, il sera difficile d'évaluer si le modèle avantage effectivement une partie plus qu'une autre.

En pratique, si la neutralité semble inatteignable, le concepteur doit tendre à la création d'un modèle objectif. Pour (Roy 2013) et (Heuer 1999) l'objectivité est obtenue en rendant les hypothèses de base et le raisonnement aussi explicites que possible. De sorte que les parties prenantes puissent en examiner la validité. Cette notion est aussi présente dans les travaux en logistique urbaine de (Quak et al. 2016) avec le concept de connaissance partagée de la situation (*situation awareness*). Roy précise que l'objectivité ne pourra être atteinte que si le concepteur décrit clairement les hypothèses essentielles du modèle et obtient leur acceptation par les acteurs. Il ajoute que cela implique également que les facteurs d'imprécision, d'incertitude, d'inexactitude dans la détermination des hypothèses et leurs influences doivent être explicites et compris. McKernan (McKernan, 2007) utilise les réflexions de Donald Davisdon pour montrer que finalement l'objectivité est construite sur l'intersubjectivité. Selon Davidson, l'objectivité relève d'un accord entre les parties prenantes : leur capacité à avoir la même compréhension d'un phénomène. La question de représentativité de la réalité n'a pas lieu d'être selon lui.

Reprenons les trois questions auxquels nous tentons de répondre avec un Système d'Aide à la Décision :

(1) est-ce que nous disposons de suffisamment de données pour construire le Système d'Aide à la Décision ?

(2) est-ce que le modèle du Système d'Aide à la Décision est une bonne approximation de la réalité ?

(3) est-ce que la solution proposée par le Système d'Aide à la Décision est la meilleure ?

Dans la section précédente, nous avons montré que l'expérience montre que ces questions doivent être traitées ensemble. La notion d'intersubjectivité nous permet de d'illustrer pourquoi : la subjectivité des concepteurs et des parties prenantes doit être réunie pour produire un Système d'Aide à la Décision valide.

En conclusion, le modèle sera toujours subjectif et il doit être considéré en tant que tel. C'est la raison pour laquelle nous souhaitons différencier la validation du modèle et la validation du Système d'Aide à la Décision.

3.2 Validation du modèle

Les processus de validation d'un modèle une étape obligatoire dans l'exercice de modélisation. Donnelly et al., (2012) remarque que le domaine de la modélisation du transport et du fret en particulier, est largement dépourvu de technique de validation. Cette observe corrobore notre illustration (avec l'oracle) de la difficulté de l'exercice : nous n'avons pas accès à « la » vérité terrain car la décision n'a pas encore été prise. Des démarches de validation (Bonnafous et al., 2013; Donnelly et al., 2012) sont proposées pour palier à cette absence, mais elles reposent toujours sur l'expertise des modélisateurs. Ce type de validation ne peut être entrepris par des experts métiers sans expérience en modélisation. Dans cette section, en nous appuyant sur le concept d'intersubjectivité, nous souhaitons montrer que la validation doit s'appuyer sur l'ensemble des parties prenantes.

La démonstration du caractère intersubjectif d'un modèle invalide l'idée d'une méthodologie de modélisation déterministe : un modèle aboutissant invariablement au modèle dont les parties prenantes ont besoin. La modélisation reposant sur l'habilité et la subjectivité des acteurs, il est peu probable que deux groupes face à la même problématique suffisamment complexe produisent un modèle rigoureusement identique. C'est cependant l'objectif que nous pourrions souhaiter pour une méthodologie de modélisation, à savoir accompagner les acteurs de la modélisation dans leur choix pour aboutir au même modèle que d'autres. La méthodologie de modélisation aurait alors réussi à concilier la subjectivité de chacun pour aboutir à la validation du modèle. Cette louable volonté d'objectivité du résultat questionne l'objectivité même de la méthodologie. Dans l'étude de la généralisation des normes comptables, Porter (1996) montre que l'objectivité de ces normes était un mécanisme pour exclure le jugement. Dès lors, l'objectivité pouvait simplement signifier le consensus parmi un groupe d'observateurs ou de mesureurs, par conséquent l'objectivité peut être mesurée comme une variance (Porter, 1996, p. 96). Ainsi, nous pourrions conclure que si plusieurs observateurs arrivent au même résultat avec le même modèle, alors le modèle est plus objectif.

Le danger est que la frontière entre la conciliation et la normalisation de la subjectivité est très fine. Par exemple, la production de deux modèles identiques par deux groupes différents pourrait être la conséquence d'une méthode normative formatant la pensée. Au contraire, si les règles de mesure [le modèle] sont vagues ou pauvrement décrites, alors la mise en œuvre du système de mesure [la conception du modèle] reposera sur un jugement de la part de l'observateur (Porter, 1996, p. 95). Le risque du flou autour de cette frontière est que le modèle ne soit pas une approximation de la « vérité terrain », mais une approximation de la vérité de la méthodologie.

Une méthodologie de modélisation, dont le but est d'aboutir à un modèle valide, doit ainsi composer entre la clarification des choix de modélisation des acteurs et leur liberté à faire usage de leur habilité, connaissances et compétences. La méthodologie doit accompagner sans contraindre.

Pour illustrer quelques choix de modélisation, nous nous restreindrons au cas d'un concepteur comme principal acteur de la réalisation d'un modèle. Dans un but d'objectivité, le concepteur explicite son raisonnement quant à ses choix afin de s'extraire de son a priori sur une problématique pour réussir le tour de force de penser « contre son

cerveau »[4]. Nous proposons de distinguer deux types de choix pour le concepteur lors du processus de modélisation (intentionnel et non intentionnel) avec leurs conséquences sur le modèle et l'avis de l'expert.

Considérons d'abord le cas d'un choix de modélisation intentionnel. Le concepteur opère un choix qu'il pense le plus juste pour représenter la réalité. Malgré l'intentionnalité du choix, il peut être plus ou moins difficile à expliquer. Par exemple, le choix de la modélisation d'un simple paramètre, comme le coût de l'essence, est soumis à une multitude de considérations.

Le concepteur peut choisir d'intégrer la volatilité du prix dans son modèle. Cette relative complexification du modèle pourrait pousser l'expert à penser que le concepteur a tout prévu et ne cherchera même pas à remettre en cause cette partie du modèle. Au contraire le concepteur a probablement des arguments en faveur d'une valeur fixe pour le prix de l'essence, par exemple tous les coûts du modèle augmentent de manière équivalente avec l'inflation. Si la modélisation peut prendre de multiples formes, l'expert doit être en mesure de comprendre la modélisation et la justification attenante.

L'intentionnalité de la part du concepteur n'est pas synonyme de transparence pour une tierce personne comme l'expert. Ainsi il revient au concepteur de rendre explicite son raisonnement, non seulement pour lui mais aussi pour les experts. Pourtant, les sciences cognitives montrent notre incapacité à exprimer de façon fiable un raisonnement relatif à notre expertise (Kahneman and Klein 2009). Dès lors, la frontière entre un choix intentionnel et un choix non intentionnel pour le concepteur commence à s'estomper.

Dans les choix non intentionnels, nous laisserons de côté les considérations psychologiques ou psychanalytiques des acteurs de la modélisation. Même si l'importance est probablement significative dans un processus où l'esprit est central, le sujet est bien trop large et complexe pour être abordé dans le cadre de cette thèse. Nous nous contenterons d'établir que les choix non intentionnels proviennent des biais cognitifs. La difficulté est d'identifier ces choix et de les expliciter, puisqu'ils n'apparaissent effectivement pas comme des choix pour les intéressés. Nous illustrons la notion de choix non intentionnel par l'exemple d'un phénomène d'ancrage (Heuer 1999) d'un concepteur lors de la phase d'observation du système. Ce phénomène désigne la difficulté de se départir d'une première impression. L'ancrage d'une personne par rapport à une problématique peut être nourri par son expérience ou ses convictions (p. ex. politiques).

Imaginons donc un concepteur, issu des professionnels de la logistique, dans une phase d'observation en amont de la conception d'un modèle pour l'amélioration de la distribution urbaine. La lecture d'enquêtes terrains montre l'hostilité de citadins face à l'usage des camions. La conclusion pour le concepteur semble claire, ces derniers refusent

---

[4] *"C'est donc tout l'usage du cerveau qui est mis en question. Désormais le cerveau n'est plus absolument l'instrument adéquat de la pensée scientifique, autant dire que le cerveau est l'obstacle à la pensée scientifique. Il est un obstacle en ce sens qu'il est un coordonnateur de gestes et d'appétits. Il faut penser contre le cerveau"* (Bachelard 1934).

de voir la vérité en face : les camions sont nécessaires. Pour le concepteur, l'expression d'un trop-plein de camions de la part des usagers est synonyme forcément d'une méconnaissance des problèmes logistiques. Mais le rejet des camions peut être le symptôme d'un autre mal que la logistique urbaine. Par exemple, l'explosion du tourisme transforme radicalement certains quartiers et la vie de ses habitants. Le rejet des camions peut s'apparenter à un rejet de la transformation de leur quartier dont ils se sentent exclus. Le modèle sera conçu pour convaincre les usagers de la pertinence des camions, alors que l'opposition aux camions des usagers dépasse la logistique urbaine. C'est en ce sens que la modélisation peut réduire le champ de vision : elle oblige à penser à travers le modèle et n'encourage pas à penser dans un cadre plus large. Dans cet exemple, il ne faudrait sans doute pas s'interdire de remettre en cause le fonctionnement de la ville qui contraint des décisions liées la logistique urbaine.

Cette illustration des choix intentionnels et non intentionnels montre la difficulté à créer un modèle valide, si la validité est une forme d'objectivité. La mobilisation du concept d'intersubjectivité nous éclaire d'une part sur cette difficulté : les acteurs ne partagent pas le même avis. Et d'autre part, elle esquisse le moyen de la résoudre : le concepteur ne doit pas être seul face à sa pensée. La participation d'experts de diverses parties prenantes permettrait de limiter les biais cognitifs par l'opposition des points de vue. Mais si les concepteurs et les experts s'accordent sur la validation du modèle, l'utilisation de ce dernier relève des décideurs.

3.3 Validation d'un système d'aide à la décision

Nous considérons que la validation du Système d'Aide à la Décision est l'intersection de la subjectivité des concepteurs, des experts et des décideurs. En effet, un modèle validé par les concepteurs et les experts n'est pas à l'abri d'une mauvaise utilisation par les décideurs. Nous entendons ainsi par validation d'un Système d'Aide à la Décision : la validation du modèle et de son utilisation.

L'intégration d'un nouvel acteur, les décideurs, dans le processus de modélisation est un défi de taille. D'une part, les décideurs doivent s'approprier les concepts de modélisation : un nouveau langage complexe maîtrisé par les concepteurs. D'autre part, les décideurs doivent emmagasiner de nouvelles connaissances maîtrisées par une diversité d'experts. Le défi de l'intégration est triple, elle impose aux décideurs d'apprendre sur un sujet via un objet (le modèle) qu'ils ne maîtrisent pas et sur lequel ils doivent avoir une approche critique. Face à cet obstacle conséquent, se pose la question de la nécessité de l'intégration des décideurs dans le processus de modélisation. Nous justifions cette nécessité en deux temps.

Dans un premier temps, nous soutenons que le modèle ne peut être utilisé pour la prise de décision sans être maîtrisé. En effet, le modèle est une représentation généralement figée d'un système qui évolue[5]. Le décideur doit être en mesure de comprendre ses limites,

---

[5] Quelle que soit la complexité du modèle, nous avons vu que la collecte de données demande un travail manuel long. Ainsi, les modèles ne peuvent pas être mis à jour en temps réel, ni même sur une base régulière. De plus, la validation des modèles est aussi très difficile, et de la même manière est un événement rare. Ainsi, l'impossibilité de

et plus spécifiquement quand la représentation devient obsolète. Il faut donc que le décideur soit en mesure d'identifier le domaine de validité du modèle, et cela suppose la compréhension du modèle malgré toutes les difficultés énoncées : diversités de connaissances, analyse des résultats de simulation, conflits d'intérêts entre les parties prenantes, biais cognitifs, etc.

Dans un second temps, nous affirmons que le décideur ne peut suppléer entièrement sa décision à l'expert. Le décideur couvre un champ d'action plus large que l'expert, c'est le décideur qui est le plus proche de la stratégie de l'organisation. Par exemple, la ville ne se résume pas à la logistique urbaine, elle doit arbitrer des choix par rapport à d'autres fonctions de la ville comme l'habitat ou le transport de personnes (Gram, 2020). Sans le décideur, le Système d'Aide à la Décision ne peut pas avoir une portée stratégique.

Il est généralement impossible de valider un Système d'Aide à la Décision à un niveau stratégique, cela supposerait d'être capable ce que la ville ou l'entreprise sera précisément dans dix, quinze, vingt ans. D'une part, parce que le modèle est à un niveau stratégique :

- la décision peut être inédite : il n'y a pas eu de décisions similaires dont nous aurions pu utiliser les résultats ;
- le système peut évoluer : les résultats suite à des décisions similaires dans le passé sont désormais obsolètes ou nous sommes incapables de qualifier si l'obsolescence est effective ;
- la mise en œuvre peut être différente du plan : pour apprendre des décisions du passé, nous devons savoir précisément comment elles ont été appliquées.

S'il peut être utile de valider le modèle par une validation ex post, il faut aller plus loin en validant l'utilisation pour que le modèle devienne un Système d'Aide à la Décision.

D'autre part, la nature de la validation, isoler les effets d'une décision spécifique pour la comparer à l'estimation du modèle, est un exercice difficile. Même si elle est souvent utilisé, l'approche expérimentale pour la validation d' un modèle causale est critiquée dans le domaine de l'économie pour des motifs méthodologiques ou éthiques (Lagneau-Ymonet, 2020).

Si la validation quantitative n'est pas envisageable, nous proposons de nous en remettre à une validation qualitative basée sur l'expérience des acteurs de la modélisation. La diversité des acteurs, par leur rôle dans la modélisation et par leur perspective métier, permet de tendre vers un Système d'Aide à la Décision dont le bais serait minimisé par l'intersection des subjectivités. Finalement, la validation du Système d'Aide à la Décision est l'acceptation par les parties prenantes du modèle et de l'utilisation prévue compte tenu du modèle.

---

s'appuyer sur des données suffisamment à jour ou de valider le modèle figent le modèle dans un temps de validité différent de celui du au système réel.

4 Conclusion

Dans la première partie, nous avons mis en évidence les liens profonds entre les données d'entrée, le modèle et les données de sortie pour un système d'aide à la décision. En se basant sur l'analyse de Système d'Aide à la Décision existants nous avons montré la nécessité de prendre en compte ces éléments simultanément pour y répondre et que cette tâche nécessite un travail commun entre les concepteurs et les parties prenantes pour la validation du Système d'Aide à la Décision.

Dans la deuxième partie, nous utilisons le caractère subjectif de l'exercice de modélisation pour exprimer la nécessité d'avoir différentes perspectives, celles des concepteurs des experts et des décideurs, pour valider le Système d'Aide à la Décision. La complexité de l'intégration des acteurs de la modélisation nécessite un modèle accessible à ces derniers. Nous motivons l'utilisation d'un modèle plus transparent pour la conception d'un Système d'Aide à la Décision utile, plutôt que l'utilisation d'un Système d'Aide à la Décision basé sur un modèle complexe que personne ne peut comprendre, et donc valider.

Dans le prochain chapitre, nous présentons une méthodologie où la transparence du modèle joue un rôle central. La transparence du modèle est une réponse au besoin d'intersubjectivité du modèle d'un Système d'Aide à la Décision pour permettre une large participation des parties prenantes : à la fois pour les encourager à participer à un exercice difficile et à la fois pour leur permettre de comprendre le modèle.

Cette méthodologie fait écho à ce chapitre sur le caractère temporaire d'un Système d'Aide à la Décision pour une problématique donnée. Le décideur doit prendre en compte l'évolution du système lorsqu'il utilise un Système d'Aide à la Décision, ainsi il doit être constamment conscient du décalage entre le modèle et la réalité.

Chapitre 4 — Méthodologie du modèle ouvert pour la conception d'un Système d'Aide à la Décision

1 Introduction

Dans ce chapitre, nous motivons le développement d'une méthodologie, appelé *méthodologie du modèle ouvert*, dont le but est la conception d'un système d'aide à la décision basé sur un modèle mathématique.

Dans un deuxième temps, nous décrivons la méthodologie du modèle ouvert en réponse à la difficulté de valider un système d'aide à la décision. La méthodologie est inspirée du principe de modélisation participative qui vise à intégrer les parties prenantes à la création d'un modèle commun. Au travers de deux concepts, le modèle ouvert et la simulation interactive, nous proposons d'aller plus loin en permettant aux parties prenantes de devenir concepteur du modèle utilisé dans un système d'aide à la décision.

Nous avons montré dans le début de ce Chapitre 4 que la conception d'un système d'aide à la décision doit répondre aux deux questions : Est-ce que l'outil est valide ? Est-ce que l'utilisation de l'outil est valide ? Si nous avons également établi qu'il ne peut y avoir une réponse définitive à ces questions, nous proposons dans cette section une méthodologie permettant d'être en mesure de proposer des éléments de réponse.

2 Modélisation participative

Dans le chapitre précédent, nous avons montré la nécessité de la participation des concepteurs et des parties prenantes pour la conception d'un Système d'Aide à la Décision. Cette nécessité fait naturellement écho au concept de modélisation participative où les parties prenantes d'une problématique sont amenées à avoir un plus grand rôle dans l'exercice de modélisation.

L'objectif de la mise en place d'une démarche participative est triple (Mendoza & Prabhu, 2005).

- Premièrement, les parties prenantes partagent leurs connaissances métiers, confrontent leur vision et leur expérience d'une problématique.
- Deuxièmement, l'intégration des parties prenantes dans le processus de décision peut amener à un sentiment d'engagement plus grand pour une meilleur acceptation de la décision.
- Troisièmement, la crédibilité du modèle est renforcée par la diversité des parties prenantes en particulier pour les personnes impactés (mais non décisionnaire) par la décision.

La grande diversité des activités et des parties prenantes dans les problématiques liées à la logistique urbaine amène logiquement à considérer la modélisation participative. Dans

la suite, nous présentons plusieurs travaux pour illustrer comment la communauté de la logistique urbaine s'est saisie du concept participatif pour répondre à différentes questions.

La modélisation participative se base sur les échanges entre les participants pour créer une représentation commune d'une problématique : une représentation qui ménage et illustre les différentes perspectives des acteurs (p. ex. ville, expéditeur, commerçant, etc.). Quak et al. soulignent la nécessité d'établir une connaissance partagée entre les parties prenantes pour la création de partenariats public/privé (par exemple pour la réduction de la pollution) (Quak et al., 2016). Chaque partie prenante doit être en mesure de comprendre les autres pour proposer un partenariat globalement équitable.

Le caractère participatif peut aussi servir à collecter de l'information et des connaissances. Des habitants au Royaume-Uni (Yearley et al., 2003), experts de leur propre expérience de vie urbaine, ont été invités à s'exprimer pour acquérir des informations locales sur leur perception de la logistique urbaine et ses externalités négatives (pollution de l'air, nuisances sonores et olfactives). Anand et al. proposent de collecter les données via un serious game. Les décisions d'un agent simulé sont comparées à celle d'un expert du domaine pour valider la simulation (Anand et al., 2016).

La création d'un consensus est un exercice difficile où la modélisation participative peut être utile. Morana et Gonzalez-Feliu utilisent cette méthodologie pour amener plusieurs groupes d'experts à s'exprimer sur des indicateurs pour établir un tableau de bord dédié à la logistique urbaine durable. À partir d'une liste de 74 indicateurs, à la suite de plusieurs étapes, les experts ont retenu 7 indicateurs principaux et 9 indicateurs secondaires (Morana & Gonzalez-Feliu, 2015).

Pour la conception de notre méthodologie, nous nous sommes appuyés sur la modélisation participative pour servir les différents points présentés : compréhension des intérêts propres et collectif, récoltes de données, validation d'un modèle, et création d'un consensus. Nous introduisons dans un deuxième temps le concept de participation des parties prenantes pour répondre aux enjeux de validation d'un Système d'Aide à la Décision stratégique.

Notre proposition de méthodologie repose sur le principe, présenté dans le Chapitre 3, selon lequel la compréhension d'un modèle est nécessaire à sa validation. Dans notre cas nous considérons que la validation d'un modèle correspond à son acceptation par l'ensemble des acteurs auquel celui-ci est destiné. Or, qui de mieux placé pour comprendre le modèle que le concepteur lui-même ? L'objectif de notre méthodologie est ainsi de positionner ces parties prenantes comme concepteurs du modèle, et non plus seulement comme partenaires de sa conception ou de sa validation. Elle prolonge par-là le concept de modélisation participative. Nous insistons sur la nécessité d'un consensus sur la validité du modèle car comme le souligne Ackoff (1983), le caractère irrationnel d'une décision d'un acteur vis-à-vis d'un autre est souvent la conséquence d'un décalage entre les modèles (ou les représentations). Nous présentons la méthodologie comme un moyen de répondre à ce décalage en aidant à ce que chaque partie prenante puisse comprendre la rationalité des autres.

Dans le cadre de cette thèse, nous concentrons le propos de la méthodologie sur la validation du modèle plutôt que sur la prise de décision. Les travaux sur l'aide à la décision en groupe (Keeney, 2013; Raiffa et al., 2002) sont nombreux, et ils devraient être pris en compte une fois le modèle validé. La compréhension des dynamiques de groupe dans les échanges devraient être prises en compte lors de la conception du modèle (Yearwood & Stranieri, 2006, 2009), et elle devrait permettre d'éclairer l'intérêt de la méthodologie. Le modèle interactif pourra être utilisé pour une prise de décision de façon analogue à Palacios-Argüello et al., (2018), mais nous limitons l'étude de la méthodologie à la conception d'un modèle utilisé pour l'aide à la décision.

Cette compréhension ouvre la voie à la compréhension du Système d'Aide à la Décision dans son ensemble. En devenant concepteurs, les parties prenantes sont aussi mieux à même de s'approprier l'objet d'étude approximé par un modèle utilisé dans un Système d'Aide à la Décision. Ainsi, plutôt que d'utiliser un modèle préétabli, comme l'analyse coût-bénéfice ou l'analyse multicritère (présentées au Chapitre 3) qui peut se présenter comme une boîte noire pour les différentes parties prenantes, celles-ci deviennent concepteurs-utilisateurs du modèle. Cela permet de limiter d'une part le risque de mauvaise interprétation du modèle. D'autre part, les experts ne sont pas contraints dans leur pensée et sont encouragés à proposer des améliorations au modèle.

L'objectif de la méthodologie est d'obtenir un Système d'Aide à la Décision dont le modèle sera accepté par toutes les parties prenantes et dont l'utilisation par le décideur ne contreviendra pas à l'esprit dans lequel le modèle a été développé. Autrement dit, la décision qui en découlerait, ne devrait pas surprendre les parties prenantes, mais devrait émerger naturellement de leur travail de modélisation. Cette volonté d'intégration ajoute une nouvelle contrainte : les parties prenantes doivent acquérir des compétences en modélisation. Notre méthodologie propose de relaxer cette contrainte en utilisant le concept de modèle ouvert.

3 Modèle ouvert

3.1 Ouvrir le modèle pour l'expliquer

La simple ouverture d'un modèle, au sens du logiciel libre en informatique, n'est pas suffisante. Un logiciel libre (*open source* en anglais) désigne une licence particulière permettant à tous de s'approprier le code source d'un logiciel (sous certaines conditions). Cette licence repose principalement sur le fait que le code circule de manière ouverte à la différence des licences traditionnelles qui protègent (cachent) le code source. Cela signifie que tout le monde peut lire le code, et potentiellement s'approprier le code dans la limite du respect de la licence proposée. En réalité, l'utilisation d'un code source libre n'est pas une chose aisée. Premièrement, la compréhension d'un programme informatique demande des compétences spécialisées. Deuxièmement, la compréhension complète d'un programme est un exercice fastidieux. De ce fait, le code source est généralement accompagné d'une documentation pour permettre au développeur de s'approprier plus facilement le code.

Pour autant, il n'est pas impossible de nous inspirer de ces méthodes. Nous proposons de nous concentrer sur la fonction que remplit la documentation pour un programme, afin d'imaginer d'autres moyens de remplir cette fonction. La documentation est un document de texte qui décrit le fonctionnement global du programme et la manière dont il est composé. Le but de la documentation est de présenter le programme à l'utilisateur avec un niveau suffisant d'abstraction pour comprendre le code presque sans avoir à le lire. Pour une fonction quelconque, l'utilisateur peut utiliser la documentation savoir quel algorithme a été utilisé au lieu de le déduire par une lecture du code. Par exemple, une fonction du programme pourra déterminer le chemin le plus court entre 54 commerces sans que l'utilisateur ait besoin de savoir comment l'algorithme d'optimisation est codé. De plus, la documentation peut indiquer à l'utilisateur des informations supplémentaires sur l'algorithme : si c'est une méthode exacte ou une heuristique. Dans le premier cas, celui d'une méthode exacte, l'utilisateur avec des compétences de base en optimisation saura que l'algorithme sera lent mais pourra donner une garantie d'optimalité sur la solution. Dans le second cas, celui d'une heuristique, l'algorithme sera probablement plus rapide mais la solution proposée ne sera pas forcément la meilleure. Ainsi la lecture de la documentation peut permettre à l'utilisateur un niveau d'abstraction suffisant pour évaluer la performance potentielle d'un code sans le lire ligne par ligne.

Dans notre cas d'application, le programme informatique serait le Système d'Aide à la Décision dont le modèle sous-jacent serait une approximation d'une partie du système de logistique urbaine. Une documentation complète du modèle serait forcément volumineuse. Or, nous souhaitons nous adresser à des parties prenantes dont la modélisation n'est pas le cœur de compétence. Ces acteurs n'ont pas un temps infini pour développer de nouvelles connaissances ou une appétence pour lire une documentation rébarbative.

Nous avons montré que la documentation est critique pour la compréhension du programme par un utilisateur. Il peut utiliser un code qu'il n'aurait pas pu écrire et potentiellement développer une approche critique. Mais nous avons établi auparavant que la lecture d'une documentation pour néophyte serait difficile. Une tâche qui devrait être précédée d'une formation à la modélisation. Dès lors, un arbitrage apparaît entre simplicité du modèle pour le rendre utilisable, et complexité pour le rendre représentatif.

3.2 Un modèle ouvert : équilibre entre simplicité (utilisation) et complexité (représentation)

Dans la suite de cette section, nous expliquons pourquoi nous rejetons l'hypothèse qu'un Système d'Aide à la Décision avec un modèle complexe soit forcément utile. Nous montrons qu'un Système d'Aide à la Décision repose sur un équilibre entre des objectifs différents : la représentativité, la facilité d'utilisation, la problématique à laquelle il peut répondre et l'utilité pour les parties prenantes. Enfin, nous montrons comment un modèle ouvert permet de tendre vers ce point d'équilibre.

3.2.1 Le défi de la représentation

Il s'agit ici de questionner l'idée selon laquelle un modèle complexe capturerait mieux le fonctionnement du système. Sans nous attacher à la réalisabilité d'une telle œuvre,

répliquer la complexité du système dans le modèle serait contre-productif : le sens de la modélisation est bien de simplifier le réel pour appréhender sa complexité. C'est dans cet esprit que pour Simon (1990), les efforts de modélisation devraient se concentrer, autant que possible, sur les questions auxquelles on peut répondre de manière plus ou moins définitive. Le raisonnement est qu'un système complexe est chaotique : une légère erreur dans le modèle conduira certainement à une prévision ou à une prescription erronée. Pour Simon, un modèle donnant une réponse presque définitive peut généralement être réduit à "un calcul de coin de table". La réduction d'un problème à ce niveau de simplification est une meilleure preuve de la compréhension de la problématique dans son ensemble.

L'ajout d'une infinité de détails complexifie le modèle, sans pour autant améliorer la décision qu'il permet, comme nous le montrons par l'exemple suivant. De plus, cette complexité a un coût : temps de calcul, collecte de données, modélisation et validation des relations.

Dans une simulation, il est possible de choisir d'approximer les distances entre les points par la ligne le rejoignant, ou de tenter de prendre en compte les distances réelles. Dans le premier cas, il suffit de considérer la distance euclidienne entre les points pour construire la matrice des distances. Cependant, il est aussi possible d'utiliser la carte Open Street Map pour obtenir les longueurs réelles des itinéraires. Ce choix permettrait de mieux prendre en compte les spécificités de la voirie allongeant le parcours, par exemple par la présence de sens interdits. Pourtant il n'est pas évident que la prise en compte des distances réelles apporte plus de réalisme :

- Premièrement, les distances euclidiennes et réelles sont généralement corrélées, donc l'effet de leur prise en compte pourrait ne pas être significatif sur la solution. Par exemple, pour une ville donnée, on pourrait estimer qu'en moyenne la distance réelle est x % supérieure à la distance euclidienne.

- Deuxièmement, les données précises sont généralement chères, elles apportent peu d'intérêt si l'on peut se satisfaire d'une bonne solution plutôt que d'une solution optimale. Un problème de routage est un problème dur (NP complet). En pratique, la solution donnée par le solveur n'est pas optimale, bien qu'elle soit satisfaisante. Augmenter la complexité des données augmentera celle du modèle, mais pas nécessairement la précision du résultat. Quoiqu'il en soit, si une solution satisfaisante est tout ce que l'on peut obtenir, augmenter la précision des données ne semble pas justifié.

- Troisièmement, l'optimalité n'est pas un gage de réalisme. Imaginons le cas où l'itinéraire parfait a été calculé : le dernier centimètre superflu a été supprimé. La question est de savoir si le livreur suivra cet itinéraire : sera-t-il détourné par des travaux ? Est-ce qu'un client plus urgent doit être livré en priorité ? Dès lors, autant se satisfaire d'une bonne approximation des distances, et se concentrer sur d'autres éléments du modèle qui ont une plus grande influence sur la représentativité du modèle.

Avec cet exemple, nous montrons que la simplicité du modèle n'est pas forcément dommageable pour la prise de décision. Au contraire, le modèle devient alors plus accessible pour les parties prenantes, facilitant par ainsi la maîtrise du Système d'Aide à

la Décision par le décideur. L'exemple illustre que la définition claire de la problématique par rapport aux parties prenantes permet de concentrer le travail de modélisation sur le nécessaire. Le modèle est moins coûteux à générer (peu de données à collecter) et les temps de calcul diminués permettent de lancer de nombreux scénarios de simulations.

3.2.2 La nécessité de la complexité

Le caractère complexe d'un modèle n'est pas à prohiber simplement. Parfois, la complexité de la réalité ne peut être réduite à une approximation simple dans le modèle. Ce peut être une complexité organisationnelle, quand il faut comprendre une interaction complexe entre différents facteurs susceptibles d'impacter sa performance. Ce peut être une complexité algorithmique, quand le modèle ne peut pas tout le temps se satisfaire d'une approximation, par exemple dans le cas d'un plan de production industrielle.

La complexité étant intrinsèque à la problématique, nous devons l'intégrer dans l'exercice de modélisation. En nous appuyant, sur les travaux de Busco & Quattrone (2015) sur les Cartes Stratégiques, nous montrons que la complexité questionne l'idée de l'unicité de la représentation d'une problématique à travers diverses perspectives. Ces travaux montrent aussi que l'emploi d'un modèle transparent, plutôt qu'une boite noire, n'évacue pas la question de l'interprétation des différentes parties prenantes.

La complexité d'un modèle et de sa construction peut aussi permettre d'engendrer un dialogue entre les acteurs qui prennent part à sa conception, et in fine leur permettre d'interroger la complexité du phénomène qu'ils tentent de modéliser. Nous illustrons cette réflexion à travers un cas d'utilisation des Cartes Stratégiques (*Balanced Score Cards*) imaginés par (Kaplan & Norton, 1996).

Aujourd'hui, cet outil de management vise à relier une vision stratégique d'une organisation à des actions dont les effets sont mesurés par des indicateurs. A partir d'une étude terrain, Busco & Quattrone (2015) montrent que la Carte Stratégique a perdu son objectif original : "la capacité de relier des mesures de performances financières et non-financières pour la mise en œuvre d'une stratégie, d'améliorer la performance, et d'améliorer la prise de décision stratégique". La réalisation d'une Carte Stratégique demande la participation de différentes parties prenantes au sein d'une même organisation. L'étude s'est concentrée sur la participation de trois services de l'entreprise pour le déploiement de cet outil : « Engineering & Operations Services », « Finance », et « Industrial Relations ».

La Carte Stratégique est un outil visuel et collaboratif : il s'oppose à l'idée d'une boite noire dont le contenu serait inaccessible aux parties prenantes. Pourtant, Busco & Quattrone observent que les services n'ont pas la même compréhension de l'outil, et que la construction d'une Carte Stratégique est a priori un exercice sans fin pour concilier définitivement tous les acteurs. En effet, l'outil ne pourra jamais intégrer l'ensemble des points de vue, ni modéliser de façon satisfaisante la complexité de l'organisation prise dans son environnement. En revanche, l'étude conclut que l'incomplétude de la Carte Stratégique est un levier pour l'implication des utilisateurs : « l'incomplétude laisse le champ libre pour la réinvention des objectifs et des mesures » (Busco & Quattrone, 2015). L'outil n'est plus un instrument d'objectivité, mais un outil de médiation entre les parties prenantes.

Pour la logistique urbaine, les échanges entre les parties prenantes apparaissent positifs. Par exemple, les acteurs publics comprennent mieux les contraintes de la logistique urbaine, et les électeurs comprennent l'intérêt d'investir dans un système de transport efficace pour le fret. Bien que la logistique urbaine intéresse de plus en plus, il existe encore un fossé important en termes de connaissances entre le monde de la recherche et les acteurs opérationnels. En particulier, ces derniers ne sont pas toujours au courant des contributions de la recherche. Il y a une nécessité à améliorer le dialogue entre les parties prenantes sur un sujet en constant mouvement. Le caractère inachevable de la modélisation de la logistique urbaine doit être, à l'image des Tableaux de Bord Prospectifs, un moyen d'interrogation et de médiation sur les problématiques de ce système.

On ne peut pas faire partout l'économie de la complexité. Mais cette nécessaire complexité peut être exploitée pour rappeler aux parties prenantes la difficulté à approximer la réalité. Par exemple, les parties prenantes doivent se préserver de tenter de modéliser une problématique trop ambitieuse. Les décisions ne doivent pas se reposer aveuglément sur le Système d'Aide à la Décision. Mais l'élaboration du Système d'Aide à la Décision peut permettre une redéfinition de la problématique vers quelque chose de faisable. Cela nécessite cependant que le modèle ne soit pas une boîte noire pour les parties prenantes. Or, nous l'avons vu, un modèle avec une volonté de transparence peut au final être semblable à une boite noire. Nous présentons dans la section suivante une proposition pour éviter l'effet boite noire. La transparence d'un modèle ne devrait pas être considérée comme une propriété physique « je suis capable de voir toutes les variables du modèle », mais plutôt comme une qualité cognitive « je suis capable de prendre en compte toutes les variables du modèle ».

3.2.3 Le coût cognitif de la complexité

La complexité d'un modèle peut se faire au détriment de son utilité dans un Système d'Aide à la Décision pour les parties prenantes. Si un ordinateur peut travailler plusieurs jours d'affiliée pour résoudre un problème d'optimisation, en revanche, une réunion de travail réunissant un panel d'experts doit être limitée dans le temps. Et pour cela la complexité du modèle doit être adaptée. Nous cherchons à réduire la charge cognitive des utilisateurs par l'emploi d'un modèle pouvant être un support de discussion. Dans cette section, nous décrivons trois stratégies possibles de simplification (mises en œuvre dans des expérimentations présentées dans les Chapitres 5 et 6) : suppression d'une variable de décision, simplification de la fonction objectif et discrétisation d'un modèle. Nous illustrons ici ces trois stratégies mises en œuvre simultanément par la suppression de la contrainte de fenêtre temporelle pour faciliter la compréhension du modèle représentant l'activité d'un transporteur.

Le principe du modèle ouvert est de commencer avec un modèle simple pouvant représenter "une" approximation du métier d'un transporteur dans différentes activités, en définissant la fonction objectif, les variables de décision et les contraintes. Les modèles pour les transporteurs sont généralement basés sur le problème de tournées de véhicules. La fonction objectif est généralement la distance totale parcourue, et devant être minimisée. La plupart des modèles dans la littérature ajoutent également des contraintes sur la capacité des véhicules et les fenêtres temporelles : les livraisons ne peuvent être

réalisées qu'à une certaine période de la journée. Ces contraintes ont des impacts significatifs sur les décisions opérationnelles (Jlassi et al., 2017).

Dans une optique de simplification, nous proposons de réaliser le modèle sans la contrainte de fenêtres temporelles. Cet exemple permet d'illustrer ce que nous entendons par simplicité. La simplicité du modèle est bien différente de la simplicité d'utilisation. L'objectif de la simplification du modèle n'est pas de permettre à l'utilisateur de trouver la solution plus rapidement. L'objectif de la simplification du modèle est de permettre à l'utilisateur à comprendre ce dernier pour être en mesure de le questionner.

Après analyse des résultats d'une simulation ne considérant pas les fenêtres temporelles, les parties prenantes identifient rapidement une lacune évidente : le modèle simule une livraison d'un commerce après son horaire de fermeture. Devant l'imperfection du modèle, les parties prenantes sont amenées à s'interroger à une modification des variables de décision menant à une solution acceptable. Par exemple, l'augmentation du nombre de véhicules de livraison permettrait potentiellement de livrer tous les commerces pendant les horaires d'ouverture. La conséquence est aisée à estimer pour les parties prenantes : augmentation du coût opérationnel et de la diminution du taux de remplissage de ses véhicules.

Ainsi l'absence de la contrainte oblige l'utilisateur à remettre le modèle en question face à des résultats non réalistes, et à explorer les relations entre les variables pour en trouver la cause. Bien sûr, ces relations auraient aussi pu être déduites des résultats d'une simulation prenant en compte la contrainte de fenêtres temporelles. Mais l'absence de cette dernière permet de mettre les parties prenantes dans une position active (à la recherche d'une explication) plutôt que dans une position passive (en attente de la solution optimale). De plus, la petite taille du modèle (avec peu de variables et de contraintes) rend l'analyse plus facile pour les parties prenantes et le modèle est suffisamment flexible pour ajouter une nouvelle hypothèse (par exemple, nouveau type d'activité, contrainte opérationnelle imprévue).

L'objectif est davantage d'ouvrir une discussion de groupe sur la réalité de la logistique urbaine et de ne pas essayer de l'imiter parfaitement. Dans ce cas, c'est l'absence de la contrainte qui peut orienter la discussion sur les horaires de livraison et illustrer les divergences d'objectifs des parties prenantes ainsi que leurs contraintes opérationnelles. Par exemple, la livraison de nuit pourrait paraître pertinente pour une ville, mais les commerçants pourraient refuser l'accès à leur magasin en leur absence et les riverains pourraient s'y opposer à cause des nuisances sonores.

La flexibilité du modèle s'appuie sur la possibilité d'ajouter ou de supprimer des contraintes. Il est ainsi possible de comparer différentes spécificités puisque l'outil reste le même, mais les résultats changent, ce qui met donc en avant l'effet de chacune d'entre elles. Les transporteurs de différentes filières peuvent partager leurs propres contraintes imposées par leur activité et leur client. La livraison de supermarchés possède des contraintes spécifiques par rapport à la livraison de pharmacie : un modèle simple comme un problème de tournée de véhicules peut permettre de les modéliser. Bien sûr, le modèle pourra se complexifier par la suite pour mieux répondre à la problématique. Mais l'idée est de conserver un modèle accessible pour recevoir la participation du plus grand nombre. Sinon, les participants doivent payer le prix de la complexité dès le début, ce qui

limiterait leur possibilité de participation, puisqu'ils ne comprendraient pas le modèle, son utilité serait donc moindre. De plus, un modèle trop précis risque d'être peu généralisable à d'autres scénarios.

3.3 Conclusion

Le concept de modèle ouvert est pensé comme un outil à la fois de modélisation et de modération pour trouver l'équilibre entre la représentativité d'un modèle, l'utilisabilité d'un Système d'Aide à la Décision, les parties prenantes et la problématique. La maîtrise d'un Système d'Aide à la Décision par le décideur s'appuie sur le concept de modèle ouvert pour caractériser l'intersubjectivité des parties prenantes grâce à la confrontation des points de vue.

Le modèle ouvert place les parties prenantes dans une démarche active, car la solution n'est pas directement affichée sur leur écran. Cette démarche active est double pour les parties prenantes : premièrement, générer des connaissances sur la problématique via le modèle et les discussions avec les autres parties prenantes et deuxièmement aboutir à la maîtrise du modèle pour assurer la cohérence de la décision par rapport à la réalité, justifiée par le modèle.

Malgré tout, un modèle simple peut être difficile à analyser, c'est pour cela que nous proposons de l'adosser à la simulation interactive. Cette simulation est aussi un support visuel pour la discussion

4 Simulation interactive

4.1 Motivations

Dans la section précédente sur le modèle ouvert, nous avons proposé de simplifier le modèle pour permettre aux experts néophytes de comprendre le modèle. Mais une simplification à outrance d'un modèle présente aussi le risque d'oublier une contrainte opérationnelle importante. Dans cette section, nous proposons "d'augmenter" l'expert néophyte pour conserver une complexité nécessaire au modèle pour la représentation d'un phénomène.

L'augmentation des experts néophytes est réalisée au travers d'un outil interactif que nous appelons simulation interactive. Il existe peu d'outils interactifs permettant de faire participer les utilisateurs à une réflexion sur les contraintes de la logistique urbaine. Nous pouvons citer le travail de (Guerlain et al., 2016) qui propose un support interactif et tangible permettant aux utilisateurs d'interagir autour d'une table sur un modèle de simulation. L'intérêt pour l'interactivité est double.

Premièrement, il permet d'engager les utilisateurs dans la démarche de conception par un moyen détourné : les apprenants préfèrent les simulations interactives aux méthodes d'enseignement traditionnelles (Vogel et al., 2006). Ainsi le premier contact des utilisateurs avec le modèle peut se faire par l'exploration interactive plutôt que par l'analyse des équations du modèle. Les expérimentations, dont deux sont présentées dans

les Chapitres 6 et 7, ont montré que les participants apprécient l'aspect ludique et le caractère nouveau de ce type d'outils.

Deuxièmement, l'interactivité permettrait un gain cognitif (Vogel et al., 2006) pour les utilisateurs. Cela ouvre potentiellement la voie à l'utilisation de modèles plus compliqués : des modèles potentiellement capables de mieux représenter la réalité ou de tester des hypothèses. Il a été montré que la simulation interactive peut être un moyen efficace de résoudre des problèmes difficiles. Par exemple, le *serious game* "phylo" permet de mobiliser la capacité humaine à résoudre des problèmes durs (NP-complets) d'appariement de modèles (Kawrykow et al., 2012) pour la génomique comparative.

Finalement, nous formalisons l'intérêt de la simulation interactive comme un moyen de motiver les utilisateurs à participer à la phase de conception et de faciliter l'utilisation de modèle plus compliqués.

4.2 Principe fondateur

Nous avons établi que la qualité d'un système d'aide à la décision était tributaire de la validation d'un modèle, ici définie comme son acceptation par les différentes parties prenantes auxquelles il est destiné, et de son utilisation par les décideurs. L'étape préalable à ces validations est la compréhension par les utilisateurs du modèle : c'est l'objectif que nous donnons à la simulation interactive. Nous entendons "compréhension du modèle" par l'intériorisation par les utilisateurs de ce que le modèle représente et, aussi important, de ce qu'il ne représente pas. Dans le contexte de l'utilisation d'un modèle ouvert avec la simulation interactive, la compréhension de "ce que le modèle ne représente pas" est un principe fondateur.

Concentrons-nous d'abord sur l'objectif final : la validation du modèle et de son utilisation. Les utilisateurs participent à la validation en s'assurant que leurs connaissances métiers diverses sont bien présentes dans le modèle. Pour cela, ils doivent avoir une connaissance suffisamment fine du modèle : ils doivent devenir experts du modèle. Alors qu'est-ce qu'un expert ? En utilisant une définition triviale, nous pouvons dire que c'est une personne qui a une certaine connaissance d'un domaine et sera donc en mesure de donner une réponse fiable à une question sur celui-ci. L'expert sait répondre à des questions sur son domaine d'expertise et donner un indice de confiance. Mais l'expert sait aussi identifier les questions à la limite ou en dehors de son domaine d'expertise. Dans ce cas, il donnera un avis avec précaution ou orientera les intéressés vers les experts concernés. Il en va de même pour les nouveaux experts du modèle : ils doivent être capable d'identifier les questions auxquelles le modèle peut apporter une réponse et avec un indice de confiance.

Souvent un modèle peut ne pas apporter une réponse satisfaisante à une question particulière. C'est bien la connaissance des lacunes du modèle qui permettra aux utilisateurs de comprendre que ce dernier doit être amélioré. Nous insistons sur ce que l'amélioration doit se faire en direction de l'objectif final : la validation du modèle et son utilisation, et non pas la représentation exacte de phénomènes. Autrement dit, le modèle doit rester accessible en termes de complexité aux utilisateurs pour que ces derniers soient en mesure de proposer des réponses fiables. Nous voulons montrer que face à une lacune du modèle, la question n'est forcément pas "comment modéliser cette

contrainte/paramètres/décisions ?", mais plutôt "quel coût devrons-nous payer pour cette amélioration ?".

Cela peut être un coût humain pour coder l'amélioration ou un coût financier pour acheter des données supplémentaires. Mais nous considérons que le coût principal sera plutôt conceptuel : un affaiblissement du modèle ouvert avec le risque d'en perdre les bénéfices présentés précédemment. Les expérimentations ont montré que la complexité d'un modèle dépasse rapidement le gain cognitif offert par la simulation interactive. Il faut donc résister à la tentation (vaine) d'utiliser la simulation interactive pour expliquer une "usine à gaz". Il faut plutôt se rassurer sur la capacité humaine à résoudre des problèmes durs de façon satisfaisante (même si non optimale), en étant assisté par des outils imparfaits. Dans le contexte des transports, les êtres humains sont en mesure de proposer des solutions satisfaisantes sans assistance informatique au problème NP-complet du "voyageur du commerce" pour de petites instances (Best, 2005). Si les utilisateurs ont une capacité d'analyse suffisante, pourquoi inclure l'analyse dans le modèle au risque de le complexifier ? L'idée sous-jacente pour la simulation interactive est de laisser à l'ordinateur les calculs (compliqués et rébarbatifs) pour laisser plus de place à l'utilisateur dans l'analyse.

La simulation interactive dévoile le modèle : les utilisateurs peuvent s'approprier un modèle relativement complexe en expérimentant différents scénarios et en visualisant les impacts sur les résultats de simulation. De fait, elle étale aussi au grand jour d'apparents manquements du modèle. Face à une simulation interactive, les utilisateurs comprennent rapidement qu'un modèle ouvert est une représentation très partielle de phénomènes. Nous présentons ce manque évident dans la modélisation comme un aiguillon permanent sur la conscience des utilisateurs (et leur subconscience) pour remettre en cause le modèle et pondérer ses réponses. Le modèle parfait n'existe pas, et par voie de conséquence la solution parfaite n'existe pas non plus[6].

4.3 Interface

L'interface graphique du simulateur interactif permet aux utilisateurs de changer les paramètres et les variables de décision de la simulation, et d'en observer les conséquences sur les indicateurs de performance. L'étude de l'interface est importante pour comprendre comment les utilisateurs s'approprient le modèle.

[6] Nous définissions la perfection d'une solution d'une part par la certitude que cette dernière ait tous les effets escomptés avec un fort taux de probabilité, et d'autre part qu'elle soit robuste, c'est-à-dire reste prévisible malgré les perturbations possibles.

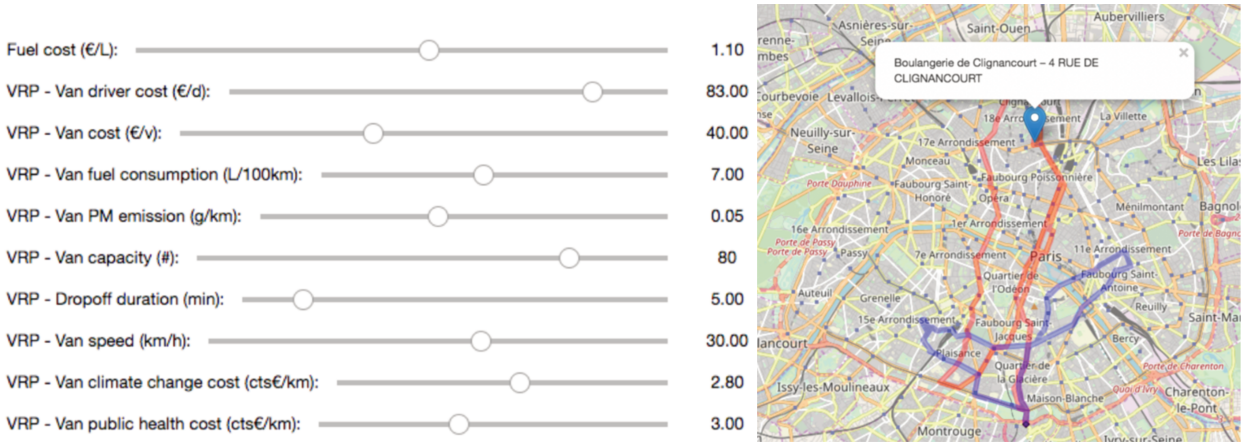

Figure 3 – Paramètres modifiables (à gauche) et visualisation des tournées de véhicules (à droite) d'une simulation interactive

Pour les premières expérimentations, nous avons choisi d'utiliser les *jupyter notebooks* associés au module *ipwidget* pour deux raisons. Premièrement, cet environnement permet aisément la création d'une interface graphique comme des boutons de sélection ou des curseurs. Ces éléments graphiques intuitifs permettent à l'utilisateur de changer facilement un paramètre du modèle comme par exemple la vitesse d'un type de véhicule (cf. Figure 3 à gauche). Lorsque l'utilisateur change un paramètre du modèle, les indicateurs de performance sont recalculés automatiquement et sont affichés directement via du texte et/ou des graphiques (cf. Figure 3 à droite).

Deuxièmement, les *jupyter notebooks* sont facilement accessible : un utilisateur peut accéder au simulateur via son navigateur internet sans installation ou configuration préalable. Pour nos expérimentations, l'utilisation du service gratuit *Binder* (Jupyter et al., 2018) pour exécuter les *jupyter notebooks* à distance a été très satisfaisant : tous les utilisateurs ont pu accéder à la simulation interactive.

4.4 Interactivité

La simplicité algorithmique du modèle permet une meilleure interaction entre l'utilisateur et la simulation interactive. Si le modèle est simple, nous pouvons réaliser les calculs de la simulation en temps réel. La simulation est suffisamment rapide pour que l'utilisateur n'ait pas besoin d'attendre pour visualiser les résultats d'un scénario.

Or pour une simulation apparemment simple comme celle d'un problème de tournée de véhicule pour 200 points nécessite environ une dizaine de seconde pour obtenir. Une nouvelle fois, la simplicité est une aide car elle limite le nombre de scénarios possibles : cela permet de pouvoir pré-calculer toutes les combinaisons des variables de décisions (i.e. tous les scénarios) et stocker les résultats. Ainsi à chaque changement de paramètre, le simulateur interactif affiche les résultats au lieu de lancer une optimisation potentiellement coûteuse en temps de calcul.

Si les résultats de simulation sont pré-calculés, ils peuvent être visualisés en utilisant une autre technologie de visualisation. En particulier, le langage JavaScript peut être plus approprié pour la visualisation de données avec ses nombreuses librairies de référence

comme D3.js (couteau suisse pour la visualisation de données) ou Leaflet (pour la cartographie interactive). De plus, ces librairies peuvent être utilisées dans *Observable* : un type de notebook spécialement conçu pour l'exploration de données avec JavaScript[7].

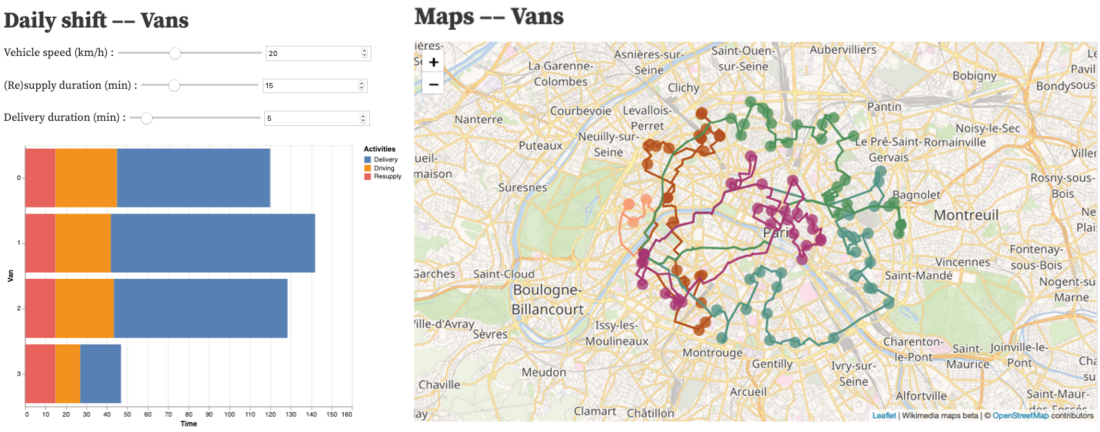

Figure 4 - Simulation interactive utilisant D3.js et Leaflet avec le service Observable

4.5 Conclusion

La méthodologie s'appuie sur la réflexion développée dans le Chapitre 3 : la complexité d'un modèle ne signifie pas nécessairement une meilleure représentativité. Pour questionner cette représentativité, et tenter de la rendre effective, nous avons proposé deux concepts : le modèle ouvert et la simulation interactive. Le concept de modèle ouvert permet de s'autoriser l'utilisation d'un modèle simple pour faciliter l'analyse et la validation. Tandis que la simulation interactive permet de faciliter l'analyse d'un modèle tout en conservant sa complexité. La combinaison de ces concepts offre de la flexibilité dans la modélisation pour permettre une analyse (et donc une validation) plus aisée du modèle. Cette flexibilité est une liberté donnée aux utilisateurs pour la conception d'un modèle. Une liberté déroutante pour un public néophyte en modélisation, d'où la nécessité de la création d'une méthodologie pour former les utilisateurs à la modélisation et à la maîtrise de ces deux concepts.

5 Processus de la méthodologie du modèle ouvert

Notre méthodologie est constituée de cinq étapes (cf. Figure 5). L'objectif de cette méthodologie est de placer des utilisateurs dans la position de concepteurs d'un modèle pour un Système d'Aide à la décision.

Dans un atelier, nous désignons un animateur et des participants (experts terrains, néophyte, personnes extérieures).

---

[7] https://observablehq.com/

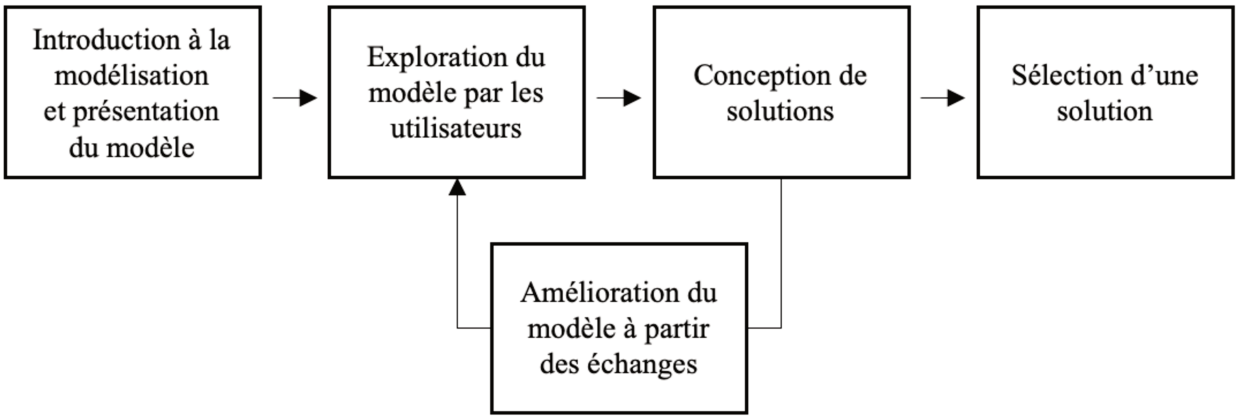

Figure 5 - Diagramme logique de la méthodologie du modèle ouvert

Dans la **première étape**, un problème de logistique urbaine est identifié par l'animateur ou par la communauté. Le problème doit être décrit de façon suffisamment précise pour circonscrire le périmètre du problème.

L'animateur développe un modèle pour représenter le problème sous la forme d'une simulation interactive. Ce premier modèle peut être vu comme une ébauche pour avoir une base de discussion avec les participants.

Dans la **deuxième étape**, l'animateur présente les concepts de modèle ouvert et de simulation interactive pour permettre aux participants de s'approprier le modèle.

Les expérimentations ont montré de fortes disparités entre les utilisateurs dans la maîtrise du concept de modélisation. L'animateur doit proposer les bases de la modélisation pour permettre aux utilisateurs de comprendre ce modèle et comment l'améliorer. Cet apprentissage peut se prolonger avec le modèle qui permettra d'illustrer les bases théoriques.

Dans la **quatrième étape**, le modèle est exploré par les participants grâce à la simulation interactive. Il repose sur l'interactivité et la visualisation claire des paramètres du modèle et des résultats de la simulation. En lançant différents scénarios de simulation, les participants se familiarisent avec le modèle et la problématique, et testent la validité du modèle.

Le but est de placer l'utilisateur dans une démarche de conception d'un modèle. Il est probable que le modèle nécessitera des améliorations pour créer et tester de nouveaux scénarios. L'animateur accompagne les utilisateurs dans l'identification et l'estimation des données nécessaires pour imaginer les paramètres, les variables de décision, les indicateurs de performance, et leur modélisation pour aboutir au choix d'une solution.

La **cinquième étape** est une boucle de rétroaction alimentée par les discussions et les commentaires des utilisateurs. Dans le cas d'un modèle trop éloigné de la réalité, l'animateur peut utiliser les propositions de la discussion pour proposer un nouveau modèle. La satisfaction se juge sur l'expérience métier des utilisateurs et leur confiance dans la capacité du modèle à représenter la situation réelle.

L'objectif est de rassembler les compétences de différentes parties prenantes et de les synthétiser dans un modèle cohérent. Par conséquent, les discussions entre les participants sont essentielles. Pour cette raison, un animateur doit modérer la discussion et guider les participants à travers les différentes étapes. Il crée un scénario illustrant la problématique à traiter pour impliquer les participants avec l'outil et pour initier des interactions. À la manière d'un exercice de brainstorming, il doit garantir à chacun la possibilité de s'exprimer. L'animateur doit également clarifier les propositions, organiser des discussions sur les propositions et gérer le temps.

Dans cette méthodologie, nous distinguons deux consensus : sur le modèle et sur la décision. Dans le cadre de cette thèse, nous avons choisi de nous concentrer sur le consensus autour de la validation du modèle. Nous souhaitons que les parties prenantes s'accordent sur les effets de plusieurs décisions potentielles. Après cette condition nécessaire remplie, la discussion peut porter sur la sélection d'une décision. Cette étape n'est pas explicitement traité par la méthodologie, mais l'outil de simulation peut servir de support à la discussion ou au déploiement de méthode d'aide à la décision comme l'analyse multi-critères (Macharis et al., 2010). Des détails sur le déploiement de la méthodologie sont exposés dans le chapitre suivant de manière à l'illustrer au travers des expérimentations.

6 Conclusion du chapitre

Dans cette thèse, nous souhaitons proposer un Système d'Aide à la Décision pour relier les décisions stratégiques aux implications opérationnelles. Dans les chapitres précédents, nous avons montré qu'un tel outil pour un système complexe nécessite une connaissance fine de la problématique et une maîtrise des concepts de modélisation.

Dans ce chapitre, nous avons montré comment la modélisation participative permettrait d'assurer la validation d'un modèle et de son utilisation, et comment elle pourrait être un moyen pour engager les parties prenantes dans l'élaboration d'une solution collective pour un problème complexe.

La méthodologie vise à former les utilisateurs à la modélisation, et à leur donner les moyens au travers du modèle ouvert et de la simulation interactive à penser au-delà du modèle. Dans l'esprit de la méthodologie, l'outil de simulation doit devenir un nouveau langage commun entre différents mondes doté chacun d'un langage particulier et d'intérêts propres pour discuter d'un problème. C'est un support de réflexion pour les utilisateurs et non pas un pourvoyeur de solutions.

Dans le Chapitre 3, nous avons montré le défi de la représentation d'un système au travers notamment du risque d'être pris dans un processus normatif : il est tentant de reproduire les modèles précédents. Le risque d'un tel processus serait d'aboutir à un modèle d'apparence valide. Le modèle apparaîtrait valide car nous utiliserions les outils et les concepts usuels. Or, la validité d'un modèle ne se mesure pas par les moyens mis en œuvre. La validité se mesure aux résultats et à la compréhension, si tant est que le concept de validité puisse être mesuré. Nous estimons que la méthodologie permet une liberté de modélisation d'une problématique phénomènes pour limiter les risques ce processus normatif. Le processus itératif du modèle ouvert permet de commencer avec un modèle

sommaire pour construire, au fur et à mesure des réflexions, un modèle plus complet. La complexité est inévitable pour les problèmes de la logistique urbaine, et certaines parties du modèle ne peuvent pas être simplifiées si l'on souhaite que ce dernier soit une bonne approximation de la réalité. Pour répondre à cette complexité nécessaire du modèle, nous proposons la simulation interactive comme un levier permettant aux utilisateurs de mieux appréhender cet exercice difficile qu'est la modélisation d'un système complexe.

Chapitre 5 — Expérimentations pour la Méthodologie du Modèle Ouvert

1 Introduction

Dans ce chapitre, nous tentons de répondre au besoin exprimé par la communauté de la logistique urbaine pour des outils d'aide à la décision face à la multiplicité des éléments (présentés dans le Chapitre 2) à prendre en compte. Comme nous l'avons montré dans le Chapitre 3, les outils actuels sont limités pour prendre en compte les différentes expertises. Cette thèse propose une méthodologie pour répondre au besoin exprimé en permettant aux parties prenantes de participer à la conception outils d'aide à la décision. C'est la démarche décrite dans le Chapitre 4 qui aboutit à la proposition de la méthodologie du modèle ouvert pour s'assurer de la validité d'un modèle utilisé dans un système d'aide à la décision. Dans ce chapitre, nous proposons d'explorer comment les concepts de modèle ouvert et de simulation interactive peuvent permettre d'inclure efficacement les parties prenantes dans la phase de conception d'un modèle. Nous nous intéressons au bénéfice de l'interaction entre l'utilisateur et la simulation pour comprendre des schémas logistiques, et la notion même de modélisation.

Au cours de cette thèse, plusieurs expérimentations ont été menées autour de la méthodologie du modèle ouvert. Dans la première expérimentation, l'objectif était d'étudier la capacité des étudiants à utiliser et à comprendre un modèle à travers une interface interactive (Gaudron, Tamayo, & La Fortelle, 2019a). Dans cette expérimentation, nous commençons une réflexion sur la possibilité d'ouvrir la boîte noire.

Dans la seconde expérimentation (Gaudron, Tamayo, & Fortelle, 2019), l'objectif était d'évaluer la capacité de création d'un consensus sur le modèle par le déploiement de la méthodologie. Cette expérimentation a été réalisée sur plusieurs groupes d'étudiants et un groupe d'experts. Dans cette expérimentation, nous cherchons à déterminer si un modèle compris par tous peut permettre une approximation satisfaisante de la réalité pour la prise de décision.

Dans le cadre de cette thèse, nous souhaitons étudier le concept de modélisation participative pour aboutir à la validation d'un modèle. La création d'un modèle consensuel est vue comme une réponse aux lacunes dans l'utilisation des outils actuels : responsabiliser les parties prenantes et démystifier l'exercice de modélisation.

Nous partons du principe que si les externalités négatives de la logistique urbaine sont inévitables, ces dernières peuvent être minimisées (avec niveau de service équivalent ou amélioré) grâce à une meilleure compréhension entre les acteurs. En revanche, la création de cette compréhension mutuelle repose parfois sur des outils de modélisation, et ces outils sont généralement des boîtes noires pour les décideurs. Nous avançons que cela nuit à la création de connaissances pour améliorer la compréhension du système de la logistique urbaine.

Nous définissons l'opacité d'une boite noire comme relative. Comme nous l'avons exprimé dans les chapitres précédents, l'outil peut être parfaitement clair pour son concepteur,

mais totalement obscur pour ses utilisateurs. Nous proposons trois raisons principales pour expliquer la confiance des utilisateurs dans ces boites noires, et pourquoi cela ne permet pas de résoudre le problème de la logistique urbaine.

Premièrement, la boite noire est acceptée, car le décideur s'estime incapable de résoudre le problème ou il ne veut pas assumer la responsabilité d'une action. Le problème est alors sous-traité à un expert ou un groupe d'experts qui réalisera un outil et proposera les solutions adéquates. Nous distinguons deux difficultés à la sous-traitance pour la production d'une solution clef en main. La première est le flou autour de la notion d'expertise. Par exemple, qui est le mieux placé pour choisir un expert que l'expert lui-même ? Et qui s'assurera de la qualité des travaux de modélisation ? En résumé, alors que le décideur ne possède pas la connaissance nécessaire à la problématique, il doit évaluer l'expert sur ladite connaissance. La deuxième difficulté est le risque d'une organisation en silo dans la prise de décision pensée autour des domaines d'expertise. Le décideur doit s'assurer que l'expert n'escamote pas des considérations importantes indirectement liées à la problématique. Par exemple, comment la ville peut-elle conduire une politique globale si les questions de l'emploi, du logement et de la logistique urbaine sont envisagées séparément ?

Deuxièmement, il y a une forte croyance dans l'existence de l'oracle présenté dans le Chapitre 3. Nous aurions une capacité à tout modéliser, et par là même à tout optimiser, il existerait donc une meilleure solution qui serait accessible par un calcul mathématique. Amoore & Piotukh (2015) montrent que les outils d'analyse de données produisent des perceptions du monde plutôt que des visions "augmentées" de la réalité. L'outil permet ainsi de proposer une bonne solution pour le modèle, mais il n'est pas garanti que la solution fonctionne dans la réalité. Le risque est donc que l'outil ne soit pas perçu comme une boite noire, puisque le décideur aurait l'impression de comprendre l'outil. Alors le décideur est susceptible de croire que l'outil représente la réalité, et donc l'image que le décideur se met à avoir de la réalité est celle que l'outil lui montre. Le décideur se met à confondre la réalité avec la vision que l'outil offre.

Troisièmement, comme la boite noire est inaccessible, elle est jugée sur l'apparent réalisme des résultats. Par exemple, l'animation du déplacement de véhicules sur une carte est perçue comme un gage de réalisme. Au contraire, un simple graphique qui représenterait les mêmes données serait moins convaincant, mais beaucoup plus utile pour la lecture et la comparaison des résultats de simulation.

Ces questions ont motivé la volonté d'ouvrir une boite noire aux utilisateurs : c'est-à-dire permettre à des utilisateurs (non spécialistes de la modélisation) de comprendre un modèle représentant une problématique de logistique urbaine. Le but de l'expérimentation décrite dans ce chapitre était de tester comment la simulation interactive peut aider les utilisateurs à mieux comprendre un modèle de simulation.

Nous décrivons la mise en œuvre de chacune des étapes nécessaires à l'application de la méthodologie de modèle ouvert :

(1) identification du problème ;

(2) création d'un modèle simple par l'expert modélisation seul ;

(3) présentation du modèle aux utilisateurs ;

(4) exploration du modèle par les participants et test de sa validité ;

(5) évolution du modèle grâce à la participation de chacun.

Pour chacune des étapes, nous présentons leur réalisation concrète à travers deux différentes expériences mises en œuvre.

2 Première expérimentation : l'ouverture de la boîte noire

2.1 Cas d'étude pour l'expérimentation

2.1.1 Problématique

Dans le cadre de notre expérimentation, nous commençons par décrire le problème sur lequel nous travaillons — étape (1). Le cas d'étude est la comparaison de deux schémas de distribution de livraisons express de 200 points dans la ville de Paris.

Premièrement, l'expérimentation vise à évaluer la capacité des utilisateurs à comprendre la relation entre des paramètres, par exemple, la relation entre la capacité d'un véhicule et la taille de la flotte. Deuxièmement, l'expérimentation cherche à déterminer si l'interaction permet à l'utilisateur de mieux comprendre le modèle et de le critiquer.

2.1.2 Modèle : deux schémas de distribution

Les données d'entrée sont composées des points de livraison, de l'adresse du dépôt et d'une carte du réseau routier. Les points de livraison sont des coordonnées GPS de la ville de Paris aléatoirement réparties. L'emplacement du dépôt correspond aux coordonnées GPS du centre de consolidation de La Poste dans le 15e arrondissement de Paris. Pour des raisons de performance, la distance entre les points a été considérée comme euclidienne (vol d'oiseau) pour l'étape d'optimisation. A posteriori, nous avons utilisé la carte Open Street Map de Paris pour estimer le trajet réel qu'aurait suivi un véhicule pour chaque itinéraire. Avant de motiver nos choix de modélisation dans la section suivante 2.2, nous présentons les perspectives prises pour la modélisation de ce problème.

Pour le simulateur interactif, nous proposons deux schémas de distribution que nous avons modélisés dans deux modèles distincts.

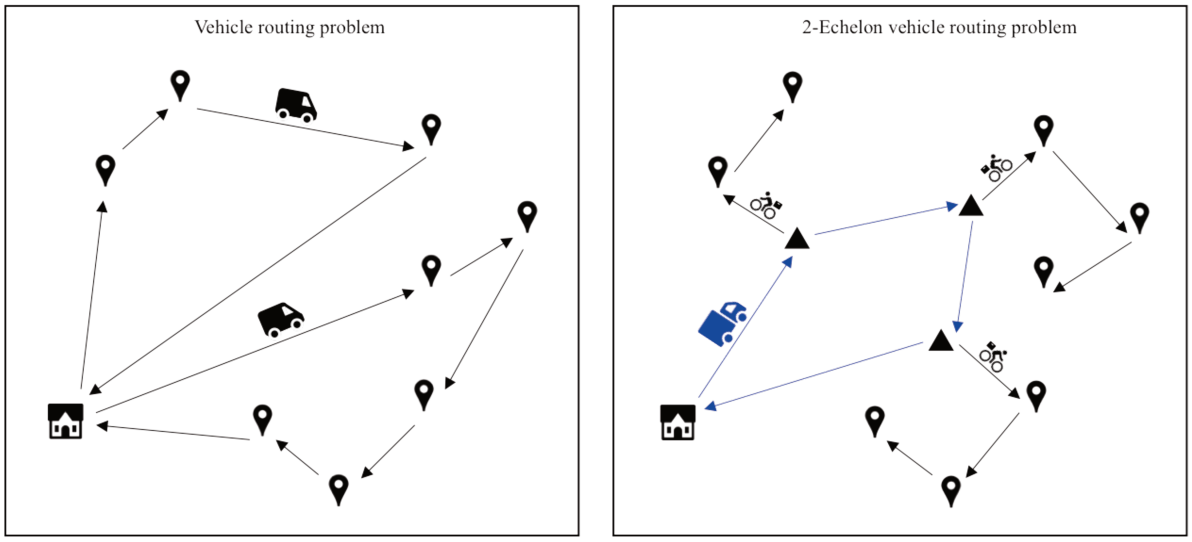

Figure 6 - deux modèles implémentés dans le simulateur interactif : distribution classique (à gauche) et distribution alternative (à droite)

Le premier schéma logistique "classique" représente une opération classique de livraison de colis (cf. Figure 6 à gauche). Les Véhicules Utilitaires Légers (VUL) quittent un dépôt situé dans le centre-ville jusqu'aux points de livraison désignés. Le premier schéma de distribution correspond à un problème d'optimisation classique de tournées de véhicules (V*ehicle Routing Problem*).

Le second schéma logistique "alternatif" est multimodal (cf. Figure 6 à droite), un camion doté d'une capacité de 200 livraisons quitte le dépôt et s'arrête cinq fois (représenté par les triangles noirs dans l'illustration) dans la ville. À chaque arrêt, les colis associés à cet arrêt sont transbordés vers des coursiers à vélo. Ce sont ces coursiers qui effectueront le dernier kilomètre. Ce second schéma de distribution peut être considéré comme un problème de tournée de véhicules à deux échelons (*Two-Echelon Vehicle Routing Problem*) (Crainic et al., 2010; Drexl & Schneider, 2015; Gonzalez-Feliu et al., 2008).

L'optimisation est réalisée avec le solveur Gurobi (version 7.5) et de scikit-learn (librairie d'apprentissage automatique Python) dans un environnement Python 3.5. L'objectif de l'algorithme d'optimisation est de minimiser la distance parcourue par les VUL et les vélos. Dans le cas de ce modèle, la prise en compte du temps de la tournée plutôt que la distance parcourue aurait eu un effet limité sur les résultats. En effet, chaque véhicule se déplace à une vitesse moyenne sans prise en compte de la congestion : le plus court chemin correspond au chemin le plus rapide. Le résultat de l'optimisation est la répartition des colis entre les véhicules, et pour chacun l'ordre de visite des adresses de livraison.

2.1.3 Les indicateurs de performance

La logistique urbaine implique de multiples acteurs dont les différents intérêts décrits (Abel & Karrer, 2006) illustrent bien la complexité du système. L'expéditeur a pour objectif de minimiser les coûts globaux tout en répondant aux besoins du client. Le transporteur recherche également un faible coût, mais souhaite en outre des opérations de transport de qualité pour satisfaire à la fois l'expéditeur et le client. Le client souhaite

être livré à temps et dans les meilleurs délais. La ville se veut attractive pour ses habitants en minimisant les externalités négatives et en gardant des services de livraison efficaces.

Pour représenter ces différents intérêts, trois indicateurs de performance ont été choisis. Ces derniers sont calculés dans la simulation interactive pour permettre la comparaison des deux solutions en termes de performances économique, opérationnelle et environnementale. Les différents indicateurs sont utilisés pour représenter les différents intérêts des parties prenantes (Holguín-Veras, 2008).

- Le premier indicateur de performance représente le coût financier total de la livraison des 200 points.
- Le deuxième indicateur de performance correspond au temps moyen d'une tournée de livraison. Cela représente la performance de la distribution en termes de délai d'exécution. Si la tournée est courte — c'est-à-dire rapide, il est possible de livrer davantage pendant les heures de pointe. Par exemple, il devient possible de livrer tous les clients après les heures de travail (entre 18h et 20h).
- Le troisième indicateur de performance vise à représenter la performance environnementale en estimant la quantité de particules fines générée par la distribution.

Ces indicateurs de performance sont calculés à partir de la solution donnée par le solveur et les paramètres décrits dans la section suivante.

Output	VRP	2EVRP
Number of drivers	3.0	1
Number of courriers	0	42.0
Total distance with vehicles (km)	114.5	29.47

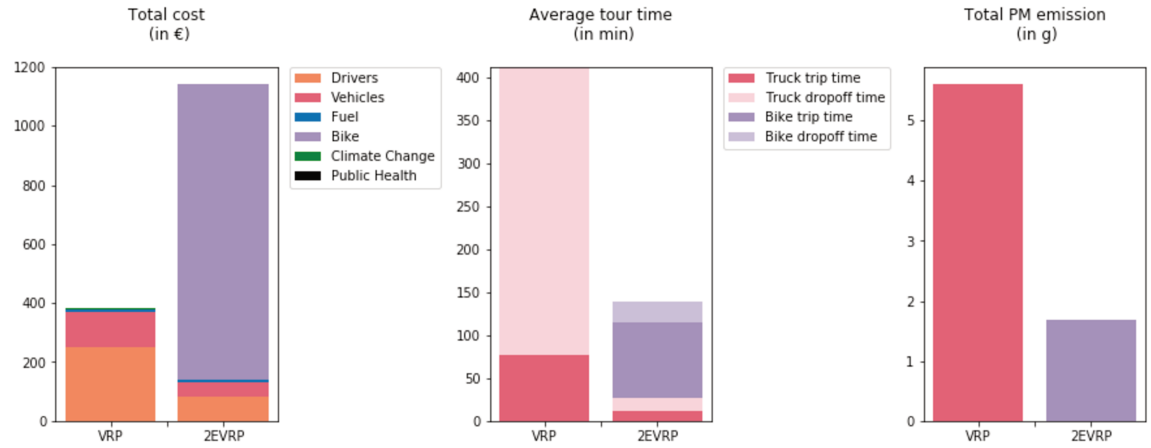

Figure 7 – Visualisation des indicateurs de performance de la simulation interactive pour un ensemble de paramètres donnés

2.1.4 Les paramètres

Le simulateur est initialement configuré avec les paramètres présentés dans les tableaux Tableau 3 et Tableau 4.

Coût journalier chauffeur : 83€/livreur	Temps moyen de livraison : 5 min
Coût journalier VUL : 40€/véhicule	Coût lié à la pollution de l'air : 0 ,017 €/km
Consommation d'essence : 7 L/100km	Coût lié au dérèglement climatique : 0,028 €/km
Vitesse moyenne du VUL : 30 km/h	Émission de particules fines : 0,049 g/km
Capacité d'un VUL : 80 livraisons	

Tableau 3 - Paramètres pour le modèle de distribution classique (HBEFA 3.3 2017 – Handbook Emission Factors for Road Transport; Korzhenevych et al., 2014)

Coût journalier chauffeur : 83€/livreur	Capacité d'un cargo-bike : 5 livraisons***
Coût journalier camion : 50€/véhicule	Temps moyen de livraison camion : 5 min
Consommation d'essence : 7 L/100km	Temps moyen de livraison cargo-bike : 5 min
Vitesse moyenne du camion : 30 km/h	Coût lié à la pollution de l'air : 0 ,017 €/km
Coût lié cargo-bike: 5 €/livraison	Coût lié au dérèglement climatique : 0,028 €/km
Capacité d'un camion : 200 livraisons	Émission de particules fines : 0,049 g/km

Tableau 4- Paramètres pour le modèle de distribution classique (HBEFA 3.3 2017 – Handbook Emission Factors for Road Transport; Korzhenevych et al., 2014)

Ces estimations sont basées sur des données relatives à la ville de Paris. Ces paramètres sont modifiables dans la simulation interactive à l'aide de curseurs (cf. Figure 8).

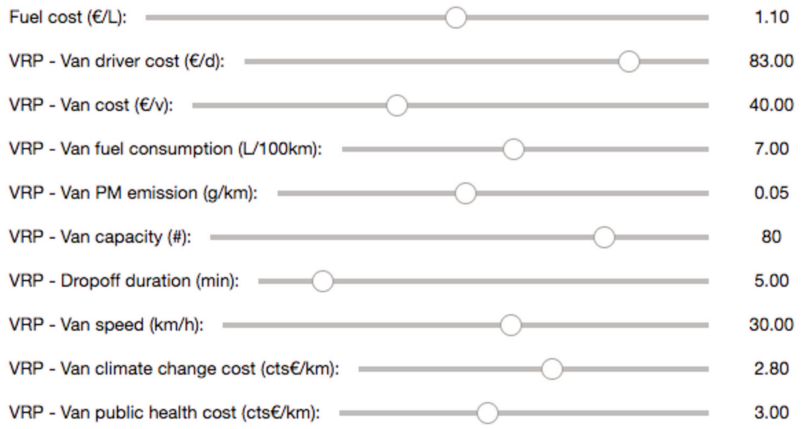

Figure 8 – Paramètres de la simulation interactive

2.2 Choix de modélisation pour un modèle ouvert

Dans notre méthodologie, notre démarche de modélisation débute avec un modèle simple développé par un expert en modélisation. De cette manière, la complexité du modèle peut augmenter graduellement afin de garder tous les utilisateurs dans la discussion. Cette section propose une application des principes présentés dans le chapitre 4 pour un modèle ouvert. Dans notre cas, nous décrivons la méthodologie suivie pour simplifier les variables de décision d'une part, puis la fonction objectif d'autre part.

2.2.1 Variables de décision

Pour simplifier les variables de décision, il est possible de tout simplement en supprimer. Ce principe est plutôt intuitif : moins il y a de choix possibles dans un modèle plus il est facile d'effectuer la comparaison pour en faire un. Bien sûr, le fait de limiter le nombre de variables de décision peut avoir un effet sur la validité du modèle. Mais, une fois le modèle compris, il sera possible d'en ajouter lors de la prochaine boucle d'itération.

Par exemple, pour le schéma de distribution alternatif, nous avons décidé de fixer l'itinéraire du camion dans la simulation : il est fixe pour tous les scénarios que l'utilisateur testera. Pour déterminer cet itinéraire, nous avons utilisé technique de clustering k-means de la bibliothèque sci-kit learn. La répartition des lieux de livraison (en fonction de leur localisation respective) en cinq groupes a permis de définir les livraisons servis par chacun des cinq arrêts du camion. Ensuite, nous avons calculé le centre de gravité de chaque groupe pour définir la position des différents arrêts. De cette manière, l'utilisateur n'a pas besoin de considérer l'influence des paramètres sur l'itinéraire du camion au regard des indicateurs de performance.

Dans les modèles utilisés, la stratégie d'optimisation ne dépend que d'une variable de décision : la capacité du véhicule. Nous justifions ce choix dans la partie suivante sur la fonction objectif.

2.2.2 Fonction objectif

Nous aurions pu faire le choix de représenter les trois indicateurs de performance dans la fonction objectif. Nous aurions cherché à minimiser le coût des opérations, le temps moyen d'une tournée et l'impact environnemental. Le Système d'Aide à la Décision aurait proposé un ensemble de solutions optimales : la frontière de Pareto que nous expliquons dans la suite.

Nous avons fait le choix de justement modéliser un seul objectif dans la fonction objectif : la distance parcourue par la flotte. C'est à partir de cette valeur que les trois indicateurs de performance sont calculés. Nous voulions tester si les utilisateurs pouvaient découvrir le principe de Pareto par eux-mêmes.

Le principe de Pareto repose sur la dépendance entre les objectifs contradictoires d'une fonction objectif. Par exemple, l'amélioration d'un objectif ne peut se faire qu'au détriment des autres objectifs. Dès lors, il existe un ensemble de solutions optimales indiscernables

au regard de la fonction objectif définie et le choix d'une solution doit s'appuyer sur d'autres critères.

Dans l'esprit du modèle ouvert, nous souhaitons limiter le niveau d'abstraction des indicateurs pour permettre aux utilisateurs de bien appréhender les compromis. De fait, nous n'utilisons pas une analyse coût-bénéfice qui consisterait à ramener les trois indicateurs à un seul indicateur financier. Par exemple, le coût de l'impact environnemental pourrait être estimé avec les coefficients proposés par l'Agence Européenne pour l'Environnement : un kilomètre parcouru a un coût estimé à 0,028 € pour la société. Faire cela, c'est mettre sur le même plan les considérations économiques et environnementales, positionnement non nécessairement partagé par tous. De plus, cette mise sur le même plan correspond à une couche d'abstraction supplémentaire qui n'est pas toujours comprise par l'utilisateur. Cela représente une double motivation pour éviter l'analyse coût-bénéfice.

Nous privilégions ainsi une approche considérant chacun des indicateurs séparement, bien que nous n'ayons pas mis en œuvre les méthodes d'analyse multicritères, comme par exemple Analytical Hierarchy Process ou ELECTREE (Beria et al., 2012). Les méthodes d'analyse multicritères (Macharis et al., 2010) permettent de mobiliser différentes parties prenantes pour établir un consensus sur le choix d'une solution par l'expression de leurs préférences entre des solutions vis-à-vis des indicateurs établis. Le consensus atteint par ces méthodes est le résultat d'un calcul d'optimisation pour maximiser la satisfaction des préférences exprimées. La sélection d'une solution parmi un ensemble peut s'avérer non homogène entre les méthodes, car ces dernières utilisent des stratégies d'optimisation différentes. Ainsi il n'y a pas de consensus sur la méthode cherchant justement à établir un consensus. À cela, nous ajoutons qu'une méthode d'analyse multicritères va concentrer les participants sur l'atteinte d'un consensus au niveau du choix d'une solution parmi d'autres, alors que nous avons établi que la difficulté de la décision reposait avant tout dans la modélisation du système et donc des solutions potentielles.

Nous proposons le modèle ouvert comme une alternative pour exposer les difficultés des méthodes d'analyse coût-bénéfice et d'analyse multicritères. Le modèle ouvert ne propose pas un ensemble de solutions optimales ou ne sélectionne pas une solution parmi un ensemble. Dans la méthodologie du modèle ouvert, la ou les solutions ne sont pas sélectionnées par un algorithme, c'est à l'utilisateur que revient la tâche de trouver le bon compromis entre les trois critères. La méthodologie place l'utilisateur dans une position de responsabilité face à sa décision : ce dernier utilise directement le modèle et non au travers d'un algorithme.

De plus, la modélisation mono objectif permet d'illustrer plus clairement les concepts de paramètres et de variables de décision. Au travers de l'exploration du modèle, l'utilisateur pourra se rendre compte que seule la capacité des véhicules pourra faire varier la distance parcourue.

Premièrement, comme la fonction objectif ne dépend que d'une seul variable de décision, il est plus facile pour l'utilisateur d'identifier la variable de décision (ici la capacité) parmi tous les paramètres de la simulation.

Deuxièmement, ce choix permet d'illustrer un concept de modélisation, la différence entre un paramètre et une variable de décision :

- un changement de paramètre peut modifier un ou plusieurs indicateurs de performance, mais il n'altérera pas les itinéraires des véhicules. Dans notre simulation, augmenter le prix de l'essence augmentera le coût tandis que les itinéraires resteront les mêmes.
- un changement de variable de décision modifiera la solution et par extension un ou plusieurs indicateurs de performance. Dans notre simulation, augmenter la capacité de chargement modifiera les itinéraires et potentiellement les indicateurs de performance.

Dans notre simulation, les utilisateurs sont forcés de jouer avec les paramètres, car les solutions n'apparaissent pas automatiquement. Cela les oblige à explorer le modèle pour comprendre les relations importantes qui régissent ces indicateurs, et illustrer un principe de modélisation.

2.3 Protocole d'expérimentation

L'outil de simulation interactive a été testé avec 28 participants de 11 nationalités différentes. Ils avaient tous une formation en ingénierie avec diverses spécialisations : architecture, génie civil, management de l'innovation, génie électronique, génie mécanique. Ce groupe de participants disposent de compétences techniques plus ou moins avancées sur la modélisation. En revanche, ils sont moins au fait des problématiques de la logistique urbaine. L'expérimentation s'est déroulée au milieu d'une semaine consacrée à la logistique urbaine, ce qui a permis aux étudiants d'avoir au préalable une connaissance de la problématique. Dans le cadre d'un déploiement de ce type d'expérimentation vers un public expert, nous devrons être attentif au renversement des compétences : les participants experts seront plus à l'aise sur la problématique que sur l'exercice de modélisation.

Les participants avaient 45 minutes pour tester le simulateur interactif. Initialement, ils étaient seulement guidés par le questionnaire présenté dans le *Tableau 5*. L'objectif était de tester la capacité des participants à comprendre par eux-mêmes les deux modèles proposés. Seule une information minimale a été donnée au début sur le fonctionnement de l'outil et sur les schémas de distribution. Les informations supplémentaires lors de l'expérimentation étaient seulement fournies à la demande des utilisateurs.

Pour cette expérimentation, une évaluation via un questionnaire et une observation directe ont été réalisées pour évaluer la compréhension des utilisateurs. L'observation directe est effectuée par la supervision de l'expérimentation. L'expert supervisait l'expérience, posait des questions pour aider, répondait aux questions et suivait le progrès des utilisateurs.

Nous avons séparé le questionnaire en deux parties : l'évaluation de la compréhension des utilisateurs et l'évaluation de l'outil par les utilisateurs.

2.4 Discussion sur l'expérimentation

2.4.1 Compréhension des utilisateurs

Le questionnaire a été développé pour guider les utilisateurs vers l'identification des composants clés de ces problèmes de distribution et pour évaluer leur compréhension. Les questions, ainsi que les scores de l'expérimentation sur 28 élèves sont présentées dans le *Tableau 5*.

Deux niveaux de compréhension des modèles sont identifiés. Le premier niveau est l'identification des paramètres et leurs interactions avec les indicateurs de performance. Dans cette perspective, l'utilisateur est testé sur sa capacité à comprendre les éléments fondamentaux du modèle. Le deuxième niveau est l'identification des incohérences possibles dans le modèle. L'utilisateur est capable de détecter les limites du modèle et peut proposer des améliorations.

Pour le premier niveau de compréhension, nous attendons des utilisateurs de parvenir à identifier les relations entre les paramètres, par exemple :

- Capacité, nombre de véhicules et distance : les véhicules de capacité inférieure devront réaliser plus de voyages afin de satisfaire la même demande. En conséquence, il y a plus de véhicules et la distance totale est augmentée.
- Délai et coût : davantage de véhicules réduiront le délai de livraison, mais augmenteront le coût.
- Certains paramètres (par exemple, le coût social lié au dérèglement climatique) ont un impact limité sur le coût total.

Pour le second niveau, nous attendons des utilisateurs de formuler des critiques argumentées sur le modèle, par exemple :

- Comprendre que les paramètres devraient avoir une influence les uns sur les autres. Par exemple, la consommation de carburant et les émissions de particules, la vitesse et la consommation de carburant, le prix de livraison et l'augmentation de la capacité, le coût pour la santé publique dépendent également de l'émission de particules de la motorisation.
- Identifier les paramètres manquants : choix de la localisation des arrêts du camion, coût du système d'information, coût du transbordement.
- Évaluer les limites des paramètres choisis. Par exemple, la vitesse moyenne peut être utilisée pour représenter la fluidité du trafic. Cependant, cela peut être une simplification excessive des phénomènes de trafic.

Nous avons établi une note moyenne à chacune des réponses en fonction des réponses des utilisateurs. Les réponses étaient sous la forme d'un choix Vrai / Faux (V / F) ou d'une rédaction (R) (cf. *Tableau 5*).

Questions	**Note**	**Niveau**
Dans la réalité, la capacité des véhicules influe sur la taille du parc. (V/F)	100 %	1
Dans la simulation VRP, la capacité des véhicules influe sur la taille du parc. (V/F)	79 %	1
Dans la simulation 2EVRP, la capacité des vélos a un impact sur le coût. (V/F)	76 %	1
Pourquoi 2EVRP est plus cher que le VRP ? (R) Que manque-t-il dans le modèle ? (R)	26 %	2
Quel serait le paramètre principal à modifier pour rendre le VRP aussi rapide que le 2EVRP ? (R)	76 %	1
Identifiez deux paramètres indépendants dans la simulation qui dépendent de la vie réelle. (V / F)	66 %	1
Identifiez deux paramètres manquants. (R)	60 %	2
Identifiez la limitation d'un paramètre. Pourquoi ne représente-t-il pas la réalité avec exactitude ? (R)	28 %	2
Identifiez deux paramètres ayant un impact limité sur la décision. (R)	43 %	2
La livraison d'un colis avec un vélo coûte en moyenne 5 euros. Comment les entreprises pourraient-elles diminuer leur prix moyen ? (R)	14 %	2

Tableau 5 - Questionnaire d'évaluation de la compréhension des utilisateurs

Premièrement, les résultats sont encourageants. Tous les utilisateurs se sont impliqués dans l'exercice. Bien qu'ils soient peu familiers avec les problèmes de logistique urbaine, ils ont été en mesure de traiter la plupart des questions de manière satisfaisante en peu de temps.

Deuxièmement, il y a une nette différence de performance entre les questions de niveau 1 et de niveau 2. Les utilisateurs ont plus de mal à formuler des critiques de l'outil (niveau 2), qu'à en comprendre son fonctionnement. De plus, il y a une grande disparité dans les résultats sur le second niveau. Une discussion directe au cours du test a montré que certains participants ont rapidement trouvé des failles dans le modèle. Au contraire, certains utilisateurs semblaient confus avec le concept de modélisation, et d'autres étaient déstabilisés par le fait d'étudier un modèle "faux".

Troisièmement, les réponses et les discussions ont montré que le manque d'expérience concernant l'optimisation mathématique et le manque d'information empêchaient les utilisateurs d'appréhender pleinement les modèles proposés.

En conclusion, la première partie de l'expérimentation nous a appris que l'utilisation basique était à la portée de ce type de public. À partir de questions précises, les utilisateurs sont en mesure d'utiliser l'outil pour analyser le problème et de formuler des recommandations. Cette évaluation a aussi montré la nécessité d'approfondir les concepts de modélisation et la démarche de modélisation participative afin que l'utilisateur soit en mesure d'adopter une démarche critique.

2.4.2 Évaluation de l'outil par les utilisateurs

Un second questionnaire a été établi pour évaluer leur intérêt pour l'outil et la possibilité de l'utiliser comme support de communication dans un cadre professionnel (cf Tableau 6). Pour répondre, les utilisateurs devaient choisir une valeur comprise entre 1 (fortement en désaccord avec la proposition) et 5 (fortement en accord avec la proposition).

Questions	**Score**
Vous avez compris les limites de l'outil en tant qu'outil utile comme support de communication. (1 - 5)	3,5
Vous êtes confiant pour expliquer le modèle et ses limites à un client. (1 - 5)	3,3
L'interactivité vous a aidé à explorer le modèle et ses limites. (1 - 5)	4
Envisageriez-vous d'utiliser l'outil pour enseigner à quelqu'un les modèles de VRP et 2EVRP ?	3,6
Pensez-vous que d'autres outils / solutions auraient pu être plus appropriés ? (R)	N/A
Avez-vous des commentaires ?	N/A

Tableau 6 - Questionnaire d'évaluation de l'outil par les utilisateurs

D'après le questionnaire et les discussions avec les utilisateurs, le retour principal est l'appréciation par ces derniers de l'utilisation d'un outil original. Les utilisateurs ont apprécié l'autonomie offerte par un outil facile d'accès, et certains se sentaient suffisamment guidés par le questionnaire pour explorer le modèle.

L'interactivité, qui est un élément constitutif de l'originalité de l'outil, a aussi été appréciée. Les utilisateurs ont estimé que cela les avait aidés dans leur compréhension des modèles. Bien sûr, il faudrait une nouvelle expérimentation avec un protocole plus lourd pour pouvoir estimer ce gain par rapport à d'autres méthodes (cours magistral, rapport, article scientifique, etc.).

Pour les points à améliorer, les utilisateurs ont fait remarquer :

- le manque d'ergonomie et de réactivité de l'outil ;
- le manque d'outils de visualisation pour l'analyse.

Cette évaluation n'était pas l'objectif principal de l'expérimentation. Nous avions une forte contrainte de temps et nous avons privilégié l'évaluation de la compréhension plutôt que l'évaluation du concept de simulateur interactif. En effet, l'utilité de ce concept devrait plutôt être évaluée pendant son utilisation dans une démarche de modélisation participative. Cependant, l'évaluation de l'outil a permis d'apporter quelques éclairages sur les attentes des utilisateurs et les retours ont été utiles pour la conduite d'une autre expérimentation avec un simulateur interactif.

3 Seconde expérimentation : la construction d'un consensus pour un modèle

Dans la section précédente, nous avons montré la pertinence du concept de modèle ouvert et de la simulation interactive pour permettre aux participants de mieux s'approprier un modèle. Dans cette section, nous décrivons une expérimentation dont le but était d'évaluer la possibilité de création d'un consensus sur le modèle entre les utilisateurs. Les conditions de l'exercice étaient plus proches de la méthodologie présentée dans le chapitre 4. Nous rappelons que l'objectif de cette démarche est d'aboutir à une solution consensuelle en nous appuyant sur une implication de toutes les parties prenantes. Pour aboutir à cette solution consensuelle, il est nécessaire au groupe de s'accorder sur les impacts estimés de différentes possibilités, et de les comparer pour en retenir la plus satisfaisante. Autrement dit, les utilisateurs doivent construire, comprendre et valider le modèle utilisé pour réaliser les estimations d'impact.

Nous avons proposé cette nouvelle expérimentation autour d'un cas d'étude où les utilisateurs devaient estimer les impacts de la mise en place de cinq tendances stratégiques sur deux entreprises de transport appartenant chacune à une filière différente (e-commerce et restaurant). L'expérimentation était découpée en trois grandes étapes au cours desquelles nous avons évalué leur opinion par rapport aux effets des réglementations et la confiance dans leurs réponses dans l'évaluation des impacts. Dans la première étape, nous avons demandé aux utilisateurs d'étudier individuellement le problème pour réaliser leur estimation. Cette étape était guidée par un questionnaire auquel ils devaient répondre. Dans la deuxième étape, les utilisateurs avaient accès au simulateur interactif pour estimer les impacts. Et dans la troisième étape, une discussion de groupe pour tenter d'arriver à un consensus sur les impacts était conduite par l'animateur de l'expérimentation.

L'objectif principal de l'expérimentation était de tester la méthodologie en permettant aux participants de prendre un rôle de concepteur plutôt que celui d'utilisateur. À la manière de l'expérimentation précédente, nous souhaitions évaluer la capacité de l'utilisateur à se servir de la simulation interactive pour comprendre et remettre en cause un modèle proposé. Mais dans cette expérimentation, nous voulions également évaluer l'intérêt de la composante participative de la méthodologie pour animer une discussion et pour converger vers une estimation commune de l'impact de différentes décisions, c'est-à-dire aboutir à un modèle commun. Le découpage en trois étapes devait permettre de suivre l'évolution des réponses des utilisateurs par le biais d'un questionnaire. Après le premier groupe, il est apparu que le cas d'étude était trop large pour exploiter les réponses des utilisateurs au questionnaire : les questions (et donc les réponses) étaient trop ambiguës.

Cependant, nous avons gardé les étapes pour animer les ateliers, et nous nous sommes limités à une évaluation qualitative des différents groupes.

Cette nouvelle expérimentation était aussi l'occasion de tester la simulation interactive sur un nouveau public. Nous avons ainsi pu tester les mêmes hypothèses sur la compréhension que lors de l'expérimentation précédente. De plus, nous avions plusieurs groupes d'utilisateurs avec des expériences différentes. Le premier était composé d'étudiants ayant le même profil que ceux de l'expérimentation présentée dans le chapitre précédent. Le second était composé de professionnels (11 du secteur privé et 1 du secteur public) proches des problématiques de la logistique urbaine. Le troisième groupe était composé de 12 élèves ingénieurs de MINES ParisTech. Nous avons ainsi pu évaluer les différences de comportement entre les différents publics. L'objectif était de tester une méthode pour familiariser les utilisateurs avec l'outil. L'expérimentation présentée dans le chapitre précédent a montré la difficulté de certains utilisateurs avec l'outil et les concepts de modélisation. En découpant l'expérimentation en plusieurs étapes, nous avons voulu présenter plus progressivement les concepts de modélisation et l'outil de simulation interactive.

3.1 Cas d'étude pour l'expérimentation

3.1.1 Problématique

Les villes sont confrontées à des problèmes complexes en matière de réglementation. En effet, une réglementation est généralement prise à l'échelle de la ville, mais ses effets sont hétérogènes selon les acteurs (expéditeurs, transporteurs, clients, etc.) et les filières. La diversité des acteurs et de filières rend difficile l'estimation de toutes les conséquences possibles suite à la mise en place d'une nouvelle règlementation. D'où l'intérêt d'une démarche de modélisation participative pour s'assurer de la pertinence d'une réglementation dont l'objectif est généralement macroscopique (c.-à-d. réduction des émissions polluantes) tandis que les effets seront à l'échelle microscopique (c.-à-d. nouvelles contraintes pour les schémas logistiques en place).

Nous proposons de limiter la problématique à un cas d'usage considérant le point de vue des transporteurs sur cinq tendances stratégiques au sein de la ville. Pour les utilisateurs, l'objectif est d'estimer l'impact de chaque tendance sur deux filières de la logistique urbaine : la livraison du *e-commerce* et les livraisons de restaurants. Ces deux activités de transport ont été choisies à cause de la différence claire dans leurs organisations logistiques, par exemple les contraintes des clients et les véhicules utilisés.

Nous avons identifié, à un niveau stratégique, cinq tendances représentatives des actions potentielles au niveau d'une ville. Les tendances stratégiques sont définies de façon parfois vague (qu'est-ce qu'un "camion" ? comment estimer la réduction de la consommation ?) pour tenter de faire émerger différentes interprétations entre les utilisateurs.

Les différentes tendances stratégiques sont :

- Taille du véhicule : interdiction des camions.
- Fenêtres horaires : livraisons uniquement autorisées entre 9h00 et 11h30.
- Réserve foncière destinée à la logistique : éloignement de l'entrepôt par rapport à la localisation de la demande.
- Motorisation : seules les motorisations EURO 5 et 6 sont autorisées.
- Développement durable : les clients sont encouragés à réduire leur consommation.

3.1.2 Modèle

Dans la première étape, les utilisateurs seront amenés à réfléchir à la méthode d'évaluation de ces tendances stratégiques. Dans les deuxième et troisième étapes, les tendances seront évaluées au regard des indicateurs de performance présentés dans la section suivante.

Le modèle proposé pour l'atelier est un problème de tournée de véhicules avec une capacité limitée. Dans la mesure où l'étude se place à une échelle stratégique, l'hypothèse de transporteurs avec une flotte infinie semble raisonnable : les transporteurs ont la flexibilité de modifier la taille de leur flotte grâce à la sous-traitance. Le modèle se base sur un système d'information géographique (issu de OpenStreetMaps) contenant les routes, les emplacements des clients et l'entrepôt.

Le modèle d'optimisation possède deux variables de décision. La première variable de décision est l'emplacement de l'entrepôt. Le premier choix est à Montrouge, juste en dehors de Paris. Le deuxième choix se situe à Rungis (15 km de Paris), une zone industrielle et commerciale bien reliée à Paris par les autoroutes, mais plus éloignée. La deuxième variable de décision est le type de véhicule. L'optimisation vise à minimiser la distance totale parcourue par la flotte.

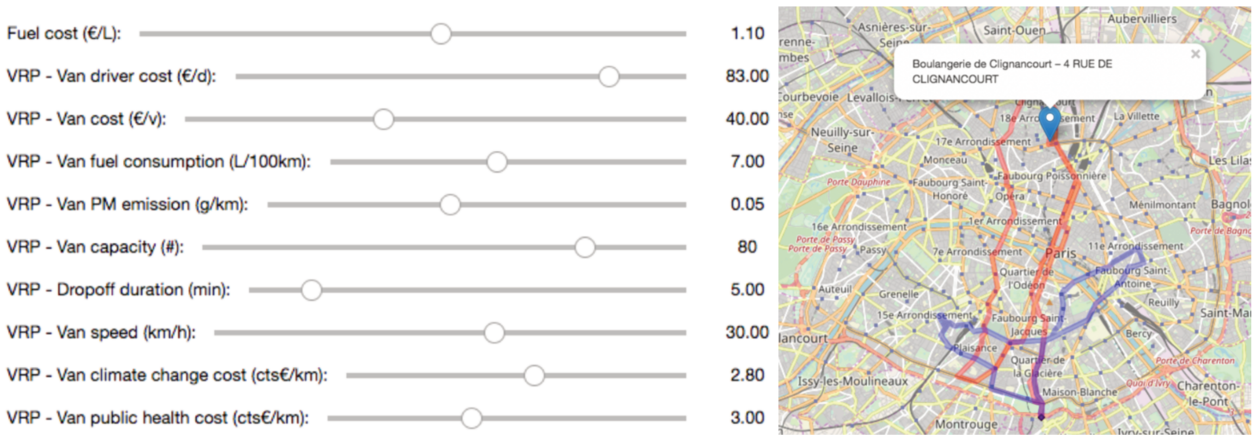

Figure 9 - À gauche, les paramètres du simulateur sont facilement personnalisables à l'aide de curseurs. Sur la droite, les itinéraires des véhicules sont tracés sur une carte.

3.1.3 Les indicateurs de performance

Les indicateurs de performance sont calculés sur la base des résultats d'optimisation (la distance parcourue des véhicules en km) et de paramètres modifiables présentés dans la section suivante. Nous avons proposé d'évaluer les mesures réglementaires du point de vue des transporteurs à travers trois indicateurs de performance (identiques au chapitre précédent) :

- Le premier indicateur de performance représente le coût financier total de la livraison de 200 points.
- Le deuxième indicateur de performance correspond au temps moyen d'une tournée de livraison. Cela représente la performance de la distribution en termes de délai d'exécution. Si la tournée est courte (c'est-à-dire rapide) il est possible de livrer davantage pendant les heures de pointe. Par exemple, il devient possible de livrer tous les clients après les heures de travail (entre 18h et 20h).
- Le troisième indicateur de performance vise à représenter la performance environnementale en estimant la quantité de grammes de CO2 générée par les véhicules.

Ces indicateurs sont communs aux deux filières de manière à pouvoir facilement comparer les effets des tendances stratégiques sur les deux filières de notre cas (e-commerce et restaurant), et à mettre en évidence la différence d'impact entre les réglementations menant probablement à des décisions différentes. Par exemple, les livraisons dans les restaurants sont soumises à de fortes contraintes de temps avant le déjeuner (entre 9 h et 12 h). Si les véhicules sont déjà à pleine capacité, il n'y a aucune motivation apparente pour améliorer leur rapidité de livraison, car il n'est pas possible de livrer l'après-midi (pas assez de temps dans une journée de travail) ni d'utiliser un véhicule plus gros (le véhicule serait plus coûteux et avec un faible taux de remplissage). Au contraire, pour les livraisons e-commerce qui peuvent être effectuées toute la journée, le transporteur peut choisir d'allonger les tournées avec des véhicules plus grands ou d'effectuer plusieurs tournées par livraison, car le livreur a encore du temps pour effectuer d'autres livraisons et remplir le véhicule. Par contre, le transporteur e-commerce privilégiera aussi la petite taille de ses véhicules pour faciliter le stationnement près des points de livraison.

Ces indicateurs ont été choisis pour leur relative simplicité et leur influence connue sur les filières. La limite évidente est que les indicateurs de performance ne sont peut-être pas adaptés à un certain type d'activité. Par conséquent, les participants sont amenés à réfléchir à la modification ou l'ajout d'indicateurs de performance pour améliorer le modèle.

3.1.4 Les paramètres

Les paramètres sont aisément accessibles par l'interface graphique du simulateur. La Figure 10 est une capture d'écran représentant un ensemble de paramètres donné pour un scénario de simulation.

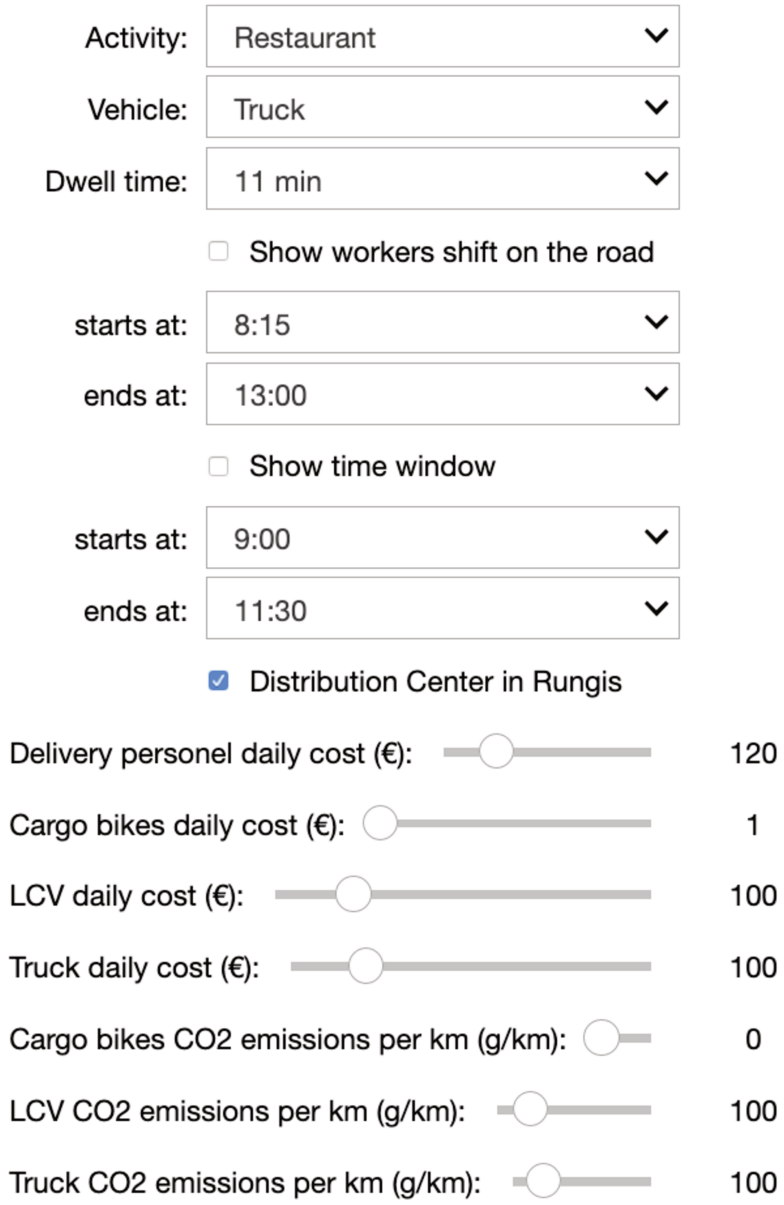

Figure 10 – Paramètres de la simulation interactive

Le premier paramètre que l'utilisateur peut choisir est la filière : restaurant ou e-commerce. Ce choix aura une influence sur le second paramètre : le type de véhicules (vélo cargo, véhicule utilitaire ou camion). En effet, la capacité d'un véhicule est modélisée par le nombre de clients servis. Or les livraisons pour les restaurants sont plus volumineuses que les livraisons pour le e-commerce.

Les capacités des véhicules en fonction de la filière et du véhicule sont présentées dans le *Tableau 7*.

	Vélo cargo	**Utilitaire**	**Camion**
Restaurants	1 client	5 clients	15 clients
E-commerce	25 clients	50 clients	100 clients

Tableau 7 - Capacité de chargement des véhicules en fonction de la filière e-commerce ou restaurants

	E-commerce	**Restaurant**
Nombre de clients	200	200
Capacité des véhicules	50	15
Centre de distribution	Beaugrenelle	Rungis
Durée moyenne d'une livraison	2 min	11 min

Tableau 8 – Description des deux types de transporteurs (e-commerce et restaurants)

Le troisième paramètre est le temps moyen pour effectuer une livraison : temps nécessaire pour se garer et remettre la livraison. Le quatrième paramètre est l'heure à laquelle débute la journée de travail. Les paramètres comme la fin de la journée de travail, le début et la fin de la fenêtre n'ont pas d'impact sur les indicateurs. Ce sont des repères visuels permettant aux utilisateurs de visualiser plus facilement si la journée de travail est trop longue ou si la tournée empiète en dehors de la fenêtre. Ensuite, un ensemble de paramètres relatifs aux coûts journaliers des différents véhicules pour estimer l'indicateur de performance sur le coût. Enfin, un ensemble de paramètres pilote les émissions de CO2 par kilomètre parcouru pour estimer l'indicateur de performance environnemental.

3.2 Choix de modélisation pour la proposition d'un modèle

Après avoir présenté le déroulement des étapes de l'expérimentation, nous présentons les choix de modélisation faits pour le modèle initial. Nous détaillons trois choix de modélisation illustrant le principe d'un modèle ouvert décrit dans le Chapitre 4.

3.2.1 Fonction objectif

La fonction objectif du problème d'optimisation vise à minimiser la distance parcourue par la flotte de véhicule. La simplicité de l'objectif permet aux utilisateurs de comprendre plus facilement le modèle, et à la fois une grande flexibilité du modèle.

Le choix de ne pas optimiser les indicateurs de performance, c'est la liberté de ne pas associer des préférences entre ces derniers. Ainsi l'utilisateur peut imaginer le transporteur selon son positionnement stratégique. Le positionnement stratégique d'un transporteur de masse visera l'abaissement des coûts, tandis qu'un transporteur haut de gamme privilégiera la rapidité. Le modèle ouvert permet d'illustrer que deux

transporteurs avec la même activité ne préféreront pas les mêmes indicateurs de performance.

3.2.2 Contrainte sur la capacité des véhicules

La capacité est une contrainte explicite dans le modèle d'optimisation. La contrainte sur la capacité est considérée comme le nombre moyen de commandes pouvant tenir dans un véhicule. Un choix de simplicité a été fait sur cette contrainte : le poids ou la taille des commandes ne sont pas pris en compte. Cela offre la possibilité de comparer différentes activités au sein d'un même modèle. En effet, certaines entreprises sont limitées par le poids de la commande (construction, industrie alimentaire), tandis que d'autres sont limitées par la taille de la commande (livraison de meubles). De plus, cela rend évidemment les choses plus faciles à comprendre pour les utilisateurs.

Anand et al. (2012) et Holguín-Veras et al. (2018) ont montré la difficulté de modéliser cette contrainte, car les marchandises peuvent nécessiter différents types de camions ou le service peut être différent. De plus, les entreprises ayant des commandes de poids différents (ou de tailles différentes) peuvent difficilement optimiser leurs plans de chargement de véhicules. C'est l'occasion d'illustrer la difficulté de modélisation et le coût pour la collecte de données de cette contrainte. En portant cet exemple à la connaissance des utilisateurs, il est alors possible de leur permettre de s'interroger sur la nécessité d'adopter une modélisation plus fine alors que les gains sont potentiellement coûteux et incertains.

3.2.3 Contrainte sur les fenêtres de livraison

Le respect des créneaux horaires de livraison est une contrainte implicite dans le modèle initial proposé. L'utilisateur doit régler lui-même les paramètres pour respecter la contrainte des fenêtres temporelles. Ce choix est motivé par deux éléments. Premièrement, la contrainte peut être aisément résolue par l'utilisateur (p. ex. la tournée doit commencer plus tôt ou le nombre de colis doit diminuer) ce qui l'oblige à chercher la relation entre les paramètres et l'indicateur de performance.

La non-résolution de la contrainte permet de la mettre en avant : les créneaux horaires sont fondamentaux pour comprendre les décisions opérationnelles, et finalement stratégiques des transporteurs. Généralement les créneaux horaires sont limités par la durée de travail des chauffeurs-livreurs, l'horaire d'ouverture des clients et la réglementation en vigueur en ville. En plus de mettre en exergue cette contrainte réelle, son absence permet de questionner la nécessité de l'intégrer dans le problème d'optimisation. Est-ce que les utilisateurs ont besoin de représenter formellement cette contrainte ? Ou bien, en vue de conserver la simplicité du modèle n'est-il pas suffisant de simplement connaître son existence sans avoir besoin de la représenter explicitement dans le modèle ?

3.3 Protocole d'expérimentation

L'expérimentation portait sur un unique cas d'étude divisé en trois grandes étapes, au cours desquelles les utilisateurs étaient amenés à réfléchir successivement. Les objectifs de la mise en place de cette expérimentation étaient conformes à notre volonté d'évaluer l'effectivité de la méthodologie de modèle ouvert : évaluer la capacité des utilisateurs à prendre part à une démarche de modélisation participative et évaluer les différences entre les types d'utilisateurs (néophytes et experts). Le premier groupe (néophyte) était composé d'étudiants, ils avaient tous une formation en ingénierie et peu de connaissances en matière de logistique urbaine, de modélisation et de recherche opérationnelle. Le second groupe (experts) était composé de professionnels proches des problématiques de la logistique de la ville. Le troisième groupe (néophyte) était composé d'élèves ingénieurs de MINES ParisTech qui possédaient tous un bagage important en modélisation.

L'évaluation a été réalisée via un questionnaire en ligne unique que les utilisateurs devaient remplir avant chaque nouvelle étape de manière à ce que nous puissions observer l'évolution de leurs réponses et l'observation des trois groupes d'utilisateurs. Le questionnaire établi demandait aux utilisateurs s'ils considéraient qu'une tendance serait susceptible d'affecter un type de transporteur plutôt qu'un autre. Pour cela, nous avons demandé aux utilisateurs d'évaluer chaque réglementation avec une échelle de 1 à 5 : (1) la tendance n'affecte que les livraisons du *e-commerce* et (5) la tendance ne concerne que les livraisons des restaurants. De plus, l'utilisateur devait estimer le degré de confiance qu'il portait à sa réponse.

3.3.1 Étape 1 - Modèle "papier"

La première étape a pour objectif de faire émerger pour les participants la nécessité de s'appuyer sur un modèle pour faciliter la résolution du cas, tout en leur permettant de se familiariser avec le problème. Ainsi, lors de cette étape, l'utilisateur dispose seulement de la présentation du cas d'étude ainsi que des différentes réglementations. Nous avons donc nommé cette étape "modèle papier", car les utilisateurs ne disposent pas encore de la simulation interactive.

L'animation de cette étape, consiste à proposer une manière de modéliser le problème comme un problème de tournée de véhicules. Nous présentons ainsi les deux activités de transport avec leurs caractéristiques et les indicateurs de performance. L'utilisateur n'est pas obligé d'utiliser le modèle proposé, il réalise individuellement son estimation des impacts des différentes tendances.

Pour répondre au questionnaire, les utilisateurs peuvent utiliser le modèle qu'ils ont imaginé pour quantifier l'impact sur les indicateurs de performance. À partir de cette information, les utilisateurs doivent imaginer quelle tendance serait susceptible de changer l'organisation actuelle des transporteurs et quelle décision serait prise en réaction par ces derniers ?

L'animateur accompagne les utilisateurs seulement pour les "débloquer" afin que tous les utilisateurs puissent continuer à participer. À ce stade, nous n'introduisons pas les concepts qui pourraient leur permettre d'aborder le problème plus systématiquement, comme par exemple celui de positionnement stratégique pour les transporteurs. Si un

utilisateur averti demande quel est leur positionnement stratégique, l'animateur laisse cette question à son appréciation. Ainsi, l'utilisateur devra établir la priorité du transporteur entre les différents indicateurs de performance sans information supplémentaire.

Finalement, les utilisateurs doivent établir une comparaison des deux transporteurs pour l'évaluation (de 1 à 5) de chaque tendance et annoncer le degré de confiance qu'ils accordent à leur réponse. L'utilisateur peut compléter son évaluation avec une réponse rédigée pour justifier sa réponse.

3.3.2 Étape 2 - Simulation interactive

Dans l'étape suivante, l'utilisateur dispose de la simulation interactive pour réaliser l'estimation des impacts des tendances. Mais il n'est pas autorisé à interagir avec les autres participants. Le modèle utilisé est une sophistication du modèle présenté dans l'étape 1.

L'utilisateur peut explorer le modèle via l'interface interactive pour tester différents scénarios. De la même manière que dans l'étape précédente, l'utilisateur doit répondre au même questionnaire.

À la fin de cette étape, l'utilisateur est familiarisé avec le problème d'étude, mais aussi avec la notion de modèle, dont il a pu commencer à se saisir. Cependant, puisque des discussions n'ont pas eu lieu, on devrait observer différentes propositions, qui refléteront des points de vue individuels (ou la position d'une partie prenante spécifique).

3.3.3 Étape 3 - Modélisation participative

Dans la dernière étape, l'utilisateur échange avec le groupe pour tenter d'établir une estimation commune des impacts à chaque tendance.

Cette étape correspond à la phase de prise de décision et met en exergue la nécessité d'atteindre un consensus sur le modèle de manière à pouvoir discuter des effets réels, et des différentes réactions possibles des transporteurs face aux différentes tendances. En effet, il s'agit pour les participants d'imaginer les réactions des transporteurs qui tenteraient d'anticiper différentes tendances. Par exemple, les participants doivent prédire la décision du transporteur à la suite de l'interdiction des camions. Cette étape ne peut être réalisée que si un consensus sur le modèle a été atteint puisque pour cela, les participants doivent valider le modèle en se demandant par exemple : les opérations du transporteur modélisées sont-elles représentatives de son activité ? Les indicateurs sont-ils significatifs ? Les indicateurs fournissent-ils suffisamment d'informations pour prédire la décision du transporteur ? Sinon, les participants doivent proposer des améliorations au modèle. La validation du modèle par les participants ne devrait être atteinte qu'après plusieurs itérations.

Dans cette étape, l'animateur donne la parole au groupe de manière à ce que chacun puisse décrire son évaluation des différentes tendances stratégiques d'une part et leur avis sur le modèle (que faudrait-il ajouter ou retirer selon eux).

Dans cette partie, les utilisateurs sont encouragés à utiliser la simulation interactive pour étayer leurs propos. Un utilisateur peut décrire un scénario de simulation en partageant

les différents paramètres choisis. Les autres utilisateurs peuvent tester ce scénario et discuter de la pertinence des choix de paramètres ou des limites du domaine de validité du modèle par exemple.

L'objectif, pour cette dernière étape, était de fournir une réponse commune à chaque tendance. Cependant, si un consensus ne peut être atteint (faute de temps ou de modèle initial satisfaisant), les participants donnent leur propre opinion dans le questionnaire.

3.4 Discussion sur l'expérimentation

Dans cette expérimentation, nous avons cherché à évaluer la capacité des utilisateurs à prendre part à une démarche de modélisation participative et évaluer les différences entre les types d'utilisateurs (néophytes et experts). L'expérimentation réalisée sur différents groupes (ingénieurs non experts de la logistique urbaine et experts de la logistique urbaine, mais non ingénieurs) a permis de dégager différentes compréhensions de l'utilité du modèle et de la méthode du modèle ouvert.

La présentation des résultats se concentrera essentiellement sur les retours écrits des participants, les observations et les discussions des participants lors l'expérimentation. Comme nous l'avons expliqué en introduction, les réponses au questionnaire n'ont pas fait apparaître de changements interprétables pour conclure de la pertinence de la méthodologie et de la simulation interactive. Dans cette section, nous présenterons d'abord la réaction des participants face un problème de modélisation avec un outil de simulation interactive. Ensuite, nous nous intéresserons à la façon dont les participants ont abordé le concept de modélisation participative. Enfin, nous proposons une piste pour la mise en œuvre de la méthodologie du modèle ouvert dans un contexte réel.

3.4.1 Interactivité et implication dans la participation

L'expérimentation sur les groupes néophytes a permis de mettre en avant le lien entre le niveau de maîtrise des concepts de modélisation et les attentes sur la complexité du modèle. En effet, aucun des participants néophytes n'avait de connaissance approfondie des problèmes de logistiques urbaines. Cependant, comme dans l'expérimentation précédente, nous avons pu noter une disparité importante au sein du premier groupe néophyte dans la maîtrise de l'outil. Cela peut être expliqué par les différences de cursus au sein du groupe : seule une partie du groupe était composée d'étudiants ingénieurs ayant une certaine aisance avec les concepts de modélisation. Les observations sur le second groupe néophyte nous ont permis de confirmer cette intuition, puisqu'il était exclusivement composé d'étudiants ingénieurs qui n'ont pas eu de mal à s'approprier l'outil.

À partir de là, nous avons pu constater que les moins à l'aise avec l'outil auraient souhaité plus d'explications sur le modèle et le contexte. À l'inverse, les étudiants ingénieurs, dont les commentaires illustrent qu'ils avaient bien intégré les principes de la modélisation, souhaitaient plus de paramètres, c'est-à-dire un modèle plus complexe.

Ce constat met en exergue certaines difficultés. Les participants ont besoin d'avoir une maîtrise minimale du problème de la logistique urbaine ou des concepts de modélisation. Dans les cas où ceux-ci maîtriseraient les concepts de modélisation, mais non pas ceux de

la logistique urbaine, ils semblent avoir tendance à se concentrer sur des aspects techniques, plutôt que sur l'objectif de résolution du problème à travers un consensus. Ce constat était étayé par le fait, par exemple, qu'un participant mentionne qu'il avait des difficultés à utiliser le modèle proposé, et qu'il aurait préféré créer le modèle lui-même. On remarque qu'alors que ce participant a un niveau technique assez élevé, puisqu'il serait en mesure de créer une modélisation, il ne parvient pas à se saisir d'un outil, que pourtant d'autres participants moins techniques finissent pas maîtriser. On peut alors se demander si ce n'est pas parce qu'il aurait voulu déplacer le problème : d'un problème décisionnel passer à un problème technique.

À l'inverse, ceux qui maîtrisent moins bien l'outil auront tendance à se concentrer sur le problème, qui leur semble peut-être plus compréhensible, ce qui est illustré par leur demande d'obtenir plus d'informations sur le problème. En réalité cette demande s'intègre bien dans la démarche de modélisation participative, et dans l'expérimentation telle que nous l'avons menée. En effet, le temps de réflexion individuel, et le découpage de l'expérience en trois étapes, ont porté ses fruits. Non seulement nous avons observé une plus grande participation à la fin de l'expérimentation, en particulier pour le groupe néophyte, mais les participants eux-mêmes ont exprimé qu'ils étaient plus à l'aise au fur à mesure de l'expérimentation. D'une part, un participant mentionne qu'il a réussi à bien cerner le problème grâce au découpage de l'expérimentation en plusieurs étapes ainsi que les questions sur l'étude. De plus, nous attribuons aussi ce succès au temps de réflexion individuel laissé à chacun, qui leur a permis dans un premier temps de se saisir du problème, en éloignant la difficulté jointe de se saisir de l'outil.

Ainsi, nous avons pu observer que le bon déroulement de la démarche nécessitait une connaissance, au moins basique préalable du problème. Si celle-ci n'était pas déjà acquise (comme avec le groupe d'experts dont nous discuterons ensuite), elle pouvait l'être grâce à un découpage de l'expérience en plusieurs étapes, et en prenant en considération le temps de réflexion individuel, qui permettait aux utilisateurs d'avancer à leur rythme. Ils pouvaient ainsi réfléchir à leurs réponses et construire leur argumentation en amont de la prise de parole. Cependant, et de manière contre-intuitive, une maîtrise technique des concepts de modélisation sans connaissance préalable du problème de la logistique urbaine pouvait être dans certains cas un frein à l'appropriation du problème décisionnel. En effet, nous avons observé un risque inattendu, qui est que ceux-ci se concentrent sur ce qu'ils connaissent, c'est-à-dire des aspects purement techniques, sans parvenir à saisir les enjeux du problème et obtenir une vision d'ensemble. Pour une nouvelle expérimentation, il serait intéressant d'évaluer la capacité des participants à intégrer la démarche, dans le cas où ils auraient une double maîtrise, aussi bien technique de la modélisation, que du problème de la logistique.

Les commentaires du groupe néophyte confirment la pertinence d'une démarche de modélisation participative. Par exemple, un participant précise qu'il est difficile de conclure définitivement sur le problème, mais que l'atelier permet d'ouvrir le débat. C'est une remarque encourageante dans la mesure où la principale motivation de la méthodologie est avant tout l'échange entre les parties prenantes pour l'expression de leur point de vue. Bien sûr, il était impossible pour les personnes néophytes de s'exprimer sur la validité du modèle. De plus, malgré le fait que les participants les plus techniquement aguerris aient eu tendance à se concentrer sur les aspects techniques du problème, le

participant qui a mentionné qu'il aurait préféré faire le modèle lui-même a aussi confirmé qu'il était enclin à s'investir dans cette tâche. Même si l'objectif de l'expérimentation n'était pas précisément celui-ci, nous voyons comme positif le fait que la démarche déclenche une volonté d'investissement.

En conclusion, les expérimentations avec les groupes néophytes ont démontré qu'une compréhension individuelle basique du problème est nécessaire avant de pouvoir mettre en œuvre l'utilisation d'un modèle ouvert et que la simulation interactive seule n'a pas d'intérêt pour un public néophyte. Les participants doivent être accompagnés dans une démarche où ils sont mis en situation et guidés vers les questions importantes.

Le groupe expert a globalement considéré le modèle de simulation comme assez simple, bien que globalement représentatif des opérations et des contraintes des transporteurs. Cette conclusion indique que le modèle, malgré sa simplicité (et donc son accessibilité), peut être un outil pour analyser la logistique urbaine au moins sur des considérations générales. Par exemple, le modèle permet d'illustrer l'impact de la capacité des véhicules ou de l'instauration d'horaires de livraison sur les opérations des transporteurs. En revanche, le groupe expert ne s'est pas prononcé sur la validité du modèle pour répondre à la problématique de l'étude de cas.

À l'issue de l'expérimentation, le groupe expert s'est rapidement aligné sur des propositions d'amélioration du modèle. L'expérience leur a permis d'identifier des paramètres et des indicateurs de performance supplémentaires dont ils se servent pour leurs opérations. Le groupe a considéré que pour mieux répondre à l'analyse des différentes tendances stratégiques, le modèle devait contenir les paramètres suivants :

- Le poids moyen livré
- Le volume moyen livré
- Le délai espéré par les clients (niveau de service)
- La notion de fréquence de livraison

Le groupe a proposé les indicateurs de performance suivants :

- Le délai effectif pour la livraison
- Le taux de remplissage des véhicules (disponible, mais non affiché, proche de 90% dans les scénarios)

Une discussion sur la pertinence de ces ajouts a soulevé des questions intéressantes de modélisation. Le groupe considérait comme importante la prise en compte de la notion de temps pour représenter la fréquence et le délai de livraison. En réalité, la discussion n'a pas permis de trancher si cette notion était indispensable pour répondre aux questions de l'étude de cas. La difficulté de cet arbitrage montre aux participants le défi de la modélisation. Le modèle peut être de plus en plus complet, mais cela ne permet pas forcément de mieux répondre à la question de l'étude. Nous pensons que la mise en situation des participants dans le rôle de concepteur permet d'illustrer en pratique la différence entre le problème considéré, le modèle créé, et le système d'aide à la décision.

Cet arbitrage permet d'illustrer que la complexification par l'ajout de paramètres ou d'indicateurs n'est pas "gratuit". D'une part pour la conception, il est nécessaire de caractériser ces nouveaux éléments et de les intégrer dans le modèle. C'est une source de travail supplémentaire qui doit être justifiée par l'espérance d'une plus grande utilité du modèle. Et d'autre part, dans l'analyse, le modèle devient plus dur à comprendre. Un participant du groupe expert s'est déclaré soulagé d'avoir à analyser un modèle avec finalement peu de paramètres.

Malgré la « simplicité » du modèle, l'exercice de modélisation est difficile. Une bonne partie de la discussion s'est cristallisée pour les deux groupes sur l'interaction avec la simulation. Le groupe néophyte a apprécié l'aspect ludique de l'outil et la facilité d'utilisation malgré une interface perfectible. Le groupe expert a aussi souligné le besoin d'améliorer l'interface. Une grande partie de la discussion avec le groupe expert a porté sur la représentation des indicateurs de performance (e.g. représentation sur une carte). La question de la visualisation a permis de mettre en évidence que l'interface était un aspect important à prendre en compte pour l'outil. Et qu'au même titre que le modèle, l'interface devrait être un sujet de discussion pour l'amélioration. C'est un point important à intégrer dans la méthodologie pour impliquer les participants. Il ne suffit pas de sélectionner les bons indicateurs, il faut qu'ils soient aussi facilement interprétables par les utilisateurs. Cela met en avant le double niveau de difficulté : l'outil modélise le problème, et par cette modélisation expose ce même problème à la connaissance des participants.

3.4.2 Modélisation participative dans un contexte professionnel

La discussion avec le groupe expert a été l'occasion d'échanger sur la possibilité d'utiliser cette méthodologie dans un contexte professionnel. Il ressort que cet outil serait plutôt destiné à des discussions entre experts pour l'étude, et moins à l'arbitrage par les décideurs finaux. En effet, l'activité de modélisation est chronophage, sans même parler de la négociation pour arriver un modèle consensuel. Il a été proposé que les décideurs finaux puissent s'appuyer sur leur équipe opérationnelle pour la réalisation et la validation du modèle pour arriver à la création de plusieurs scénarios avec l'estimation des impacts. Les résultats de ces travaux ne seraient pas forcément présentés au travers d'une simulation interactive, mais sous la forme d'un rapport et d'une présentation. Ainsi les décideurs finaux effectueront la négociation et l'arbitrage entre différentes solutions sur la base de leurs experts.

Malheureusement, il est probable que cette proposition se heurte à des problèmes méthodologiques dans le contexte de son utilisation réelle. Pour appuyer cette affirmation, nous nous baserons sur les échanges dans le groupe expert. L'atelier avec le groupe expert a été aussi l'opportunité de discussions sur la logistique urbaine qui sont primordiales pour la modélisation participative. Elles illustrent la difficulté d'un exercice de transparence vis-à-vis des acteurs eux-mêmes et vers l'extérieur. Nous évoquerons deux discussions.

La première discussion révélait le manque de visibilité sur les objectifs des autres parties prenantes. En effet, pour proposer une solution qui convient à tous, il faut comprendre les motivations de chacun. En réalité, il s'avère que les acteurs ont parfois des objectifs

contradictoires, et ces derniers ont une difficulté à l'exprimer. On peut supposer trois causes pour expliquer cette difficulté.

La première tient à la structure des organisations impliquées dans la discussion. L'expert couvre un domaine plus ou moins limité dans les activités ou le niveau de décision de son organisation. Les experts présents étaient à un niveau opérationnel, alors que le modèle a été conçu pour être utilisé à un niveau stratégique. Comme dans le groupe néophyte, les participants s'attachaient à des aspects techniques plutôt qu'à la construction d'une vision d'ensemble. Par exemple, dans la sphère privée, un responsable logistique n'est pas forcément au fait des enjeux marketing ou commerciaux spécifiques à son organisation. L'implication du décideur final qui possède une vision plus large de son organisation dans le processus de modélisation participative permettrait de limiter cette difficulté pour intégrer les enjeux logistiques aux enjeux marketing et commerciaux.

La deuxième cause est la difficulté de la quantification de certains objectifs. Par exemple, la notion de qualité de vie pourrait être quantifiée par une agrégation d'indicateurs comme le pouvoir d'achat, la mixité sociale, le nombre de kilomètres de pistes cyclables, etc. Mais quelle est l'importance de chacun de ces indicateurs dans la qualité de vie ? De plus, ces considérations seront variables en fonction de la ville, du pays et du pouvoir politique en place.

La troisième cause touche au caractère politique de la définition des objectifs. Cela semble d'autant plus prégnant dans le cas d'une ville où les responsables sont évalués à échéances régulières lors des élections. Par exemple, l'explicitation des objectifs et des priorités rend leurs auteurs responsables de leurs actions. Le risque de l'échec d'une solution et de devoir en porter la responsabilité pousse à l'adoption d'un statu quo. Citons l'exemple de Simon (1990) sur la possibilité de détourner un ouragan pour sauver une ville. Si le décideur ne fait rien, il pourra difficilement être tenu responsable puisque c'est une catastrophe naturelle. En revanche, s'il détourne effectivement l'ouragan, et que par malheur ce dernier ravage une ville voisine alors le décideur devient responsable. Ce décideur est encouragé à maintenir le statu quo pour ne pas engager sa responsabilité.

La deuxième discussion a mis en exergue le risque de la délégation de décisions stratégiques à des organes extérieurs qui seraient experts. Cet exemple rappelle que la désignation d'un expert nécessite une expertise préalable pour s'assurer de la qualité d'un cabinet de conseil. Les participants ont évoqué l'expérience d'une municipalité ayant fait appel à un cabinet de conseil pour aider la ville en matière de réglementation de l'accès en ville des véhicules de livraison. La municipalité s'apprêtait à entériner des décisions empêchant un transporteur de livrer en heures creuses, une initiative à priori vertueuse de la part du professionnel. Le cabinet de conseil ne s'était apparemment pas assez impliqué sur le terrain et il n'était pas allé à la rencontre des professionnels pour prendre connaissance de leurs initiatives. Cette discussion révèle une méconnaissance de la municipalité dans le domaine de la logistique urbaine qui s'apprêtait à baser leur décision sur une expertise « relative ». La sous-traitance d'une étude n'est pas un problème en soi, en revanche la ville devrait être en mesure d'analyser avec un œil critique une étude qui touche à une fonction essentielle de la ville. Cette discussion montre l'intérêt du développement des connaissances sur la modélisation et la logistique urbaine vers les collectivités locales (et les citoyens) pour avoir le recul nécessaire dans l'évaluation de travaux de modélisation.

Au regard des discussions, la proposition établie lors de l'atelier pour la délégation de l'analyse à des groupes d'experts opérationnels ou à des groupes d'experts consultants s'apparente à une délégation de la décision. Dans le cadre de l'étude d'un système complexe, il est nécessaire de reconnaître cette tension. Si la délégation de la décision est effective, on prend le risque de n'atteindre qu'un optimum local : la décision est bonne pour la problématique étudiée, mais les impacts sur d'autres problématiques (logement, insertion sociale, etc.) ne sont pas pris en compte. En revanche, l'analyse sera difficilement étanche à la décision comme nous l'avons montré dans le chapitre 3. Nous pouvons illustrer ce manque d'étanchéité dans cet atelier : la proposition était justement de soumettre différents scénarios au décideur. Par la limitation du choix, est-ce que les scénarios ne constituent-ils pas déjà une forme de décision faite par l'analyste ? Cet exemple montre que la question de la frontière entre analyse et décision mérite réflexion dans le processus de décision d'une organisation.

Bien sûr, cela répond à une démarche pragmatique, car le décideur n'a pas forcément le temps pour mener l'analyse complète d'un problème. Toutefois, à l'égard du coût d'une mauvaise décision, le décideur ne devrait-il pas revoir les priorités ? Ou se voir confier des moyens plus importants pour réaliser sa mission ? La tension sur la question de la délégation interroge effectivement notre capacité à utiliser des outils de modélisation, mais aussi sur l'organisation de la prise de la décision.

4 Conclusion du chapitre

Dans cette thèse, nous proposons une méthodologie pour la création d'un Système d'Aide à la Décision. Cette méthodologie qui repose sur le principe d'un modèle ouvert associé à la simulation interactive vise à inclure les parties prenantes dans le processus préalable à la prise de décision : la modélisation de la problématique.

La première expérimentation a eu pour objectif d'évaluer l'utilité de la méthodologie de la modélisation participative pour permettre à des néophytes de la logistique urbaine de se saisir d'un problème simple et d'y apporter une solution. L'expérimentation met en évidence que l'interactivité aide les utilisateurs à comprendre les modèles et leurs limites. Les utilisateurs ont pu se familiariser avec un nouveau problème grâce à la simulation interactive. En effet, les utilisateurs peuvent facilement identifier les paramètres significatifs (ou leurs combinaisons) ayant un impact sur les indicateurs de performance. En revanche, les utilisateurs ont eu plus de difficulté à prendre du recul sur le modèle en lui-même pour formuler des améliorations. Cette première expérimentation nous a montré l'importance d'accompagner les participants dans leur apprentissage des concepts de modélisation. L'expérimentation a permis de montrer la nécessité d'un accompagnement des utilisateurs dans l'exploration du modèle ouvert, à la fois pour découvrir une problématique nouvelle et les concepts de modélisation.

Dans la deuxième expérimentation, l'atelier organisé a permis de mettre les participants dans une situation proche de celle visée par la méthodologie. Nous avons observé que le rôle de concepteur obligeait les participants à s'imprégner de la pratique de modélisation et à prendre du recul sur le concept de modèle.

L'expérimentation a permis de dégager les différents usages de cette démarche en fonction des publics. Pour le public néophyte, il est nécessaire de les accompagner davantage pour compenser leur méconnaissance (légitime) de la logistique urbaine. En plus d'accompagner les participants sur les notions de modélisation comme nous l'avons évoqué lors de la première expérimentation, il faut les former aux outils de gestion pour présenter notamment la notion d'indicateurs de performance. Cette remarque est d'autant plus vraie pour le déploiement de la méthodologie vers un public plus large sans connaissance en modélisation ou dans les outils de gestion. De plus, les expérimentations sur les étudiants ont fait émerger la nécessité de communiquer plus les enjeux de la logistique urbaine dont ils sont souvent les clients sans imaginer les impacts sous-jacents. Une communication qui mériterait évidemment d'être plus large à l'ensemble des clients ou des impactés par la logistique urbaine.

Pour le public expert, la méthodologie a montré son intérêt pour servir de base commune pour conduire une discussion. Cependant, l'atelier a illustré que l'exercice de modélisation reste difficile. Par exemple, certains participants avaient du mal à saisir le caractère multi objectifs d'une décision. Les expérimentations ont permis d'identifier de nouveaux prérequis pour s'assurer de donner aux utilisateurs les moyens de participer à l'atelier.

L'expérimentation a permis de montrer que la méthodologie permettait aux participants de se saisir du problème. En revanche, le retour d'expérience montre qu'il faut que les participants acceptent de ne pas se concentrer sur des aspects techniques pour aller vers une abstraction nécessaire pour une décision stratégique. Cette conclusion appelle à une modification de la méthodologie pour la démonstration des limites d'un modèle complexe pour motiver les participants à utiliser un modèle simple.

Ensuite, les échanges entre les participants ont permis de mettre en exergue la tension entre la délégation de l'analyse et la délégation de la décision de la part du décideur vers les équipes opérationnelles.

Enfin, les échanges ont mis en évidence l'importance de la visualisation, une importance appelant à une collaboration avec des spécialistes de l'ergonomie des interfaces utilisateurs.

Les deux expérimentations ont permis de tester la méthodologie du modèle ouvert sur différents publics. Les expérimentations ont montré la capacité des participants pour comprendre et utiliser un modèle de simulation. Dans le même temps, l'expérience a montré la nécessité de guider les participants et de les former aux concepts clefs pour la modélisation. De plus, l'expérimentation avec les professionnels a montré la nécessité du dialogue entre les parties prenantes pour comprendre leurs motivations. Les résultats sont encourageants pour promouvoir le déploiement de la méthodologie pour un cas d'étude avec un enjeu réel de décision afin de créer un Système d'Aide à la Décision dont le modèle et l'utilisation seront maîtrisés par les parties prenantes : un Système d'Aide à la Décision valide.

Chapitre 6 — Conclusion de la thèse

1 Contexte de la question de thèse

La logistique urbaine est un problème complexe dont les fines ramifications représentent un défi pour la décision. Face à la complexité, le réflexe naturel du décideur est de prendre conseil auprès d'un expert. Mais comment peut-on évaluer les impacts (positifs et négatifs) des recommandations de l'expert ? Au cours de cette thèse, nous avons mis en évidence que cette interrogation mérite réflexion pour un Système d'Aide à la Décision dans la mesure où l'expertise est modélisée sous une forme mathématique, et où cette expertise sera utilisée par un non-expert. Pourtant, dans la littérature du domaine de la logistique urbaine, la question de l'évaluation du modèle (et donc de l'expertise) est souvent mise de côté ou traitée partiellement.

Le but de cette thèse est de proposer une méthodologie pour s'assurer qu'une décision stratégique recommandée par un Système d'Aide à la Décision aura les effets escomptés sur le système de la logistique urbaine. Le Système d'Aide à la Décision doit s'ancrer dans la réalité complexe du terrain, et cela appelle une étude et une revue des outils, de concepts ou de méthodologies adaptés à un système complexe. Nous revenons ici sur les principaux apports de la thèse. Dans la première section, nous appuierons cette définition sur la compréhension des spécificités de ce système complexe (Chapitre 2). Dans la deuxième section, nous rappelons les deux grands paradigmes de simulation pour la logistique urbaine (macroscopique et microscopique) et leur limite pour dégager l'intérêt du concept d'intersubjectivité pour la validation (Chapitre 3). Dans la troisième section, nous proposons la méthodologie du modèle ouvert pour établir le lien identifié entre les processus de conception, de validation et d'utilisation d'un Système d'Aide à la Décision (Chapitre 4). Enfin, nous proposerons cette conception opérationnelle pour un Système d'Aide à la Décision pour la décision stratégique pour la logistique urbaine à partir du développement de la thèse et des résultats d'expérimentations (Chapitre 5).

1.1 Un système complexe

Dans le chapitre 2, un Système d'Aide à la Décision existe pour combler un besoin : prendre des décisions quantifiées plus finement et dont les impacts sont plus prédictibles dans l'environnement complexe de la logistique urbaine.

La contribution du chapitre 2 est de montrer en quoi le sujet d'étude (la logistique urbaine) d'un Système d'Aide à la Décision pour une décision stratégique mérite la qualification de système complexe. Dans ce chapitre, nous illustrons que la complexité ne provient pas seulement de la diversité des acteurs dont les objectifs sont par essence différents, et parfois s'opposent. La complexité provient aussi des tensions internes d'un groupe souvent considéré comme homogène : l'autorité publique au niveau municipal ou national n'a pas les mêmes objectifs environnementaux (respectivement la diminution des particules fines et la diminution de l'empreinte CO_2). Si nous utilisons la métaphore du pilote d'avion, chaque partie prenante serait un pilote d'un même avion, mais doté d'un panneau de contrôle propre où les indicateurs, les actionneurs et leurs objectifs seraient différents. Chaque pilote aurait une vision limitée des possibilités d'actions et des actions entreprises des autres pilotes, bien qu'ils agissent tous sur le même système.

Figure 11 - Décisions et complexité (crédits : Dan Lohmar)

Nous montrons ainsi la nécessité d'une approche systémique, plutôt qu'une approche locale, d'une problématique de décision. Aussi séduisante une solution pensée au niveau local soit-elle, elle ne peut pas s'affranchir de la réalité du terrain : tous les efforts de déploiement pourraient être annihilés par des contraintes opérationnelles inconnues jusqu'alors ou par l'opposition stratégique d'un acteur fort. Ainsi, nous arrivons à la conclusion que la problématique de décision doit être considérée horizontalement (entre les parties prenantes) et verticalement (entre une vision stratégique et opérationnelle). L'expression de la complexité sous ces deux dimensions offre une grille de lecture pour comprendre l'impact limité de certaines initiatives dans la logistique urbaine.

Par conséquent, les Systèmes d'Aide à la Décision doivent être en mesure de représenter cette complexité pour l'estimation des impacts d'une décision. Ainsi, il est primordial de s'interroger sur la capacité d'un modèle à représenter un système (ou une partie de celui-ci), et la capacité des utilisateurs à évaluer la cohérence entre ce modèle et le système que nous ne connaissons pas parfaitement.

1.2 Un outil à la fois mathématique et de management

La rapidité de l'évolution de la logistique urbaine, l'urgence de certaines décisions, la quantité importante de données à analyser appellent à utiliser des outils mathématiques et informatiques pour guider une décision. Pour utiliser ces outils, appelés généralement outils de simulations, nous devons nous assurer que ces derniers permettent d'intégrer la complexité horizontale et verticale nécessaire à la compréhension du système.

Dans le Chapitre 3, nous avons proposé de segmenter les outils en deux paradigmes de simulation : les simulations macroscopiques et les simulations microscopiques pour en dégager leur apport par rapport à notre besoin de complexité.

Le premier paradigme, la simulation macroscopique, semble plus adapté pour représenter un système à un niveau stratégique. L'agrégation de données dans ce type de simulation permet de regrouper un grand nombre d'acteurs offrant une vision globale à partir de quelques indicateurs. Pourtant la littérature ne permet pas de conclure sur l'efficacité de ces outils pour accompagner une décision stratégique. Par exemple, nous avons vu que le modèle de Freturb pour la ville de Bordeaux n'a pas résisté à la transformation de la logistique urbaine sur un horizon de temps d'une dizaine d'années. Si cette tâche est vraisemblablement impossible pour un système en constante transformation comme la logistique urbaine, il est intéressant d'en comprendre les raisons.

Premièrement, nous soulignons que le choix pragmatique de guider la collecte par un modèle préétabli est aussi un choix méthodologique fort. Il est vrai que devant un système aussi vaste que la logistique urbaine, il était nécessaire de choisir un point de départ pour construire une représentation. L'idée était de s'inspirer des modèles de transport de personnes pour modéliser le transport de marchandises. Mais le risque que les données doivent se conformer au modèle plutôt que de rendre compte de la réalité est important.

Deuxièmement, la collecte et la vérification des données essentielles à la logistique urbaine sont des opérations lourdes et coûteuses comme nous l'avons vu dans le cas des enquêtes de transport de marchandises. Elles ne peuvent pas être menées régulièrement, ainsi il y a un intervalle de temps important entre deux collectes qui rendent difficile l'identification des décisions et des variables extérieures qui ont amené à l'évolution du système.

En résumé, pour la simulation macroscopique, le haut niveau d'agrégation empêche de décrire finement toutes les interactions entre les parties prenantes. Elle se concentre sur les indicateurs stratégiques, et elle ne peut pas rendre compte des problématiques à l'échelle des opérations, pourtant essentielles dans la compréhension du système.

Le second paradigme, la simulation microscopique se destine plutôt à une décision à l'échelle des opérations. Elle permet de représenter finement les interactions entre les

agents d'un modèle comme la gestion des stocks, les tournées des véhicules ou une politique de prix dynamique. Par contre, ces simulations ont généralement un périmètre limité compte tenu de la quantité de données à traiter.

La voie d'un modèle complexe (plus de données, de puissance de calcul, plus de variables) pour un système complexe semble se heurter à des obstacles insurmontables à ce jour :

- Comment collecter toutes les données (si la réalité est contenue dedans) ?
- Comment optimiser un modèle à l'échelle d'une ville comme Paris ?
- Comment identifier et représenter toutes les variables et leurs interactions ?

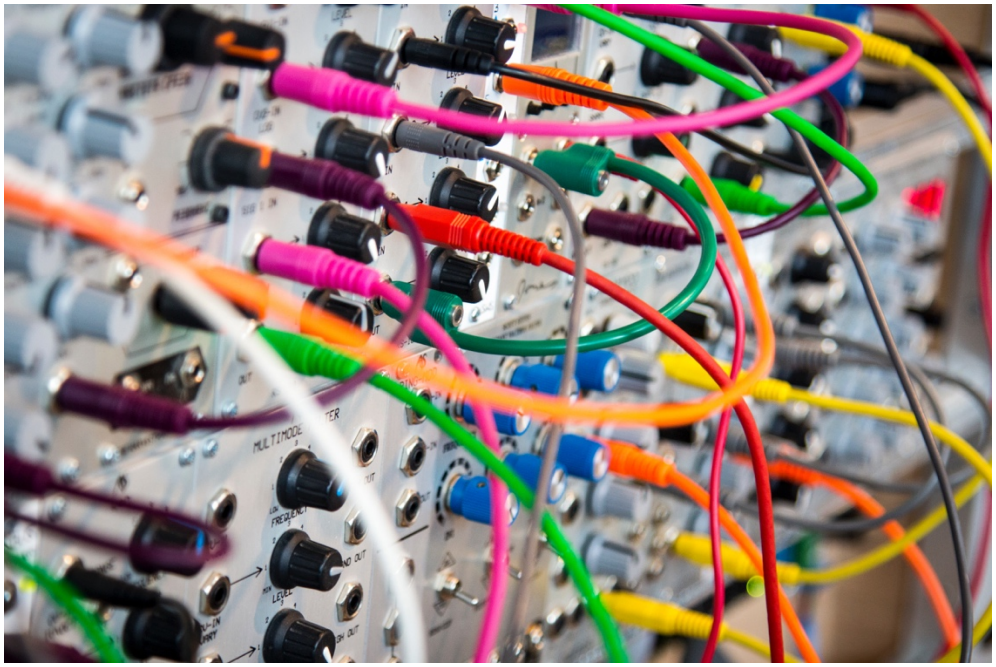

Figure 12 - Liens de causalité (credits : John Barkiple)

Premièrement, la collecte des données, et la vérification de leur qualité sont des processus lourds si on veut bien calibrer un modèle. Au cours de cette thèse, le développement de modèles de simulation pour les aires de livraison a montré la difficulté à réaliser ces tâches à l'échelle d'une rue. Et il faudrait opérer à une échelle bien plus grande, comme le quartier, la ville, voire la région.

Deuxièmement, la complexité algorithmique des problèmes de simulation croît très vite à mesure que l'on souhaite augmenter la précision du modèle ou son périmètre. Dans le cadre des travaux sur les aires de livraison, le projet de combiner la simulation (du temps d'utilisation des aires de livraison) à un moteur d'optimisation (pour décider de l'emplacement des aires) s'est révélé d'une grande complexité au-delà d'une seule rue.

Troisièmement, la complexité du modèle empêche la validation de ses mécanismes internes et la comparaison avec la réalité. Pour poursuivre sur les travaux à propos des aires de livraison, la complexité algorithmique du modèle empêchait la proposition d'une décision optimale. Dans ce cas, il revient à l'utilisateur du modèle de définir les critères

d'une « bonne » solution. L'utilisateur doit alors être expert en modélisation pour comprendre le modèle aboutissant aux résultats, et expert sur la problématique pour comprendre la pertinence la simulation par rapport à son expérience des aires de livraison.

En résumé, la simulation microscopique permet de modéliser finement les opérations essentielles à la compréhension du système ; elle semble donc mieux coller à la réalité du terrain. Malheureusement, ce paradigme souffre de limitations importantes pour une décision à l'échelle stratégique. Ce niveau de décision se heurte à la difficulté du passage à l'échelle d'un tel modèle pour les raisons évoquées : collecte de données, complexité algorithmique, et complexité de la validation.

L'expérience acquise au cours de cette thèse grâce à ces travaux de simulation a permis de faire émerger les fortes interactions entre ces questions, qui ne peuvent pas être prises indépendamment des autres. En particulier, cela a mis en évidence la nécessité d'intégrer les parties prenantes, et en particulier les experts métiers détenant une connaissance suffisante pour valider un modèle.

Nous avons ainsi introduit le concept d'intersubjectivité pour comprendre la nécessité de l'interdisciplinarité pour la prise de décision dans un système complexe. Ce concept définit l'objectivité comme un accord entre les parties prenantes : il faut ainsi que ces dernières aient la même compréhension des phénomènes en question. Par conséquent, les experts métiers doivent être en mesure de comprendre et maîtriser le modèle pour atteindre un consensus. Ce besoin d'amener les experts métiers à la maîtrise du concept de modélisation a appelé à la création de la méthodologie du modèle ouvert.

2 Recommandations pour la mise en œuvre de la méthodologie du modèle ouvert : capter le savoir de l'expert

2.1 Réunion des rôles : intégrer les participants à l'ensemble de la chaîne algorithmique

Dans le chapitre 4, nous proposons la méthodologie du modèle ouvert pour répondre à l'impératif de compréhension du modèle par les parties prenantes. Le postulat de base est qu'une partie prenante doit comprendre le modèle pour que ce dernier soit utilisable dans un Système d'Aide à la Décision. Et la manière la plus sûre de s'assurer que la partie prenante est en mesure de comprendre le modèle est de la faire participer à la conception de ce dernier.

Figure 13 - Savoir changer de direction (crédits : Joshua Fuller)

Le principe de la méthodologie du modèle ouvert est d'unifier les processus de conception, de validation (généralement opérés par un modélisateur), et d'utilisation (généralement opérés par les parties prenantes) d'un modèle. Cela suppose un renversement des rôles, où les experts métiers des parties prenantes deviennent les concepteurs du modèle d'aide à la décision, et où l'expert en modélisation devient un animateur de la conception et de la validation du modèle. Les experts métiers sont alors les garants de la cohérence du modèle par leur connaissance du système ainsi que du modèle co-construit. Le but est d'aboutir à un consensus sur le modèle, l'analyse du modèle et la formulation de recommandations.

Ce changement de rôle est soutenu par un outil pour conduire les échanges : la simulation interactive. D'une part, c'est un outil pédagogique pour comprendre la modélisation et le modèle. Au cours d'un atelier, les parties prenantes peuvent explorer le modèle via une interface. Ces dernières peuvent tester différents scénarios de simulation pour comprendre les mécanismes et les limites du modèle. D'autre part, lorsque l'outil est maitrisé, ce dernier devient un outil de dialogue servant de support à la discussion de groupe.

L'inclusion des décideurs permet de tester le simulateur dans les conditions proches de leur utilisation réelle du Système d'Aide à la Décision. Il devient possible d'analyser l'interprétation du modèle par le décideur pour s'assurer qu'il n'y ait pas d'ambiguïté.

En conclusion, cette méthodologie ouvre la voie pour repenser les cadres d'analyse établis avec les parties prenantes d'un système évoluant rapidement, pour de nouvelles problématiques et mieux intégrer les nouvelles données (internes aux parties prenantes et en Open Data) pour se rapprocher au plus près des besoins pour la décision.

2.2. Modélisation et décision dans environnement instable

Pour répondre aux besoins décisionnels stratégiques d'un système complexe comme la logistique urbaine, le modèle de simulation doit permettre d'appréhender les contraintes opérationnelles pour les amener à un niveau stratégique.

Les modèles de décision cherchent en général à reproduire ou intégrer la pensée des experts. C'est l'ambition du domaine de l'Intelligence Artificielle qui est de pouvoir décrire tout aspect de l'intelligence de l'homme de manière à ce qu'une machine puisse le reproduire en le simulant (Russell & Norvig, 2016).

L'échec des systèmes experts a montré la difficulté de décrire l'intelligence de l'expert par l'impossibilité de mécaniser la pensée par un système de règles. De plus, pour la logistique urbaine, quand bien même cela serait possible, cela supposerait que l'Expert existe bel et bien.

L'IA moderne, au travers de l'apprentissage automatisé, permet de contourner l'inexistence de l'Expert en s'appuyant sur les données du système. Au-delà de la question de l'accessibilité de ces données et de leur représentativité du système (problème du biais), l'impossibilité, à ce jour, d'interpréter le modèle qui se cache (p.ex. derrière les paramètres des réseaux de neurones) empêche son utilisation pour un système comme la logistique urbaine. Si nous nous intéressons aux succès de l'IA moderne, nous pouvons voir qu'ils se limitent à des environnements contrôlés où les décisions sont explicites. Il est relativement aisé de définir le succès d'une IA pour la reconnaissance d'image (vrai/faux sur une base de données) ou pour le jeu de go (victoire contre le meilleur joueur humain), mais c'est déjà plus difficile pour la conduite autonome (la non-collision avec d'autres objets ne suffit pas). C'est le contrôle de l'environnement et la simplicité des objectifs qui permet d'évaluer la pertinence des décisions en dehors du modèle.

La création d'un modèle pour la prise de décision dans le cadre de la logistique urbaine pose donc deux problèmes majeurs (inter-dépendants) qui rendent les modèles d'IA inefficaces pour la mise en œuvre d'un processus de décision automatisé pour le moment.

D'une part, la complexité de l'environnement empêche d'en créer une représentation fidèle. D'autre part, la décision a pour objectif de modifier l'environnement, ce qui implique que même s'il avait été possible de modéliser cet environnement, la décision rend ce modèle obsolète.

C'est pour répondre à cette double problématique que nous proposons une conception opérationnelle d'un Système d'Aide à la Décision. Celle-ci a pour objectif final de s'assurer qu'une décision stratégique ait les effets escomptés sur le système de la logistique urbaine. Nous formulons trois recommandations :

- Le Système d'Aide à la Décision se limite à des données accessibles et consensuelles entre les parties prenantes. Il est toujours possible d'ajouter d'autres données si elles sont disponibles et en cohérence avec les autres étapes.
- Le Système d'Aide à la Décision s'appuie sur la création et l'utilisation d'un modèle suffisamment simple à appréhender conceptuellement pour que les acteurs puissent s'en saisir. Le modèle peut être algorithmiquement complexe (p.ex. optimisation de tournées) en restant conceptuellement simple (faible nombre de paramètres).
- Le Système d'Aide à la Décision est alimenté par le savoir des experts, qui eux-mêmes enrichissent leur propre savoir en manipulant le modèle jusqu'à atteindre un consensus sur les variables et leurs interactions dans le modèle, qui coïncide alors avec la validation du modèle ouvrant la voie à un consensus pour la décision.

La méthodologie du modèle ouvert est une réponse à cette conception opérationnelle d'un Système d'Aide à la Décision. Dans les sections suivantes, nous revenons sur les concepts de la méthodologie et les perspectives pour la logistique urbaine et d'autres domaines.

3 Méthodologie du modèle ouvert : discussion de la méthodologie et perspectives futures

Le but de cette méthodologie est de proposer un Système d'Aide à la Décision pour la logistique urbaine à un niveau stratégique. Pour utiliser un tel système, il faut s'assurer, en amont, de notre capacité à approximer un système complexe et à identifier ce qui serait la meilleure direction pour ce dernier. Nous avons basé notre approche de validation sur la cohérence d'une décision à un niveau stratégique avec ses impacts estimés à un niveau opérationnel. Le Système d'Aide à la Décision doit opérer à un niveau stratégique pour penser la logistique urbaine sur le long terme et à un niveau opérationnel pour s'assurer de la faisabilité de la stratégie.

La considération de cette cohérence s'inscrit dans l'exercice plus général de la modélisation d'un système. Mais comment s'assurer de la réussite de cette entreprise ? Nous pouvons imaginer les conséquences d'un échec. Un modèle faux proposera au mieux des décisions inefficaces au pire des décisions dangereuses. La réussite tient à la capacité à contrôler le système, c'est-à-dire identifier les variables de décision, et à anticiper un nouvel état du système afin de prendre des décisions éclairées et efficaces.

Considérons un instant la dangerosité de l'exercice de modélisation pour souligner la subtilité de la notion de validation. Le modèle est un objet mathématique inoffensif, c'est un concept qui n'appartient qu'aux esprits, au papier ou au silicone des ordinateurs. Or le danger n'existe et ne s'évalue uniquement dans le monde physique. Nous comprenons que le danger ne vient pas du modèle puisqu'il est extérieur au monde physique des décisions.

Le danger (relatif) vient de l'usage du modèle, lorsque le modèle est utilisé pour soutenir une décision, alors il devient un Système d'Aide à la Décision. Dans ce cas, le modèle devient par son influence sur le système, il perd alors sa neutralité. Le modèle devient alors une nouvelle partie prenante de ce dernier. Ainsi la validation d'un Système d'Aide à la Décision ne peut se limiter au modèle, elle doit être étendue à l'interaction entre le décideur, les parties prenantes et le modèle.

Au cours de cette thèse, nous avons identifié le besoin d'approfondir la réflexion sur la subtile question de la validation des Systèmes d'Aide à la Décision pour la logistique urbaine. Nous avons relié la difficulté de la réponse à deux obstacles majeurs à la modélisation d'un système complexe : inaccessible et transitoire. D'une part, la complexité du système empêche une validation formelle d'un modèle : le système est inaccessible. Et d'autre part, le Système d'Aide à la Décision ne peut être jugé sur le modèle, mais sur les effets mesurés des décisions : le système est transitoire et donc inexistant à l'heure de la décision. Autrement dit, l'enjeu de la validation est de s'assurer de la bonne approximation d'un objet qu'on ne peut pas décrire a priori et a posteriori. La méthodologie du modèle ouvert est une réponse à ce défi de modélisation et de contrôle du système.

3.1 Le modèle ouvert

3.1.1 Validation du modèle

Nous distinguons deux étapes pour la validation du modèle : (1) les parties prenantes doivent s'approprier le modèle et ce dernier doit intégrer les différents points de vue, et (2) les parties prenantes confrontent leur point de vue à travers la validation du Système d'Aide à la Décision grâce à la génération de métriques et d'une discussion pour aboutir au consensus.

Dans la première étape, nous nous intéressons au modèle. Dans la conception de ce dernier, plusieurs parties prenantes seront mobilisées, et donc il y aura plusieurs perspectives. Comme le modèle doit intégrer les différentes perspectives pour ne pas léser une partie prenante, les parties prenantes doivent être en mesure d'exprimer leur perspective d'une manière compréhensible pour tous. Ensuite, les parties prenantes doivent intégrer les différentes perspectives dans le modèle. La modélisation ne peut se faire en silo parce qu'il y a de nombreuses interactions entre eux : le transporteur doit être en mesure d'échanger avec la ville ou les expéditeurs. Enfin, le modèle doit être observé d'un point de vue global, les parties prenantes peuvent chacune se prononcer sur la capacité d'un modèle à refléter leur activité, leurs objectifs et leurs contraintes.

Figure 14 – Prendre une direction en connaissance de cause

(crédits : Javier Allegue Barros)

Maintenant, considérons la deuxième étape avec la validation du Système d'Aide à la Décision. À partir du modèle validé, des solutions sont proposées et les impacts sont estimés. Il faut alors valider le modèle par rapport aux solutions et aux impacts : est-ce que le modèle est toujours valide pour ces scénarios imaginés ? Ensuite, les solutions sont déclinées en actions pour estimer leur faisabilité et les parties prenantes doivent valider les actions. Une solution modélisée n'appartient qu'au monde des idées, il faut la penser dans le monde physique : est-ce que les parties prenantes non participantes suivront ? est-ce légal ? est-ce éthique ? Enfin, un consensus sur la décision est créé à partir d'un modèle dont nous avons assuré la validité de la chaine de décision pour limiter ou illustrer le décalage entre le modèle et ce que serait la réalité. Autrement dit, les utilisateurs configurent le modèle pour se figurer le système.

Nous montrons que le modèle est sans cesse remis en question. Il ne faut pas avoir confiance dans le modèle, mais dans les conclusions des discussions autour du Système d'Aide à la Décision. Le Système d'Aide à la Décision n'est pas pourvoyeur de solution, il est un support à des idées émergentes pour convaincre l'ensemble des parties prenantes : tendre vers l'intersubjectivité agissant comme un proxy à l'objectivité. Nous devons souligner que la méthodologie du modèle ouvert peut appeler à une grande exigence de coopération : tous les acteurs ne seront pas prêts pour s'engager dans une voie susceptible de dévoiler la stratégie de leur organisation.

3.1.2 La méthodologie en pratique : résultats et points d'amélioration

Les expérimentations ont permis de faire émerger deux perspectives importantes pour l'amélioration de la méthodologie du modèle ouvert. Premièrement, la prise de décision à un niveau stratégique n'est pas triviale. Deuxièmement, l'interaction de l'utilisateur avec la simulation interactive est un sujet de recherche important pour aider ce dernier dans la compréhension d'un modèle.

L'idée centrale de la méthodologie du modèle ouvert est d'utiliser un modèle suffisamment fin pour prendre en compte les contraintes opérationnelles dans une décision stratégique. L'outil peut aussi être utilisé non plus pour seulement prendre une décision stratégique, mais aussi penser la stratégie d'une organisation. Pour cela, il faut être en mesure de dissocier la résolution d'une problématique de la création d'une stratégie. Dans le cas d'une décision stratégique ou de l'élaboration d'une stratégie, le point critique est d'équilibrer l'abstraction pour une vue stratégique et le détail pour une vue opérationnelle. Cet équilibre repose sur une maitrise de plusieurs compétences généralement partagées entre diverses parties prenantes et divers acteurs (expert en modélisation, expert opérationnel, expert stratégique, etc.).

L'équilibre consiste à amener les participants à identifier leurs compétences, ainsi que celles des autres participants, pour déterminer leur contribution à l'objectif d'un Système d'Aide à la Décision à un niveau stratégique. Les expérimentations ont montré que les techniciens (sur la modélisation ou sur la logistique urbaine) privilégient une discussion proche de leur compétence ou centres d'intérêts, et cela empêche une prise de recul sur la problématique. Il faut permettre aux participants d'un niveau opérationnel de mobiliser leurs connaissances et les porter, ainsi que leur réflexion, à un niveau stratégique. Inversement, un participant trop ancré dans la stratégie devra être amener à considérer un niveau opérationnel pour bien comprendre les contraintes du terrain.

Le retour d'expérience avec des participants montre que les techniciens ne sont pas encore convaincus de l'intérêt d'un modèle simple. Nous avons plutôt observé une tendance à complexifier le modèle plutôt que de le remettre en cause et prendre du recul. L'exercice de discussion est nouveau pour les participants, ils ont besoin d'être éduqués à une nouvelle manière de faire, c'est-à-dire leur permettre de se rendre compte par eux-mêmes du fait qu'un modèle complexe ne sera pas meilleur, c'est-à-dire ne leur permettra pas de prendre une décision plus intelligente, et en plus que ce dernier fermera la discussion plus qu'il ne l'ouvrira, justement car il se positionne dans un paradigme représentationaliste.

C'est dans cette optique que nous proposons de repenser l'organisation d'un atelier utilisant la méthodologie du modèle ouvert. Nous imaginons que l'atelier pourrait débuter avec un modèle complexe de la problématique. L'objectif serait de montrer les effets pervers d'une modélisation trop complexe et la difficulté d'utilisation pour une discussion entre les parties prenantes. Nous serions ainsi en mesure d'illustrer qu'il est nécessaire de se défaire des aspects techniques, autant que faire se peut, pour amener la discussion sur un niveau stratégique.

Nous devons prendre en compte que la méthodologie se positionne à contre-courant du discours ambiant sur la modélisation : la méthodologie revendique l'impossibilité de la représentation d'un système complexe. Le déploiement de la méthodologie doit être légitimé pour être perçu comme une alternative crédible pour la création d'un Système d'Aide à la Décision. L'étude d'un modèle complexe pour une problématique permettrait ainsi de donner plus de légitimité à l'animateur de l'atelier pour montrer sa capacité à créer des modèles complexes au niveau de l'état de l'art, et d'illustrer les limites de ce type de modèle pour justifier l'usage d'un modèle simple.

Les discussions sur l'interaction des participants avec la simulation interactive ont été un point récurrent dans les expérimentations. Nous pensons que l'interface est un axe

important d'amélioration pour permettre aux utilisateurs de s'approprier un modèle. Et il est probable que la convivialité d'un outil peut avoir un effet important sur la motivation des utilisateurs pour les ateliers. Cette piste de recherche pourrait faire l'objet d'un projet transdisciplinaire avec un ergonome spécialiste des interfaces utilisateurs pour comprendre l'utilisation de la simulation interactive par les participants. De plus, l'amélioration de l'interface renforcera vraisemblablement le sentiment de professionnalisme et contribuera à sans doute à la crédibilité du processus de réflexion lors d'un atelier pour une plus grande implication des parties prenantes.

3.2 Le modèle ouvert et les boîtes noires

Après avoir montré que le modèle ouvert pouvait être à la base d'un Système d'Aide à la Décision pour un usage classique. Nous proposons deux perspectives d'utilisation pour utiliser ce concept avec d'autres outils. Premièrement, nous nous intéresserons aux opportunités d'utilisation pour la validation d'outils basés sur des modèles complexes comme ceux issus de l'apprentissage automatisé. Deuxièmement, nous illustrons la possibilité de déployer le concept de modèle ouvert pour mieux aider à l'identification des liens causaux nécessaire à la conception de Cartes Stratégiques.

3.2.1 Expliciter les outils d'IA

Si sous le terme de boîte noire, nous avons essentiellement désigné les modèles de macrosimulation ou de microsimulation, nous pouvons compter sur l'apparition des nouveaux modèles issus de l'apprentissage automatique. Nous rappelons que nous avons utilisé la notion de boîte noire pour exprimer l'incapacité des parties prenantes utilisatrices du modèle à comprendre leur fonctionnement.

Pour les modèles de macrosimulation et de microsimulation, la notion de boîte noire est relative. En effet, les concepteurs sont normalement à même de comprendre les mécanismes de modélisation dont ils sont les créateurs. Mais nous avons établi que la validation ne peut se limiter à la participation des concepteurs et elle doit intégrer les parties prenantes possédant l'expertise métier. Les modèles issus de l'apprentissage automatique poussent la notion de boîte noire à son paroxysme puisque la plupart des modèles ne sont généralement pas auditables par leur concepteur à ce jour.

Nous pensons que la méthodologie du modèle ouvert peut permettre de valider certaines de ces boîtes noires pour leur usage dans un Système d'Aide à la Décision. Dans le chapitre 3, nous avons déjà justifié les limites des modèles de macrosimulation et de microsimulation pour la conception d'un modèle valide. Dans les paragraphes suivants, nous nous intéresserons aux modèles d'apprentissage automatique[8].

Nous attribuons le succès des boîtes noires dans certains domaines (reconnaissance d'image, de parole, etc.) à la maîtrise des données d'entrée et des données de sortie. En effet, nous sommes généralement en mesure de définir si le pixel d'une photo correspond

---

[8] Nous concentrons notre propos sur la validation de ce type de modèle, et non sur l'entraînement pour l'apprentissage.

bien à un chat, si un son est associé au bon mot, si une phrase générée est cohérente. Le concepteur d'un modèle peut, sans connaître les mécanismes internes, valider la boîte noire en vérifiant la cohérence entre les données d'entrée (une image) et les données de sorties (une classification) pour un grand nombre de données.

Malheureusement cette cohérence n'est pas toujours facile à déterminer. Dans le cas d'une image avec une faible résolution, un loup et un chien peuvent être indiscernables pour un expert. Ce dernier peut difficilement établir si la machine avait raison de classifier l'animal comme un loup ou un chien. Dans d'autres domaines, comme par exemple le recrutement, la validation se révèle encore plus compliquée. Dans ce cas, l'objectif de l'apprentissage automatisé est de repérer des candidats potentiels pour un emploi spécifique via l'analyse automatique de leur expérience passée. La validation du système suppose que le concepteur puisse définir de manière certaine ce qui fait un bon candidat. Nous montrons ainsi que certaines problématiques ne peuvent pas être résolues par l'apprentissage automatique, faute de pouvoir comprendre ce qu'est la « bonne » réponse pour l'apprendre à une machine.

Nous avons ainsi illustré la problématique avec les modèles d'apprentissage automatique. Ces modèles peuvent se révéler très performants lorsque nous avons une bonne maitrise du lien entre les données d'entrée et les données de sortie. Or ce lien est en fait la connaissance du système : un expert peut identifier un loup d'un chien, un expert peut identifier un CV intéressant d'un CV banal. Plus l'expert sera performant, et plus il sera a priori capable d'exprimer ses connaissances, et plus le modèle d'apprentissage aura un potentiel d'apprentissage. De manière similaire, la validation des boîtes noires (macrosimulation, microsimulation) suppose le développement de connaissances sur le système pour être en mesure d'apprécier la cohérence entre les données d'entrées et les données de sortie, puisque le modèle est toujours inaccessible aux parties prenantes (expertes métiers), c'est le seul moyen de validation.

Or le développement de connaissances est justement l'apport de la méthodologie du modèle ouvert. Les échanges entre les parties prenantes sur une problématique permettent de dégager non pas seulement un consensus sur une solution, mais sur les raisons (ou les connaissances) qui ont orienté ce choix.

L'idée pour la validation d'un modèle boîte noire avec un modèle ouvert repose sur une hiérarchisation des modèles. La validation du modèle boîte noire se fera au travers du modèle ouvert validé par les experts. L'intérêt est de pouvoir utiliser le modèle boite noire pour modéliser des comportements très fins. Nous proposons d'approximer la validité d'un modèle boîte noire par la vérification de la cohérence des indicateurs du modèle ouvert (validé par des experts) avec les indicateurs de la boîte noire. Dans les paragraphes suivants, nous développons cette idée pour la modélisation d'un objet ou une hiérarchie d'objets.

Considérons d'abord que nous souhaitons modéliser le même objet comme par exemple une rue. Le modèle ouvert adoptera une vue un niveau de détails adéquats pour permettre sa validation par les parties prenantes. Tandis que le modèle boîte noire optera pour une perspective extrêmement microscopique pour simuler des comportements fins utiles à la compréhension de la rue. Imaginons que le modèle ouvert décrit le débit de la rue. La simulation issue du modèle boîte noire devra être évidemment cohérent avec les données

d'entrée (flux de véhicules entrants/sortants, localisation des commerces, activités, météo, etc.), mais aussi avec le modèle ouvert (débit de véhicules). Par exemple, si le modèle boîte noire considère la vitesse des véhicules, les arrêts de livraison et l'encombrement de la rue, alors les résultats de cette simulation de trafic microscopique devront être cohérent avec le débit estimé et validé par le modèle ouvert.

Considérons maintenant une hiérarchie d'objets. Le modèle ouvert pourrait se placer à un niveau macroscopique pour la ville, et nous souhaiterions simuler les arrondissements par des boîtes noires pour mieux comprendre leurs spécificités (si elles existent). L'agrégation des données de sorties des modèles boîtes noires (les arrondissements) devra être cohérente à l'échelle du modèle ouvert (la ville). Par exemple, l'agrégation des activités de livraison (nombre de véhicule, temps de parcours, etc.) provenant de chaque arrondissement devra être cohérente avec celle déterminée par le modèle ouvert validé au niveau de la ville par les parties prenantes.

C'est une validation par l'agrégation des indicateurs microscopiques (inintelligibles même pour l'expert métier) vers des indicateurs macroscopiques compris par les parties prenantes (experts métiers et décideurs). Cette nouvelle possibilité de valider un modèle pourrait nous autoriser à utiliser avec plus de confiance des modèles boîtes noires. En particulier, nous pensons que cela peut ouvrir la voie à une utilisation de modèle basé sur l'apprentissage automatique pour la ville (data-driven policy). Nous avons alors un potentiel pour valider de nombreux modèles pour la gestion de décisions opérationnelles tandis que nous pouvons nous assurer (dans une certaine mesure) de leur cohérence à une échelle globale grâce au modèle ouvert validé par les experts.

3.2.2 Expliciter les outils comptables

Dans le Chapitre 4, nous avons évoqué les Cartes Stratégiques dont l'objectif est de permettre aux organisations de comprendre les interactions entre des indicateurs financiers et non-financiers. Nous avons souligné les travaux de Busco & Quattrone (2015) montrant l'ambiguïté de l'exercice compte tenu des différentes perspectives des services et des fonctions. Nous citons maintenant le travail de Malmi (2001) dont l'étude a porté sur des entreprises finlandaises ayant mis en place des Cartes Stratégiques. Il s'avère que si la construction des Cartes Stratégiques s'appuie sur l'hypothèse d'un lien de cause à effet entre les indicateurs, l'auteur souligne que cette notion n'est pas maitrisée et elle peut passer inaperçue. Une explication est que les indicateurs sont reliés de manière symbolique et non pas de manière quantitative.

Nous pensons que l'utilisation de la méthodologie du modèle ouvert pourrait permettre d'expliciter le lien entre les indicateurs de manière plus formelle. La modélisation des relations supposées entre les indicateurs permettrait de valider leur raisonnement en testant des scénarios mettant en jeu plusieurs parties prenantes. Le déploiement d'une Carte Stratégique suppose que, si cet effet existe bel et bien, il doit être estimable par les parties prenantes. Par exemple, la modification d'un indicateur provenant du service commercial pourra avoir un effet sur un indicateur du service d'ingénierie. Lors d'un atelier utilisant la méthodologie du modèle ouvert, les services auraient l'opportunité d'échanger sur l'effectivité de ce lien et le moyen de l'estimer. Le modèle ouvert permettrait de valider les liens de cause à effet nécessaires à la conception d'une Carte Stratégique.

4 Conclusion

D'abord, nous avons proposé une conception opérationnelle d'un Système d'Aide à la Décision pour une problématique stratégique à la logistique urbaine. Pour cela, nous avons envisagé la complexité de ce système comme le défi de trouver une cohérence entre les perspectives stratégiques et opérationnelles des diverses parties prenantes. L'étude des outils actuels (selon les paradigmes de simulation macroscopique et microscopique) et l'usage d'outils de simulation ont permis de mettre en évidence la limitation des outils actuels pour rendre compte de cette complexité. L'introduction du concept d'intersubjectivité a permis d'identifier une réponse pour capter et figurer cette complexité dans un modèle : l'intégration des parties prenantes dans la conception du Système d'Aide à la Décision. Les expérimentations sur différents publics (néophyte et expert) réalisées ont présenté des résultats encourageants attestant de la capacité des parties prenantes à prendre en main un modèle ouvert par le biais d'une simulation interactive.

Ensuite, nous avons présenté plus en détail la méthodologie comme une alternative aux outils et méthodologies actuelles pour les Systèmes d'Aide à la Décision. Nous sommes revenus sur le concept d'intersubjectivité qui était le point de départ à la réflexion sur la méthodologie du modèle ouvert. Nous avons utilisé le concept pour généraliser la pertinence d'une telle démarche, et proposé une justification sur l'importance (contre-intuitive) de la simplicité d'un modèle pour approximer un système complexe.

Au regard de ces apports théoriques et des retours des expérimentations, nous avons formulé des perspectives de recherche pour contribuer à l'efficacité du déploiement de la méthodologie. Premièrement, le retour d'expérience a fait émerger que les participants devaient être plus accompagnés dans un exercice inédit où ces derniers sont appelés à prendre une position critique de leurs connaissances opérationnelles pour prendre le recul nécessaire à une décision stratégique. Nous avons ainsi proposé de commencer un atelier utilisant la méthodologie par l'étude d'un modèle complexe pour exposer ses limites et la différence entre une vision opérationnelle et une vision stratégique d'une problématique. Deuxièmement, nous avons identifié le besoin de mener une réflexion sur l'ergonomie de l'interface de la simulation interactive pour faciliter la compréhension d'un modèle et le déroulement d'un atelier.

Enfin, nous avons proposé la méthodologie du modèle ouvert comme un complément indispensable à l'utilisation de modèles boîtes noires dont les mécanismes internes ne peuvent pas être facilement audités empêchant ainsi la validation de ces derniers.

Les perspectives de l'utilisation de l'Intelligence Artificielle à travers l'apprentissage automatisé se heurtent aux problèmes d'interprétabilité des modèles générés. Ainsi, nous proposons l'utilisation de la méthodologie du modèle ouvert pour permettre la validation de ces modèles et ouvrir la voie à un pilotage data-driven de la logistique urbaine. De plus, nous pensons que la méthodologie peut s'appliquer à d'autres domaines où des systèmes complexes sont à l'étude. Nous proposons d'utiliser la méthodologie pour accompagner le déploiement des Cartes Stratégiques dans les organisations pour expliciter le lien cause-conséquence essentiel à la réussite des Cartes Stratégiques.

Dans le but de ne pas influencer les parties prenantes, le modèle ouvert a été pensé pour être indépendant du domaine d'application. Comme nous l'avons illustré avec la validation des Cartes Stratégiques, nous pensons que la méthodologie pourrait être adaptée facilement dans d'autres domaines que la logistique urbaine.

Science (nom féminin) : Ensemble cohérent de connaissances relatives à certaines catégories de faits, d'objets ou de phénomènes obéissant à des lois et/ou vérifiés par les méthodes expérimentales. Dictionnaire Larousse.

Nous pensons que le modèle ouvert a toute sa place dans le contexte actuel de la remise en cause de la science ou de son omniprésence au travers de la technologie. La définition de la science nous rappelle qu'elle peut être vue comme un modèle. Au cours de cette thèse, nous avons rencontré une grande diversité d'acteurs ; de cette expérience ressort la contradiction suivante : nous nous accordons à dire que le modèle est une simplification de la réalité, mais nous oublions ce décalage, faute de pouvoir le quantifier, lors de l'utilisation d'un modèle. Nous espérons que le modèle ouvert sera en mesure d'illustrer ce décalage.

Annexe A : Techniques et données utilisées dans les expérimentations

Dans le cadre de cette thèse, le critère de choix pour de modélisation d'un problème ou des bases de données était la simplicité pour permettre aux parties prenantes d'appréhender la simulation de la manière la facile possible, plutôt que la performance de la simulation en termes de temps de calcul ou de précision des résultats.

Dans la première expérimentation, nous proposons de simuler l'utilisation d'un camion associé à des coursiers à vélo de la manière suivante :

- Un algorithme de clustering (k-means de la librairie sci-kit) permet de regrouper les points de livraison en autant de groupes qu'il y aura d'arrêts pour le camion. La localisation de ces arrêts correspond au centre de gravité de chacun de ces groupes.
- À partir de ces arrêts, l'itinéraire du camion est optimisé en utilisant la formulation d'un Problème du Voyageur de Commerce. Le solver utilisé est Gurobi.
- Enfin pour chaque arrêt, les colis sont repartis entre plusieurs coursiers à vélo et leur itinéraire est calculé par l'optimisation d'un Problème de Tournées de Véhicules. Le solver utilisé est Gurobi.

Dans les deux expérimentations (Gaudron, Tamayo, & Fortelle, 2019; Gaudron, Tamayo, & La Fortelle, 2019b), pour les modèles d'optimisation de tournées des véhicules utilitaires légers, le problème a été formulé sous la forme d'un Vehicle Routing Problem avec une contrainte sur la capacité (Laporte, 1992). La résolution du problème avec un grand nombre de points à visiter (à partir de 100) par Gurobi s'est montré peu satisfaisante, certains itinéraires étaient clairement sous optimal. Nous avons choisi de considérer la répartition des points entre les véhicules comme satisfaisante, et de seulement améliorer l'itinéraire de chaque véhicule par l'utilisation de l'heuristique 2-opt (Croes, 1958; Flood, 1956). Cette heuristique est très rapide et permet d'améliorer efficacement la qualité des solutions.

Le choix de Gurobi plutôt qu'une heuristique spécialisée permet une plus grande flexibilité du modèle. En effet, l'amélioration du modèle se concentrera uniquement sur la nouvelle formulation du problème d'optimisation. La relative faible performance de l'heuristique de Gurobi pouvant être compensé a posteriori à l'image de l'utilisation de l'ajout de l'heuristique 2-opt pour améliorer les solutions.

Dans les expérimentations, nous avons utilisé pour les véhicules des valeurs de consommation et d'émissions polluantes basés sur le référentiel HBEFA et Den Boer et al. (2011). Ce référentiel avait été proposé par des praticiens lors de l'élaboration des ateliers ou de travaux précédents (Jlassi et al., 2017). Nous nous sommes limités à la vérification de la cohérence entre ces deux bases car l'objectif était d'avoir un bon ordre de grandeur plutôt que l'estimation précise de la consommation et des émissions.

Annexe B : Contributions des publications pour la thèse

1 État de l'art sur les outils de simulation pour la logistique urbaine.

Sarra Jlassi, Simon Tamayo & **Arthur Gaudron**.
Simulation applied to urban logistics: a state of the art.
10th International Conference on City Logistics, Jun 2017, Phuket, Thailand

L'état de l'art sur les outils de simulation pour la logistique urbaine a été une opportunité pour faire un tour d'horizon sur les problématiques traitées, les méthodes de simulation généralement associées, et le contexte de l'utilisation.

L'étude s'est limitée à des travaux de simulation à une échelle microscopique, ces derniers ont été regroupés en cinq catégories : (1) Transport, réseau et infrastructure, (2) Tournées de véhicules, (3) Consolidation et mutualisation, (4) Intermodalité et (5) Électromobilité.

La revue de la littérature a permis de montrer la diversité de ces problématiques et qu'elles étaient abordées à majorité selon l'angle des autorités publiques (75%) avec la prise en compte des transporteurs (50%) et des expéditeurs (35%). Malgré la diversité d'acteurs de la logistique urbaine, il est apparu que les différents points de vue sur une problématique n'étaient pas systématiquement intégrés à la simulation. De plus, les publications font rarement état de l'utilisation du modèle, et des impacts que la simulation aurait pu avoir sur la compréhension d'une partie prenante ou sur une décision.

Les techniques de simulation utilisée ont été classées en cinq catégories : (1) Modèle d'optimisation (p. ex. Problème du Voyageur de Commerce), (2) Simulation Monte Carlo, (3) Simulation à événements discrets, (4) Simulation multi-agents et (5) Système dynamique.

L'étude a permis de montrer que si certaines méthodes étaient plus adaptées à certaines problématiques, il n'y avait pas une méthode de simulation prédominante, et généralement une combinaison de plusieurs méthodes pour pallier aux potentiels manques. Par un sondage auprès des auteurs, il est apparu que le choix d'une méthode se faisant à l'appréciation des modélisateurs, et qu'un critère important de la maîtrise de la méthode de simulation. Cette observation a fait émerger l'hypothèse que la réussite d'une simulation, c'est-à-dire la validité du modèle, repose davantage sur les capacités du modélisateur que sur les propriétés intrinsèques d'une méthode particulière.

En conclusion, cet état de l'art a mis en évidence le chemin pour que les simulations puissent être au service des parties prenantes en prenant en compte leur diversité et comment la simulation pouvait leur être utile pour accroître la connaissance sur le système ou pour aider à la prise de décision. L'étude des outils de simulation a mis en avant la liberté du modélisateur pour le choix de la méthode de simulation car il n'y a pas de méthode qui dominerait toutes les autres sur toutes les problématiques.

2 Simulation des impacts réglementaires sur la livraison de restaurants

Sarra Jlassi, Simon Tamayo, **Arthur Gaudron** & Arnaud de la Fortelle.
Simulating impacts of regulatory policies on urban freight: application to the catering setting. 6th International Conference on Advanced Logistics and Transport, IEEE, Jul 2017, Bali, Indonesia

L'objectif de ce travail de simulation était d'estimer l'effet de différentes réglementations sur les choix d'un transporteur vis-à-vis de la composition de sa flotte (véhicules utilitaire léger ou camions). Quatre scénarios ont été créés :

1. Les poids-lourds sont autorisés à toutes heures de la journée
2. Seuls les Véhicules Utilitaires Légers sont autorisés sans contrainte de temps
3. Les poids-lourds sont autorisés entre 9:00 et 11:30
4. Seuls les Véhicules Utilitaires Légers sont autorisés et entre 9:00 et 11:30

Ces scénarios étaient évalués à la lumière de six indicateurs de performance :

1. Kilomètres parcourus par tonne (km.t)
2. Taux de chargement des véhicules (%)
3. Temps de livraison moyen (h)
4. Émission de NO_x (g/kg de marchandise)
5. Émission de CO_2 (kg/kg de marchandise)
6. Émission de SO_2 (mg/kg de marchandise)

La construction du modèle a été réalisé à partir d'entretien avec l'entreprise Pomona pour comprendre l'organisation logistique de l'approvisionnement des restaurants, le matériel utilisé et les comportements d'achat de ces derniers. Cet exercice de modélisation s'est révélé ambitieux et nous avons rapidement dû limiter notre cas d'analyse à un certain type de restaurant pour simplifier la modélisation. L'enjeu n'était pas de simplifier le modèle par rapport à des contraintes techniques, mais d'amener le modèle à la hauteur de la confiance que nous pouvions accorder aux données. En effet, la validité des résultats d'une simulation étant lié à la qualité des données d'entrée, la précision d'un modèle n'a pas d'intérêt si les données d'entrée sont imprécises.

À partir de ce travail, la cohérence du modèle de simulation avec les données disponibles est apparue comme une nécessité pour la validation du modèle. Le modèle doit s'adapter à la problématique et à la diversité d'acteurs, mais il doit aussi s'adapter aux données disponibles. Le travail en collaboration avec un industriel a aussi montré la nécessité d'une bonne compréhension du système pour soutenir certains choix de simulation définissant ce qui est important de ce qui l'est moins.

Un deuxième enseignement a émergé de ce travail sur l'utilisation du modèle de simulation. Le degré de sophistication de la simulation ne permettait pas de donner une réponse quantitative précise à l'une des réglementations. Dès lors, l'utilisation du modèle

ne donnait que la dynamique du système : l'utilisation de véhicules à haute capacité permet d'utiliser moins de véhicules. Or cette conclusion proposée par ce modèle peut aussi émerger d'un autre modèle plus simple. Dans le cas d'une flotte de cent camions, l'augmentation de la capacité d'une unité entrainera une diminution de la flotte de six camions.

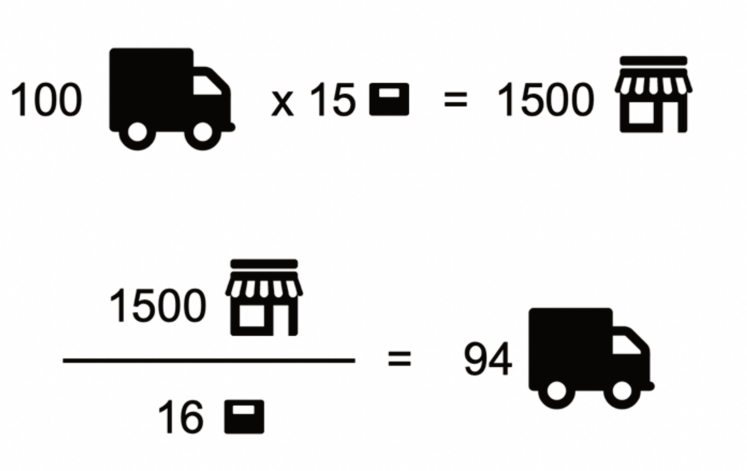

Figure 15 : Un modèle simple mais bien utile

Finalement, si le but de la simulation était de convaincre une municipalité du bien-fondé de l'utilisation de camion, alors il serait plus pertinent d'utiliser le second modèle plus simple mais plus accessible. De plus, la réponse quantitative du premier modèle pourrait donner un faux sentiment de confiance. Dans le deuxième modèle, la simplicité du modèle appelle à la prudence lors de son utilisation. Cette observation a mis en évidence le besoin d'expliciter la validité du modèle à un acteur étranger à la modélisation. En effet, l'utilisation d'un modèle erroné pourrait mener à de mauvaises décisions.

3 Localisation et utilisation des aires de livraison

Simon Tamayo, **Arthur Gaudron** & Arnaud de la Fortelle.
Loading/unloading spaces location and evaluation: an approach through real data. 10th International Conference on City Logistics, Institute for City Logistics, Jun 2017, Phuket, Thailand

Arthur Gaudron, Simon Tamayo & Arnaud de la Fortelle.
Simulation de l'utilisation des aires de livraisons en ville par la méthode de Monte-Carlo.
ATEC - Les rencontres de la mobilité intelligente 2018, Jan 2018, Paris, France

Les aires de livraison sont aménagements d'infrastructure importants pour les opérations de livraison. Ces espaces sont en concurrences avec les autres activités de la ville : stationnement résidentiel, trottoir pour les piétons, voies cyclables. Cette concurrence pousse à une quantification des effets induits par l'aménagement d'aires de livraison pour (1) justifier du (potentiel) caractère prioritaire de l'aménagement et (2) prioriser les aires de livraison pour maximiser son efficacité de manière à ne pas sous utiliser les aires.

Dans le premier travail, nous nous sommes concentrés sur une méthode d'optimisation de la localisation des aires. Nous avons utilisé une modélisation très simple des comportements d'utilisation, et que nous savons éloigné des comportements réels. Par exemple, nous avons considéré que toutes les livraisons utilisaient une aire de livraison (pas de stationnement en double file). De plus, le modèle ne considérait pas les cas où plusieurs livraisons pouvaient avoir lieu au même moment. De fait, la proposition d'une solution par un algorithme d'optimisation pouvait être sujette à caution. A cela, nous devons prendre en compte la difficulté de ce type de problème NP-Complet empêchant une garantie optimalité de la solution. Ce premier modèle illustre la limite de la modélisation d'un problème de logistique urbaine dont le périmètre peut paraitre assez limité. D'une part, la modèle peut être remis en cause dans sa construction, il est difficile de prouver le nécessaire du superflu. D'autre part, même dans le cas d'un modèle simple, la complexité algorithmique du modèle empêche la validation de ce qui pourrait être une bonne solution.

Dans le second travail, nous avons modélisé l'utilisation des aires de livraison dans le temps. Nous pouvons appliquer les mêmes réserves que pour le modèle précédent. Premièrement, les données d'entrée (temps d'une livraison, fréquence de livraison, etc.) sont difficiles à collecter et à valider. Deuxièmement, la complexité des résultats du modèle empêche la validation des résultats. Enfin, la charge computationnelle pour l'évaluation des aires de livraison était trop grande pour l'associer notre outil d'optimisation développé précédemment. Si des améliorations algorithmiques auraient pu être mises en œuvre, la priorité devrait être donnée à la validation du modèle.

En conclusion, ces travaux montrent la difficulté de proposer des outils d'aide à la décision. Premièrement, les problèmes discrets sont algorithmiquement difficiles et sans garantie d'optimalité : le décideur ne peut pas savoir si la solution recommandée est le meilleur possible pour ce modèle. Deuxièmement, la création d'un modèle implique la

simplification de la réalité : le décideur face à une bonne solution recommandée par le modèle n'a pas de garantie que celle-ci sera effective dans la réalité.

4 Machine learning pour l'analyse de texte

Simon Tamayo, François Combes & **Arthur Gaudron**.
Unsupervised machine learning to analyse city logistics through Twitter. 11th International Conference on City Logistics, Jun 2019, Dubrovnik, Croatia

La disponibilité croissante des données dans la logistique urbaine est un levier important pour mieux comprendre ce système. Une part importante de ces données sont sous la forme de texte (e.g. rapport, discussion sur les réseaux sociaux). Le gigantisme de la taille de ces bases de données appelle à l'utilisation de méthode comme le traitement automatique du langage pour leur analyse.

L'objet de ce travail est de montrer que l'analyse du contenu des médias sociaux pourrait aider à comprendre la perception publique de la logistique de la ville. Cet article propose une méthodologie pour collecter du contenu sur Twitter et mettre en œuvre des techniques d'apprentissage automatique (apprentissage non supervisé et traitement du langage naturel), pour effectuer une analyse du contenu et des sentiments. La méthodologie proposée est appliquée à plus de 110 000 tweets contenant des termes-clés City Logistics. Les résultats ont permis de construire une carte d'intérêt des concepts et une analyse des sentiments pour déterminer si les entrées de City Logistics sont positives, négatives ou neutres.

En conclusion, l'analyse du contenu Twitter relatif à la logistique urbaine a montré un biais important avec la présence importante d'acteurs privés : promotion de leurs opérations et actions de recrutement. Ce travail montre une fois de plus le décalage entre des données collectées qui pourrait fournir une analyse juste par rapport au modèle plutôt que par rapport à la réalité. Le déploiement de cette méthodologie sur d'autres corpus de texte comme la littérature scientifique sur la logistique urbaine pourrait être intéressant pour suivre les tendances et les liens entre les travaux de recherche sur une longue période de temps.

5 Marchés de la Ville de Paris

R. Benoit, C. Gunot, S. Tamayo, **A. Gaudron** & F. Fontane.
Food open-air markets in Paris: transportation environmental issues.
World Conference on Transport Research, May 2019, Mumbai, India

Les marchés en ville représentent des flux importants de marchandises et d'occupation de l'espace dans les villes. La forte intégration des marchés dans les modes de consommation n'a pas entrainé de changement important sur leur organisation : les vendeurs s'approvisionnent chez un grossiste ou ils sont eux-mêmes producteurs. Pourtant, les marchés pourraient bien évoluer sous la pression des exigences environnementales ou de modes d'approvisionnement concurrents comme les AMAP (Association pour le maintien d'une agriculture paysanne) ou la grande distribution.

Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur la quantification des impacts des marchés à partir d'une étude terrain sur les marchés parisiens. Cette quantification s'est rapidement heurtée à des considérations qualitatives comme les modes de consommation, l'urbanisation et la notion floue de qualité de vie. L'étude montre l'intérêt de la quantification pour certaines questions (faut-il assurer l'approvisionnement par des véhicules légers ou par des poids-lourds ?).

Toutefois, la limitation d'une approche purement quantitative pour des questions au périmètre plus large : quelle sera l'évolution des modes de consommation ? quel rôle une municipalité peut ou doit jouer ? Cette limitation souligne l'importance de pouvoir intégrer des éléments qualitatifs pour définir des concepts propres aux parties prenantes. La méthodologie du modèle ouvert vise justement à considérer une problématique sous l'angle de la diversité des parties prenantes et les intégrer dans le processus de modélisation pour comprendre leurs attentes et leurs contraintes.

Publications

Conférences avec comité de lecture

1. **Arthur Gaudron**, Simon Tamayo & Arnaud de la Fortelle. Interactive Simulation For Collective Decision Making In City Logistics. 11th International Conference on City Logistics, Jun 2019, Dubrovnik, Croatia

2. Simon Tamayo, François Combes & **Arthur Gaudron**. Unsupervised machine learning to analyse city logistics through Twitter. 11th International Conference on City Logistics, Jun 2019, Dubrovnik, Croatia

3. Raphael Benoit, Corine Gunot, Simon Tamayo, **Arthur Gaudron** & Frédéric Fontane. Food open-air markets in Paris: transportation environmental issues. World Conference on Transport Research, May 2019, Mumbai, India

4. **Arthur Gaudron**, Simon Tamayo & Arnaud de la Fortelle. Interactive Simulation To Explore Urban Distribution Schemes. 21st EURO Working Group on Transportation Meeting, Sep 2018, Braunschweig, Germany

5. Apollinaire Barme, Simon Tamayo & **Arthur Gaudron**. Statistic regression and open data approach for identifying economic indicators that influence e-commerce. 20th International Conference on Urban Transportation and City Logistics, May 2018, London, United Kingdom

6. **Arthur Gaudron**, Simon Tamayo & Arnaud de la Fortelle. Simulation de l'utilisation des aires de livraisons en ville par la méthode de Monte-Carlo. ATEC - Les rencontres de la mobilité intelligente 2018, Jan 2018, Paris, France

7. Sarra Jlassi, Simon Tamayo, **Arthur Gaudron** & Arnaud de la Fortelle. Simulating impacts of regulatory policies on urban freight: application to the catering setting. 6th International Conference on Advanced Logistics and Transport, IEEE, Jul 2017, Bali, Indonesia

8. Simon Tamayo, **Arthur Gaudron** & Arnaud de la Fortelle. Loading/unloading spaces location and evaluation: an approach through real data. 10th International Conference on City Logistics, Institute for City Logistics, Jun 2017, Phuket, Thailand

9. Sarra Jlassi, Simon Tamayo & **Arthur Gaudron**. Simulation applied to urban logistics: a state of the art. 10th International Conference on City Logistics, Institute for City Logistics, Jun 2017, Phuket, Thailand

Conférences sans comité de lecture

1. “Collaboration in city logistics using interactive simulation” 8th METRANS International Urban Freight Conference, 17th Oct 2019, Long Beach, USA
2. “Classifying logistic vehicles in cities using Deep learning” 8th METRANS International Urban Freight Conference, 17th Oct 2019, Long Beach, USA
3. Les données, base d’apprentissage de l’intelligence artificielle Cycle de conférences “Quelle régulation pour l’intelligence artificielle ?”Université Paris Descartes, 8th February 2018, Paris, France
4. Mobile multi-depot vehicle routing problem. 7th METRANS International Urban Freight Conference, Oct 2017, Long Beach, USA
5. Loading/Unloading Spaces Location And Evaluation. EURO Winter Institute on “Methods and Models in Transportation Problems”, 14-23 Feb 2017, Bressanone, Italy

Références

Abel, H., & Karrer, R. (2006). *Best Practice Handbook—BESTUFS* (p. 178). Rapp Trans AG.

Ackoff, R. L. (1977). Optimization + objectivity = optout. *European Journal of Operational Research*, *1*(1), 1-7. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(77)81003-5

Ackoff, R. L. (1983). An Interactive View of Rationality. *Journal of the Operational Research Society*, *34*(8), 719-722. https://doi.org/10.1057/jors.1983.165

Adam, M., & Ropital, C. (2018). *LA LOGISTIQUE, FONCTION VITALE* (p. 104). Institut Paris Region.

Aiura, N., & Taniguchi, E. (2005). *PLANNING ON-STREET LOADING-UNLOADING SPACES CONSIDERING THE BEHAVIOUR OF PICKUP-DELIVERY VEHICLES. 6*, 12.

ALICE. (2016). *ALICE Recommendations to H2020 Work Programs 2018-2020*.

Allen, J., Anderson, S., Browne, M., & Jones, P. (2000). A framework for considering policies to encourage sustainable urban freight traffic and goods/service flows : Summary report. *Time*, *March*, 1–35.

Allen, J., Browne, M., Woodburn, A., & Leonardi, J. (2012). The Role of Urban Consolidation Centres in Sustainable Freight Transport. *Transport Reviews*, *32*(4), 473-490. https://doi.org/10.1080/01441647.2012.688074

Allen, J., & Eichhorn, C. (2007). *BESTUFS II - Port cities and innovative urban freight solutions. Managing urban freight transport by companies and local aut.pdf*.

Allen, J., Thorne, G., & Browne, M. (2007). *Good practice guide on urban freight transport* (p. 84). N.A. www.bestufs.net

Ambrosini, C., Gonzalez-Feliu, J., & Toilier, F. (2013). A design methodology for scenario-analysis in urban freight modelling. *European Transport / Trasporti Europei*, *54*, 21.

Ambrosini, C., Patier, D., & Routhier, J.-L. (2010). Urban freight establishment and tour based surveys for policy oriented modelling. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *2*(3), 6013-6026. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.015

Ambrosini, C., Routhier, J.-L., Sonnetag, H., & Meimbresse, B. (2008). *URBAN FREIGHT MODELLING: A REVIEW*. 29.

Amoore, L., & Piotukh, V. (2015). *Life beyond big data – governing with little analytics*. 34.

Anand, N., Meijer, D., van Duin, J. H. R., Tavasszy, L., & Meijer, S. (2016). Validation of an agent based model using a participatory simulation gaming approach : The case of city logistics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *71*, 489-499. https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.08.002

Anand, N., Quak, H., van Duin, R., & Tavasszy, L. (2012). City Logistics Modeling Efforts : Trends and Gaps - A Review. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *39*, 101-115.

https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.094

Anderson, S., Allen, J., & Browne, M. (2005). Urban logistics—how can it meet policy makers' sustainability objectives? *Journal of Transport Geography*, *13*(1), 71-81. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2004.11.002

Autonomous Vehicle Robot Delivery. (2020). Ford Corporate. http://corporate.ford.com/articles/products/autonomous-vehicle-robot-delivery.html

Behrends, S. (2016). Recent Developments in Urban Logistics Research – A Review of the Proceedings of the International Conference on City Logistics 2009 – 2013. *Transportation Research Procedia*, *12*, 278-287. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.065

Beria, P., Maltese, I., & Mariotti, I. (2012). Multicriteria versus Cost Benefit Analysis : A comparative perspective in the assessment of sustainable mobility. *European Transport Research Review*, *4*(3), 137-152. https://doi.org/10.1007/s12544-012-0074-9

Best, B. J. (2005). *A Model of Fast Human Performance on a Computationally Hard Problem*. 6.

Bonnafous, A. (2019). « Le diesel est mieux placé que l'essence en matière de pollution ». *Le Monde.fr*. https://nouveau.europresse.com/Link/PSLT_1/news%c2%b720190316%c2%b7LMF%c2%b75437167

Bonnafous, A., Gonzalez-Feliu, J., & Routhier, J.-L. (2013). *An alternative UGM Paradigm to O-D matrices : The FRETURB model*. 22.

Bonneuil, C., & Fressoz, J.-B. (2013). *L'événement Anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*. Seuil.

Bourlon, A.-M., Berger, P., Françon, S., Levifve, H., Nicol, M.-A., & Renouvel, S. (2014). *Logistique urbaine : Vers un schéma d'orientation logistique parisien*.

Box, G. E. (1979). Robustness in the strategy of scientific model building. In *Robustness in statistics* (p. 201–236). Elsevier.

Bozzo, R., Conca, A., & Marangon, F. (2014). Decision Support System for City Logistics : Literature Review, and Guidelines for an Ex-ante Model. *Transportation Research Procedia*, *3*, 518-527. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.033

Brygo, J. (2019, août 1). *Peut-on encore vivre sans Internet ?* Le Monde diplomatique. https://www.monde-diplomatique.fr/2019/08/BRYGO/60129

Busco, C., & Quattrone, P. (2015). Exploring How the Balanced Scorecard Engages and Unfolds : Articulating the Visual Power of Accounting Inscriptions. *Contemporary Accounting Research*, *32*(3), 1236-1262. https://doi.org/10.1111/1911-3846.12105

Cattaruzza, D., Absi, N., Feillet, D., & González-Feliu, J. (2017). Vehicle routing problems for city logistics. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, *6*(1), 51-79. https://doi.org/10.1007/s13676-014-0074-0

Chambers, J., & Elfrink, W. (2014, octobre 31). *The Future of Cities*. https://www.foreignaffairs.com/articles/2014-10-31/future-cities

Chiabaut, N., Lopez, C., & Leclercq, L. (2016). *Evaluation of the performance of an urban freight system*. 18.

Collet, P., & Pillot, D. (2017). *Pollution de l'air—Une étude alerte sur les émissions des scooters et des voiturettes*. 3.

Comi, A. (2012). *Urban Freight Transport Demand Modelling : A State of the Art*. *51*, 17.

Comi, A., & Rosati, L. (2015). CLASS : A DSS for the Analysis and the Simulation of Urban Freight Systems. *Transportation Research Procedia*, *5*, 132-144. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.01.007

Crainic, T. G. (2008). City Logistics. In *State-of-the-Art Decision-Making Tools in the Information-Intensive Age* (p. 181-212). INFORMS. https://doi.org/10.1287/educ.1080.0047

Crainic, T. G., Perboli, G., Mancini, S., & Tadei, R. (2010). Two-Echelon Vehicle Routing Problem : A satellite location analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *2*(3), 5944-5955. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.009

Crainic, T. G., Ricciardi, N., & Storchi, G. (2009). Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems. *Transportation Science*, *43*(4), 432-454. https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0279

Croes, G. A. (1958). A Method for Solving Traveling-Salesman Problems. *Operations Research*, *6*(6), 791-812. https://doi.org/10.1287/opre.6.6.791

Cuevas, A., Giesen, R., Merchan, D., Winkenbach, M., & Bianco, E. (2017, juin). *Location of Urban Loading and Unloading bays using the hypercube model : Application for Santiago, Chile*. The Tenth International Conference on City Logistics, Phuket, Thailand.

Dablanc, L. (2007). Goods transport in large European cities : Difficult to organize, difficult to modernize. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *41*(3), 280-285. https://doi.org/10.1016/j.tra.2006.05.005

Dablanc, L. (2013). *Commercial Goods Transport, Paris, France* (p. 15).

Dablanc, L., & Frémont, A. (2016). *La métropole logistique. Le transport de marchandises et le territoire des grandes villes, Laetitia Dablanc et Antoine Frémont (dir.)* (Vol. 4). https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-01433547

Debrie, J., & Heitz, A. (2017). La question logistique dans l'aménagement de l'Ile-de-France : Formulation d'un enjeu métropolitain versus absence de concrétisation dans les projets urbains ? *Géographie, économie, société*, *19*(1), 55-73. https://doi.org/10.3166/ges.19.2017.0003

Den Boer, E., Otten, M., & Van Essen, H. (2011). STREAM International Freight 2011 : Comparison of various transport modes on a EU scale with the STREAM database. *CE Delft, Delft, The Netherlands*.

Dezi, G., Dondi, G., & Sangiorgi, C. (2010). Urban freight transport in Bologna : Planning commercial vehicle loading/unloading zones. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *2*(3), 5990-6001. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.013

Donnelly, R., Thompson, R. G., & Wigan, M. (2012). Process Validation of Urban Freight and Logistics Models. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *39*, 400-408. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.117

Drexl, M., & Schneider, M. (2015). A survey of variants and extensions of the location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, *241*(2), 283-308. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.08.030

Eliot, L. (2019). *Pairing Self-Driving Cars With Autonomous Drones For Faster Fast Food Delivery*. Forbes. https://www.forbes.com/sites/lanceeliot/2019/06/21/self-driving-cars-paired-with-autonomous-drones-for-faster-fast-food-delivery/

ERTRAC, & ALICE. (2015). *Urban freight—Research & Innovation Roadmap*.

European Commission (Éd.). (2014). *Transport : Connecting Europe's citizens and business* (Ms. updated in November 2014). Publ. Off. of the Europ. Union.

Flood, M. M. (1956). The Traveling-Salesman Problem. *Operations Research*, *4*(1), 61-75. https://doi.org/10.1287/opre.4.1.61

Gardrat, M. (2017). *Impensée mais structurante, refoulée mais exhibée : La mobilité urbaine des marchandises*.

Gaudron, A., Tamayo, S., & de La Fortelle, A. (2018). *Simulation de l'utilisation des aires de livraisons en ville par la méthode de Monte-Carlo*. 11.

Gaudron, A., Tamayo, S., & Fortelle, A. de L. (2019). Interactive Simulation For Collective Decision Making In City Logistics. *Transportation Research Procedia*, 8.

Gaudron, A., Tamayo, S., & La Fortelle, A. de. (2017). *Mobile multi-depot vehicle routing problem*. 7th METRANS International Urban Freight Conference 2017.

Gaudron, A., Tamayo, S., & La Fortelle, A. de. (2019a). Interactive Simulation To Explore Urban Distribution Schemes. *Transportation Research Procedia*, *37*, 75-82. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.168

Gaudron, A., Tamayo, S., & La Fortelle, A. de. (2019b). Interactive Simulation To Explore Urban Distribution Schemes. *Transportation Research Procedia*, *37*, 75-82. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.168

Gennevilliers, le nouveau grenier de Paris. (2019, mars 20). Les Echos. https://www.lesechos.fr/industrie-services/tourisme-transport/gennevilliers-le-nouveau-grenier-de-paris-1001707

Gonzalez-Feliu, J. (2016). *Viability and potential demand capitation of urban freight tramway systemss via demand-supply modelling and cost benefit analysis*. 9.

Gonzalez-Feliu, J. (2018). Sustainability Evaluation of Green Urban Logistics Systems : Literature Overview and Proposed Framework. In A. K. Paul, D. K. Bhattacharyya, & S. Anand (Éds.), *Green Initiatives for Business Sustainability and Value Creation:* IGI Global. https://doi.org/10.4018/978-1-5225-2662-9

Gonzalez-Feliu, J., Perboli, G., Tadei, R., & Vigo, D. (2008). *The two-echelon capacitated vehicle routing problem*. 57.

Gonzalez-Feliu, J., & Routhier, J.-L. (2012). Modeling Urban Goods Movement : How to be Oriented with so Many Approaches? *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *39*, 89-100. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.093

Gonzalez-Feliu, J., & Sánchez-Díaz, I. (2019). The influence of aggregation level and category construction on estimation quality for freight trip generation models. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *121*, 134-148. https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.07.007

Gonzalez-Feliu, J., Semet, F., & Routhier, J.-L. (Éds.). (2014). *Sustainable Urban Logistics : Concepts, Methods and Information Systems*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31788-0

Gram, M. (2020, février 17). *On Design Thinking*. https://web.archive.org/web/20200217051856/https://nplusonemag.com/issue-35/reviews/on-design-thinking/

Great Britain. Ministry of Transport, & Smeed, R. J. (1964). *Road pricing : The economic and technical possibilities*. HMSO. http://archive.org/details/op1265810-1001

Green, B. (2019). *1. The Smart City : A New Era on the Horizon*. 14.

Grzybowska, H., & Barceló, J. (2012). Decision Support System for Real-Time Urban Freight Management. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *39*, 712-725. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.142

Guerlain, C., Cortina, S., & Renault, S. (2016). Towards a Collaborative Geographical Information System to Support Collective Decision Making for Urban Logistics Initiative. *Transportation Research Procedia*, *12*, 634-643. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.017

Gui, S., Zhu, Q., & Lu, L. (2005). Area Logistics System Based on System Dynamics Model. *Tsinghua Science and Technology*, 5.

Halatsis, Gagatsi, Chrysochoou, Stathacopoulos, & Xenou. (2016). *D2.3 "Understanding Cities" Tool* (p. 48).

Heitz, A., & Dablanc, L. (2019). *Mobilité des marchandises dans la ville durable : Les nouveaux enjeux de l'action publique locale*. IFSTTAR : CGI.

Holguín-Veras, J. (2008). Necessary conditions for off-hour deliveries and the effectiveness of urban freight road pricing and alternative financial policies in competitive markets. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *42*(2), 392-413.

https://doi.org/10.1016/j.tra.2007.10.008

Holguín-Veras, J., Amaya Leal, J., Sánchez-Diaz, I., Browne, M., & Wojtowicz, J. (2018). State of the art and practice of urban freight management. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, S0965856418301265. https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.10.037

Holguín-Veras, J., & Jaller, M. (2014). Comprehensive Freight Demand Data Collection Framework for Large Urban Areas. In J. Gonzalez-Feliu, F. Semet, & J.-L. Routhier (Éds.), *Sustainable Urban Logistics : Concepts, Methods and Information Systems* (p. 91–112). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31788-0_6

Holguín-Veras, J., Sánchez-Díaz, I., Lawson, C. T., Jaller, M., Campbell, S., Levinson, H. S., & Shin, H.-S. (2013). Transferability of Freight Trip Generation Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *2379*(1), 1-8. https://doi.org/10.3141/2379-01

Huschebeck, M. (2004). *BEST Urban Freight Solutions—Recommendations for further activities (IV)*.

Jlassi, S., Tamayo, S., & Gaudron, A. (2018). Simulation Applied to Urban Logistics : A State of the Art. In *City Logistics 3* (p. 65-87). John Wiley & Sons, Inc. https://doi.org/10.1002/9781119425472.ch4

Jlassi, S., Tamayo, S., Gaudron, A., & de La Fortelle, A. (2017). Simulating impacts of regulatory policies on urban freight : Application to the catering setting. *2017 6th IEEE International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT)*, 106-112. https://doi.org/10.1109/ICAdLT.2017.8547005

Joubert, J. W., Fourie, P. J., & Axhausen, K. W. (2011). *A large scale combined private car and commercial vehicle agent-based traffic simulation $,$*. 14.

Jupyter, P., Bussonnier, M., Forde, J., Freeman, J., Granger, B., Head, T., Holdgraf, C., Kelley, K., Nalvarte, G., Osheroff, A., Pacer, M., Panda, Y., Perez, F., Ragan-Kelley, B., & Willing, C. (2018). Binder 2.0—Reproducible, interactive, sharable environments for science at scale. *Proceedings of the 17th Python in Science Conference*, 113-120. https://doi.org/10.25080/Majora-4af1f417-011

Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (1996). *The Balanced Scorecard : Translating Strategy into Action*. https://www.hbs.edu/faculty/Pages/item.aspx?num=8831

Kapros, S., Panou, K., & Tsamboulas, D. A. (2005). Multicriteria approach to the evaluation of intermodal freight villages. *Transportation Research Record*, *1906*(1), 56–63.

Kawrykow, A., Roumanis, G., Kam, A., Kwak, D., Leung, C., Wu, C., Zarour, E., Phylo players, Sarmenta, L., Blanchette, M., & Waldispühl, J. (2012). Phylo : A Citizen Science Approach for Improving Multiple Sequence Alignment. *PLoS ONE*, *7*(3), e31362. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0031362

Keen, P. G. (1980). Decision support systems : A research perspective. *Decision support systems: Issues and challenges: Proceedings of an international task force meeting*, 23–44.

Keeney, R. L. (2013). Foundations for Group Decision Analysis. *Decision Analysis*, *10*(2), 103-120. https://doi.org/10.1287/deca.2013.0265

Korzhenevych, A., Dehnen, N., Bröcker, J., Holtkamp, M., Meier, H., Gibson, G., Varma, A., & Cox, V. (2014). *Update of the Handbook on External Costs of Transport*.

Ladyman, J., Lambert, J., & Wiesner, K. (2013). What is a complex system? *European Journal for Philosophy of Science*, *3*(1), 33-67. https://doi.org/10.1007/s13194-012-0056-8

LAET. (2019). *La nouvelle vague d'enquêtes nationales Marchandises en Ville*. http://tmv.laet.science/projets/Enquetes/index.htm#Renouvellement

Lagneau-Ymonet, P. (2020, février 1). *Sciences pauvres*. Le Monde diplomatique. https://www.monde-diplomatique.fr/2020/02/LAGNEAU_YMONET/61312

Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem : An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, *59*(3), 345-358. https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90192-C

Lootsma, F. A. (1990). The french and the american school in multi-criteria decision analysis. *Opérations Research*, 24.

Lopez, C. (2017). *Modélisation dynamique du trafic et transport de marchandises en ville : Vers une approche combinée*. 174.

Lopez, C., Zhao, C.-L., Magniol, S., Chiabaut, N., & Leclercq, L. (2019). Microscopic Simulation of Cruising for Parking of Trucks as a Measure to Manage Freight Loading Zone. *Sustainability*, *11*(5), 1276. https://doi.org/10.3390/su11051276

Macharis, C., De Witte, A., & Turcksin, L. (2010). The Multi-Actor Multi-Criteria Analysis (MAMCA) application in the Flemish long-term decision making process on mobility and logistics. *Transport Policy*, *17*(5), 303-311. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.02.004

Malmi, T. (2001). Balanced scorecards in Finnish companies : A research note. *Management Accounting Research*, *12*(2), 207-220. https://doi.org/10.1006/mare.2000.0154

Mancini, S. (2013). *Multi-Echelon Distribution Systems in City Logistics*. *54*, 24.

Mattessich, R. (2003). Accounting representation and the onion model of reality : A comparison with Baudrillard's orders of simulacra and his hyperreality. *Accounting, Organizations and Society*, *28*(5), 443-470. https://doi.org/10.1016/S0361-3682(02)00024-7

McKernan, J. F. (2007). Objectivity in accounting. *Accounting, Organizations and Society*, *32*(1-2), 155-180. https://doi.org/10.1016/j.aos.2006.03.008

McKinnon, A. C. (Éd.). (2011). *Green logistics : Improving the environmental sustainability of logistics* (Reprinted). Kogan Page.

Meinard, Y., & Cailloux, O. (2020). On justifying the norms underlying decision support. *European Journal of Operational Research*, *285*(3), 1002-1010. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.02.022

Mendoza, G. A., & Prabhu, R. (2005). Combining participatory modeling and multi-criteria analysis for community-based forest management. *Forest Ecology and Management*, *207*(1-2), 145-156. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.024

Mercedes-Benz to Show Drone Mothership Vision Van at CES. (2017, janvier 4). Trucks.Com. https://www.trucks.com/2017/01/04/mercedes-benz-drone-vision-van-ces/

Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer. (2016). *La logistique tour d'horizon*.

Montreuil, B., Meller, R. D., & Ballot, E. (2013). Physical internet foundations. In *Service orientation in holonic and multi agent manufacturing and robotics* (p. 151–166). Springer.

Morana, J., & Gonzalez-Feliu, J. (2015). A sustainable urban logistics dashboard from the perspective of a group of operational managers. *Management Research Review*, *38*(10), 1068-1085. https://doi.org/10.1108/MRR-11-2014-0260

NY Times. (2016, mars 25). Opinion | The Racism at the Heart of Flint's Crisis. *The New York Times*. https://www.nytimes.com/2016/03/25/opinion/the-racism-at-the-heart-of-flints-crisis.html

Ortuzar, J., & Willumsen, L. G. (2002). *Modelling Transport*. Wiley. https://books.google.fr/books?id=EmRhDNLWtVUC

Palacios-Argüello, L., Gonzalez-Feliu, J., Gondran, N., & Badeig, F. (2018). Assessing the economic and environmental impacts of urban food systems for public school canteens : Case study of Great Lyon region. *European Transport Research Review*, *10*(2), 37. https://doi.org/10.1186/s12544-018-0306-8

Palmisano, S. (2011, novembre 10). *IBM - Sam Palmisano—Smarter Cities : Crucibles of Global Progress—United States* [CT402]. http://www.ibm.com/smarterplanet/us/en/smarter_cities/article/rio_keynote.html

Parra Herrera, J. E., Palacios-Arguello, L., Gonzalez-Feliu, J., & Jaimes, W. (2017). *Decision support system design requirements, information management and urban logistics efficiency : Case study of Bogotá, Colombia.* (p. 224-239).

Porter, T. M. (1996). *Trust in Numbers : The Pursuit of Objectivity in Science and Public Life*. Princeton University Press. https://books.google.fr/books?id=oK0QpgVfIN0C

Power, D. J. (2002). *Decision Support Systems : Concepts and Resources for Managers*. Quorum Books. https://books.google.fr/books?id=9NA6QMcte3cC

Qiu, Y., Shi, X., & Shi, C. (2015). A system dynamics model for simulating the logistics demand dynamics of metropolitans : A case study of Beijing, China. *Journal of Industrial Engineering and Management*, *8*(3), 783-803. https://doi.org/10.3926/jiem.1325

Quak, H., Lindholm, M., Tavasszy, L., & Browne, M. (2016). From Freight Partnerships to City Logistics Living Labs – Giving Meaning to the Elusive Concept of Living Labs. *Transportation Research Procedia*, *12*, 461-473. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.080

Rabe, M., Clausen, U., Klueter, A., & Poeting, M. (2016). An approach for modeling

collaborative route planning in supply chain simulation. *2016 Winter Simulation Conference (WSC)*, 2228-2238. https://doi.org/10.1109/WSC.2016.7822264

Raicu, R., Raicu, Ş., Popa, M., & Costescu, D. (2012). On the Evaluation of Urban Logistics Intermodal Terminal Projects. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *39*, 726-738. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.143

Raiffa, H., Richardson, J., Metcalfe, D., & others. (2002). *Negotiation analysis : The science and art of collaborative decision making*. Harvard University Press.

Routhier, J., & Aubert, P. (1999). *FRETURB, un modèle de simulation des transports de marchandises en ville, 8th WCTR Antwerp proceedings, Vol. 1*. Elsevier.

Russell, S. J., & Norvig, P. (2016). *Artificial intelligence : A modern approach* (Third edition, Global edition). Pearson.

Russo, F., & Comi, A. (2010). A classification of city logistics measures and connected impacts. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *2*(3), 6355-6365. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.044

Sartori, D., & Europäische Kommission (Éds.). (2015). *Guide to cost-benefit analysis of investment projects : Economic appraisal tool for cohesion policy 2014 - 2020* (Dec. 2014). Publ. Office of the Europ. Union.

Schroeder, S., Zilske, M., Liedtke, G., & Nagel, K. (2012). Towards a Multi-Agent Logistics and Commercial Transport Model : The Transport Service Provider's View. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *39*, 649-663. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.137

Seik, F. T. (2000). An advanced demand management instrument in urban transport : Electronic road pricing in Singapore. *Cities*, *17*(1), 33-45. https://doi.org/10.1016/S0264-2751(99)00050-5

Semuels, A. (2016, mars 18). *The Role of Highways in American Poverty*. The Atlantic. https://www.theatlantic.com/business/archive/2016/03/role-of-highways-in-american-poverty/474282/

Simon, H. A. (1990). Prediction and Prescription in Systems Modeling. *Operations Research*, *38*(1), 7-14. https://doi.org/10.1287/opre.38.1.7

Tamayo, S., & Gaudron, A. (2017). *Loading/unloading spaces location and evaluation : An approach through real data*. 16.

Taniguchi, E., Thompson, R. G., & Qureshi, A. G. (2020). Modelling city logistics using recent innovative technologies. *Transportation Research Procedia*, *46*, 3-12. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.157

Taniguchi, E., Thompson, R. G., Yamada, T., & van Duin, R. (2001). *City Logistics : Network Modelling and Intelligent Transport Systems*. Emerald Group Publishing Limited. https://doi.org/10.1108/9780585473840

Thibodeau, P. H., & Boroditsky, L. (2011). Metaphors We Think With : The Role of Metaphor in

Reasoning. *PLoS ONE*, *6*(2), e16782. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016782

Tisue, S., & Wilensky, U. (2004). *NetLogo : A Simple Environment for Modeling Complexity*. 10.

Toilier, F., Gardrat, M., Routhier, J. L., & Bonnafous, A. (2018). Freight transport modelling in urban areas : The French case of the FRETURB model. *Case Studies on Transport Policy*, *6*(4), 753-764. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2018.09.009

Vahrenkamp, R. (2013). *Why failed the urban consolidation centres*.

Van Binsbergen, A. J., & Visser, J. G. S. N. (2001). *Innovation steps towards efficient goods distribution systems for urban areas : Efficienty improvement of goods distribution in urban areas*. DUP Science.

van den Bossche, Maes, Vanelslander, Macário, & Reis. (2017). *Use of information and communication technologies Technical report*.

van Duin, R., Quak, H., & Munuzuri, J. (2007). *Revival of the cost benefit analysis for evaluating the city distribution center concept?* 14.

Van, E. L., Zuccarello, P., Toilier, F., Routhier, J.-L., Gérardin, B., & Gardrat, M. (2016). *SILOGUES: SImuler la LOGistique Urbaine dans son environnement Economique et Spatial*. 110.

Verlinde, S., & Macharis, C. (2016). Who is in Favor of off-hour Deliveries to Brussels Supermarkets? Applying Multi Actor Multi Criteria Analysis (MAMCA) to Measure Stakeholder Support. *Transportation Research Procedia*, *12*, 522-532. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.008

Vogel, J. J., Vogel, D. S., Cannon-Bowers, J., Bowers, C. A., Muse, K., & Wright, M. (2006). Computer Gaming and Interactive Simulations for Learning : A Meta-Analysis. *Journal of Educational Computing Research*, *34*(3), 229-243. https://doi.org/10.2190/FLHV-K4WA-WPVQ-H0YM

Wikipedia. (2019). Rocket mail. In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rocket_mail&oldid=918118059

Winner, L. (2010). *The whale and the reactor : A search for limits in an age of high technology*. University of Chicago Press.

Wisetjindawat, W., & Sano, K. (2003). *A BEHAVIORAL MODELING IN MICRO-SIMULATION FOR URBAN FREIGHT TRANSPORTATION*. 16.

Yearley, S., Cinderby, S., Forrester, J., Bailey, P., & Rosen, P. (2003). Participatory Modelling and the Local Governance of the Politics of UK Air Pollution : A Three-City Case Study. *Environmental Values*, *12*(2), 247-262. https://doi.org/10.3197/096327103129341315

Yearwood, J. L., & Stranieri, A. (2006). The generic/actual argument model of practical reasoning. *Decision Support Systems*, *41*(2), 358-379. https://doi.org/10.1016/j.dss.2004.07.004

Yearwood, J. L., & Stranieri, A. (2009). Deliberative discourse and reasoning from generic

argument structures. *AI & SOCIETY*, *23*(3), 353-377. https://doi.org/10.1007/s00146-006-0069-y

RÉSUMÉ

Le transport de marchandises, ou logistique urbaine, est un système complexe tant par la diversité de ses parties prenantes (ville, transporteurs, commerçants, etc.) que par l'intrication de leurs interactions. Chacun de ces acteurs a des objectifs qui lui sont propres mais dont les effets des décisions pour y parvenir se répercutent à un niveau global. Piloter cette activité représente donc un réel défi : non seulement modéliser précisément le système – passé ou présent – pose de réelles difficultés (en termes de complexité et des données nécessaires), mais cette modélisation ne permet que difficilement d'augurer des effets des décisions prises sur celui-ci. Son pilotage demande la capacité de projeter et se représenter les effets de décisions, non-encore observées, sur celui-ci. Pour que les décisions de la logistique urbaine soient pertinentes, elles doivent s'appuyer sur des modèles qui devront intégrer une vision plus fine de l'activité, au niveau microscopique, c'est-à-dire des opérations, vers un niveau macroscopique qui primait jusque-là. Pour cela, nous proposons donc de nous appuyer sur des outils de simulation mathématique qui ont pour objectif de simuler les effets macroscopiques de différentes décisions (p. ex. interdiction de certaines motorisations), en prenant en compte les interactions microscopiques de la logistique comme la prévisible modification d'une organisation logistique et l'impact sur les indicateurs associés (p. ex. le niveau de pollution d'une rue ou le coût de la livraison).

C'est pourquoi nous proposons la « méthodologie du modèle ouvert » dont l'objectif est de concevoir et valider un modèle qui pourra être utilisé par les acteurs de la logistique urbaine lors de leur prise de décision stratégique. Au cœur de cette méthodologie se tient la question de l'intégration du savoir expert dans un modèle de simulation. Une telle question agite la communauté scientifique au moins depuis la création de l'IA comme discipline : d'abord avec les systèmes experts, dont l'échec est lié à l'impossibilité de mécaniser le savoir expert ; à présent avec les avancées extrêmement prometteuses de l'apprentissage automatique, qui entre autres tentent d'apprendre par des données les raisonnements des experts, mais dont les modèles se heurtent à des problèmes de disponibilité de la donnée, de validation et d'explicabilité. Nous pensons que cette méthodologie permet de réconcilier la science des données et les sciences de gestion de manière à ce que dans des environnements complexes, la décision puisse être assistée par des simulations qui permettent de plus précisément maîtriser cette complexité. De plus, en supposant une certaine disponibilité de la donnée, et la volonté de la mise en place d'un pilotage data-driven (donc plus automatisé), ce modèle pourrait servir comme une première base de validation de modèles plus complexes d'apprentissage automatique.

MOTS CLÉS

Aide à la décision, simulation interactive, intelligence artificielle, logistique urbaine

ABSTRACT

The transportation of goods, or city logistics, is a complex system as much by the diversity of its stakeholders (city, transporters, traders, etc.) as by the entanglement of their interactions. Each of these actors has its own objectives, but the effects of decisions to achieve them have repercussions on a global level. Piloting this activity therefore represents a real challenge: not only precisely modeling the system - past or present - poses real difficulties (in terms of complexity and of the data required), but this modeling makes it difficult to predict the effects of the decisions taken on this one. Its management requires the ability to project and represent the effects of decisions, not yet observed, on it. Relevant city logistics decisions must be based on models which must integrate a more detailed vision of activity, at the microscopic level, that is to say operations, towards a macroscopic level which prevailed until then. To do this, we therefore propose to rely on mathematical simulation tools which aim to simulate the macroscopic effects of different decisions (e.g. prohibition of certain engines) by considering microscopic interactions of logistics such as foreseeable change in a logistics organization and the impact on associated indicators (e.g., the level of pollution on a street or the cost of delivery).

This is why we are proposing the "open model methodology", the objective is to design and validate a model that can be used by actors in city logistics when making strategic decisions. At the heart of this methodology is the question of integrating expert knowledge into a simulation model. Such a question has agitated the scientific community at least since the creation of AI as a discipline: first with expert systems, whose failure is linked to the impossibility of mechanizing expert knowledge; now with the extremely promising advances in machine learning, which among other things attempt to learn from experts reasoning, but whose models face problems of data availability, validation and explainability. We believe that this methodology makes it possible to reconcile data science and management science so that in complex environments, the decision can be assisted by simulations which allow to master more precisely this complexity. In addition, assuming a certain availability of data, and the desire to set up a data-driven piloting (therefore more automated), this model could serve as a first basis for validating more complex machine learning models.

KEYWORDS

Decision support system, interactive simulation, artificial intelligence, city logistics