

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)

Discipline ou spécialité :

Informatique et Automatique

Présentée et soutenue par :

M. JUSTIN MOSKOLAI NGOSSAHA

le mercredi 26 septembre 2018

Titre :

Contribution à la conception d'un système de mobilité urbaine durable : de l'élicitation des connaissances à l'architecture distribuée du système

---

Ecole doctorale :

Systèmes (Systèmes)

Unité de recherche :

Laboratoire Génie de Productions de l'ENIT (E.N.I.T-L.G.P.)

Directeur(s) de Thèse :

M. BERNARD ARCHIMEDE

M. MARCEL FOUDA NDJODO

Rapporteurs :

M. REMY DUPAS, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

M. THIBAUD MONTEIRO, INSA LYON

Membre(s) du jury :

M. HERVE PINGAUD, INSTITUT NATIONAL UNIV. CHAMPOLLION, Président

M. BERNARD ARCHIMEDE, ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TARBES, Membre

M. EMMANUEL HYGOUNENC, GROUPE SAFRAN, Membre

MI. MARCEL FOUDA NDJODO, UNIVERSITE DE YAOUNDE 1, Membre

Mme TATIANA GRAINDORGE, EIGSI LA ROCHELLE, Membre

M. RAYMOND HOUE NGOUNA, ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TARBES, Membre

Dédicace

A toute la famille MOSKOLAI

Remerciements

Je voudrais exprimer toute ma gratitude à mes directeurs de thèse, M. Bernard ARCHIMEDE et M. Marcel FOUDA NDJODO, d'avoir accepté de diriger ma thèse après m'avoir orienté sur un sujet intéressant et d'actualité, en me consacrant une partie de leur temps pour me rappeler la rigueur scientifique et m'assister de leurs précieux conseils qui ont fait progresser cette thèse.

J'associe tout particulièrement à ces remerciements M. Raymond HOUE NGOUNA pour m'avoir encadré et guidé tout au long de ces années vers la thématique de la mobilité urbaine en me prodiguant ses conseils constructifs, pour sa grande disponibilité, sa rigueur et sa patience à corriger mes erreurs malgré ses multiples occupations, et également M. Jean Michel NLONG II et M. Adolphe AYISSI ETEME pour leur encadrement et conseils.

Mes remerciements sincères à M. Thibaud MONTEIRO et M. Rémy DUPAS qui ont accepté d'être rapporteurs en vue de la soutenance de ma thèse, pour leurs remarques constructives et leurs conseils judicieux sur le manuscrit, et pour avoir bien voulu fournir leur rapport dans des délais très contraints.

J'aimerais également remercier M. Emmanuel HYGOUNENC qui a accepté de participer au jury et d'y apporter la vision et l'expertise de l'Ingénierie Système, ainsi que Mme Tatiana GRAINDORGE et M. Hervé PINGAUD.

Ma gratitude va aussi à l'endroit de Monseigneur Samuel KLEDA, Archevêque Métropolitain de Douala, Président de la Conférence Episcopale des évêques du Cameroun, Grand Chancelier de Saint Jérôme de Douala et à M. Emmanuel POHOWE, Administrateur Général de Saint Jérôme de Douala pour m'avoir permis de mener cette thèse à terme, à tous mes collègues de Saint Jérôme Douala et de l'ENI de Tarbes qui m'ont aidé lors de la réalisation de cette thèse et m'ont soutenu au quotidien, en particulier, Laurent GENESTE, Fréderic ROTELLA, Bernard KAMSU, Philippe CLERMONT, Eliane CASTA, Maxime DAWOUA, Mamadou BILO, Roger Pierre LEMANLE, Thierry LOUGE et Agnès LETOUZEY.

Je remercie en particulier M. Yacoubou et Mme Sophie WAOLANY pour leur soutien inestimable, M. Jean Bernard BOYABE, M. Abdou WAHABOU, M. David BEKOLLE, M. KOLYANG DINA TAIWE pour leurs précieux conseils et appuis sans oublier mes beaux-frères Alain, Éric et Aboubakar.

Pour terminer, je remercie ma famille qui est ma raison de vivre, plus particulièrement mes parents M. et Mme MOSKOLAÏ car ils ont toujours été là pour moi, mon frère Dieudonné et mes sœurs Fadimatou, Gigi, Sylvie, Donatienne, Rose et Chantal, sans oublier mon fils Mahel Khandrid.

Sommaire

Dédicace ..... *i*

Remerciements ..... *ii*

Sommaire ..... *iii*

Liste des figures ..... *vii*

Liste des tableaux ..... *ix*

Glossaire des abréviations ..... *xi*

Introduction *1*

Chapitre 1 – Conception d'un système de mobilité urbaine et évaluation de sa durabilité : état de l'art *9*

1.1. Définition des principaux concepts **10**

1.2. La mobilité urbaine à travers les âges **12**

1.2.1. Du phénomène d'urbanisation à la mobilité sociale et à l'émergence des mégapoles 14

1.2.2. De l'innovation technologique à un nouveau paradigme de mobilité urbaine 15

1.2.3. La mobilité en tant que service : mobilité urbaine du futur 16

1.3. La mobilité urbaine durable **18**

1.3.1. Peut-on définir un indice de durabilité ? 19

1.3.2. Principales approches de conception 21

1.3.3. Les principales méthodes de l'approche orientée système 21

1.4. Évaluation de la durabilité d'un système de mobilité urbaine : principales méthodes **25**

1.4.1. Méthode directe basée sur l'expertise humaine 25

1.4.2. Méthodes intégrant une analyse multicritère 25

1.4.3. Mobilité urbaine et évaluation de sa durabilité 29

1.5. Positionnement scientifique 30

Synthèse du chapitre 32

Chapitre 2 – Méthodologie de conception et de mise en œuvre d'un système de mobilité urbaine durable 34

2.1. Cadre méthodologique proposé 35

2.1.1. Pourquoi un co-déploiement ? 35

2.1.2. Schéma de principe de la méthodologie proposée 36

2.2. Modélisation avec le formalisme BPMN 38

2.2.1. Principales notations BPMN 39

2.2.2. Les sous-processus du niveau stratégique 41

2.2.3. Les sous-processus du niveau tactique 43

2.2.4. Les sous-processus du niveau opérationnel 47

2.3. Aide au choix des politiques cibles 49

2.3.1. Présentation de la méthode AHP 50

2.3.2. Présentation de la méthode Dempster–Shafer (DS)/AHP 51

Synthèse du chapitre 55

Chapitre 3 - Conception d'un système de mobilité urbaine durable par une démarche d'ingénierie système 56

3.1. Elicitation des connaissances de durabilité 57

3.1.1. Techniques d'élicitation des connaissances 57

3.1.2. Méthode de conceptualisation des indicateurs de durabilité 59

3.2. Conception d'un système complexe 61

3.2.1. Une démarche de conception 61

3.2.2. Formalisme de représentation 63

3.3. Le méta-modèle de mobilité proposé 66

3.3.1. Mise en œuvre de la conceptualisation des critères de durabilité 66

3.3.2. Conception du système par une démarche d'ingénierie système.....68

3.3.3. Méta-modèle de la mobilité urbaine durable proposé 83

Synthèse du chapitre.....85

Chapitre 4 - Aide au déploiement du système : de la méthodologie à l'architecture distribuée.....86

4.1. Choix d'une méthode 87

4.1.1. Avantages de la méthode choisie.....87

4.1.2. Présentation des Design Structure Matrix (DSM) 88

4.2. Démarche d'élaboration de la roadmap 93

4.3. Roadmap de déploiement proposée.....95

4.4. Architecture du système proposée.....100

4.4.1. Méthodologie de regroupement des composants du système.....100

4.4.2. Architecture distribuée du système de mobilité urbaine 101

Synthèse du chapitre.....106

Chapitre 5 - Simulation et étude de cas.....107

5.1. Description du cadre d'étude 108

5.1.1. Contexte et problématique 108

5.1.2. Objectifs.....110

5.2. Choix des politiques cibles.....110

5.3. Architecture du système de mobilité du cas considéré 120

5.4. Roadmap du cas étudié 121

5.5. Analyse de la résilience.....123

Synthèse du chapitre.....127

Conclusion générale et perspectives *129*

Annexes *132*

Références bibliographiques *141*

Liste des figures

Figure 1 : Écosystème de la mobilité du futur 2

Figure 2 : La maison de la mobilité du futur 4

Figure 3 : Conduite du système du contexte considéré 6

Figure 4 : Organisation du manuscrit et principaux résultats 8

Figure 5 : La mobilité urbaine à travers les âges (Source : Arthur, 2018) 13

Figure 6 : Évolution de la population mondiale et comparée à celle de la classe moyenne. (Source : UN-DESA, 2014) 14

Figure 7 : Écosystème de la mobilité urbaine traditionnelle 31

Figure 8 : Schéma de principe du cadre méthodologique proposé 37

Figure 9 : Quelques notations BPMN 40

Figure 10 : Définition stratégique du système de mobilité urbaine 41

Figure 11 : Modélisation du système de mobilité urbaine et évaluation de sa durabilité 44

Figure 12 : Déploiement du système de mobilité urbaine durable 48

Figure 13 : Cadre architectural d'un système, (Hygounenc, 2015) 62

Figure 14 ; Démarche modélisation méta-modèle de mobilité 66

Figure 15 : Diagramme de contexte d'un système de mobilité urbaine durable 70

Figure 16 : Diagramme de flux de données d'un système de mobilité urbaine durable 72

Figure 17 : Système de la topologie de la mobilité urbaine 73

Figure 18 : Système des horaires de la mobilité urbaine 76

Figure 19 : Système des services de la mobilité 77

Figure 20 : Système de gestion urbaine de la mobilité 82

Figure 21 : Méta-modèle de la mobilité urbaine durable 84

Figure 22 : Représentation schématique d'une DSM 90

Figure 23 : Types de relations d'une DSM 90

Figure 24 : Les catégories de DSM 91

Figure 25 : Démarche d'élaboration de la roadmap 94

Figure 26 : DSM du sous-système physique 96

Figure 27 : DSM du sous-système d'information 97

Figure 28 : DSM d'intégration des sous-systèmes physique et d'information de mobilité urbaine durable 98

Figure 29 : Roadmap de co-déploiement du système de mobilité urbaine durable 99

Figure 30 : Algorithme de clustering inspiré de Fernanadez (1998) 101

Figure 31 : DSM optimisée du système de mobilité urbaine durable 102

Figure 32 : Architecture distribuée du système de mobilité urbaine durable 103

Figure 33 : Cadre commun d'urbanisation du système de mobilité urbaine durable 105

Figure 34 : Vue partielle de la structure des critères de durabilité 112

Figure 35 : Vue partielle du modèle DS/AHP pour le problème de la mobilité urbaine durable . 114

Figure 36 : Modèle du système de mobilité urbaine étudié 120

Figure 37 : DSM du système de mobilité considéré 122

Figure 38 : Roadmap de déploiement du cas étudié 123

Figure 39 : Le modèle d'interdépendance d'un écosystème de mobilité urbaine 124

Figure 40 : Les courbes de résilience des trois secteurs impactés par des perturbations externes 126

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des approches de conception d'un système de mobilité urbaine 24

Tableau 2 : Synthèse des méthodes d'aide à la décision multicritère 28

Tableau 3 : Synthèse bibliographique de l'évaluation de la durabilité d'un système de mobilité urbaine 30

Tableau 4 : Principales notations ORM et leurs significations 61

Tableau 5 : Les entités de OPM 64

Tableau 6 : Les relations structurelles de OPM 65

Tableau 7 : Synthèse analytique des indicateurs de durabilité d'un système de mobilité urbaine..67

Tableau 8 : Les principaux types de DSM 93

Tableau 9 : Jugements agrégés des critères en fonction de l'objectif 112

Tableau 10 : Vecteur de priorité de l'étude de cas 113

Tableau 11 : BOE fourni par DM1 115

Tableau 12 : *Bpa* associé pour DM1 115

Tableau 13 : BOE fourni par DM2 115

Tableau 14 : *Bpa* associé pour DM2 116

Tableau 15 : BOE fourni par DM3 116

Tableau 16 : *Bpa* associé pour DM3 116

Tableau 17 : Agrégation des jugements du décideur 1 117

Tableau 18 : Agrégation des jugements du décideur 2 117

Tableau 19 : Agrégation des jugements du décideur 3 117

Tableau 20 : Mesures de croyance et de vraisemblance pour le décideur 1 118

Tableau 21 : Mesures de croyance et de vraisemblance pour le décideur 2 118

Tableau 22 : Mesures de croyance et de vraisemblance pour le décideur 3 118

Tableau 23 : Agrégation des jugements des décideurs y compris le décideur 3 119

Tableau 24 : Agrégation des jugements des décideurs sans le décideur 3..... 119

Glossaire des abréviations

ACTIF : Architecture cadre des Transports intelligents en France

AFIS : Association Française de l'Ingénierie système

AFNOR : Association Française de NORmalisation

AMF : Association des Maires de France

AOT : Autorité Organisatrice du Transport

AOM : Autorité Organisatrice de la Mobilité

ATIS : Atelier d'Ingénierie Système, outil d'architecture système

CERTU : Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques

CST : Center for Sustainable Transportation

DISIC : Direction Interministérielle des Systèmes d'Information et de la Communication

DMM : Domain Mapping Matrix

DSM : Design Structure Matrix

GPS : Global Positioning System

GSM : Global System for Mobile Communications

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

IFOPT : Identification of Fixed Objects for Public Transport

INCOSE : International Council on Systems Engineering

ISO : International Organization for Standardization

MDM : Multiple-Domain Matrix

OECD : Organization for Economic Co-operation and Development

ONU : Organisation des Nations Unies

OPM : Object Process Methodology

OPD : Object Process Diagram

OPL : Object Process Language

ORM : Object Role Modeling

OWL : Web Ontology Language

PEVD : Pays En Voie de Développement

PPP : Partenariat Public/Privé

SMUD : Système de Mobilité Urbaine Durable

STI : Système de Transport Intelligent

TIC : Technologie de l'Information et de la Communication

WBCSD : World Business Council for Sustainable Development

Introduction

Dans un contexte marqué par une explosion démographique, les villes sont sous pression : d'après les projections du rapport des Nations Unies sur les perspectives de l'urbanisation en 2014, 66 % en effet de la population mondiale sera urbaine d'ici 2050, tandis que la demande de passagers doublera (UN-DESA, 2014). Les comportements et les attentes en matière de mobilité iront également en évoluant : besoins de plus de rapidité, plus de fiabilité, plus de commodité, plus de connectivité, plus d'individualisation/personnalisation, etc. Grâce à l'innovation, notamment aux énergies « propres », aux nouvelles technologies de communication, à la possibilité de traiter des données massives (grâce à l'Intelligence Artificielle), à l'irruption de l'Internet des objets, etc., de nouvelles solutions de mobilité seront progressivement introduites (Arthur, 2018 ; Jittrapirom et al., 2017 ; Giffinger, 2015) : covoiturage, auto-partage, vélo en libre-service, véhicules autonomes, systèmes de transport intelligents, etc. Alors que le besoin en financement public est des plus pressant, les dotations dont bénéficient les villes semblent au contraire décliner, sans doute en raison des difficultés des pays à investir dans des projets du futur coûteux, au profit des besoins locaux immédiats. En même temps, les systèmes traditionnels de mobilité continuent d'être étendus, au mépris parfois des exigences de durabilité et sans grande efficacité sur le long terme.

La mobilité du futur s'organisera autour de plusieurs parties prenantes dont il est impératif de satisfaire les attentes et les exigences : il s'agit principalement des autorités organisatrices de la mobilité, des fournisseurs de solutions, des usagers (Hietanen, 2014). Les solutions du futur s'appuieront sur un système de mobilité intelligente, multimodale, interconnectée et basée sur des services personnalisés ; c'est en effet un système plus pratique, plus efficace et adapté à la croissance démographique dans les villes et conciliant développement économique et qualité de vie (respect de l'environnement et bien-être des populations). Outre la convergence vers la digitalisation des services, Jittrapirom (2017) et Banister (2008) soulignent l'impératif d'une convergence tarifaire, en s'appuyant sur une règlementation et des options tarifaires adaptées aux attentes de toutes les parties prenantes.

On peut donc affirmer que l'irruption des nouvelles technologies a modifié le comportement des usagers et est en train de remodeler l'économie de la mobilité urbaine. Celle-ci transcende désormais les dimensions infrastructurelles pour intégrer également la composante « services » pour faciliter à la fois l'utilisation et la gestion des infrastructures et des équipements. Un bref aperçu de l'écosystème émergeant est donné dans la suite.

Au fil des années, à côté des acteurs « historiques » que sont les fournisseurs de transport et les fournisseurs d'infrastructures de transport (illustrés par les cercles en trait bleu dans la Figure 1), d'autres acteurs (illustrés par des cercles en trait rouge) ont progressivement émergé, apportant une nouvelle forme de mobilité. Celle-ci est basée sur des systèmes intelligents capables de fournir des services à la demande, plus attrayants et plus adaptés aux attentes des usagers (Jittrapirom et al., 2017).

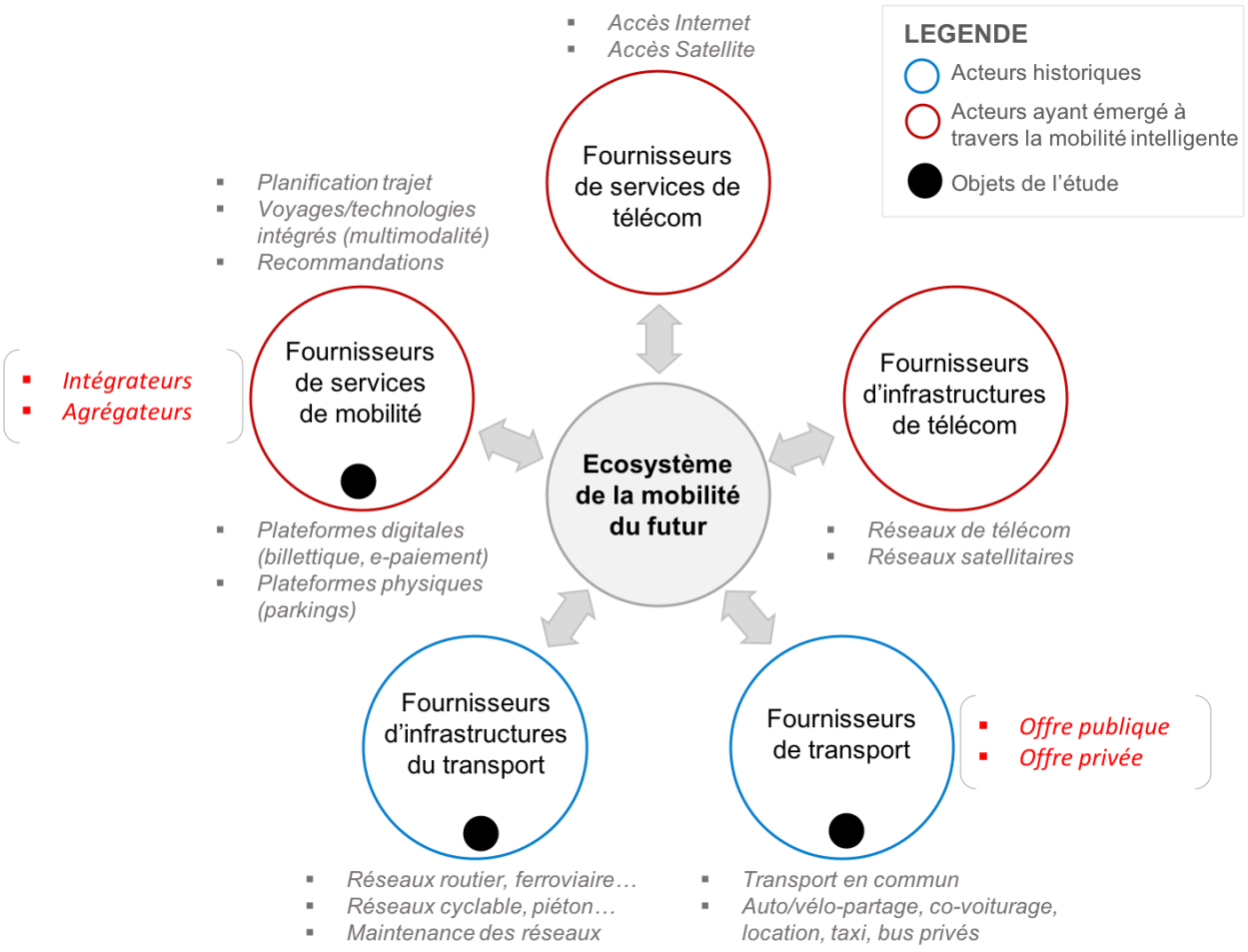


Figure 1 : Écosystème de la mobilité du futur

Avec les fournisseurs de transport ou de services de télécommunication, les fournisseurs de services de mobilité (intelligente) constituent un groupe d'acteurs majeurs de la mobilité du futur. C'est en effet un membre de la chaîne de valeur qui fournit un nouveau mode de transport et offre un accès numérique à ses services (par exemple, par des applications mobiles). On distingue deux types de fournisseurs de services de mobilité : les intégrateurs et les agrégateurs. Les premiers sont des entités qui permettent l'existence de programmes de mobilité à travers une offre variée incluant notamment la planification de trajet, des voyages intégrés combinant plusieurs modes, des recommandations d'itinéraires, etc. Considérés comme des hubs de services, les seconds sont quant à eux des entités qui offrent comme

activité principale une sélection de services de mobilité, soit en tant que fournisseurs autonomes, soit par le biais de partenariats. Ils utilisent pour cela des plateformes digitales pour la billettique, le paiement en ligne, etc. et/ou des plateformes physiques pour gérer par exemple les parkings. Dans la présente étude, seuls les acteurs identifiés par un cercle plein de couleur noire dans la figure ont été considérés. En effet, les deux autres familles d'acteurs concernent les vues applicative et infrastructurelle du système d'information de la mobilité urbaine et ne sont pas directement adressées dans le cadre de cette thèse.

La convergence par le biais de la numérisation constitue donc une occasion majeure de réinventer les systèmes de mobilité au fur et à mesure qu'évoluent les technologies et les besoins des usagers. Pour relever les défis du futur, les villes et les fournisseurs de solutions de mobilité doivent adopter une gestion plus complète et mieux coordonnée de l'offre de mobilité et s'orienter vers une approche plus proactive de la gestion de la demande de mobilité afin de mieux influencer les comportements dans l'espace et le temps, car les systèmes de mobilité de demain seront intermodaux, personnalisés, pratiques et connectés, et encourageront l'utilisation de modes de transport plus durables (transports publics, vélo, marche à pied) tout en intégrant de nouvelles solutions de mobilité et des véhicules autonomes (Arthur, 2018).

Certains travaux de la littérature se sont intéressés de façon spécifique à l'étude des problématiques connexes à l'amélioration et à l'utilisation des infrastructures, d'autres à l'étude des innovations technologiques pour une mobilité intelligente. Malgré la qualité des solutions proposées et implémentées dans certaines villes, une récente étude a permis d'établir que la durabilité n'est toujours garantie (Arthur, 2018), laissant penser à une juxtaposition de solutions qui ne prennent pas en compte les interdépendances entre les différentes composantes de l'écosystème de mobilité urbaine. La gestion de la mobilité s'opère toujours en effet dans un environnement fragmenté où chaque acteur est obnubilé par la création de solutions supplémentaires à ses offres de base. Plusieurs constats peuvent alors être relevés :

- ✓ Une persistance des problèmes de pollution, de l'augmentation du trafic et de la congestion ;
- ✓ Un déficit d'expertise et de ressources propres dans les villes pour gérer les évolutions technologiques conjugués à la raréfaction des dotations publiques pour supporter les coûts élevés des innovations technologiques requises pour l'amélioration des offres existantes ;
- ✓ Une faible intégration entre les modes de transport, entre les différentes politiques urbaines (en matière d'environnement, d'aménagement du territoire, d'énergie, de politique sociale, etc.) et

entre les régions, conduisant à des systèmes sous utilisés dans certains cas, peu adaptés dans d'autres.

En définitive, les systèmes de mobilité ne répondent pas encore suffisamment aux besoins évolutifs des clients. Ces derniers doivent prendre en compte les différentes étapes de la chaîne de valeur de la mobilité à travers des systèmes intégrés (Arthur, 2018 ; Jittrapirom et al., 2017 ; Hietanen, 2014). Une hypothèse réaliste est donc de considérer un partenariat public/privé, tout en préservant le rôle organisateur et régulateur des pouvoirs publics. La « maison idéale » de la mobilité du futur peut donc être résumée comme illustré par la Figure 2, en considérant l'hypothèse d'un partenariat public/privé et d'une participation citoyenne dans l'élaboration des stratégies de développement urbain.

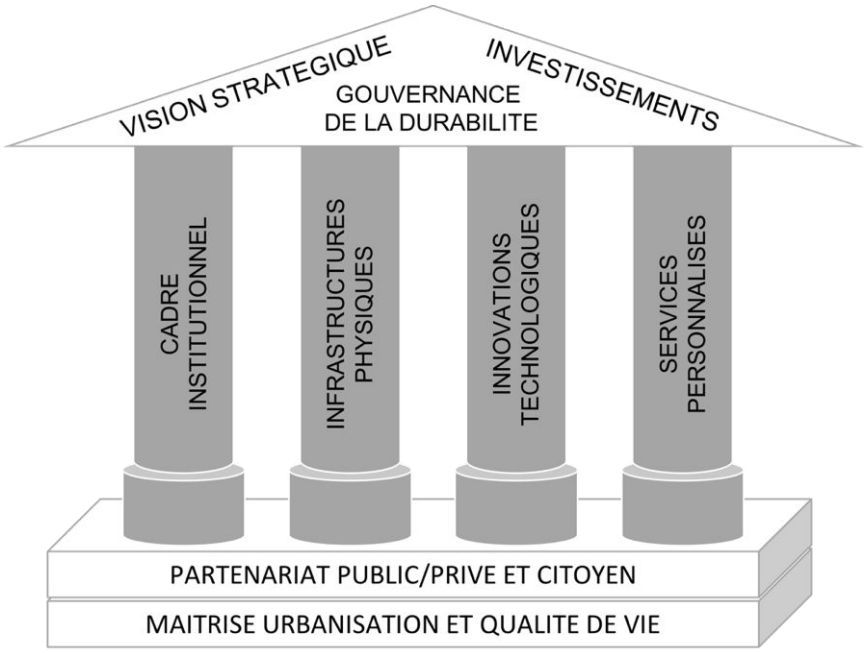


Figure 2 : La maison de la mobilité du futur

Pour les villes peu matures (cas des petites villes des pays développés et de la plupart des villes des pays en voie de développement), la trajectoire vers la mobilité du futur pose une contrainte forte, en raison des investissements importants à faire tant sur le plan infrastructurel que sur le plan technologique. Mais le pari de l'innovation technologique, avec une mise en place conjointe des infrastructures non encore présentes, offre néanmoins de réelles occasions pour le développement de nouvelles opportunités d'affaires, en phase avec les exigences et défis sociétaux de l'heure et du futur. Pour les villes matures, la contrainte majeure réside dans le choix des technologies adaptées aux infrastructures existantes, ou dans la reconfiguration de ces dernières pour mieux les arrimer aux

technologies du futur. Dans les deux cas, la planification des actions à conduire, en s'appuyant sur une stratégie cohérente, est une garantie d'une gouvernance maîtrisée de la durabilité (Arthur, 2018).

Ce constat soulève des questions auxquelles il est impératif d'apporter des réponses, notamment pour les gestionnaires des villes :

- Comment concevoir un système de mobilité urbaine et avec quelles infrastructures et quels services ?
- Comment coordonner les décisions entre les principaux acteurs dans le cadre du partenariat public et privé préconisé ?
- Quels domaines de la gestion urbaine faut-il confier aux acteurs privés sans compromettre l'autorité des pouvoirs publics dans leur rôle de garant des libertés et du bien-être de tous ?
- Comment déployer les infrastructures et les plateformes numériques (fournissant les services de mobilité) afin de mieux prendre en compte leurs dépendances mutuelles ?
- Quelle architecture faut-il préconiser pour le système d'information de la commune gestionnaire des services de mobilité, compte tenu de la diversité des acteurs privés offrant ces services ?
- Comment évaluer les performances du système, notamment sa durabilité, voire sa résilience face à un changement de paradigme ou des perturbations externes (comme par exemple une catastrophe naturelle, une attaque du système d'information, une grève, une baisse soudaine de la demande, etc.) ?

Avec le point de vue de l'aide à la décision, la problématique générale de cette thèse est donc d'**accompagner les gestionnaires des villes dans la conception et la mise en place d'un système de mobilité urbaine durable**.

Pour traiter cette problématique et apporter des réponses aux questions précédentes, plusieurs verrous doivent pour cela être considérés :

- Comment formuler les exigences d'un système de mobilité urbaine et comment les intégrer dans un modèle exploitable informatiquement ?
- Comment éliciter les connaissances pour caractériser sa durabilité en prenant en compte ces exigences ?
- Comment choisir des politiques et partenaires cibles dans un cadre de décision collective (du fait de la diversité des acteurs), en prenant compte la subjectivité, les incertitudes et l'incomplétude caractérisant ce cadre ?

- Quelles recommandations doit-on formuler pour favoriser un déploiement coordonné et maîtrisé des solutions envisagées ?

Le schéma de principe de la conduite d'un système de mobilité urbaine répondant aux enjeux et défis du futur est illustré par la Figure 3. Il prend en compte la nécessité d'une collaboration multi-acteurs, multi-niveaux suggérée dans les développements précédents. Par conséquent, la conduite du système doit intégrer la diversité des acteurs en présence.

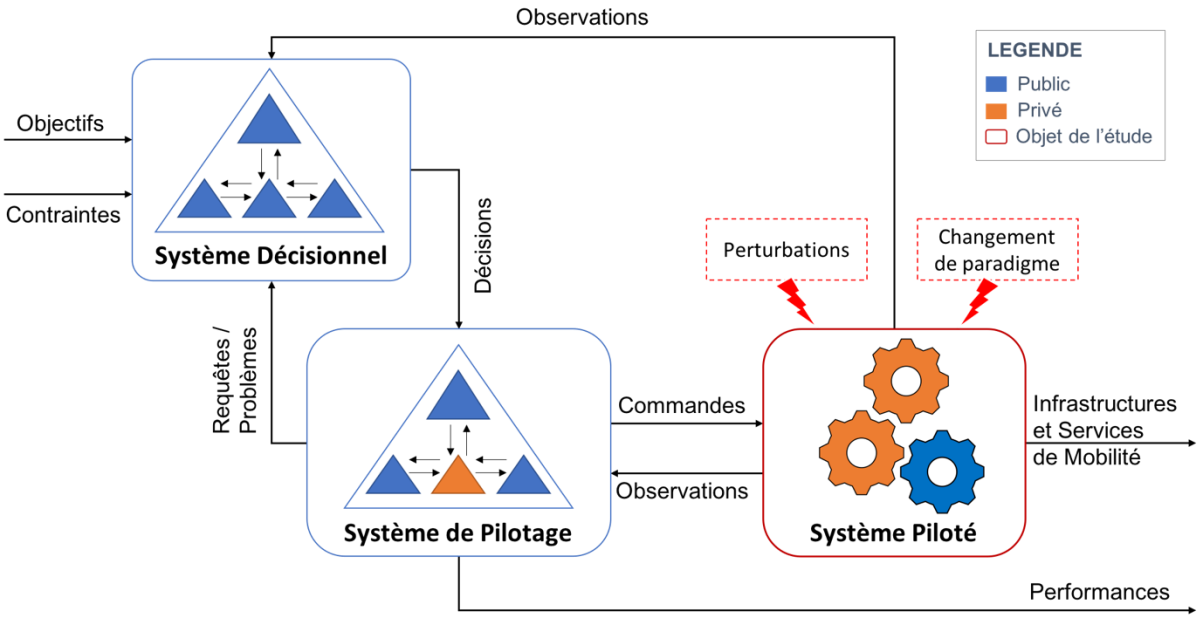


Figure 3 : Conduite du système du contexte considéré

Comme précisé plus haut, les pouvoirs publics ont par hypothèse un rôle de contrôle et de régulation du système piloté (représenté dans la partie inférieure droite de la Figure 3). Cette hypothèse est illustrée par la composition du système décisionnel qui est représenté dans la partie supérieure gauche de la figure, et composé exclusivement des organes relevant du secteur public. On considère pour cela que les décisions stratégiques et politiques pour définir un plan de développement urbain sont sous l'autorité des pouvoirs publics, à l'échelle d'une commune ou d'une communauté de communes. Étant détentrices à la fois de l'expertise et des technologies pour déployer les solutions de mobilité du futur, les entreprises à capitaux privés ont cependant un rôle à jouer dans le pilotage du système (voir partie inférieure gauche de la figure). Dans cette optique, en collaboration avec les pouvoirs publics, des actions visant à ajuster le système (par exemple, reconfiguration du réseau de transport, nouvelle tarification, nouveaux services, etc.) pourront être conjointement discutées pour mieux prendre en compte les interdépendances entre les différentes composantes du système et par conséquent, mieux refléter la satisfaction des exigences et attentes des parties prenantes en présence. Il est à noter que les

solutions de mobilité qui composent le système piloté sont supposées être majoritairement détenues par des entités du privé parce qu'elles détiennent l'expertise et les technologies (énergie propre, systèmes intelligents, communication temps réel, etc.) pour s'adapter plus rapidement à des besoins nouveaux.

En vue d'une plus grande efficacité et une plus grande réactivité par rapport aux évolutions technologiques, un scénario réaliste est la réduction progressive de l'implication des pouvoirs publics au niveau du système piloté pour se consacrer au contrôle et à la régulation des solutions proposées ; ce qui doit permettre de mieux refléter la prise en compte conjointe de l'amélioration de la qualité de vie des usagers et le respect des contraintes sociétales. La présente étude se focalisera sur le système piloté basé sur des infrastructures et services de mobilité dont il faut garantir la durabilité.

Sur cette base, les principaux objectifs de ce travail de recherche sont les suivants :

- ✓ Proposer une démarche générale de conception et de pilotage d'un système de mobilité urbaine durable (SMUD) basé sur un partenariat public/privé ;
- ✓ Proposer une méthode d'aide au choix des politiques et d'évaluation de la durabilité ;
- ✓ Proposer une méthode d'aide au déploiement du système basé sur un ensemble de recommandations pour favoriser une implémentation réussie.

Les contributions des travaux de recherche effectués peuvent être résumées ainsi :

1. Un **cadre méthodologique** de conception d'un système de mobilité urbaine et d'évaluation de sa durabilité. Bien que la conception du système piloté et son déploiement (cf. partie inférieure droite de la Figure 3) soient prioritaires dans cette étude, la démarche proposée intègre le cycle de vie complet du système, allant du choix des politiques et partenaires cibles à l'analyse de sa résilience.
2. Un **méta-modèle** d'un système de mobilité urbaine durable reflétant la complexité des interdépendances entre plusieurs domaines.
3. Proposition d'une **architecture distribuée** du système mettant en exergue la complexité de la communication entre plusieurs systèmes offrant divers services de mobilité.

La structure du présent manuscrit ainsi que les principaux résultats issus des travaux de recherche effectués sont indiqués dans le schéma de la Figure 4.

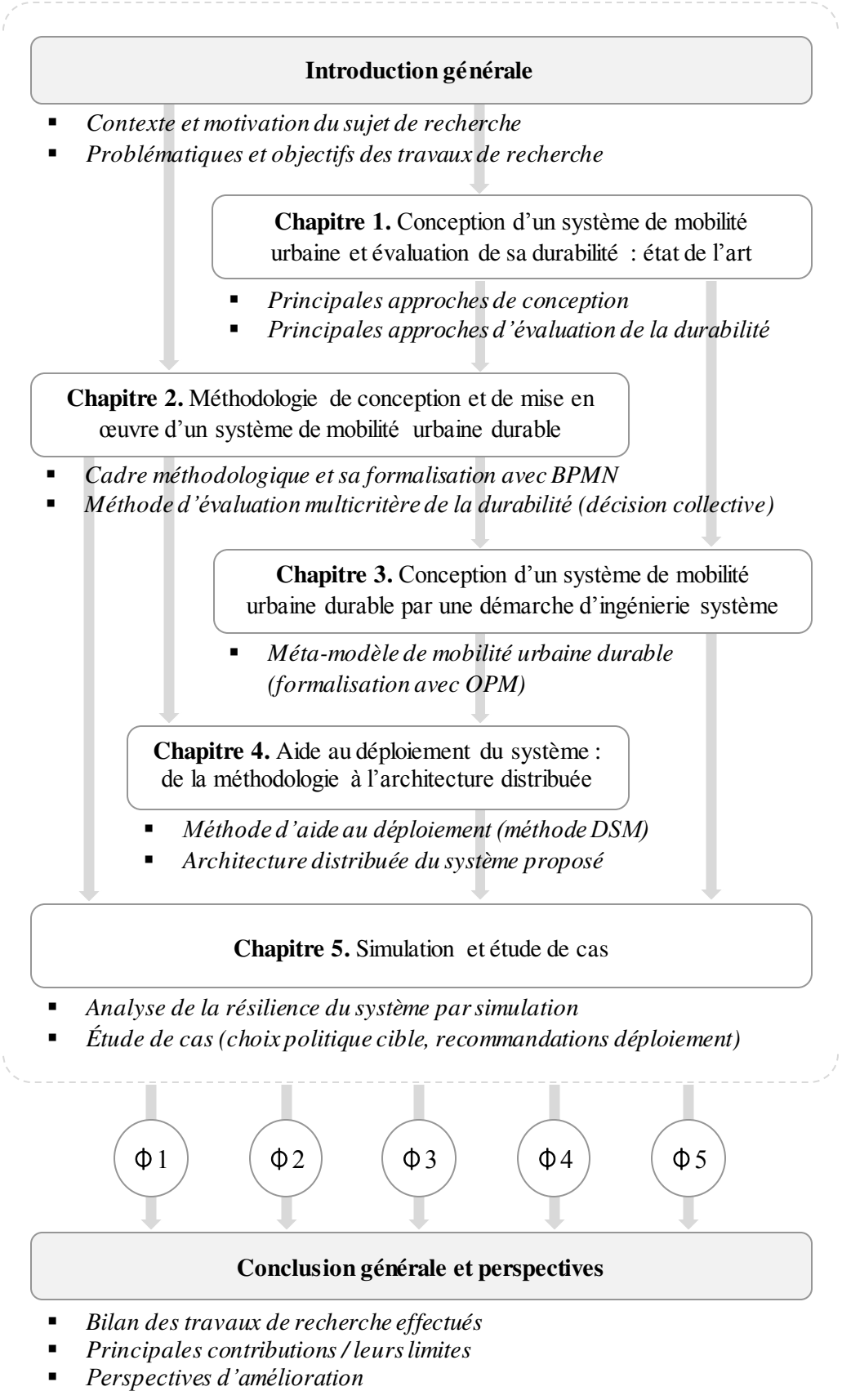


Figure 4 : Organisation du manuscrit et principaux résultats

Chapitre 1 – Conception d'un système de mobilité urbaine et évaluation de sa durabilité : état de l'art

Chapitre 1 – Conception d'un système de mobilité urbaine et évaluation de sa durabilité : état de l'art *9*

1.1. Définition des principaux concepts **10**

1.2. La mobilité urbaine à travers les âges **12**

1.2.1. Du phénomène d'urbanisation à la mobilité sociale et à l'émergence des mégapoles 14

1.2.2. De l'innovation technologique à un nouveau paradigme de mobilité urbaine 15

1.2.3. La mobilité en tant que service : mobilité urbaine du futur 16

1.3. La mobilité urbaine durable **18**

1.3.1. Peut-on définir un indice de durabilité ? 19

1.3.2. Principales approches de conception 21

1.3.3. Les principales méthodes de l'approche orientée système 21

1.4. Évaluation de la durabilité d'un système de mobilité urbaine : principales méthodes **25**

1.4.1. Méthode directe basée sur l'expertise humaine 25

1.4.2. Méthodes intégrant une analyse multicritère 25

1.4.3. Mobilité urbaine et évaluation de sa durabilité 29

1.5. Positionnement scientifique **30**

Synthèse du chapitre **32**

Dans le chapitre d'introduction, le contexte de cette thèse, la problématique générale ainsi que les objectifs visés ont été présentés. Un schéma de principe pour la conduite du système de mobilité urbaine a pour cela été défini, faisant apparaître des interactions entre le secteur public et le secteur privé, tant du point de vue des décisions de pilotage que des infrastructures et services fournis. A l'échelle d'une ville, une bonne coordination des actions peut favoriser une maîtrise des investissements et de la gestion de ces infrastructures et services. Une démarche générale intégrant le cycle de vie complet du système étudié est pour cela nécessaire. Ce chapitre se focalise sur l'état de l'art de la conception de ce système et l'évaluation de sa durabilité. Dans la section suivante, les principaux concepts de la littérature sur la mobilité urbaine seront tout d'abord définis. Un bref rappel de l'évolution de la mobilité urbaine à travers les âges est ensuite exposé, suivi de la présentation des principales approches de conception d'un système de mobilité urbaine et d'évaluation de la durabilité. Le positionnement scientifique de ce travail de recherche qui en découlera sera décrit par la suite. Enfin, une synthèse des analyses effectuées clôturera le chapitre.

1.1. Définition des principaux concepts

Les principaux concepts utilisés dans cet état de l'art sont brièvement rappelés ci-après.

Urbanisme. Ensemble des sciences, des techniques et des arts relatifs à l'organisation et à l'aménagement des espaces urbains, en vue d'assurer le bien-être de l'homme et d'améliorer les rapports sociaux en préservant l'environnement (Corbusier, 1967). Bien que les praticiens aient tendance à associer le concept à la seule dimension de planification urbaine, il revêt bien plusieurs autres dimensions. Wirth (1938) précise que l'urbanisme est un mode de vie, caractérisé par des conflits étendus de normes et de valeurs, par des changements sociaux rapides, par une différenciation sociale accrue, par une plus grande mobilité sociale, par des niveaux d'éducation et de revenus plus élevés, par l'accent mis sur les possessions matérielles et l'individualisme, par l'impersonnalité des relations et le déclin de la communication intime et par l'augmentation des contrôles sociaux formels.

Urbanisation. Elle fait référence à la fois à un état à un moment donné et à un processus se déroulant dans le temps. L'état d'urbanisation, également appelé niveau d'urbanisation, est indiqué par le pourcentage d'une population qui vit dans des zones urbaines (UN - DESA, 2014). Le processus d'urbanisation a quant à lui été utilisé de plusieurs façons et désigne (selon les contextes) : (i) la migration des zones rurales vers les zones urbaines, (ii) la croissance absolue de la population urbaine (dite croissance urbaine), (iii) une croissance urbaine plus rapide que la croissance rurale. Ce processus décrit également le passage d'une population dispersée dans de petites agglomérations rurales où l'agriculture est l'activité économique dominante, à une population concentrée dans des zones urbaines,

plus grandes et plus denses, caractérisées par des activités industrielles et de services (Montgomery et al., 2004).

Zone urbaine. Bien que la transition urbaine soit historiquement liée au développement économique (UN - DESA, 2014), faisant des zones urbaines un pôle d'attraction pour investisseurs et travailleurs, il n'existe pas de consensus général sur la définition de ce qu'elles sont. De ce fait, l'acception que lui accordent les bureaux nationaux de statistique varie considérablement d'un pays à l'autre et, dans certains cas, elle a même changé au fil du temps à l'intérieur d'un même pays. D'après le rapport de l'UN-DESA (2014), les éléments suivants sont considérés pour définir une zone urbaine : (1) des critères administratifs, (2) un seuil minimal de population, (3) la densité de population, (4) la proportion de personnes employées dans des secteurs non agricoles, (5) la présence d'infrastructures (comme les routes bitumées/pavées, l'électricité, l'eau courante ou les égouts), (6) la présence de services d'éducation et de santé.

Classe moyenne. Elle renvoie à la classe de population considérée comme intermédiaire, entre celle de pauvres et celle des riches. Dans (Easterly, 2001), elle est plus précisément définie comme la classe se situant entre le 20ème et le 80ème quantile de la distribution de la consommation. Elle est également définie comme la classe dont le revenu médian par habitant se situe entre 75 et 125% du revenu médian par habitant (Birdsall et al., 2000) et d'après la Banque Mondiale, elle comprend les ménages dont le revenu par habitant se situait, en 2005, entre 10 et 100$ par personne et par jour (Bank-World, 2007). Un élément caractéristique des populations de la classe moyenne est qu'elles sont prêtes à payer un peu plus cher pour la qualité, et la demande de biens de consommation (de qualité) qu'elles génèrent alimente l'investissement dans la production (Murphy et al., 1989). Dans le contexte de cette étude, il s'agit de la catégorie de populations dont les fournisseurs de services de mobilité tendent à influencer le comportement pour déployer les solutions innovantes basées sur les technologies que ces populations utilisent déjà.

Mobilité urbaine. Elle est généralement définie comme la facilité de déplacement d'une origine à une destination dans une zone urbaine (Cascetta, 2009). On verra par la suite qu'avec les évolutions technologiques, cette acception tend à être dépassée pour prendre en compte les comportements nouveaux dans l'utilisation des services de mobilité et la diversité des acteurs en présence.

Mobilité urbaine durable. Peu d'auteurs ont apporté une définition claire de ce concept. Comme cela a été rappelé dans (Da Silva et al., 2008), sur la base des études réalisées par l'OECD (2000) et un groupe de spécialistes de la Commission Européenne, on peut le définir comme une mobilité qui contribue positivement à l'état économique et social d'une région, sans compromettre la santé des

humains et l'environnement. De ce fait, c'est une mobilité qui : (1) permet de satisfaire l'accessibilité et les besoins basiques des personnes ou des entreprises, (2) est abordable financièrement, fonctionne efficacement, offre la possibilité de choisir entre plusieurs modes, contribue au dynamisme économique et au développement d'une région, (3) participe à la limitation des émissions en s'appuyant sur une politique énergétique soutenable. Ce qui dénote une complexité de la caractérisation de la durabilité, justifiant l'intérêt d'une méthode d'élicitation proposée au prochain chapitre en vue de faciliter l'intégration des critères qui vont en découler dans la définition d'un système de mobilité durable.

Mobilité multimodale. Il s'agit de la possibilité d'enchaîner plusieurs modes de transport au cours d'un même déplacement. Ce terme est souvent utilisé de façon interchangeable avec des termes tels que la mobilité intermodale, co-modale ou la mobilité synchro-modale. Mais il y a des différences subtiles entre ces termes. Le terme mobilité multimodale est considéré comme une mobilité qui utilise au moins deux modes de transport différents ; mobilité intermodale comme un type particulier de mobilité multimodale qui utilise la même unité de chargement de passagers ; mobilité co-modale ajoute l'utilisation efficace des différents modes en combinaison et synchro-modale souligne l'aspect temps réel de la mobilité (SteadieSeifi et al., 2014). L'aspect multimodalité sera privilégié dans ce travail.

Mobilité intelligente. C'est une forme de mobilité où l'usage des technologies de l'information et plus généralement des plateformes numériques est dominant (Benevolo et al., 2016).

Infrastructure (physique) de transport. Comme rappelé dans (Adl-Zarrabi, 2017), c'est un ensemble de composants physiques de systèmes interdépendants, fournissant des services essentiels pour permettre, maintenir ou améliorer les conditions de mobilité des personnes et des biens.

Système de mobilité urbaine (SMU). C'est un ensemble de ressources (infrastructures, services, personnes, etc.) mis en relation afin de réaliser l'activité de transport dans un environnement urbain (CST, 2005). C'est par conséquent un système complexe (ou encore un système de systèmes) dont les principales composantes seront spécifiées au chapitre 3.

1.2. La mobilité urbaine à travers les âges

Longtemps associé au transport, le concept de mobilité revêt aujourd'hui, avec l'évolution des métropoles, une acception plus générale qui met le citadin et les nouvelles technologies au cœur de

l'organisation de la cité[1]. La mobilité urbaine est aujourd'hui, davantage un système qui satisfait des exigences/besoins, qu'un simple déplacement d'un point à un autre (d'une personne ou d'une marchandise). A travers les âges, elle a connu diverses mutations rythmées par les différentes étapes de la révolution industrielle (cf. Figure 5). Au 19ème siècle (l'ère de la première révolution industrielle), le développement des premiers chemins de fer et transports publics a favorisé la concentration des populations dans les villes qui émergeaient (premières manifestations du phénomène d'urbanisation).

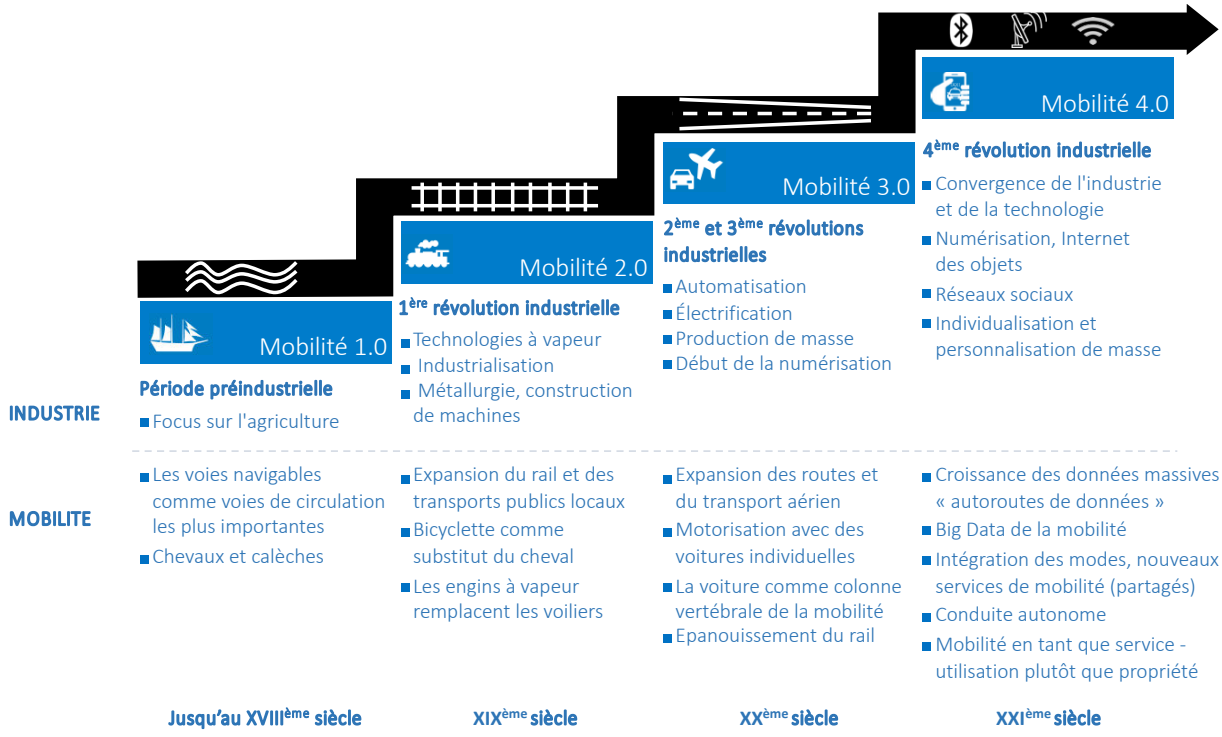


Figure 5 : La mobilité urbaine à travers les âges (Source : Arthur, 2018)

Le 20ème siècle (la période des 2ème et 3ème révolutions industrielles qui ont consacré la massification de la production des véhicules personnels) a connu l'essor de la sub-urbanisation. Celle-ci est marquée par la décentralisation progressive des activités industrielles à la périphérie des villes. Le 21ème siècle (l'ère du numérique) a quant à lui ouvert la voie à de nouvelles opportunités pour rendre les réseaux de

[1] HTS Consulting, « La mobilité n'est pas qu'une question de transport » http://hts-consulting.com/2014/10/27/la-mobilite-urbaine-nest-pas-quune-question-de-transport/

transport existants beaucoup plus efficaces et plus conviviaux. Ils se sont en effet progressivement adaptés, de plus en plus précisément à ce que les utilisateurs veulent, quand ils le veulent et comment ils le veulent, grâce à des offres de services de mobilité très variées. En favorisant l'autonomie et la connectivité des personnes, ce siècle a fait naître des attentes et des comportements nouveaux qui sont au centre des défis actuels et futurs de la mobilité urbaine.

1.2.1. Du phénomène d'urbanisation à la mobilité sociale et à l'émergence des mégapoles

L'attractivité économique est de loin le principal facteur du phénomène d'urbanisation de par le monde. Avec le relèvement du niveau de vie qu'elle a engendré, on est progressivement passé de l'urbanisation à la mobilité sociale marquée par un changement de statut des populations. D'après une étude réalisée par les Nations Unies (UN-DESA, 2014), ce phénomène ira en s'amplifiant : à l'échelle mondiale, à mesure qu'augmente la population, celle de la classe moyenne croit également (cf. Figure 6). A partir des années 2000, elle a commencé à croître plus vite que la population mondiale, et à ce rythme, elle constituera bientôt la majorité de la population mondiale. La mobilité sociale posera sans conteste des problèmes en matière d'organisation et de gestion urbaine comme on le voit déjà avec les difficultés à satisfaire la forte demande en mobilité dans les mégapoles qui se développent (par exemple, Le Caire, Kinshasa, Lagos, etc. en Afrique, Bogota, Lima, Rio de Janeiro, etc. en Amérique latine, etc.). Les mégapoles se distinguent des autres villes par leur taille et leur concentration de l'activité économique. Si en 1990, on pouvait dénombrer 10 villes de plus de 10 millions d'habitants, lesquelles comptaient 153 millions d'habitants, soit moins de 7% de la population urbaine mondiale, en 2014, le nombre de mégalopoles avait presque triplé pour atteindre 28 : leur population est passée à 453 millions d'habitants, représentant 12% des citadins du monde.

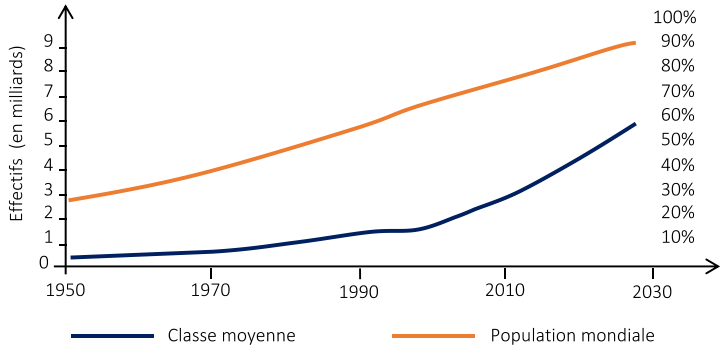


Figure 6 : Évolution de la population mondiale et comparée à celle de la classe moyenne. (Source : UN-DESA, 2014)

1.2.2. De l'innovation technologique à un nouveau paradigme de mobilité urbaine

Avec l'irruption des technologies de l'Internet dans les ménages, un phénomène nouveau a modifié la trajectoire de la dynamique urbaine. Les fournisseurs de services de mobilité semblent avoir saisi, à travers les comportements nouveaux (axés sur l'usage de ces technologies), de réelles opportunités pour développer une nouvelle économie de la mobilité. Ce qui pose des défis majeurs pour les gestionnaires des villes. D'après une étude des Nations Unies (ONU-Habitat, 2013), des exemples de bonnes pratiques sur la manière de relever ces défis existent, la satisfaction des besoins et attentes en mobilité va au-delà de la prise en compte de l'accroissement de la rapidité de se déplacer ou de l'amélioration de l'efficacité et de l'efficience des systèmes de mobilité. Elle doit également inclure des orientations axées sur la demande des usagers, par la fourniture d'une offre variée de services de mobilité susceptible de correspondre aux exigences nouvelles (notamment l'hyper-connectivité des personnes).

D'après Banister (2008), le développement de projets technologiquement innovants permettra de gagner la confiance des usagers qui utilisent déjà certaines technologies (notamment pour communiquer entre eux), offrant ainsi de nouvelles opportunités d'affaire. Lyons (2016) a toutefois rappelé qu'un risque serait de faire passer l'importance de promouvoir la sophistication technologique avant l'examen de la manière par laquelle les systèmes de mobilité urbaine et leur utilisation peuvent évoluer, mettant en péril le soutien à apporter au type d'environnements urbains du futur que les villes pourraient rechercher. Il s'agit en définitive de concilier deux approches complémentaires, la mobilité intelligente et la mobilité durable.

Banister (2008) a identifié quatre principes clés d'une implémentation réussie : (1) investir dans les technologies visant les modes de transport, les systèmes d'information et le système de transport lui-même ; (2) avoir une réglementation et une tarification qui devraient permettre de refléter les coûts externes du transport dans les coûts réels des déplacements ; (3) développer l'aménagement du territoire, notamment par la planification et la réglementation afin de favoriser les déplacements plus courts ; (4) proposer des services et des informations personnelles ciblées afin d'accroître l'acceptabilité, notamment par la sensibilisation, la démonstration, la persuasion et le marketing individuel.

Confirmant la tendance de la trajectoire prise par la mobilité urbaine aujourd'hui, de récentes études basées sur différents programmes de recherche sur les transports et le développement durable des deux dernières décennies ont mis en exergue le rôle des technologies de l'information et de la communication dans la perception de la mobilité (Cohen-Blankshtain & Rotem-Mindali, 2016 ; Stead, 2016). C'est une

période qui a en effet connu des changements technologiques qui ont affecté plusieurs aspects de la vie quotidienne, en particulier les déplacements, changeant considérablement la perception qu'ont les personnes de la distance, de l'accessibilité et de la disponibilité des services de mobilité. Des canaux supplémentaires pour aller travailler, se divertir, faire du shoping, etc. ont été offerts aux usagers, remettant en question le paradigme dominant. Un paradoxe que révèlent ces analyses est l'augmentation du besoin en déplacements que provoque le remplacement des activités physiques par des télé activités (télé travail, télé shoping, télé loisir …) : en effet, à mesure que les télé activités libèrent du temps aux personnes, d'autres émergent et sont réalisées, suscitant un besoin accru de se déplacer. Par conséquent, l'innovation dans la mobilité ne saurait être une simple substitution des solutions traditionnelles par l'introduction de nouvelles technologies.

Comme le rappellent Adams et al. (2016), la durabilité ne peut être remplie par une simple conformité à un standard ; des actions coordonnées par les gestionnaires des villes sont nécessaires : il est donc impératif de les doter d'outils d'aide pour trouver les solutions novatrices aux défis de la durabilité. Les actions d'innovation préconisées par les auteurs sont principalement orientées vers : (1) l'optimisation opérationnelle (faire mieux avec moins), (2) la transformation organisationnelle (faire bien en faisant de choses nouvelles), et (3) la construction de systèmes acceptés (faire bien en faisant de choses nouvelles avec les autres). L'impératif de « faire avec les autres » est relayé dans (Arthur, 2018) où il a été établi qu'actuellement, la gestion de la mobilité urbaine dans son ensemble fonctionne encore dans un environnement trop fragmenté, et que, malgré l'évolution de ces dernières années, les systèmes de mobilité ne réunissent pas encore suffisamment d'acteurs clés pour travailler ensemble afin de favoriser l'apprentissage collectif pour développer des solutions de mobilité innovantes, rencontrant les attentes de toutes les parties prenantes.

Il s'agit donc en définitive de concilier innovation technologique et durabilité sans substituer l'un à l'autre. Le paradigme de mobilité pour le futur (décrit dans la suite) semble remplir cette exigence.

1.2.3. La mobilité en tant que service : mobilité urbaine du futur

Avec la démocratisation des technologies de l'information et de la communication qui a favorisé l'hyper-connectivité des personnes, une transition s'est opérée vers la mobilité en tant que service (*Mobility as a Service - MaaS*). L'objectif du *MaaS* est de réduire le besoin d'utiliser le véhicule personnel au profit d'alternatives plus attrayantes et plus soutenables, intégrant la multimodalité, l'intermodalité, les modes doux (non motorisés), des services personnalisés, etc. (Goodall et al., 2017 ; Hietanen, 2014). Son émergence a favorisé le développement d'une nouvelle économie de la mobilité urbaine, combinant des services des fournisseurs à la fois du secteur public et du secteur privé

(Jittrapirom et al., 2017). Sa finalité est de faire en sorte qu'il soit si pratique pour les usagers de se déplacer, qu'ils choisissent volontairement d'abandonner leur véhicule personnel pour se rendre en ville, notamment parce que les alternatives sont plus attrayantes (Goodall et al., 2017). D'après Jittrapirom (2017), les éléments suivants permettent de caractériser plus précisément le *Maas :*

- **Intégration des modes de transport.** L'objectif est d'encourager l'utilisation des services de transport public par le transport multimodal et de faciliter les déplacements intermodaux des usagers ;
- **Option tarifaire.** Composée de deux types de tarif, *"mobility package"* et *"pay-as-you-go"* ; le premier contient des forfaits de différents modes de transport et comprend un certain nombre de km/minutes/points qui peuvent être utilisés en échange d'un paiement mensuel, tandis que le second fait payer les utilisateurs en fonction de leur utilisation effective du service ;
- **Une seule plateforme.** Basée sur la digitalisation des contenus, et par laquelle les utilisateurs peuvent facilement accéder (y compris à partir de leur smartphone) à divers services comprenant notamment la planification de voyage, la réservation, la billetterie, le paiement électronique et l'information en temps réel sur le trafic ;
- **Acteurs multiples.** Interaction par le biais d'une plateforme numérique entre différentes parties prenantes, parmi lesquelles des particuliers ou des entreprises clientes, des fournisseurs de services de transport (privés ou publics), des propriétaires de plateformes (tiers, fournisseur de transport public ou autorités métropolitaines), des sociétés de monétique, de billettique, de télécommunication et de gestion des données ;
- **Utilisation des technologies de l'Internet.** Combinaison d'appareils tels que smartphones ou ordinateurs, réseau Internet mobile (Wi-Fi, 4G, 3G, LTE...), GPS, systèmes de billetterie électronique et de paiement électronique, systèmes de gestion de bases de données et infrastructure intégrée de technologies (Internet des objets) ;
- **Obligation d'enregistrement.** Pour permettre à l'utilisateur final de rejoindre la plateforme et de bénéficier d'un accès aux services, y compris des services personnalisés ;
- **Services à la demande.** Pour faciliter la satisfaction des exigences et attentes des utilisateurs finaux ;
- **Personnalisation.** Pour permettre aux utilisateurs finaux de modifier les options de service en fonction de leurs préférences, d'où la possibilité de composer librement des trajets connexes ou de construire leur forfait mobilité, avec un volume d'utilisation différent de certains modes de transport.

En dépit des contraintes nouvelles, notamment pour les gestionnaires des villes, le *MaaS* comporte plusieurs avantages (Arthur, 2018 ; Hietanen, 2014) :

(1) Pour le **consommateur** qui bénéficie d'une mobilité sur mesure, adaptée à la situation et à ses besoins, facilitée par les choix de mobilité en fonction du temps de déplacement, du coût et d'autres préférences personnelles, comme l'heure de départ préférée ou le désir de faire des choix écologiques ; une réduction du budget global alloué à la mobilité, en passant d'un modèle de propriété d'une voiture à un modèle d'utilisation de la mobilité, voire de l'économie du partage (co-voiturage, location de bicyclette…).

(2) Pour les **opérateurs de solutions de mobilité (publics et privés)** de par l'optimisation de leur offre de mobilité en temps réel, une augmentation du profit grâce au volume, à l'efficacité et à la réponse à la demande, un partage des bénéfices et opportunités de nouvelles affaires, un accès à tous les besoins de mobilité exprimés, augmentant ainsi le marché adressable et rendant leurs services plus accessibles.

(3) Pour les **autorités de transport** qui ont leurs investissements optimisés, tant dans les infrastructures de transport que dans leur utilisation, et bénéficient d'une productivité et une efficacité de leurs solutions, la capacité d'orienter la politique des transports vers des modes de mobilité plus soutenables, qu'ils soient publics.

(4) Pour les **pouvoirs publics** qui peuvent justifier un meilleur niveau de service au citoyen (les solutions offertes étant ciblées, fournies à la demande), une amélioration de la qualité de vie par la diminution de la congestion, l'amélioration de qualité de l'air, etc., voire des économies budgétaires.

1.3. La mobilité urbaine durable

Goldman et Gohram (2006) rappellent qu'à la suite de sa conférence de 1996, l'OCDE a entrepris un projet à long terme axé sur le « Transport durable » qui a permis d'élaborer une définition. L'organisme a défini le transport durable comme étant celui qui *« ne met pas en danger la santé publique ou les écosystèmes et répond à des besoins d'accès compatibles avec (a) l'utilisation de ressources renouvelables en deçà de leur taux de régénération, et (b) l'utilisation de ressources non renouvelables en deçà du taux de développement de substituts renouvelables »*. En se basant sur une vision de la durabilité comme un « état final », bon nombre de travaux de la littérature, tel que rappelé dans (Goldman & Gorham, 2006), semblent encore accorder une part importante aux enjeux environnementaux pour définir la durabilité, en considérant par exemple sur : (1) des normes sanitaires pour les oxydes d'azote, l'ozone, les particules et le bruit ; (2) des objectifs internationaux pour les

émissions de dioxyde de carbone dans le secteur des transports ; et (3) des objectifs de protection des écosystèmes liés à la protection des terres dans les zones urbaines.

Deux remarques méritent d'être relevées (au vu des développements effectués dans les sections précédentes) : (1) la mobilité urbaine ne se réduit pas à la seule dimension « transport » ; (2) la durabilité comporte plusieurs critères interdépendants qu'il faut satisfaire, et qui transcendent le seul facteur « environnemental ». En effet, grâce à l'apport des technologies, la mobilité durable correspond plus généralement à la réponse aux besoins des usagers par rapport à leurs activités quotidiennes (à savoir aller travailler, se soigner, se divertir, etc.), et en prenant en compte le fait que ces besoins peuvent être satisfaits sans déplacement. Banister (2008) rappelle à cet effet qu'elle vise à : (1) réduire la nécessité de voyager (autrement dit, faire moins de trajets), (2) encourager le transfert modal, (3) réduire la longueur des trajets (par conséquent les émissions dans la nature), (4) encourager une plus grande efficacité du système. Pour la définir, il est donc impératif, d'une part de prendre en compte la diversité des éléments qui la caractérisent ainsi que leurs interrelations (ce qui revient à gérer la complexité du système sous-jacent), et d'autre part d'identifier les critères pertinents de durabilité que ces éléments doivent justifier pour satisfaire les attentes des parties prenantes.

1.3.1. Peut-on définir un indice de durabilité ?

Dans une revue de la littérature consacrée aux indices de mobilité urbaine (Costa et al., 2017), il a été établi que tous les indices identifiés sont utiles pour l'analyse et le suivi de la mobilité urbaine et servent à soutenir les politiques publiques dans les zones urbaines. Dans chacun des cas étudiés, chaque auteur a choisi l'approche la plus réalisable pour sa région, en adoptant des solutions différentes en fonction de la situation urbaine existante et de la réalité de chaque région. Les critères de durabilité élicités ont été classés selon les trois dimensions du développement durable, à savoir « économique », « sociale » et « environnementale ». Des mesures d'importance relative de chaque critère ont ensuite été effectuées, suivies d'une estimation globale, obtenue par agrégation des évaluations individuelles. Bien que les critères utilisés semblent refléter une variété d'aspects pouvant rencontrer les exigences et attentes des parties prenantes en matière de durabilité, la méthode d'agrégation mise en œuvre, basée sur une somme arithmétique, paraît trop simpliste pour refléter les incertitudes liées à de telles évaluations.

Plus récemment, une étude portant sur des cas réels couvrant la plupart des villes de par le monde (Arthur, 2018), a permis de spécifier une classification des critères de mobilité qui semble en phase avec la trajectoire de la mobilité du futur. La classification proposée intègre la vision orientée système préconisée par Goldman et Gorham (2006) : l'étude prend en effet en compte le fait que le transport

seul ne peut caractériser la complexité de la mobilité urbaine. Trois indices clés ont pour cela été considérés :

(1) l'**indice de maturité** qui concernent les facteurs d'attractivité financière du transport public, sa part dans la répartition modale, la part des modes non polluants, la densité routière, la densité du réseau de pistes cyclables, la densité de l'agglomération urbaine, la fréquence du transport public, les initiatives des pouvoirs publics ;

(2) l'**indice d'innovation,** calculé à partir des critères reflétant le taux de pénétration des cartes à puce de mobilité, l'utilisation des plateformes (digitales) de mobilité, les solutions de vélos en libre-service, l'auto-partage (en B2C), les plateformes de covoiturage (en P2P), les services de transmission électroniques, les plates-formes de taxis, les véhicules autonomes et autres initiatives de mobilité intelligente ;

(3) l'**indice de performance** enfin, basé sur des critères *(a) environnementaux*, en prenant en compte les émissions de dioxyde de carbone (CO2), la concentration de dioxyde d'azote (NO2), celle des particules dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres (PM10) ou inférieure à 2.5 micromètres (PM2.5), *(b) de gestion du trafic*, en intégrant les accidents mortels, la congestion, etc., *(c) de gestion des modes*, comprenant la part du transport public, celle des modes non polluants, le temps moyen pour aller au travail, le niveau moyen de motorisation.

Dans cette étude, les auteurs ont ensuite défini un indice global en attribuant (de façon subjective) un poids spécifique à chaque critère, donnant un total de 36 points pour les critères composant l'indice de maturité, 24 points pour l'indice d'innovation et 40 points pour l'indice de performance. D'où, pour une ville donnée, le calcul d'un indice global de mobilité sur 100. Comme pour le cas précédent, les critères identifiés reflètent bien les dimensions environnementale, économique et sociétale rencontrées dans la littérature. Quelques problèmes sont toutefois à relever : le mécanisme d'attribution des poids ainsi que leur agrégation (pour le calcul d'un indice global) laissent peu de flexibilité pour permettre à des experts d'intégrer leurs jugements personnels dans les évaluations et faire ainsi refléter leurs préférences, les incertitudes qui s'y réfèrent, ainsi que les spécificités du contexte considéré.

Plusieurs méthodes existent bien dans la littérature, pour définir des indices de durabilité, dont celles présentées plus haut. Les approches pour l'évaluation des critères ainsi que pour l'agrégation des évaluations individuelles peuvent cependant différer. Il serait par conséquent illusoire de chercher une méthode utilisée dans un contexte spécifique pour l'adapter à un autre qui n'en partagerait par forcément les spécificités. D'où l'impératif d'une démarche d'aide à la construction des critères de

durabilité et à leur évaluation par élicitation des connaissances qui s'y réfèrent, et ce dans un cadre de décision collective, prenant en compte les préférences des experts.

1.3.2. Principales approches de conception

Dans la littérature, on peut classer les principales approches de conception d'un système de mobilité urbaine selon deux catégories : (1) les *approches par analyse sectorielle*, guidées par la résolution d'une problématique spécifique à un domaine, (2) *les approches globales, orientées système*, qui intègrent plusieurs domaines à la fois.

Les principales problématiques étudiées dans le cadre de l'approche par analyse sectorielle visent (1) la reconfiguration ou l'expansion des infrastructures de transport, par exemple pour introduire une piste cyclable, un nouveau parking, un point de transfert modal, etc. (SteadieSeifi et al., 2014 ; CERTU, 2012) ; (2) l'aménagement du territoire à travers la planification de l'occupation du sol (Ayissi & Moskolaï, 2017 ; Wang et al., 2012 ; Saelens et al., 2003) ; (3) l'optimisation de la logistique urbaine basée par exemple sur des hubs de distribution, la promotion des circuits courts, des zones de distribution aménagées, etc. (Jia et al., 2016 ; Memon et al., 2013 ; Houda et al., 2010). Malgré la qualité des solutions apportées dans chacun des secteurs étudiés, pour les décideurs des villes, une telle approche ne permet pas d'avoir une visibilité sur le long terme et pourrait se réduire à une juxtaposition de solutions dont les influences mutuelles (parfois conflictuelles) peuvent affecter l'efficacité du système : lors de l'expansion d'un réseau de transport, généralement réalisée dans le but de réduire la congestion, il a souvent été constaté que l'augmentation des capacités de déplacements tend à accroître la densité routière (car elle incite les usagers à utiliser leurs véhicules personnels).

Le choix d'une « vision orientée système » pour concevoir un système de mobilité urbaine durable semble par conséquent plus approprié. Comme l'a montré (Fiksel, 2006), avec un tel choix, la gestion de la résilience du système face à une perturbation externe est plus maîtrisable. Les principales méthodes qui s'y réfèrent sont présentées dans la suite.

1.3.3. Les principales méthodes de l'approche orientée système

Dans l'approche orientée système, plusieurs méthodes de conception ont été proposées dans la littérature, allant de la spécification non formelle à des méthodes générales, intégrant le cycle de vie complet du système.

Analyse de la dynamique du système. Dans cette catégorie, malgré la vision orientée système, les modèles élaborés visent généralement l'analyse de l'influence d'une composante sur l'ensemble, à

travers l'étude de la dynamique du système. Les autres aspects du système comme par exemple sa structure, ne sont pas explicitement traités. Les études d'influence peuvent par exemple porter sur l'évaluation de la politique de sécurité (Goh et al., 2012), l'évolution de la structure du transport de passagers (Chao & Zishan, 2013), l'analyse de l'influence de la pollution de l'air sur le système de transport (Vafa-Arani et al., 2014), ou encore l'évaluation de la politique de durabilité (Haghshenas et al., 2015). Une tentative de conceptualisation du système intégrant ses différentes composantes a été proposée dans (Wang et al., 2008) où les auteurs ont étudié les interdépendances entre plusieurs sous-systèmes d'un système de mobilité comprenant : la population, le développement économique, le nombre de véhicules, les impacts environnementaux, la demande de transport, sa fourniture, la congestion du trafic. En se basant sur des données réelles d'une ville, la simulation effectuée a permis d'établir la nécessité de réduire le nombre de véhicules comme solution de durabilité.

Spécification non formelle de système. Dans cette catégorie, il y a quelques décennies déjà que Wegener (1994) a proposé un modèle opérationnel de mobilité urbaine, composé de huit sous-systèmes et classés en fonction de leur vitesse de changement dans le temps :

(a) Sous-systèmes caractérisés par des changements lents : (1) ***réseaux***, (2) ***occupation du sol***. D'après l'auteur les réseaux urbains tels que les réseaux de transport, de communications et de services publics sont les éléments les plus permanents de la structure urbaine ; les grands projets structurants nécessitent en effet une décennie ou plus, et une fois en place, ils sont continuellement mis à jour et réparés, mais rarement abandonnés. Concernant l'occupation du sol, l'auteur affirme que leur répartition est tout aussi stable ; elle ne change que progressivement et est beaucoup plus permanente que les bâtiments individuels.

(b) Sous-systèmes caractérisés par des changements à vitesse moyenne : (3) ***lieux de travail***, (4) ***logements***. Selon l'auteur, les bâtiments d'habitation ont une durée de vie allant jusqu'à cent ans et prennent plusieurs années, de la planification à leur achèvement, tandis que les lieux de travail (bâtiments non résidentiels) tels que les usines, les entrepôts, les centres commerciaux ou les bureaux, les théâtres ou les universités existent beaucoup plus longtemps que les entreprises ou les institutions qui les occupent.

(c) Sous-systèmes caractérisés par des changements rapides : (5) ***emploi***, (6) ***populations***. D'après l'analyse de l'auteur, les entreprises sont créées ou fermées, agrandies ou délocalisées en réponse à l'évolution des marchés et des technologies, créant de nouveaux emplois ou les rendant superflus. Les ménages sont créés, grandissent ou déclinent et finissent par être dissous,

et à chaque étape de leur cycle de vie, ils adaptent leur consommation de logements et leur localisation à leurs besoins changeants, ce qui détermine la répartition de la population.

(d) Sous-systèmes caractérisés par des changements immédiats : (7) ***transport de marchandises***, (8) ***voyages***. L'analyse de l'auteur conduit à la conclusion que la localisation des activités humaines dans l'espace donne lieu à une demande d'interaction spatiale sous forme de transport de marchandises ou de voyages, et que ces interactions sont les phénomènes les plus volatils du développement urbain ; ils s'ajustent en quelques minutes ou heures à des conditions changeantes telles que la congestion ou les fluctuations de la demande.

Vision générale de conception. Pour (Goldman & Gorham, 2006), plusieurs approches apportant chacune une vision différente, doivent être considérées dans la conception d'un système de mobilité urbaine durable. En étudiant les interactions entre le transport et les systèmes socio-économiques, ils préconisent d'adopter une démarche qui englobe : (1) l'approche ***« nouvelle mobilité »*** qui s'intéresse à la façon dont les individus planifient leurs activités quotidiennes. L'objectif dans ce cas est de chercher à comprendre et à influencer l'ensemble des facteurs économiques et psychologiques qui façonnent le choix du mode de transport et les décisions relatives à la possession d'un véhicule ; (2) l'approche ***« logistique urbaine »*** qui concerne essentiellement l'optimisation du transport de marchandises. L'idée ici est d'encourager de nouveaux modèles d'affaires pour des systèmes de distribution urbaine plus durables (par exemple des hubs de distribution) ; (3) l'approche ***« management de systèmes intelligents »*** qui traite de la relation entre les infrastructures de transport et les institutions publiques qui l'exploitent. La finalité est de parvenir à réorganiser les pouvoirs publics autour de la gestion de l'infrastructure publique en tant qu'actif de grande importance dont la valeur est maximisée si elle est évaluée, appliquée et gérée efficacement ; (4) l'approche ***« qualité de vie »*** qui porte sur la manière dont la société interagit avec les systèmes de transport. Dans cette optique, il est préconisé une plus grande intégration de la planification des transports aux besoins de la société, en incluant les possibilités de loisirs et d'interaction sociale, et l'accessibilité pour les personnes vulnérables (notamment les enfants, les pauvres, les personnes âgées). Une brève synthèse des différentes approches de conception orientées système est présentée au Tableau 1.

Tableau 1 : Synthèse des approches de conception d'un système de mobilité urbaine

Principales approches de conceptualisation	Intérêt de l'approche	Limites de l'approche
Analyse sectorielle en considérant le changement d'état du système de mobilité (Wegener, 1994)	(1) Gestion de la complexité (2) Interaction entre plusieurs domaines de la mobilité (3) Taux de couverture de la mobilité (4) Formalisation des interactions	(1) Gestion de la complexité limitée (réduite à la rapidité de changement) (2) Flexibilité faible dans la spécification du système (non prise en compte de changements de technologie ou de paradigme, des besoins spécifiques de parties prenantes) (3) Absence de cadre formel d'évaluation des interactions (4) Absence de formalisme de représentation du système (5) Processus d'élaboration et de suivi non spécifié
Analyse d'impact socio-économique du système de mobilité (Goldman & Gorham, 2006)	(1) Gain en efficacité (optimisation, gestion) (2) Bon suivi des actions et leurs impacts	(1) Gestion de la complexité limitée (réduite à l'impact socio-économique) (2) Flexibilité faible dans la spécification du système (non prise en compte de changements de technologie ou de paradigme, des besoins spécifiques de parties prenantes) (3) Interactions non formalisées (4) Absence de formalisme de représentation du système (5) Processus d'élaboration et de suivi non spécifié
Analyse de la dynamique du système de mobilité (Haghshenas et al., 2015 ; Vafa-Arani et al., 2014 ; Chao & Zishan, 2013 ; Goh et al., 2012 ; Wang et al., 2008)	(1) Étude du comportement du système montrant les influences mutuelles (2) Interactions formalisées (dans le domaine étudié)	(1) Gestion très faible de la complexité (circonscrite au domaine étudié) (2) Spécification déficiente du système (limitée aux domaines étudiés) (3) Interactions peu représentatives du système global (4) Représentation du système peu adaptée à la compréhension et à l'analyse de sa complexité (5) Processus d'élaboration et de suivi non spécifié

1.4. Évaluation de la durabilité d'un système de mobilité urbaine : principales méthodes

Dans la littérature, de nombreuses méthodes d'évaluation des systèmes existent. Parmi les travaux s'étant spécifiquement intéressés à l'évaluation de la durabilité d'un système, on note principalement celles basées sur (1) l'expertise humaine, ou (2) sur la décision multicritère.

1.4.1. Méthode directe basée sur l'expertise humaine

L'humain est bien souvent confronté à des problèmes complexes où son intervention pour une prise de décision est nécessaire. Prendre une décision, c'est trancher entre plusieurs possibilités et choisir celle qui sera effectivement mise en œuvre. Diverses communautés scientifiques se sont penchées sur la question de savoir comment l'humain prend une décision, pour l'accompagner dans cette tâche ou pour pouvoir reproduire cette décision de manière automatique. C'est le cas des problèmes de choix, par exemple, celui d'un tronçon de voie ferrée à construire, parmi plusieurs propositions. Dans ce cas, il s'agira de désigner le meilleur tracé au sens d'un ensemble de critères reflétant les exigences des décideurs.

A chaque problème de décision, l'humain doit rechercher la "meilleure" solution pour le résoudre. Parfois il se heurte à d'énormes difficultés quant au choix de la meilleure solution à cause de l'hétérogénéité de ces solutions et des critères à prendre en compte. C'est pourquoi, en pratique, il est préférable de résoudre ces problèmes complexes via un processus scientifique, appelé aide à la décision multicritère (Bouyssou et al., 2000), permettant la modélisation mathématique du problème concerné. Un processus d'aide à la décision met en scène au moins deux acteurs : le décideur (ou expert) et l'*analyste*. Le premier a la responsabilité de décider du choix final de la "meilleure" solution. Il peut intervenir tout le long du processus en donnant ses préférences, ses priorités, en émettant des avis et autres souhaits. L'analyste quant à lui facilite le processus d'aide à la décision par une analyse méthodologique et scientifique du problème. Il utilise pour cela des formulations claires et des structures rationnelles nécessaires à la modélisation du problème. Il peut aussi interagir avec le décideur à travers des discussions pour requérir son avis ou la modification de certaines données fournies par ce dernier. Parfois l'analyste porte le nom de *facilitateur*.

1.4.2. Méthodes intégrant une analyse multicritère

D'après la définition proposée par Roy (1985), *« l'aide à la décision est l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de*

décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à recommander, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part ». L'objectif des méthodes multicritères est ainsi d'aider à prendre une décision (ou à évaluer entre elles plusieurs solutions, sans avoir forcément de choix à effectuer au final) dans les situations de choix où aucune possibilité n'est parfaite, et où différents critères entrent en conflit. L'idée de base est de : (1) considérer tous les critères entrant en compte, (2) leur attribuer un poids lié à leur importance relative, (3) noter chaque action par rapport à tous les critères et finalement (4) d'agréger ces résultats. Toute activité d'aide à la décision fait généralement intervenir un décideur (celui à qui on s'adresse) et un homme d'étude ou expert comme précédemment rappelé.

Le processus de décision multicritère se résume principalement en trois phases :

- Une ***phase de compréhension*** : analyse de la situation et du problème ;
- Une ***phase de modélisation*** : formulation du problème (mise en évidence des écarts entre la situation actuelle et la situation objectée) et description des solutions potentielles ;
- Une ***phase de sélection*** : choix d'une solution en fonction de critères concrets (objectifs, normes, …) ou abstraits (intuition, motivation, ...), appréhendés par le décideur avec ou sans le soutien d'outils et de techniques d'aide à la décision.

Les problématiques de décision

Tout problème de décision multicritère se ramène généralement vers une orientation que l'on adopte. Il traduit les termes dans lequel le décideur pose le problème pour lequel il souhaite obtenir des solutions. Roy (1985) propose quatre problématiques de référence :

(1) Problématique de choix : Elle consiste à sélectionner un sous-ensemble aussi restreint que possible de l'ensemble des actions en vue d'un choix final d'une seule action. Mais à cause de la nature conflictuelle des critères, il est préférable de fournir au décideur quelques actions qui représentent différentes variantes de la "meilleure action". Évidemment, le résultat final peut être raffiné en utilisant de l'information additionnelle ou avec une analyse plus approfondie.

(2) Problématique de tri : Elle consiste à affecter chaque action à un ensemble de catégories prédéfinies. Cette formulation est adéquate lorsque le problème de décision consiste à examiner chaque action indépendamment des autres (en tenant compte des caractéristiques intrinsèques de chaque action) dans le but de proposer une recommandation parmi un ensemble des recommandations spécifiées en avance. Chaque recommandation peut être associée avec une

catégorie. Le problème de décision est alors vu comme trier les actions potentielles aux différentes catégories définies en termes de normes prédéfinies. La procédure de tri doit être définie de telle sorte que chaque action est affectée à une et seule catégorie.

(3) ***Problématique de rangement :*** Elle consiste à ranger les différentes actions en allant de la meilleure action à la moins bonne. Cette problématique est intéressante lorsque les actions sont à différencier selon leur intérêt relatif. L'idéal est d'obtenir un ordre complet. Cependant, à cause de la nature conflictuelle des critères, à l'imprécision, à l'existence de systèmes de valeurs différents, il est souvent plus réaliste de présenter au décideur un ordre partiel. Il est à noter qu'en pratique, le rangement peut être nécessaire seulement pour les actions les plus intéressantes.

(4) ***Problématique de description :*** Elle consiste simplement à décrire les actions et leurs conséquences et non pas à les comparer comme c'est le cas avec les trois autres problématiques précédentes. Ici, il n'existe pas une prescription et la procédure d'investigation est cognitive.

Exemples de méthodes d'aide à la décision multicritère

Plusieurs méthodes d'analyse multicritères ont été proposées et comparées dans la littérature (Ho et al., 2010). Pour plus de simplicité, seules les plus utilisées selon (Mardani et al., 2015) ont été recensées et présentées dans le Tableau 2. Il s'agit principalement des méthodes suivantes : *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (Saaty T. , 1980), *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) (Hwang & Yoon, 1981), *Elimination Et Choix Traduisant la REalité* (ELECTRE) (Roy & Bertier, 1971) et *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE) (Brans & Vincke, 1985).

Les méthodes ELECTRE et PROMETHEE sont dites basées sur des approches par ***sur-classement de synthèse***, prenant en compte « l'incomparabilité » entre deux actions (par exemple lorsque le décideur est en incapacité de juger des paires d'actions). Elles considèrent les critères qualitatifs et quantitatifs, s'appliquent à tous les domaines de la science, et peuvent s'étendre à l'utilisation des nombres flous. Quant aux méthodes AHP et TOPSIS, elles sont dites basées sur des approches du ***critère unique de synthèse*** (les décideurs peuvent effectuer des jugements sur des paires de critère). En plus des avantages proposés par les autres méthodes, AHP est la plus utilisée selon Mardani et al. (2015), et ce pour plusieurs raisons : utilisation d'une structure hiérarchique de critères, d'une échelle

pour exprimer les préférences, possibilité de vérification de la cohérence des jugements, prise en compte des décisions collectives (agrégation des décisions), etc.

Tableau 2 : Synthèse des méthodes d'aide à la décision multicritère

	AHP	TOPSIS	ELECTRE	PROMETHEE
Référence bibliographique	Saaty (1980)	Hwang and Yoon (1981)	Bernard Roy (1965)	Brans (1982)
Domaine d'application	Sciences sociale, économique, environnementale, etc.	Sciences sociale, économique, environnementale, etc.	Sciences sociale, économique, environnementale, etc.	Sciences sociale, économique, environnementale, etc.
Type de critères	Quantitatif et Qualitatif	Quantitatif et Qualitatif	Quantitatif et Qualitatif	Quantitatif et Qualitatif
Méthode de calcul des poids des critères	Matrice de comparaison de pair de critères selon l'échelle de Saaty (1 à 9)	Pas de méthode spécifique	Pas de méthode spécifique	Pas de méthode spécifique
Traitement d'incohérences	Contrôle de la cohérence des jugements (étape postérieure)	Contrôle de la cohérence des jugements (étape antérieure)	Non pris en compte	Contrôle de la cohérence des jugements (étape antérieure)
Classement des alternatives	Oui	Oui	Non	Oui
Intégration d'une approche étendue	Oui	Oui	Oui	Oui

Dans les versions originelles de ces méthodes, les évaluations et les poids attribués aux critères sont supposés connus avec précision : la représentation des critères quantitatifs se fait alors par des nombres. Ce qui n'est pas toujours possible en pratique et n'offre aucune flexibilité à l'expert dans son jugement. Des versions étendues ont pour cela été proposées dans la littérature, par exemple, la méthode Fuzzy AHP (Chang, 1996) définie pour faire face à la prise en compte des incertitudes liées aux jugements personnels des experts, la méthode DS/AHP (Beynon, 2002) permet de gérer l'incomplétude et le doute, à partir d'un raisonnement évidentiel basé sur les fonctions de croyance de la théorie Dempster-Shafer.

1.4.3. Mobilité urbaine et évaluation de sa durabilité

Le système de mobilité urbaine est par nature complexe et caractérisé par de nombreux facteurs à prendre en compte lors de son évaluation tel que précédemment présenté. Il doit également satisfaire à plusieurs décideurs des secteurs public et privé ayant un large éventail de points de vue et qui participent au processus de prise de décision. Cependant, en réalité, la plupart des décideurs de la mobilité urbaine ne disposent ni des informations complètes ni des règles de décision rigides pour prendre la décision « correcte ». Dans la littérature, de nombreux travaux se sont penchés également sur les questions de : comment évaluer, présenter et recommander de manière logique le système de mobilité le plus souhaitable qui réponde aux objectifs et aux besoins de divers points de vue et en même temps, répond à de multiples objectifs dans le cadre d'informations incertaines.

Selon Pérez (2015) et Mardani (2017), les méthodes intégrant une analyse multicritère sont les plus recommandées et les plus utilisées pour la prise en compte des décisions collectives et la considération de divers critères dans les processus d'évaluation et de prise de décisions dans les projets de mobilité urbaine au cours des dernières décennies. Quelques travaux récents de la littérature présentés dans le tableau ci-dessous (cf. Tableau 3) montrent bien l'intérêt porté aux méthodes d'analyse multicritère dans l'évaluation de la durabilité de la mobilité urbaine.

Tableau 3 : Synthèse bibliographique de l'évaluation de la durabilité d'un système de mobilité urbaine

Références bibliographiques	Méthode d'évaluation de la durabilité	Description
Bandeira et al., (2018)	Analyse multicritère	Modèle multicritère flou pour évaluer la durabilité d'un système transport de fret urbain
Büyüközkan et al., (2018)	Analyse multicritère	Sélection d'alternatives de transport urbain durable utilisant une approche intégrée basé sur l' intégrale de Choquet intuitionniste floue
De Paula et al., (2018)	Analyse multicritère	Algorithmes appliqués à la prise de décision pour le choix de système de transport durable
Perra et al., (2017)	Analyse multicritère	Évaluation de la mobilité urbaine durable dans la ville de Thessalonique
Brandi et al., (2017)	Méthode statistique multivariée	Evaluation sous incertitude d'un système de mobilité urbaine
Mardani et al., (2016)	Analyse multicritère	Etat de l'art sur les techniques de prise de décision à critères multiples dans les systèmes de transport
Graindorge & Breuil (2016)	Analyse multicritère	Mise en évidence des principes fondamentaux pour l'évaluation des projets de transport
Macharis & Bernardini, (2015)	Analyse multicritère	Examen de l'utilisation de l'analyse décisionnelle multicritères pour l'évaluation des projets de transport
Pérez et al., (2015)	Analyse multicritère	Revue de la littérature sur les approches multicritères pour les systèmes de transport urbain de passagers

1.5. Positionnement scientifique

Au vu de ce qui précède, l'écosystème de la mobilité urbaine traditionnelle peut être représenté comme dans la Figure 7. Trois principales parties prenantes sont concernées et dont il faut satisfaire les

exigences. Elles occupent des zones spécifiques dont il faut planifier la modification à travers des plans d'aménagement urbain, tandis que leurs besoins respectifs, les services et infrastructures de mobilité associés sont nombreux et en interaction. Par exemple, pour une catégorie de partie prenante telle que les populations, leurs principaux besoins en terme de mobilité concernent le déplacement pour se rentre au travail (école, hôpital, etc.) ou encore pour effectuer des activités de loisir (faire du shopping, aller au marché, au stade, etc.). Pour ces populations, leurs principaux besoins en terme d'aménagement urbain ce sont les logements et en terme de service de mobilité c'est le transport public/privé. Les liens pour les autres parties prenantes (pouvoirs publics et entreprises) peuvent s'interpréter de la même manière. Vu que les besoins sont appelés à évoluer, les services et infrastructures qui répondent à ces besoins étant par conséquent appelés à évoluer également, la complexité du système ira en augmentant.

Sur cette base, la conception d'un système de mobilité urbaine durable nécessite de traiter les verrous suivants : (1) la caractérisation de la durabilité en tenant en compte des besoins des parties prenantes, (2) la gestion de la complexité liée à la multitude des éléments en interaction, et la prise en compte de leurs évolutions. D'après les précédentes discussions, aucune méthode de la littérature ne remplit ces préalables.

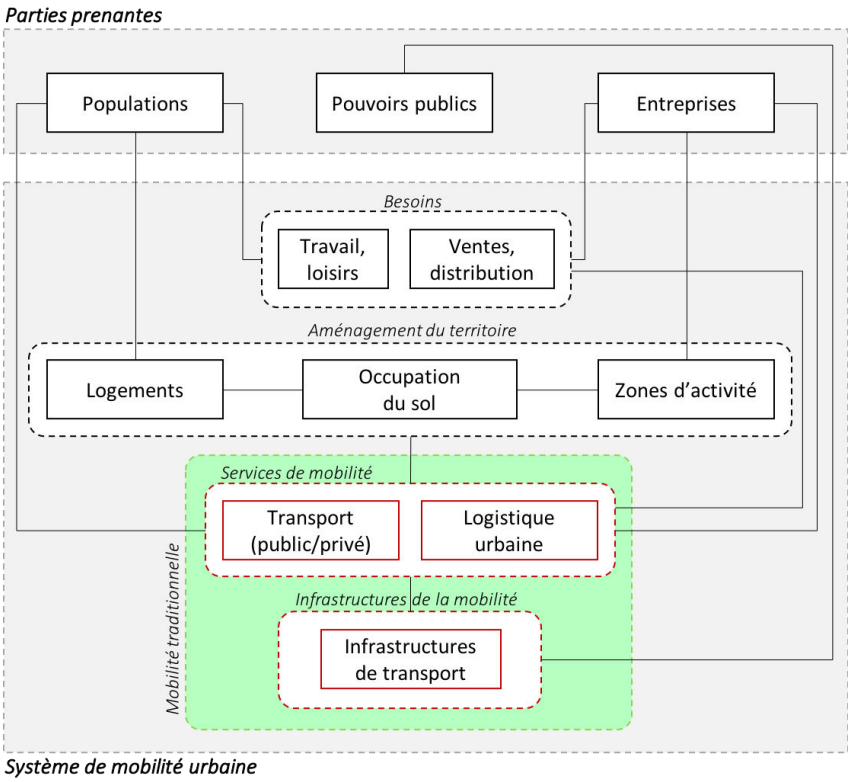


Figure 7 : Écosystème de la mobilité urbaine traditionnelle

En vue d'accompagner les décideurs des villes à concevoir et à déployer un système de mobilité urbaine durable basé sur le *MaaS* (i.e. la forme de mobilité en phase avec les évolutions socio-technologiques), qui prend en compte les exigences de toutes les parties prenantes, deux hypothèses seront considérées dans le cadre de cette thèse : (1) les pouvoirs publics assurent un rôle régulateur et de contrôle pour garantir une transparence et veiller à la satisfaction des usagers ; (2) un partenariat public/public (PPP) doit être instauré pour permettre aux fournisseurs de solutions de jouer un rôle actif dans l'élaboration et la conduite du système de mobilité ; ce qui revient à considérer un environnement distribué. Le PPP peut comporter quelques risques : l'un est que l'entité publique et l'entreprise privée cherchent à tirer profit de la relation, l'usager finissant par payer plus cher ; un autre est lié aux contrats à long terme qui n'intègrent pas toujours les évolutions technologiques, voire socio-économiques. Les avantages des modèles de PPP sont toutefois nombreux : allègement des contraintes budgétaires, optimisation des ressources, contrôle réaliste des coûts, calendrier de construction simplifié et fiable de la mise en œuvre du projet, permettant d'améliorer l'efficacité économique, maintenance et prestation de services mieux coordonnées, possibilité de transfert technologique, etc. Au total, il favorise un recentrage des gestionnaires des villes dans leur rôle d'autorité publique et leur fonction de contrôle du respect de la règlementation.

Pour traiter le premier verrou, notre positionnement est en définitive celui d'une méthode d'élicitation des connaissances, afin de formuler les exigences des parties prenantes. Après l'élicitation, une méthode d'analyse multicritères susceptible de refléter ces exigences et prenant en compte les incertitudes et doutes liés à une telle évaluation a été adoptée, basée sur le couplage de la méthode AHP avec la théorie des fonctions de croyance. En ce qui concerne le second verrou, une méthode de conception capable d'intégrer plusieurs points de vue et plusieurs niveaux d'analyse pour gérer la complexité du système est nécessaire. Une démarche d'Ingénierie Système a pour cela été adoptée.

Synthèse du chapitre

Comme nous avons tenté de le montrer, le système qui caractérise la mobilité urbaine est complexe. Sa conception, tout comme l'évaluation de sa durabilité nécessitent par conséquent une démarche holistique, prenant en compte le cycle de vie complet du système ainsi que les interdépendances entre ses composantes. Il a en outre été établi dans les développements précédents qu'il est impératif de prendre en compte les évolutions futures (de technologies ou de paradigme). Comme on a pu le voir, la tendance pour définir la durabilité, consiste à aller au-delà de l'intégration des technologies qui facilitent certes l'utilisation des services de mobilité, pour considérer de façon plus globale les préoccupations des humains, et cette trajectoire ira en s'amplifiant avec des règlementations et une gouvernance de plus en plus stricte. Dans la littérature, nous avons vu que des méthodes existent pour

caractériser la variété des facteurs de durabilité, en incluant ceux reflétant la nouvelle trajectoire de la mobilité durable. D'autres existent pour formaliser les composantes du système étudié de manière à mieux refléter leurs interdépendances. Cependant, aucune de ces méthodes ne propose un cadre formel pour gérer la complexité.

Chapitre 2 – Méthodologie de conception et de mise en œuvre d'un système de mobilité urbaine durable

Chapitre 2 – Méthodologie de conception et de mise en œuvre d'un système de mobilité urbaine durable 34

2.1. Cadre méthodologique proposé 35

2.1.1. Pourquoi un co-déploiement ? 35

2.1.2. Schéma de principe de la méthodologie proposée 36

2.2. Modélisation avec le formalisme BPMN 38

2.2.1. Principales notations BPMN 39

2.2.2. Les sous-processus du niveau stratégique 41

2.2.3. Les sous-processus du niveau tactique 43

2.2.4. Les sous-processus du niveau opérationnel 47

2.3. Aide au choix des politiques cibles 49

2.3.1. Présentation de la méthode AHP 50

2.3.2. Présentation de la méthode Dempster–Shafer (DS)/AHP 51

Synthèse du chapitre 55

Dans le chapitre précédent, un état de l'art sur la conception d'un système de mobilité urbaine et l'évaluation de sa durabilité ont été discutés, ainsi que le positionnement scientifique de ce travail. Dans ce chapitre, une méthodologie de conception et de mise en œuvre sera proposée. L'objectif est de guider les gestionnaires de villes dans le choix et la conduite des actions appropriées. Le cadre méthodologique proposé intègre le cycle de vie complet du système, allant de sa conception à l'analyse de sa résilience et de divers impacts. Les principales briques de base qui le composent seront tout d'abord présentées. A l'aide du formalisme BPMN - Business Process Model and Notation (Raedts, et al., 2007), les principales articulations entre ces composantes seront ensuite détaillées, suivies de la présentation de la méthode d'aide au choix des politiques cibles proposée. Enfin une synthèse clôturera le chapitre.

2.1. Cadre méthodologique proposé

La méthodologie proposée dans le cadre de cette thèse est basée sur le co-déploiement des systèmes physique et d'information de l'écosystème de mobilité urbaine. L'intérêt d'un tel choix est rappelé dans la suite.

2.1.1. Pourquoi un co-déploiement ?

Au vu de l'hypothèse considérée dans cette thèse, plusieurs partenaires (publics et privés) sont appelés à collaborer pour la conduite du système de mobilité urbaine. Sa mise en œuvre ainsi que sa gestion doivent par conséquent prendre en compte plusieurs dimensions du pilotage du système.

- ***La dimension décisionnelle.*** En raison du partenariat public/privé envisagé par hypothèse, les décisions pour la conduite du système s'inscrivent dans le cadre d'une collaboration entre les différentes parties prenantes. Par exemple, pour la mise en service d'une nouvelle offre de service telle que la billettique, la multimodalité ou l'intermodalité, l'aménagement des infrastructures existantes, etc., les décisions concernant les actions à conduire doivent faire l'objet d'un consensus entre ces derniers.

- ***La dimension infrastructurelle.*** La maturité d'un système de mobilité s'appuie, comme vu au chapitre précédent, sur un ensemble d'infrastructures et d'équipements qui sont appelés à répondre aux attentes des usagers. La conception du système étudié doit par conséquent prendre en compte les caractéristiques de la mobilité urbaine relevant de cette dimension. Par exemple, les aspects liés au parking, au réseau de transport (piste cyclable, routière, ferroviaire, etc.).

- ***La dimension informationnelle.*** Comme cela a été discuté au chapitre 1, la mobilité du futur est une mobilité en tant que service. Il s'agit des services à la demande, des services personnalisés, etc. qui visent à réduire l'utilisation des véhicules personnels au profit des modes alternatifs plus respectueux des exigences de durabilité. Ces services sont fournis à travers des plateformes numériques. Par exemple, la planification d'un itinéraire, la gestion du trafic, etc.

Dans les faits, les villes considérées comme matures (du point de vue de la densité du réseau de transport, de l'attractivité financière des transports publics, de la multimodalité, etc.) sont en général intéressées par des solutions qui touchent des aspects décisionnels et informationnels (cas de la plupart des grandes villes des pays développés). Les autres villes, celles dont l'infrastructure routière, les équipements associés, la densité des réseaux routiers, etc. sont à parfaire, sont concernées par les trois dimensions à la fois. Comme les choix qui portent sur chacune de ces trois dimensions correspondent à des domaines interdépendants d'un système de mobilité urbaine (comme cela sera illustré lors de l'analyse de la résilience), une vision holistique a pour cela été adoptée : d'où l'intérêt d'un co-déploiement pour mieux prendre en compte la complexité du système étudié et favoriser une implémentation réussie (Moskolaï et al., 2015). Dans cette thèse, les aspects infrastructurels et informationnels ont été plus particulièrement traités. Le schéma de principe reflétant cette vision est décrit dans la section suivante.

2.1.2. Schéma de principe de la méthodologie proposée

La méthodologie proposée pour l'élaboration du système de mobilité urbaine durable s'articule autour de trois niveaux de prise de décision : stratégique, tactique et opérationnel. Le schéma de principe caractérisant cette méthodologie est illustré à la Figure 8.

(a) Le ***niveau stratégique***. Il comprend les processus de définition et de choix des politiques cibles, des partenaires cibles et d'élaboration des projets pilotes à partir des exigences sociétales et des contraintes financières de l'heure. Comme éléments d'entrée, les décideurs doivent prendre en compte (1) la loi de finances, (2) les exigences sociétales de l'heure, (3) le contexte économique afin de bien dimensionner les investissements (cf. niveau supérieur Figure 8).

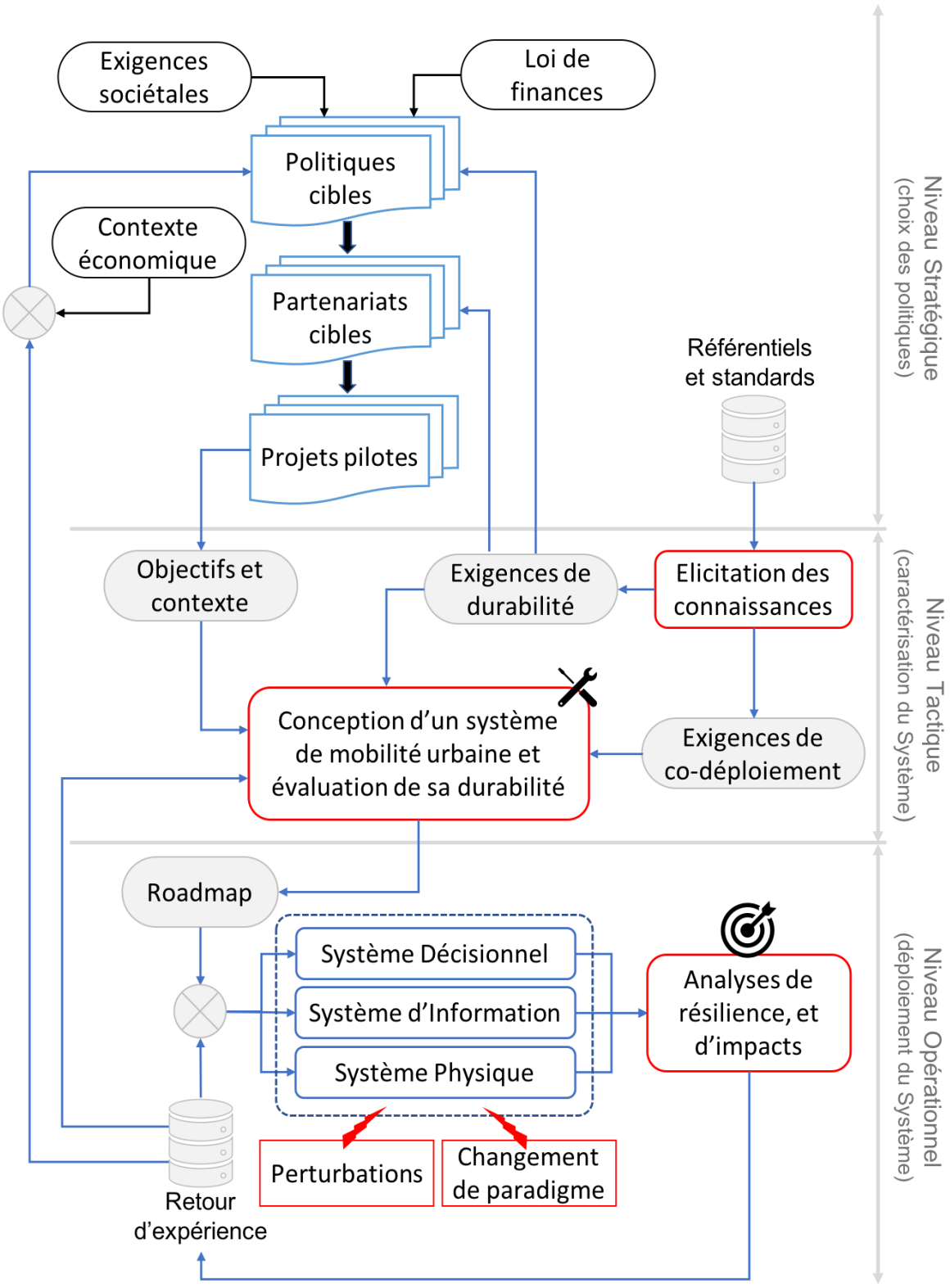


Figure 8 : Schéma de principe du cadre méthodologique proposé

(b) **Le *niveau tactique*.** Il comprend les processus de conception du système de mobilité urbaine et d'évaluation de sa durabilité, en s'appuyant sur des exigences de durabilité et de co-déploiement contenues dans des référentiels et standards d'une part, des objectifs spécifiques au projet en cours d'autre part. Les connaissances pour l'intégration de ces exigences n'étant pas données, une phase d'élicitation est pour cela envisagée pour montrer comment exploiter les référentiels et standards considérés (cf. partie médiane de la Figure 8).

(c) **Le *niveau opérationnel*.** Il comprend essentiellement le processus de déploiement conjoint des sous-systèmes décisionnel, physique et informationnel, en considérant la roadmap de co-déploiement (issue du niveau supérieur) comme élément d'entrée. Pour étudier le comportement du système face à des perturbations externes (par exemple, catastrophe naturelle, attaque du système d'information, grève, baisse soudaine de la demande, etc.), une phase d'analyse de sa résilience est pour cela envisagée. La vulnérabilité des parties prenantes est quant à elle intégrée dans le processus à travers différentes analyses d'impacts. (cf. partie inférieure de la Figure 8).

Afin de montrer les articulations entre les activités composant les macro-processus de la méthodologie qui viennent d'être présentés, une vue plus détaillée a ensuite été réalisée en utilisant le formalisme BPMN. Les principales notations de ce formalisme sont rappelées dans la suite.

2.2. Modélisation avec le formalisme BPMN

Le formalisme BPMN est une norme de formalisation des processus métiers qui favorise leur compréhension à travers une notation graphique, et offre aux organisations la capacité de communiquer leurs procédures de façon standard[2]. Une finalité est de permettre aux acteurs de différents métiers de se comprendre et de s'adapter à des contextes nouveaux. Les principales notations de ce formalisme sont brièvement décrites dans la suite.

[2] www.bpmn.org, consulté le 10 mai 2018.

2.2.1. Principales notations BPMN

Les symboles des diagrammes BPMN sont répartis en quatre catégories : les objets de flux, les objets de connexion, les couloirs et les artefacts. Une description brève de ces catégories est proposée par la suite et les notations résumées dans la Figure 9.

Les objets de flux

Les objets de flux sont les éléments de base d'un diagramme BPMN. Ils représentent les concepts à modéliser. Les objets de flux peuvent appartenir à l'une des trois catégories suivantes : événements, activités et branchements.

(a) Événements. Il s'agit d'un élément déclencheur qui commence, modifie ou termine un processus. Ils sont représentés à l'aide de cercles contenant d'autres symboles qui changent en fonction du type d'événement (message, minuterie, erreur, compensation, signal, annulation, escalade ou lien). Dans un processus, trois types d'évènements servent à identifier un état particulier dans le processus : il s'agit des événements de début, intermédiaire et de fin.

(b) Activités. Il s'agit d'une activité ou d'une tâche particulière effectuée par une personne ou un système. Elle est représentée par un rectangle aux angles arrondis. Elle peut être assortie de sous-processus, de boucles, de compensations et d'instances multiples.

(c) Branchements. Le branchement est un objet essentiel dans la norme BPMN. Il sert à représenter la condition de routage entre le(s) flux en entrée et le(s) flux en sortie. Le branchement n'est pas une tâche et n'effectue aucune action. Lorsque le losange est vide, chaque sortie est une alternative et il n'y a pas de différenciation entre les sorties. Le losange vide est utilisé lorsque le niveau d'abstraction du modèle est élevé et que l'on ne désire pas compliquer une vue ou bien lorsque la règle de traitement n'est pas connue. Les différents branchements possibles dans BPMN sont : les branchements exclusifs, parallèles, conditionnels et de synchronisation.

Objets de connexion

Il existe 3 types de connexions possibles. Les messages, représentés par une flèche en trait pointillé, servent à décrire les échanges entre processus, par une flèche en trait continu représentent les enchainements des activités ou flux entre deux tâches et les associations représentées en pointillés qui servent de support de rattachement entre une tâche et un objet de données.

Piste et couloirs

Une piste représente les principaux participants d'un processus. Une piste différente peut faire référence à une autre entreprise ou à un autre service qui participe néanmoins au processus. Les couloirs au sein d'une piste montrent les activités et les flux d'un rôle ou d'un participant, et définissent qui est responsable de quelle partie du processus.

Artefacts

Il s'agit d'une information supplémentaire utilisée par les développeurs pour ajouter un niveau de détail nécessaire au diagramme. Il existe trois types d'artefacts : les objets de données, les groupes et les annotations. Un objet de données montre quelles données sont nécessaires à une activité. Un groupe montre un regroupement logique d'activités, mais ne modifie pas le flux du diagramme. Une annotation apporte des explications complémentaires sur une partie du diagramme.

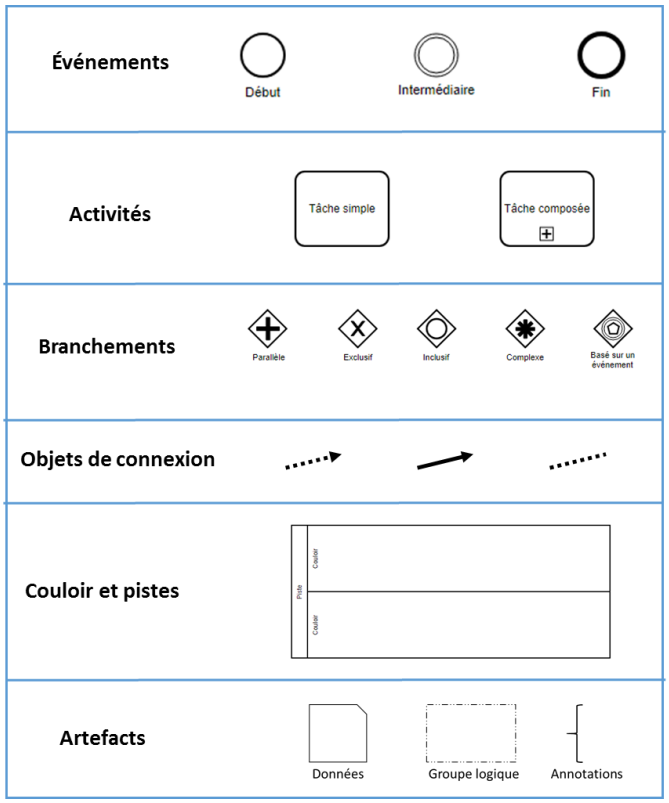


Figure 9 : Quelques notations BPMN

Dans la section suivante, une description plus détaillée des différentes phases du cadre méthodologique proposé sera présentée en utilisant le formalisme BPMN.

2.2.2. Les sous-processus du niveau stratégique

Trois principaux sous-processus constituent le niveau stratégique : le sous-processus de définition et de choix des politiques cibles (A), le sous-processus de choix des prestataires cibles (B) et le sous-processus d'élaboration des projets pilotes (C) (cf. Figure 10). Le sous-processus d'élaboration ou révision du PDU n'est pas traité dans ce travail car étant une activité qui est menée par les gestionnaires de villes et qui concerne une politique globale de la ville.

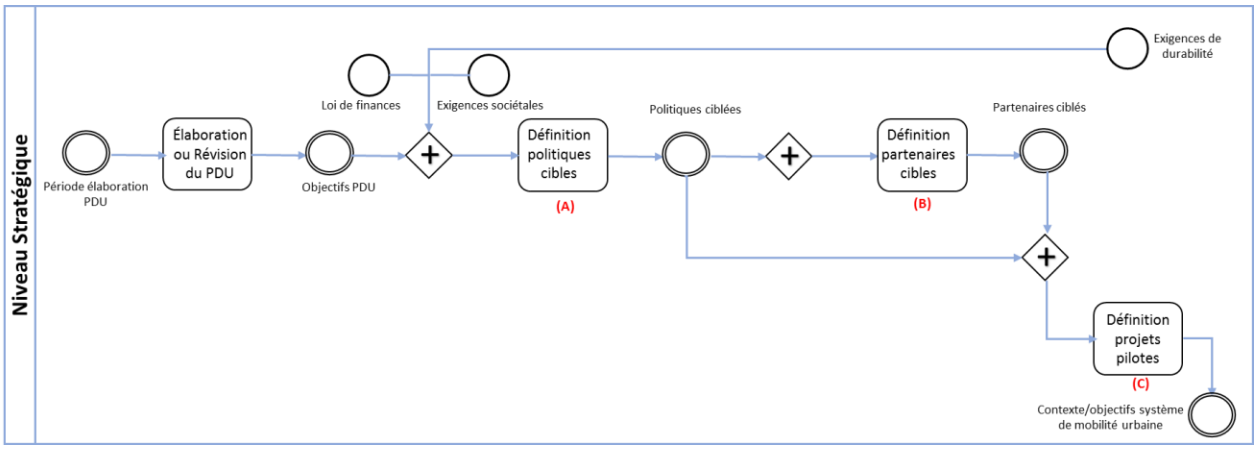


Figure 10 : Définition stratégique du système de mobilité urbaine

(A) Sous-processus de définition et du choix des politiques cibles

Le sous-processus de définition des politiques de mobilité urbaine se rapporte très souvent à la définition d'un projet de mobilité urbaine. Il consiste globalement à définir des alternatives spécifiques à mettre en œuvre en réponse aux besoins des citadins relativement aux systèmes de mobilité habituels tels que : l'aménagement des nouveaux modes de mobilité, l'extension d'un réseau routier, l'implémentation de nouveaux services, etc. La démarche méthodologique proposée dans ce travail suggère, pour l'élaboration d'un système de mobilité urbaine durable, une définition des politiques cibles par les pouvoirs publics conformément à la loi des finances et du budget de l'État, du Plan de Développement Urbain (PDU) et des exigences sociétales en spécifiant quels sont les modes de transport (par exemple métro, tram, bus, vélos, etc.) et les services (par exemple modes de paiements, système de validation et de contrôle des titres de transports, etc.) préconisés aux usagers. En plus des PDU, les exigences sociétales doivent également être prises en considération pour une bonne gouvernance en termes de mobilité urbaine.

Dans le choix des politiques cibles, les pouvoirs publics doivent également tenir compte des exigences de durabilité, du budget et de la loi des finances. Le budget et la loi des finances

correspondent tout simplement au montant de l'enveloppe budgétaire allouée aux différents projets de mobilité urbaine pour un exercice donné.

En ce qui concerne le sous-processus du choix de politiques cibles, il consiste pour les pouvoirs publics à prendre une décision collective sur la palette d'alternatives de services et d'infrastructures à implémenter suivant des exigences du développement durable dans le cadre d'une ville en concert avec les citoyens tel que définie précédemment. Ces services concernent par exemple la construction ou la réhabilitation des voies et infrastructures de transport vers des centres de santé, commerciaux, de loisir, culturels, éducatifs (écoles, lycées ou universités), des zones industrielles, d'habitations, administratives, etc. ou la mise à disposition des usagers des services d'informations en temps réel sur : les choix multimodaux, les horaires, la facilitation des paiements, etc. Il s'agit de manière globale pour les décideurs d'évaluer et de choisir la ou les politiques à déployer.

A l'issue du sous-processus de définition et du choix de politiques cibles à déployer, il est nécessaire d'effectuer le choix des partenaires cibles candidats à la matérialisation des politiques sélectionnées.

(B) Sous-processus du choix des partenaires cibles

Une fois les politiques cibles choisies, en définissant clairement pour chaque politique quels sont les modes de transport, les lieux d'implantation et les services associés (par exemple les services de paiement électronique, de réservation en ligne, etc.), le sous-processus suivant permettra aux pouvoirs publics d'effectuer le choix des partenariats cibles correspondants. Ces partenaires cibles correspondent aux entreprises pouvant contribuer à la mise en œuvre et au déploiement, la maintenance et la fourniture des infrastructures du réseau physique de transport, des partenaires offrant des solutions d'automatisation des systèmes de gestion de la mobilité notamment la billettique, la monétique et les opérateurs offrants des solutions supports dans le domaine des nouvelles technologies. Les partenariats doivent également être choisis sur la base des exigences de durabilité tel que des politiques cibles ; cependant les connaissances qui s'y réfèrent n'étant pas données, il faudra les extraire sur la base des référentiels existants. L'évaluation et le choix des partenaires cibles se feront suivant les méthodes adoptées pour le choix des politiques cibles.

(C) Sous-processus définition des projets pilotes

La matérialisation des sous-processus du choix des politiques et partenariats ciblés se fera à travers la mise en œuvre du sous-processus de définition des projets pilotes concernant aussi bien le système décisionnel, les réseaux physiques et les systèmes d'information du système de mobilité urbaine envisagé sur une échelle de temps bien définie. L'analyse des alternatives de ces projets pilotes

permettent de définir clairement les objectifs, contextes et spécificités attendues du futur système de mobilité urbaine à déployer. Ces spécificités qui constituent les éléments de sortie du niveau stratégique seront ainsi considérés dans le niveau de décision suivant. Et, pour rester en conformité avec les nouvelles exigences du développement durable, la prise en compte des parties prenantes est également nécessaire. Pour cela, le recours aux outils d'ingénierie des exigences et d'ingénierie système est nécessaire pour une bonne caractérisation du futur système de mobilité urbaine à déployer : il s'agit du niveau tactique.

2.2.3. Les sous-processus du niveau tactique

Après la phase de la définition de la stratégie d'élaboration et de conduite des systèmes de mobilité urbaine durable, ayant conduit à la définition d'un ensemble de projets pilotes à implanter, il est nécessaire d'élaborer une roadmap pour la conduite des dits projets. L'objectif de la roadmap étant d'aider les décideurs à mieux organiser la conduite de la mise en œuvre des projets pilotes à travers la capitalisation des connaissances extraites. Cette roadmap permettra de prendre en compte et d'anticiper les besoins futurs du système de mobilité urbaine : les sous-processus associés à cette activité correspondent au niveau tactique du cadre méthodologique proposé.

Il permet la description d'une part de la conception du système de mobilité urbaine préalablement défini dans le niveau de décision stratégique et l'évaluation de sa durabilité (cf. Figure 10), et d'autre part à la description de la génération de la roadmap de déploiement et le déploiement virtuel du système (cf. Figure 11). La lecture de cette figure se fait de la gauche vers la droite.

Cinq sous-processus le composent : le sous-processus de génération du méta-modèle de la mobilité urbaine durable (D), le processus d'élaboration du modèle de mobilité urbaine durable (E), le sous-processus d'élaboration de la roadmap de co-déploiement (F), le sous-processus de déploiement virtuel (G), et le sous-processus de simulation et d'évaluation du modèle virtuel (H).

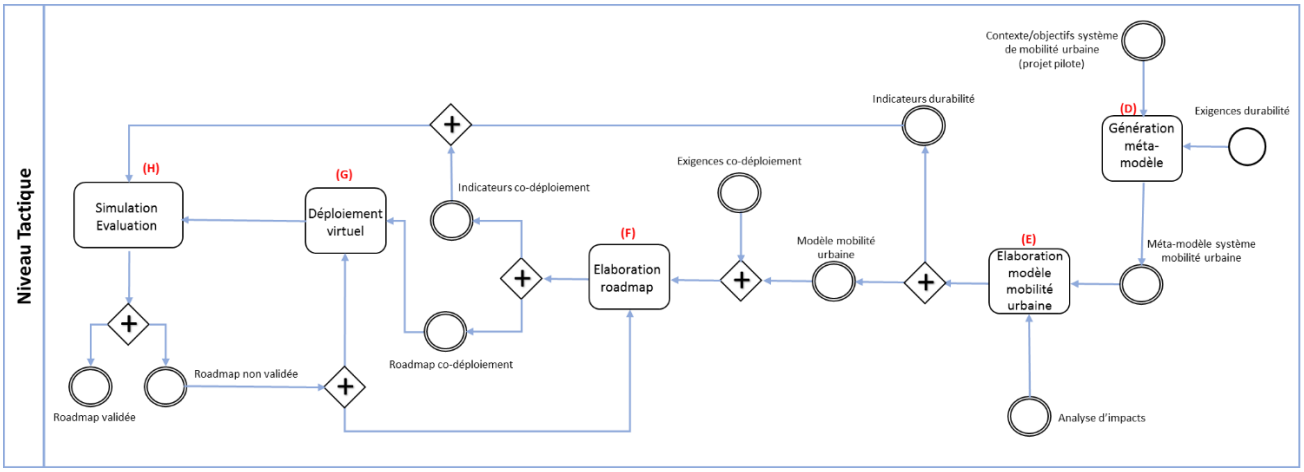


Figure 11 : Modélisation du système de mobilité urbaine et évaluation de sa durabilité

(D) Sous-processus de génération du méta-modèle de mobilité urbaine durable

La stratégie préalablement définie au niveau précédant, a permis aux pouvoirs publics et aux décideurs d'identifier les projets pilotes, les exigences et les contraintes à prendre en compte lors de la définition d'un système de mobilité urbaine durable. Ces exigences concernent celles des gestionnaires de la mobilité et celles des usagers qui doivent être formalisées sont formes de connaissances et de modèles compréhensibles afin de pouvoir servir d'outils d'aide à la décision. Les exigences relatives à la durabilité n'étant pas données doivent être extraites et éliciter à partir des données existantes (référentiels, corpus, documents stratégiques, etc.). C'est pourquoi la première étape de ce processus consiste à spécifier un méta-modèle correspondant au système de la mobilité urbaine prenant en compte les exigences préalablement définies et les spécificités du contexte des projets pilotes identifiés. En général, l'obtention d'un méta-modèle nécessite l'analyse du système afin de mettre en exergue les éléments du système et les interactions significatives sur les performances globales du système. Cette analyse peut se traduire par une description des entités et de leurs propriétés, des relations et des contraintes exprimées sous forme d'axiomes afin de promouvoir non seulement la gestion de la qualité du système au moment de la conception suivant les différents points de vue, mais aussi le traitement de données et la prise de décision.

Dans ce contexte, un méta-modèle de la mobilité urbaine durable a été proposé dans le chapitre suivant (cf. chapitre 3) en utilisant les outils d'ingénierie système. Ce méta-modèle de la mobilité urbaine durable proposé constitue une forme de patron générique décrivant de manière assez détaillée l'écosystème de la mobilité urbaine durable. Cet écosystème n'est pas seulement constitué d'un ensemble d'infrastructures physiques et organisationnels mis ensemble afin de produire des activités

de mobilité mais tient également des systèmes d'informations associés et décisionnels afin d'améliorer la qualité de service rendu.

(E) Sous-processus d'élaboration du modèle de mobilité urbaine durable

Cette étape consiste à instancier le méta-modèle préalablement obtenu, dans l'optique de spécifier le modèle de mobilité étudié. Le modèle résultant correspond à un cas particulier de système de mobilité urbaine durable avec des caractéristiques spécifiques. Par exemple le besoin d'implémenter un système de mobilité durable dans une ville A ne sera pas le même modèle que dans une ville B, sauf si les deux villes sont soumises à de mêmes exigences et présentent les mêmes configurations. L'instanciation du méta-modèle de la mobilité urbaine nécessite également la prise en compte d'un ensemble d'indicateurs de durabilité pour l'évaluation de la future roadmap. La définition de ces indicateurs permet aux décideurs (AOT et pouvoirs publics) de diagnostiquer la conformité (projets en cours de réalisation) aux exigences de la durabilité afin de prétendre le statut de mobilité urbaine durable. Ces indicateurs n'étant pas donnés, doivent être extraits et élicités à partir de référentiels. Une élicitation des connaissances qui s'y réfèrent a été proposée dans ce travail au chapitre suivant. L'objectif étant de se rassurer qu'il s'agit d'un système qui permet aux individus et aux sociétés de satisfaire leurs principaux besoins en terme d'accès aux lieux d'activités en toute sécurité et compatible avec la santé (limitation des émissions polluantes, etc.) des hommes et des écosystèmes, avec équité entre les différentes générations. L'élaboration du système de mobilité urbaine durable tient également compte du retour d'expériences des systèmes de mobilité urbaine ayant fait leurs preuves (à travers une analyse d'impacts).

Aussi, il faudrait que le système de mobilité proposé soit un système qui offre des coûts abordables et qui offre le choix entre différentes alternatives de transport (train, bus, métro, tram, vélo, etc.) pour l'ensemble des populations y compris les personnes à mobilité réduite (mal voyante, handicapée, âgée, etc.). A cet effet, une analyse des interactions complexes entre les principaux constituants du système de mobilité est nécessaire afin de définir une feuille de route de déploiement du futur système basée sur un système de recommandations visant à optimiser la réalisation de projets de mobilité nouveaux.

(F) Sous-processus de génération de la roadmap

Le modèle du système de mobilité urbaine obtenu dans le sous-processus précédant, va servir d'intrant pour ce sous-processus qui est l'étape de la génération de la roadmap de co-déploiement. Ce sous-processus a principalement pour but de définir une roadmap de co-déploiement du futur système. Elle consiste à réaliser une feuille de route stratégique qui permet de visualiser et à analyser le réseau

de dépendances et d'interactions entre les services rendus (processus) et composants nécessaires (décisionnel, physique et informationnel). Le sous-processus d'élaboration de la roadmap tient compte des exigences de co-déploiement qui permettent de mettre en exergue les interrelations possibles et des dépendances qui existent entre les infrastructures physiques et informationnelles du système de la mobilité urbaine.

La roadmap générée constitue un système de recommandations aux décideurs, elle spécifie pour chaque activité de mobilité à réaliser, quelles sont les briques de bases nécessaires pour sa réalisation. Elle permet également de donner le séquencement des activités à mener pour le déploiement du système de mobilité urbaine envisagé afin d'optimiser la collaboration qui pourrait exister entre les différents partenaires sélectionnés pour la réalisation et le déploiement du futur système. Des outils d'ingénierie système ont été usités à cet effet pour sa réalisation et une démarche méthodologique a été proposée dans le chapitre 4. La génération de cette feuille de route tient également compte des retours d'expériences afin de mieux intégrer les points positifs des systèmes de mobilité urbaine déployés et de les capitaliser d'une part, et d'autre part d'identifier les points négatifs et manquements pour proposer des axes d'amélioration afin d'éviter que les défaillances se reproduisent. Il résulte également de cette étape des indicateurs de co-déploiement nécessaires pour la validation de la roadmap. A l'issue de ce sous-processus de génération de la roadmap de co-déploiement, un déploiement virtuel est nécessaire en vue de simuler le système de mobilité urbaine préconisé.

(G) Sous-processus du déploiement virtuel

Le sous-processus du déploiement virtuel consiste à projeter la roadmap obtenue dans l'étape précédente (génération de la roadmap) sur un simulateur en vue d'obtenir un modèle virtuel du système envisagé. L'ensemble des indicateurs obtenus (de durabilité et de co-déploiement) et le modèle (virtuel) permettront de réaliser la dernière étape de ce niveau de décision qui est celle de la simulation et l'évaluation du modèle virtuel proposé qui correspond au système de mobilité urbaine durable envisagé.

Avant de déployer réellement la solution de mobilité urbaine durable obtenue à l'issue du sous-processus de génération de la roadmap, le déploiement virtuel est nécessaire. Un modèle du système de mobilité urbaine durable virtuel est obtenu à cette phase et ce modèle sera constitué des systèmes physique, informationnel et décisionnel. Il s'agira alors dans cette étape pour les décideurs de confronter le système de mobilité urbaine durable déployé (de manière virtuelle) au système prévisionnel (politique cible respectant les exigences de durabilité et des parties prenantes). Dans le cadre de ce travail de thèse, les sous-processus de déploiement virtuel et la simulation ne seront pas traités et constituent une perspective du travail.

(H) Sous-processus de simulation et d'évaluation

La simulation des modèles virtuels est un domaine innovent, scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou plusieurs utilisateurs en immersion totale par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs. Elle permet d'appréhender des situations, ou d'analyser les concepts illustrés de manière réelle par des modèles informatisés. Cette évaluation consiste à vérifier que le modèle virtuel obtenu à l'issue du sous-processus de déploiement virtuel, correspond bien aux objectifs, contexte et spécificités élaborés à l'issue de la définition stratégique.

A l'issue de la simulation, si la roadmap est en non-conformité c'est-à-dire ne répond pas aux exigences relatives à la durabilité ou aux spécifications du contexte et des objectifs du cas considéré, un retour aux sous-processus du déploiement virtuel ou de l'élaboration de la roadmap de la mobilité urbaine durable est nécessaire afin de mieux prendre en compte ces exigences. Par contre si le modèle virtuel est validé et prend en compte toutes les exigences, il servira de schéma directeur (fil conducteur) pour le déploiement du futur système de mobilité urbaine. Le processus de déploiement sera ainsi confié aux partenariats cibles définis dans au niveau de la définition stratégique.

2.2.4. Les sous-processus du niveau opérationnel

Enfin le dernier niveau qui est le niveau opérationnel (cf. Figure 12), correspond à la description des processus de déploiement du système réel de mobilité urbaine durable et des processus d'analyse de la résilience et d'impacts.

Il s'agit du niveau décisionnel qui intervient après la validation de la roadmap de co-déploiement des systèmes physique et d'information obtenue dans le niveau décisionnel tactique (cf. Figure 11). Le niveau opérationnel concerne principalement deux sous-processus : le sous-processus de déploiement des systèmes physique et informationnel (I) (géré par les partenariats cibles choisis préalablement dans le niveau stratégique, par exemple le choix des prestataires en charge de la réalisation des infrastructures et les prestataires en charge du déploiement des services numériques correspondants) et à terme le sous-processus d'analyse de la résilience et des impacts de ces dits systèmes (J).

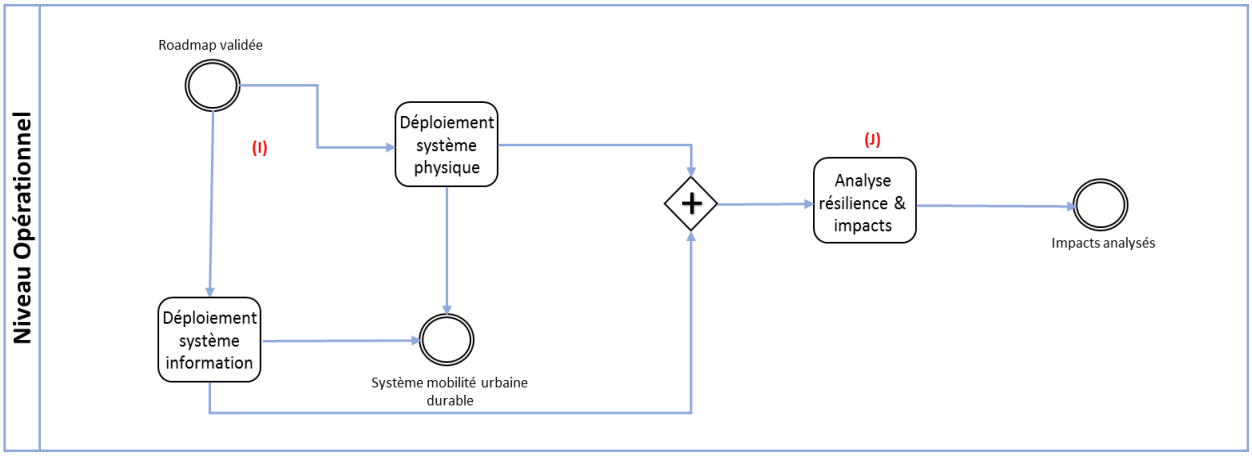


Figure 12 : Déploiement du système de mobilité urbaine durable

(I) Sous-processus de déploiement

Le sous-processus de déploiement est celui de l'implantation de la roadmap validée. Cette roadmap correspond à celle du modèle de mobilité urbaine durable, élaborée dans la phase amont (dans le niveau tactique). Le sous-processus de déploiement concerne l'implantation conjointe des systèmes physique (infrastructures routières, ponts, chaussées, parking, etc.) et d'information (systèmes de paiement électronique, informations voyageurs, etc.) de mobilité urbaine durable. En d'autres termes, il s'agit de la matérialisation des projets pilotes (biens et services) issus de la phase de définition stratégique en prenant en compte les exigences relatives à la durabilité, aux partie prenantes, au co-déploiement, au contexte et aux spécificités locales. Cette réalisation des politiques cibles est assurée par les partenariats cibles préalablement définis. La sensibilité aux perturbations externes liées à diverses formes d'attaques de ces systèmes sera à terme analysée ainsi que les impacts des systèmes sur le moyen ou long terme.

(J) Sous-processus d'analyse de la résilience et des impacts

Comme cela a été établi au chapitre d'introduction, plusieurs composantes forment l'écosystème de mobilité urbaine. Afin d'analyser les performances de ce système en prenant en compte des perturbations externes (catastrophe naturelle, attaque des plateformes numériques, etc.) ou un changement de paradigme, une analyse de son comportement semble nécessaire. Elle vise notamment à étudier la résilience du système face à ces perturbations. Une illustration de cette étude, par simulation, est détaillée au chapitre 5. Dans ce sous-processus, une analyse des impacts est également nécessaire. Celle-ci vise notamment à étudier la vulnérabilité des différentes parties prenantes (usagers, autorités organisatrices de la mobilité et pouvoirs publics) suite au déploiement de projets pilotes reflétant les nouvelles orientations du système de mobilité : il s'agit par exemple des impacts métier, économique, environnemental, etc. Les expériences issues de ces analyses (résilience et impact) seront capitalisées

dans la définition de projets nouveaux (niveau stratégique) ou prises en compte dans la révision du modèle de mobilité obtenu dans le sous-processus de conception du système (niveau tactique). Cette révision conduira à l'élaboration d'une nouvelle roadmap de co-déploiement.

L'analyse des impacts issue des usagers permettra par exemple l'amélioration de l'accessibilité, de l'utilisabilité, de l'acceptabilité, etc. des solutions de mobilité proposées. Au niveau des partenaires et prestataires, elle favorisera notamment l'amélioration de la collecte des données et informations sur l'utilisation des services de mobilité, ce qui garantira une meilleure gestion de ces services (par exemple, par une planification et une gestion des ressources optimisées). En ce qui concerne l'analyse des impacts issue des pouvoirs publics, elle vise à faciliter la coordination des décisions ainsi que l'amélioration des performances du système piloté. Ce qui conduira par exemple à une structuration des services, une révision des règles générales de collaboration, voire de nouveaux services ou de nouvelles offres tarifaires, en phase avec les avancées technologiques et l'évolution des comportements des usagers.

Une vue d'ensemble de tous les sous-processus du cadre méthodologique proposé, et de leurs articulations est résumée dans le modèle BPMN global présenté en annexe (Cf. Annexe1). Cette vue d'ensemble montre les interrelations et la collaboration entre différents sous-processus du cadre méthodologique proposé (les extrants d'un niveau qui correspondent bien aux intrants d'un autre). En vue d'aider les décideurs dans le choix des politiques cibles tel que le suggère le niveau tactique, une méthode d'aide au choix des politiques cibles a été proposée dans la section suivant.

2.3. Aide au choix des politiques cibles

Au vu du positionnement scientifique présenté dans le chapitre précédent, pour aider les décideurs dans le choix de politiques cibles à déployer, une approche étendue d'aide à la décision multicritère a été adoptée pour l'évaluation de la durabilité du système de mobilité urbaine. Le contexte de ces travaux impose de considérer les verrous suivants :

- Incertitudes liées à la subjectivité des évaluations ;
- Ambiguïtés relatives à l'incomplétude des informations pour effectuer l'évaluation ;
- Métrique d'agrégation des évaluations individuelles pour obtenir une estimation globale ;
- Consensus dans un cadre de décision collective pour mieux refléter les avis des différents experts.

Pour prendre en compte tous ces verrous, le choix s'est porté sur la méthode AHP par ce qu'adaptée au mode de raisonnement humain généralement basé sur les comparaisons par paires des objets à

évaluer. Pour prendre en compte la subjectivité, une extension de AHP sera mise en œuvre prenant en compte l'incomplétude. Dans la suite, le mécanisme de fonctionnement de la méthode AHP sera tout d'abord décrit :

2.3.1. Présentation de la méthode AHP

Un problème basé sur AHP est résolu par les étapes suivantes : structurer le problème (sous forme d'une hiérarchie des critères), obtenir des comparaisons par paires des critères, valider les résultats par un contrôle de cohérence des jugements et dériver le vecteur de priorités des critères. Dans le cas d'une décision collective, il faut par la suite agréger les évaluations individuelles (moyennes géométrique, pondérée, etc.).

Structuration du problème. Le modèle AHP est en général une hiérarchie de critères inter-reliés résultant de la décomposition d'un problème. On trouve l'objectif de l'étude au plus haut niveau de la hiérarchie, et dans les niveaux inférieurs, les éléments contribuant à l'objectif global. Les critères et les sous-critères utilisés pour choisir parmi les alternatives sont à des niveaux intermédiaires, tandis que le niveau le plus bas constitue les alternatives à évaluer.

Élicitation des comparaisons par paires. Dans cette étape, il s'agit de comparer l'importance relative de tous les éléments appartenant au même niveau hiérarchique pris deux par deux, par rapport à l'élément du niveau supérieur suivant. Il en résulte des matrices de comparaison sous la forme de l'équation (1) où chaque élément S_{ij} représente le ratio estimé en fonction d'une échelle de critères de poids respectifs i et j ; et estime le degré d'importance du critère i par rapport au critère j ; en se basant sur l'échelle proposée par Saaty (1980) : $\left\{\frac{1}{9},\frac{1}{8},\ldots,\frac{1}{2},1,2,\ldots,8,9\right\}$.

$$S=\begin{bmatrix} 1 & s_{12} & . & . & s_{1j} \\ 1/s_{21} & 1 & . & . & s_{2j} \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ 1/s_{j1} & 1/s_{j2} & . & . & 1 \end{bmatrix} \qquad (1)$$

Pour tout $i, j \in \{1,2,...,n\}$.

Vérification de cohérence. Pour assurer une certaine qualité du niveau de décision, un contrôle de cohérence *(CR)* de chaque préférence exprimée par les décideurs est défini par Saaty (cf. Equation 2). Par exemple, si nous choisissons A1 trois fois plus important que A2 lui-même deux fois plus important

que A3 et que dans un même temps A3 cinq fois plus important que A1 alors les indicateurs indice de cohérence et ratio de cohérence nous avertiront que les solutions risquent d'être quelque peu aléatoires. Si le ratio de cohérence est inférieur ou égal à 10 %, l'appréciation est jugée cohérente.

$$CR = \frac{CI}{RC} \leq 0.1 \qquad (2)$$

Avec $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1}$, λ_{max} qui est la valeur propre la plus élevée, et RC est le nombre réel estimant la moyenne CI obtenu à partir d'un ensemble suffisamment large de matrices générées de manière aléatoire de n; des valeurs aléatoires pour chaque n sont disponibles dans la littérature. En pratique, selon Saaty (1980), les matrices des jugements $CR \leq 0.1$ sont acceptées comme étant cohérentes.

Agrégation des jugements dans une décision collective. Les décisions collectives sont établies par le biais de comités ou toute autre équipe d'experts pour l'élicitation des comparaisons par paires. Dans de tels contextes, de nombreuses méthodes d'agrégation sont fournies dans la littérature. Dans le cadre de ce travail, la méthode de la moyenne géométrique a été utilisée pour agréger les jugements individuels, qui est calculée comme suit (3) :

$$s_{ij} = \left(\prod_{k=1}^{n} s^{(k)}{}_{ij} \right)^{1/n} \qquad (3)$$

Où n est le nombre de décideurs et $S_{ij}^{(k)}$ est la préférence d'un décideur k pour un critère i par rapport à un critère j. Après avoir obtenu le vecteur de priorité, il est ensuite multiplié par le coefficient de poids de l'élément à un niveau supérieur (qui a été utilisé comme critère pour les comparaisons par paires). La procédure est répétée vers le haut pour chaque niveau, jusqu'à ce que le sommet de la hiérarchie soit atteint. Le coefficient de pondération global, par rapport à l'objectif pour chaque option de décision, est alors obtenu. L'alternative avec la valeur du coefficient de poids le plus élevé devrait être considérée comme la meilleure alternative.

Pour prendre en compte l'incomplétude, une extension de AHP a été utilisée, il s'agit du DS/AHP. Cette méthode combine AHP avec un raisonnement évidentiel basé sur la théorie des fonctions de croyance (Dempster/ Shafer, 1976).

2.3.2. Présentation de la méthode Dempster–Shafer (DS)/AHP

Le DS/AHP est une méthode qui combine la méthode classique du processus de hiérarchie analytique (AHP) (Saaty T., 1980) avec celle de la théorie de Dempster Shafer (Dempster 1968, Shafer

1976). Il est structurellement similaire à AHP, basé sur un modèle de structure hiérarchique. Cependant, sa base mathématique repose sur la théorie des preuves de Dempster-Shafer (DST). L'utilisation de la DST dans DS/AHP permet à un décideur de faire des jugements subjectifs sur des groupes d'alternatives de décision, plutôt que sur des comparaisons d'alternatives individuelles ou par paire d'alternatives. DS/AHP est utilisé pour les problèmes de décision multicritère qui permettent la considération de l'abstention car un décideur peut ne pas être capable de répondre à un critère donné. Dans (Smets, 1991), l'auteur a noté que l'ignorance englobe l'incomplétude, l'imprécision et l'incertitude, qui se rapportent ici aux aspects objectifs et subjectifs du processus de prise de décision.

Les résultats d'une analyse DS/AHP sont des niveaux de préférence sur des groupes d'alternatives (à savoir, l'assignation de probabilité de base introduite dans DST) ainsi qu'un niveau d'ignorance concomitante, collectivement appelé un ensemble de preuves (BOE). Le DS/AHP permet également d'identifier les niveaux de croyance et de vraisemblance, en ce qui concerne la meilleure alternative existante dans des groupes d'alternatives de taille variable (Beynon, 2005). Une brève présentation du processus d'évaluation des politiques de mobilité urbaine est décrite ci-après.

Soit $\Theta = \{H_1, ..., H_n\}$ un ensemble fini d'hypothèses mutuellement exclusives appelé le cadre du discernement. Selon la théorie de Dempster-Shafer, une affectation de probabilité basique *(bpa)* est une fonction $m: 2^{\Theta} \to [0,1]$ (aussi appelée fonction de masse) satisfaisant :

$$m(\varnothing) = 0 \quad et \quad \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1, \quad (4)$$

Où $\varnothing$ est l'ensemble vide, et 2^{Θ} l'ensemble de puissance contenant tous les sous-ensembles possibles Θ. La probabilité assignée à Θ, $m(\Theta)$, est interprétée comme *le degré d'ignorance* et chaque sous-ensemble $A \subseteq \Theta$ tel que $m(A) > 0$ est appelé *l'élément* f*ocal.* Après le calcul, les valeurs *bpa* représentent les niveaux de croyance exacte dans les préférences aux éléments focaux identifiés par un décideur.

Pour la même information, basée sur le *bpa*, différentes mesures de croyance peuvent être définies, parmi lesquelles, la croyance *(Bel)* et les fonctions de plausibilité *(Pls)* qui sont les deux fonctions $2^{\Theta} \to [0,1]$ définies respectivement dans les formules (5) et (6) :

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B), \forall A \subseteq \Theta, \quad (5)$$

$$Pls(A) = \sum_{A \cap B \neq 0} m(B), \forall A \subseteq \Theta, \quad (6)$$

$Bel(A)$ mesure le soutien exact à A c'est-à-dire la croyance que l'hypothèse A soit vraie et représente la force de l'évidence A. $Pls(A)$ mesure le soutien possible à A c'est-à-dire la quantité totale de croyance qui pourrait potentiellement être placée dans A et représente la mesure dans laquelle nous échouons à ne pas croire A. Par conséquent, l'intervalle $[Bel(A), Pls(A)]$ représente l'intervalle de soutien à A et peut être vu comme les limites inférieure et supérieure de la probabilité à laquelle l'hypothèse est vraie, également interprétée par Beynon et al. (2000) comme l'imprécision sur la *"vraie probabilité"* de A.

Les preuves provenant de différentes sources peuvent être combinées, en supposant leur indépendance, sur la base de la règle de combinaison de Dempster donnée dans l'équation (7) :

$$[m_1 \oplus m_2](C) = \begin{cases} 0, & C = 0 \\ \frac{\sum_{A \cap B = \varnothing} m_1(A) m_2(B)}{1 - \sum_{A \cap B = \varnothing} m_1(A) m_2(B)}, & C \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

Où A et B étaient les éléments focaux avec leur *bpa* associé m_1 and m_2 (respectivement), tels que Bel_1 et Bel_2 sont indépendants. Il est évident que $m_1 \oplus m_2$, une fonction $2^{\Theta} \to [0,1]$, c'est aussi un *bpa*. Cette fonction est *commutative et associative*, ce qui permet de combiner plus de deux fonctions de masse.

DS/AHP : les principales étapes et leur mise en œuvre

Nous avons présenté le processus DS/AHP, basé sur l'hypothèse que AHP traditionnel a été faite, spécifiquement à chaque niveau de la structure hiérarchique du problème, sauf le dernier niveau. Le but est de fournir le vecteur des priorités par rapport à chaque niveau de la structure hiérarchique, sauf le niveau le plus bas.

Les valeurs de ces vecteurs sont appelées valeurs de priorité de critères *(CPV)* et sont utilisées dans le processus DS/AHP. Les principales étapes (pour chaque décideur) dans les processus concernés sont décrites ci-après :

Étape 1 : Fournir les sources de données probantes concernant les critères et l'alternative (alternatives de décision). À cette fin, chaque décideur reçoit une enquête sous la forme de l'exemple présenté en annexe (cf. Annexe 6).

Étape 2 : Calculer les valeurs *bpa* (Basic Probability Assignment) normalisées de chaque élément focal sous chaque critère. Dans (Beynon, 2002), basé sur une théorie de l'algèbre concernant les valeurs propres, l'auteur a montré que le *BOE* (Body Of Evidence) associé à chaque critère pouvait être calculé à l'aide des formules suivantes :

$$m(s_i) = \frac{a_i.p}{\sum_{k=1}^{d} a_k.p+\sqrt{d}}, \quad m(\Theta) = \frac{\sqrt{d}}{\sum_{k=1}^{d} a_k.p+\sqrt{d}} \qquad (8)$$

Où

- p est la valeur associée dans le CPV,
- s_i le i-ème ensemble (élément focal) dans le groupe associé de DA,
- a_i a valeur de la ième échelle assignée à s_i,
- d le nombre d'éléments focaux dans le groupe associé de décideurs,
- Θ le cadre de discernement (précédemment défini dans la sous-section concernant les principaux concepts de DS AHP).

Étape 3 : Combiner les valeurs *bpa* sous tous les critères. Pour un décideur donné, cette étape aboutit à l'évaluation de la croyance moyenne sur le choix de chaque politique, qui est calculée selon la formule d'agrégation de l'équation *(7),* et en supposant que les jugements sur les critères sont indépendants.

Étape 4 : Calculer la croyance et la plausibilité de chaque sous-ensemble du cadre de discernement selon les équations *(5)* et *(6)*. En conséquence, cette étape fournit deux indicateurs, permettant d'analyser le degré de confiance dans le jugement d'un décideur sur un élément focal, et la mesure dans laquelle il n'a pas méconnu son jugement.

Étape 5 : Construire l'intervalle d'incertitude, en fonction des résultats de l'étape précédente. Cet intervalle, qui est interprété dans (Beynon, 2002) comme l'imprécision sur la « vraie probabilité » d'un élément focal, aidera à analyser à quel point nous pouvons faire confiance aux jugements du décideur concerné : en d'autres termes, plus l'intervalle est réduit, plus on pourrait faire confiance à ses jugements.

Étape 6 : Agréger les jugements de tous les décideurs et déterminer le classement de chaque sous-ensemble du cadre de discernement. A ce stade, plusieurs stratégies de classement peuvent être adoptées. Par exemple, l'interprétation humaine des résultats suivie d'une décision subjective. En outre, l'automatisation pourrait également être effectuée à travers des règles floues telles que les méthodes de raisonnement probant proposées dans la littérature.

A l'issue de la phase de choix des politiques cibles à mettre en œuvre, à travers l'évaluation de la durabilité des différentes politiques, ayant conduite à l'identifiant des projets pilotes à déployer, la caractérisation des infrastructures et services à mettre en œuvre est nécessaire. A cet effet, la proposition d'un méta-modèle de mobilité urbaine durable sera proposée dans le prochain chapitre (chapitre 3).

Synthèse du chapitre

Dans ce chapitre, un cadre méthodologique pour la conception et le déploiement d'un système de mobilité urbaine durable a été proposé. Sa particularité est de prendre en compte le cycle de vie complet du système. Un intérêt est de faciliter sa conduite sur le long terme car la méthodologie proposée prend en compte les évolutions de chacune des composantes du système ainsi que leurs interrelations. La démarche proposée ne s'applique pas à un contexte spécifique ; elle est en effet généralisable et se décline en trois niveaux de décision : (1) au niveau stratégique, il comprend les processus de définition et de choix des politiques cibles, des partenaires cibles et d'élaboration des projets pilotes ; (2) au niveau tactique, il comprend les processus de conception du système de mobilité urbaine et d'évaluation de sa durabilité ; (3) au niveau opérationnel, il comprend essentiellement le processus de déploiement du système. Le prochain chapitre sera consacré aux méthodes et outils pour la mise en œuvre des activités des niveaux stratégique et tactique du cadre méthodologique proposé.

Chapitre 3 - Conception d'un système de mobilité urbaine durable par une démarche d'ingénierie système

Chapitre 3 - Conception d'un système de mobilité urbaine durable par une démarche d'ingénierie système *56*

3.1. Elicitation des connaissances de durabilité **57**

3.1.1. Techniques d'élicitation des connaissances 57

3.1.2. Méthode de conceptualisation des indicateurs de durabilité 59

3.2. Conception d'un système complexe **61**

3.2.1. Une démarche de conception 61

3.2.2. Formalisme de représentation 63

3.3. Le méta-modèle de mobilité proposé **66**

3.3.1. Mise en œuvre de la conceptualisation des critères de durabilité 66

3.3.2. Conception du système par une démarche d'ingénierie système 68

3.3.3. Méta-modèle de la mobilité urbaine durable proposé 83

Synthèse du chapitre **85**

Les développements effectués dans les chapitres précédents ont permis de mettre en exergue la multiplicité des acteurs, des ressources et des services composant un système de mobilité urbaine, ainsi que la complexité de leurs interrelations. La conception d'un tel système doit par conséquent tenir compte de cette complexité. Une démarche d'ingénierie système a pour cela été adoptée. D'après cette démarche, une manière de gérer la complexité consiste à définir les exigences des parties prenantes et du système lui-même. Une autre alternative est basée sur l'analyse croisée du système en considérant deux dimensions : (1) ses différents niveaux d'analyse et (2) les points de vue selon lesquels il peut être perçu. Ce chapitre vise à montrer l'intérêt d'une telle démarche dans le cadre de la conception d'un système de mobilité urbaine durable. A la section suivante, une méthode d'élicitation des connaissances relatives à la caractérisation de la durabilité du système étudié et reflétant la prise en compte des exigences des parties prenantes sera tout d'abord présentée. A la deuxième section, une méthodologie de conception des systèmes complexes sera proposée. Sa mise en œuvre se fera à la troisième section à travers la proposition d'un méta-modèle de mobilité urbaine durable. Enfin une synthèse clôturera le chapitre.

3.1. Elicitation des connaissances de durabilité

Les connaissances pour évaluer la durabilité d'un système de mobilité urbaine ne sont pas données. Elles sont en général formulées par des experts ou obtenues par des référentiels, des standards sous une forme non exploitable pour la caractérisation de la durabilité ; d'où la nécessité de les éliciter. Les principales techniques d'élicitation des connaissances sont rappelées dans la suite.

3.1.1. Techniques d'élicitation des connaissances

L'élicitation de connaissances est le processus qui consiste à recueillir, auprès d'une source humaine des connaissances, de l'information que l'on croit pertinentes (Cooke, 1994). Elle est une étape faisant partie du processus plus large d'acquisition des connaissances, qui comprend également l'explication et la formalisation de ces connaissances. Le résultat de l'élicitation des connaissances est transformé en un modèle exploitable informatiquement. Dans un processus d'acquisition, les connaissances peuvent aussi être obtenues à partir de documents écrits (par ex. procédures écrites, notes de service, manuels, etc.), plutôt qu'à partir de sources humaines (Cordingley, 1989).

Les principales techniques d'élicitation sont décrites dans la suite.

(a) Observation et entretiens (méthodes informelles)

Les *techniques d'observation* utilisent : (1) la participation active, (2) l'observation ciblée et (3) l'observation structurée. Les *techniques d'entretiens* utilisent : (1) les entretiens non structurés, (2) les entretiens structurés (discussion ciblée, jeux de rôle, questionnaires, techniques d'entretien de groupe, retour d'expérience, etc.) et (3) les outils automatisés d'entretien. Les *techniques d'analyse de tâches* utilisent : (1) l'analyse fonctionnelle des flux, (2), l'analyse opérationnelle des séquences, (3) l'analyse des flux d'information, (4) l'analyse d'interactions, (5) l'analyse de l'emploi, (6) l'analyse chronologique et (7) l'analyse cognitive de tâche.

Selon Cooke (1994), ces méthodes informelles semblent bien adaptées aux phases initiales d'élicitation de connaissances dans lesquelles le domaine doit être bien défini et circonscrit. Elles peuvent également être utiles pour obtenir un rapport d'expert. Cependant, leurs résultats sont souvent lourds et difficiles à interpréter. Mis à part l'analyse des tâches, il y a en effet peu de directives concernant l'analyse des données générées par les entretiens et les observations.

(b) Traçabilité des processus (méthodes formelles)

Les *techniques à base de rapports verbaux*, utilisent : (1) les rapports en ligne (par exemple, parler ou penser à haute voix) et (2) les rapports hors ligne (par exemple, rappel rétrospectif ou assisté, analyse d'interruption). Une autre forme de technique est basée sur les rapports non verbaux. Les *techniques d'analyse de protocoles* utilisent l'analyse du contenu, le discours / la conversation / l'analyse des interactions, des outils automatisés. Les *techniques d'analyse des décisions* utilisent l'obtention des estimations de probabilité et d'utilité, la modélisation statistique.

Selon Cooke (1994), ces techniques sont plus formelles dans la mesure où elles spécifient à la fois les phases d'élicitation et d'analyse. De plus, elles vont plus loin dans l'analyse en explorant la structure et les processus cognitifs qui sous-tendent l'exécution des tâches. Elles font le plus souvent appel à des données verbales et sont donc soumises aux limites des rapports verbaux. En outre, comme dans le cas des méthodes informelles, elles donnent lieu à des ensembles de données volumineux et souvent ingérables, qui sont difficiles à interpréter de façon significative.

(c) Méthodes conceptuelles

Les *techniques à base de concepts* utilisent : (1) les entretiens structurés en vue de l'élicitation de concepts (comme par exemple, listes de concepts, d'étapes, de chapitres, les transcriptions d'entretiens) et (2) l'élicitation de concepts couplée à une grille d'analyse (par exemple, échelonnement,

comparaison par similarité, élicitation par similarité). Les *techniques par collecte de données* utilisent : (1) la notation et le classement (par exemple, la comparaison par paire, l'estimation de grandeur, l'association contrôlée), (2) une grille d'analyse, le tri (par exemple, tri hiérarchique, carte multidimensionnelle de tri, tri répété), (3) la co-occurrence d'événement / les probabilités de transition et (4) les corrélations / la covariance entre données. Les *techniques d'analyses structurelles* utilisent : (1) des échelles multidimensionnelles, (2) des techniques discrètes (par exemple routines de regroupement, dimensionnement de réseau), (3) l'élicitation directe de structure (par exemple, dessiner des courbes fermées, des associations libres, la construction de graphe, les questions-réponses) et (4) l'interprétation de structures (par entretiens guidés, identification d'aspects de la représentation, comparaison de représentations). Une autre catégorie de *techniques est basée sur l'automatisation des méthodes conceptuelles*.

Selon Cooke (1994), les possibilités pour créer des méthodes d'élicitation en intégrant différentes techniques à base de concepts, de collecte de données, d'analyse structurelle et d'interprétation semblent infinies. Les techniques structurelles permettent cependant de se concentrer sur la structure conceptuelle du domaine et bénéficient d'une moins grande dépendance à l'égard des rapports verbaux que les autres techniques, ainsi que d'une capacité à traiter des données provenant d'experts multiples. De plus, elles sont axées sur la réduction des données, avec l'espoir de révéler les caractéristiques les plus significatives du domaine. Il a par ailleurs été établi qu'elles fournissent une approche plus objective pour l'interprétation de grandes quantités de données (Cooke, 1994). Il y a cependant des limites, notamment la tendance de ces techniques à se concentrer sur la connaissance conceptuelle (nécessitant une forte expertise du domaine) au détriment d'heuristiques, de règles ou de stratégies.

Une méthode basée sur des techniques conceptuelles d'élicitation (décrites plus haut) a été adoptée. Dans cette étude, des connaissances de durabilité déjà élicitées et contenues dans des référentiels et standards de la littérature ont été considérées. Pour faciliter leur utilisation dans un modèle exploitable informatiquement, une phase de conceptualisation des indicateurs de durabilité a été nécessaire.

3.1.2. Méthode de conceptualisation des indicateurs de durabilité

Dans un sens large, les indicateurs de durabilité sont utiles pour surveiller et mesurer l'état de l'environnement d'un système en considérant un nombre de variables ou de caractéristiques. Les connaissances de durabilité considérées dans ces travaux, sont extraites de l'analyse d'une importante revue bibliographique. Cette revue bibliographique concerne principalement des articles scientifiques, des documents de stratégie et des rapports d'expertises afin d'avoir une vue globale des indicateurs couramment utilisés. La méthodologie utilisée pour les extraire est basée sur la méthode ORM (Object-

Role Modeling) proposée par Halpin et Bloesch (1999), qui consiste à traduire directement une expression de faits en langage naturel. Cette méthode peut également exprimer les relations comme des contraintes.

Le modèle ORM peut être réalisé conformément à la procédure de conception de schémas conceptuels suggérée par Halpin et Bloesch (1999). Elle consiste à : (i) exprimer les connaissances initiales à travers des faits élémentaires, (ii) établir un modèle préliminaire incluant les contraintes ORM et (iii) intégrer les contraintes ORM dans le modèle préliminaire. Dans le cadre de ce travail, le formalisme ORM a été utilisé en vue de verbaliser les concepts pour faciliter la transcription des sources textuelles considérées. Elle s'est faite en 2 principales étapes :

1ère étape : Verbalisation

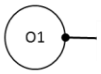
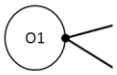
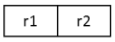
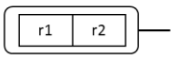
Il s'agit, d'identifier les fragments de phrases simples permettant de décrire le domaine considéré et de les exprimer sous la forme normalisée <sujet> <verbe> <complément> telle que le recommande le formalisme. Par exemple, les expressions suivantes peuvent être considérées : <ligne> <possède> <arrêt>, <usager> <emprunte> <bus>, etc.

2ème étape : Élaboration d'un modèle préliminaire

Il s'agit de relier les objets identifiés (matérialisés par des ellipses) aux rôles qu'ils jouent (figurés par des rectangles) en utilisant les notations graphiques telles que celles du tableau suivant (cf. Tableau 4). Pour l'exemple précédent, les objets suivants peuvent être identifiés <ligne>, <arrêt>, <usager>, et <bus>. Ces objets seront représentés par des ellipses et les rôles <possède> et <emprunte> par des rectangles tel que présenté dans le tableau suivant (cf. Tableau 4).

Les notations graphiques utilisées dans un modèle ORM ne constituent pas une originalité en soi (malgré leur simplicité). Cependant, l'aptitude du langage ORM à décrire un univers du discours avec un formalisme proche du langage naturel nous semble être un atout intéressant pour la présente étude.

Tableau 4 : Principales notations ORM et leurs significations

Principales notations	Significations
	Type d'objet non lexical ou NOLOT (Non Lexical Object Type) ; C'est l'équivalent des « classes » UML
	Type d'objet lexical ou LOT (Lexical Object Type) ; C'est l'équivalent des « attributs » UML
	Le point sur le segment dénote une contrainte d'obligation de rôle; O1 doit obligatoirement « jouer » ce rôle c'est-à-dire est nécessairement en relation avec l'autre objet associé audit rôle
	Les deux segments reliés par un point dénotent une contrainte disjonctive; O1 ne peut être en relation avec les deux objets associés à ces rôles (un seul rôle est joué)
	La double flèche (positionnée sur un ou plusieurs rôles) matérialise une contrainte d'unicité; une seule instance des objets concernés est possible
	Exemple de relation binaire, matérialisée par les deux rectangles adjacents (représentant les deux rôles r1 et r2
	Exemple « d'objectification »: les deux rôles r1 et r2 se transforment en un objet matérialisé par un rectangle arrondi; c'est l'équivalent des classes d'association d'UML

3.2. Conception d'un système complexe

Considéré comme un écosystème coopératif, interconnecté et fournissant des services reflétant les besoins des parties prenantes (usagers, autorités organisatrices de la mobilité, pouvoirs publics), un système de mobilité urbaine est de facto complexe. Une démarche d'ingénierie système a pour cela été adoptée pour faciliter sa conception et permettre une meilleure maîtrise de la complexité.

3.2.1. Une démarche de conception

Les principales étapes de cette démarche sont décrites ci-après (AFIS, 2009) :

Etape 1 : Analyse des besoins des parties prenantes

Cette étape consiste à transformer les besoins des parties prenantes en un ensemble d'exigences techniques cohérentes, claires, conformes aux besoins identifiés, mesurables et validées par ces dernières. Cela permet de définir un système qui satisfait toutes les exigences en présence (Luzeaux & Ruault, 2013). L'ensemble des parties prenantes doit pour cela être clairement spécifié.

Ce qui permet d'identifier leurs interrelations et de maîtriser les contraintes auxquelles le système sera soumis.

Étape 2 : Analyse et spécification du système

Il s'agit dans la deuxième étape, de spécifier les besoins du système. Dans ce cadre, trois visions architecturales du système sont considérées et pour chaque vision, plusieurs points de vue sont à prendre en compte (Hygounenc, 2015) (cf. Figure 13). Ce qui permettra ainsi de mieux cerner la complexité du système aussi bien dans le fonctionnement que dans sa structure organique. Les différentes visions concernent :

La vision opérationnelle. Il s'agit de décrire comment le système fonctionne dans son environnement, en prenant en compte son interaction tant avec les autres systèmes de cet environnement qu'avec ses utilisateurs. Il s'agit en effet d'un système vu comme une boite noire rendant les services attendus à son environnement, sans pour autant regarder les relations entre les fonctions et entre les composants. La vue opérationnelle permet de répondre à la question *« Quoi ? »*. La recherche des services du système peut s'effectuer à travers différents types de diagrammes tels que les diagrammes de cas d'utilisation, des diagrammes de séquences ou de contexte (Hygounenc, 2015).

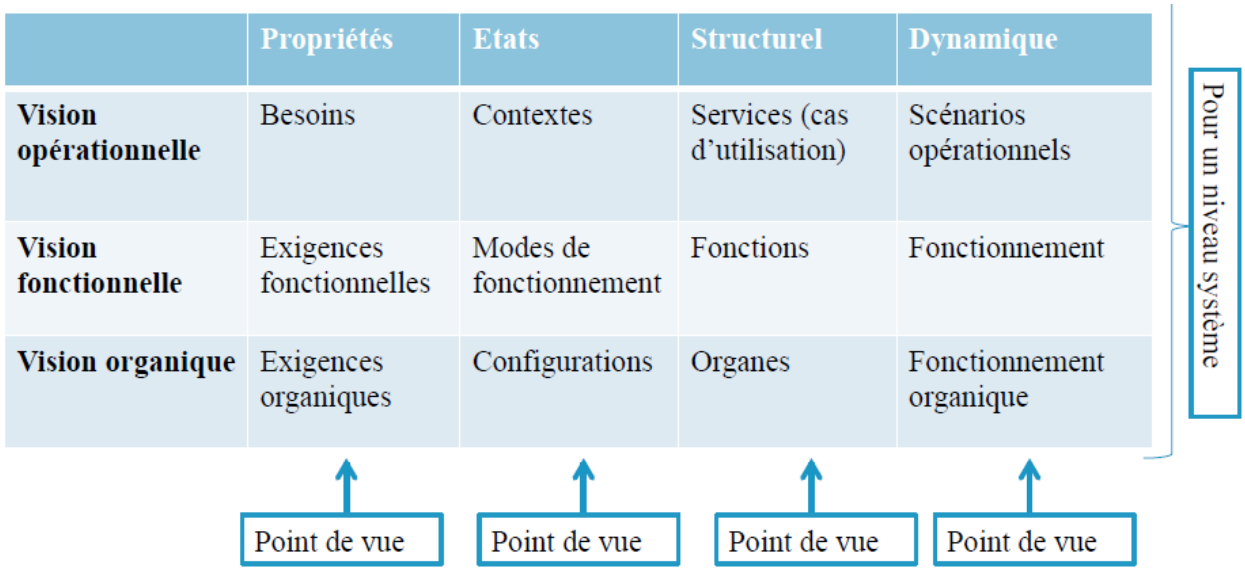


Figure 13 : Cadre architectural d'un système, (Hygounenc, 2015)

La vision fonctionnelle. Pour satisfaire les exigences définies par les utilisateurs et le système, une décomposition du système est nécessaire en vue d'identifier les principales fonctions en interactions conduisant à la solution envisagée et ensuite, une identification des composants associés. Il s'agit de décrire la solution pensée sous forme de fonctions du système et les liens qu'elles entretiennent entre

elles. Ces fonctions seront ensuite décomposées en sous fonctions en vue d'effectuer des choix de composants organisationnels y relatifs adéquats. La vue fonctionnelle permet de répondre à la question *« Comment ? »*.

La vision organique du système. La vision organique du système permet de décrire les composants qui réalisent les différentes fonctions du système. Elle permet également de représenter l'arborescence des constituants (organes) et leurs liens d'interfaces en vue de réaliser les fonctions du système. Elle répond à la question *« Qui fait ?»*.

Il existe principalement deux démarches d'analyse : une démarche ascendante et une démarche descendante.

La démarche ascendante stipule de figer les solutions et les fonctions principales préalablement aux choix organisationnels. Elle est indispensable pour les systèmes novateurs car elle permet à tout moment la prise en compte de nouveaux composants pour l'atteinte des objectifs souhaités ;

La démarche descendante stipule une définition des constituants des systèmes en vue de réaliser des fonctions du système. La difficulté étant celle de la prise en compte des évolutions fonctionnelles.

La mise en œuvre des méthodes préconisées plus haut est abordée à la section suivante où un méta-modèle de la mobilité urbaine durable sera proposé.

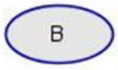
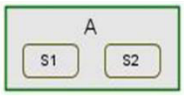
3.2.2. Formalisme de représentation

Selon Le Moigne (1990), un modèle est : *« une production de l'esprit visant à représenter symboliquement un phénomène »*. Par le guide de l'ingénierie système de l'INCOSE (2010), il existe plusieurs approches de représentation informatique des modèles : les approches orientées fonction (appelées FBSEM, Function-Based Systems Engineering Method) et les approches orientées objet (appelées OOSEM, Object-Oriented Systems Engineering Method). Dans ces travaux, une approche orientée objet qui intègre les aspects structuraux, fonctionnels et comportementaux en une seule vue unifiée sera adoptée : il s'agit du formalisme OPM.

Le formalisme OPM (Object-Process Methodology) est une méthodologie qui permet de concevoir un système permettant de définir à la fois sa structure et son comportement. Une autre caractéristique intéressante de ce formalisme est l'expression bi-modale des modèles proposés via des graphismes formels intuitifs et un langage naturel équivalent, ce qui peut être d'un grand intérêt pour permettre à un non-spécialiste de la modélisation de comprendre ou même de valider un modèle fourni. Ses produits livrables comprennent un ensemble de diagrammes objet-processus (OPD) et une collection

correspondante de phrases écrites dans Object-Process Language (OPL). OPM est constitué de trois types d'entités principales : les objets, les processus et états ; les objets et les processus étant des blocs de construction de niveau supérieur. Les objets existent et les processus transforment les objets en les générant, en les identifiant ou en les affectant. Les états sont utilisés pour décrire des objets et ne sont pas des éléments autonomes. Une description sommaire est donnée dans le tableau ci-dessous (cf. Tableau 5).

Tableau 5 : Les entités de OPM

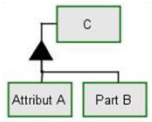
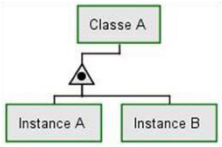
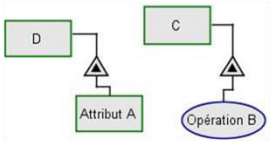
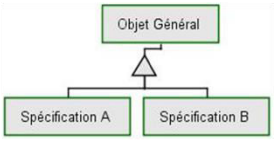
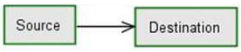
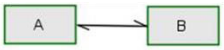
Notation		Nom: Définition
Objets		Objet A : Un objet ou une chose qui existe
		Processus B : Une chose qui transforme (génère, consomme ou change l'état) d'un objet
		Etat B : Une situation d'un objet

La modélisation de OPM repose sur la mise en relation d'un ensemble d'objets encore appelés relations structurelles du système. Ces relations structurelles expriment des relations statiques, indépendantes du temps entre des paires d'entités, le plus souvent entre deux objets. En général les liens de OPM assurent trois principales fonctions : les liens de transformation, les liens d'activation et les liens de contrôle (Dori, 1995 ; Dori, 2016). Une description sommaire des liens structurels est donnée dans le tableau ci-dessous (cf. Tableau 6).

Dans OPM, les relations encore appelées liens de procédure entre les entités (objets, processus et états) permettent de traduire le comportement dynamique et temporel du système. Le comportement et l'aspect dynamique d'un système peuvent se manifester dans OPM de trois façons :

- Un processus peut transformer (générer, consommer ou modifier l'état) des objets ;
- Un objet peut déclencher un processus sans être transformé ;
- Un objet ou un processus peut déclencher un événement qui pourrait, à son tour, invoquer un processus si certaines conditions sont remplies.

Tableau 6 : Les relations structurelles de OPM

Notation	Nom de la relation structurelle
	Agrégation - participation
	Classification - Instanciation
	Caractérisation
	Généralisation - Spécialisation
	Relation unidirectionnelle
	Relation bidirectionnelle

Pour modéliser un système, très souvent il est important d'être spécifique et montrer non seulement comment un objet est généré par un processus, mais aussi à quel état cet objet est généré. Aussi, il est important d'indiquer non seulement comment un objet est consommé par un processus, mais aussi à quel état cet objet doit être pour qu'il soit consommé par le processus. Afin de pouvoir parler de la transformation de l'objet, nous devons définir l'état et démontrer comment les états sont utilisés. La modélisation avec OPM permet également de montrer comment un modèle peut être simulé par une animation pour faire valoir son aspect dynamique, en particulier en exécutant les séquencements des transitions d'état de chaque objet. Les notions approfondies sur la modélisation OPM sont disponibles (Dori, 2011 ; Dori, 2015).

3.3. Le méta-modèle de mobilité proposé

A l'aide des concepts et formalismes présentés, le méta-modèle de mobilité urbaine durable proposé dans cette section, correspond à une intégration des exigences de durabilité élicitées, des parties prenantes et du système de mobilité. Il s'obtient suivant la démarche suivante (cf. Figure 14).

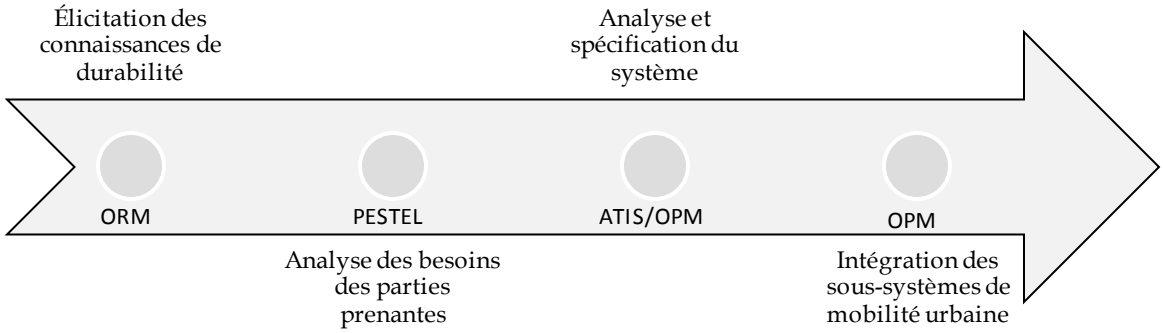


Figure 14 ; Démarche modélisation méta-modèle de mobilité

3.3.1. Mise en œuvre de la conceptualisation des critères de durabilité

Dans la littérature, l'évaluation des indicateurs de durabilité des systèmes de mobilité urbaine peut être classée selon les principales catégories suivantes : les facteurs environnementaux, économiques, la qualité de vie et le système de mobilité, comme résumé dans le tableau suivant (cf. Tableau 7).

Les référentiels utilisés pour l'extraction des indicateurs de durabilité, synthétisés dans le Tableau 7 sont répertoriés dans l'ordre chronologique, de 2001 à nos jours, et concernent principalement les documents de stratégie (deuxième et cinquième colonne), les rapports d'expertises (dixième et dernière colonne) et les articles scientifiques (le reste).

A la lecture du tableau proposé (cf. Tableau 7), il en ressort qu'il n'existe pas de méthodologie commune d'évaluation de la durabilité et, que peu d'études traitent des problèmes qui présentent un grand intérêt pour la formalisation des connaissances liées à la durabilité. Cela renforce le besoin d'une vision holistique en vue de permettre aux décideurs de la mobilité d'avoir une sémantique partagée.

Tableau 7 : Synthèse analytique des indicateurs de durabilité d'un système de mobilité urbaine

	Gudmundsson	ACTIF	Richardson	Goldman & Gohram	AMF	Tiwaria & Jain	Smith et al.	Buzási	Shiau et al.	WBCSD	Litman	Arthur L.
	2001	2003	2005	2006	2008	2012	2013	2015	2015	2016	2017	2018
Pollution de l'air			•		•	•	•	•	•	•	•	•
Congestion		•	•							•		•
Émissions de gaz	•							•	•	•		•
Carburant/Consommation d'énergie	•		•			•	•	•	•			
Nuisance Sonore	•									•	•	
Recyclabilité	•						•		•			
Résilience										•		
Pollution de l'eau											•	
Attractivité					•							
Opportunités économiques	•	•			•		•	•		•	•	
Occupation du sol										•	•	
Finances publics	•						•	•	•	•	•	•
Diversités urbaines										•		•
Accès aux services de mobilité	•		•		•	•	•			•		
Accès à mobilité réduites	•									•	•	
Abordabilité	•	•								•		
Retour d'expérience					•				•			
Confort										•		
Accidents							•	•		•	•	•
Diversité fonctionnelle										•		
Santé	•						•					
Système d'information		•		•								•
Qualité de l'espace public		•							•	•	•	•
Temps de déplacement	•			•		•		•		•		•
Sécurité routière	•		•	•		•		•		•	•	•
Efficience énergétique	•								•	•		
Connectivité intermodale	•					•	•			•	•	•
Intégration multimodale						•				•	•	•
Taux d'occupation								•	•	•		
Efficacité opérationnelle		•										•
Accès aux services										•	•	
Sureté	•	•						•		•		
.....												
Méthodologies	Sondage	Standard	Sondage	Sondage	Standard	Sondage	Méthode analyse processus	Sondage	Théorie des ensembles	Standard	Sondage	Sondage

En vue de faciliter l'exploitation des critères élicités, une ontologie a été ainsi proposée. La formalisation de cette dernière s'est faite avec le langage standard OWL pour sa capacité à représenter la connaissance informatiquement, et à faciliter l'échange entre les ontologies. Étant donné que les processus de raisonnement ne sont pas considérés dans le cadre de ce travail, le code source n'est pas

présenté ici, mais la hiérarchie de l'ontologie proposée est fournie (cf. Annexe 2) et réalisée avec le logiciel Protégé. Afin de rester en conformité avec la définition d'un système de mobilité urbaine durable, l'ontologie de durabilité proposée classe les indicateurs suivant les critères environnementaux, économiques et sociaux. Les indicateurs donnés suivant un critère peu selon le point de vue du décideur appartenir à un autre critère (exemple, pour la consommation d'énergie, l'instance pourrait être analysée par son impact économique, environnemental ou social). Ici, les indicateurs de durabilité ont été classés selon le point de vue de l'autorité organisatrice de la mobilité qui constitue la partie prenante principale de ce travail, dont une analyse du cadre de durabilité est étudiée et suggérée. Un glossaire des différents indicateurs utilisés est également proposé (cf. Annexe 3).

3.3.2. Conception du système par une démarche d'ingénierie système

La mise en œuvre de la démarche se fera par étape successive telle que précédemment proposée :

Étape 1 : Analyse des besoins des parties prenantes

Dans le cadre de ce travail, la méthode d'analyse PESTEL (Yüksel, 2012) a été utilisée. Elle permet en effet de prendre en compte dans le processus de conception les dimensions Politique, Économique, Social, Technologique, Écologique et Législative qui peuvent influencer le système. Au vu de l'état de l'art dans le chapitre 1 et du positionnement de ces travaux, les principales parties prenantes correspondant à chacune des dimensions sont :

Politique

- *Les pouvoirs publics*, ils élaborent et impulsent les politiques de mobilité urbaine au niveau communal, régional ou d'un pays. Ils sont situés au premier plan de l'élaboration de nouvelles offres de mobilité. Ils décident des budgets, et des choix de politiques à mettre en œuvre. Ils élaborent également des orientations géostratégiques ou macroéconomiques du système.

Économique

- *Les fournisseurs de services*, ils représentent les entreprises partenaires et prestataires de services qui interviennent pour le déploiement des offres de mobilité. Ils proviennent des domaines divers (travaux publics, télécommunication, électricité, infrastructures de transport, etc.).

- *Les autorités organisatrices de la mobilité* généralement constituées des opérateurs privés et publics, ils permettent de mettre en œuvre les politiques gouvernementales et proposent des offres de mobilité.

Sociale

- *Les régulateurs du transport,* veillent au respect des règles de sécurité et d'hygiène des usagers et de la conformité des politiques déployées vis-à-vis de la loi et des normes pour une meilleure satisfaction des usagers de la mobilité urbaine (accessibilité, confort, abordable, etc.).
- *Les voyageurs (individuel ou entreprise)*, ils sont les principaux bénéficiaires et acteurs de l'organisation de la mobilité urbaine. Ils utilisent les réseaux de transport pour des raisons diverses liées à leurs activés quotidiennes (loisir, santé, travail, éducation, etc.).

Technologique

- *Les industries des systèmes de mobilité* qui proposent des services et infrastructures liés à la mobilité urbaine
- *Les industries de fabrication de véhicules* qui produisent des véhicules répondant aux exigences des utilisateurs et répondant aux normes ;
- *Les opérateurs de maintenance*, ils sont responsables de la réhabilitation et de l'aménagement des voies, lignes et du réseau de transport en général. Ils travaillent sous la coordination des autorités organisatrices du transport ;
- *Les fournisseurs d'énergie* qui produisent l'énergie nécessaire pour la traction des engins et l'alimentation énergétique des infrastructures de transport.

Écologique

- *Les régulateurs de mobilité urbaine*, ils ont pour rôle de réguler l'activité du transport à travers des recommandations concernant les infrastructures et la gestion urbaine en vue de préserver l'environnement pour les générations futures. Ils peuvent être représentés par les organisations non gouvernementales ou gouvernementales.

Législative

- *Les municipalités (pouvoirs publics)* qui conçoivent les Plans de Déplacement Urbain et élaborent les politiques de développement de la mobilité en milieu urbain. Ils sont aussi

garants de l'applicabilité des règlements à prendre en compte dans l'élaboration de nouvelles offres de mobilité.

Avec l'évolution sans cesse des systèmes de mobilité urbaine, de nouvelles organisations et parties prenantes spécifiques qui s'occupent de la gestion des nouveaux modes de mobilité douces tels que le partage de vélos, l'utilisation des voies fluviales urbaines, etc. peuvent être envisagées.

Étape 2 : Analyse et spécification du système

La vision opérationnelle du système

Dans ces travaux, un diagramme de contexte a été proposé (cf. Figure 15), ce afin d'identifier les flux échangés pour la réalisation de la fonction principale du système de mobilité urbaine. Ces flux identifiés correspondent ainsi aux services rendus par les parties prenantes identifiées précédemment à travers la méthode PESTEL.

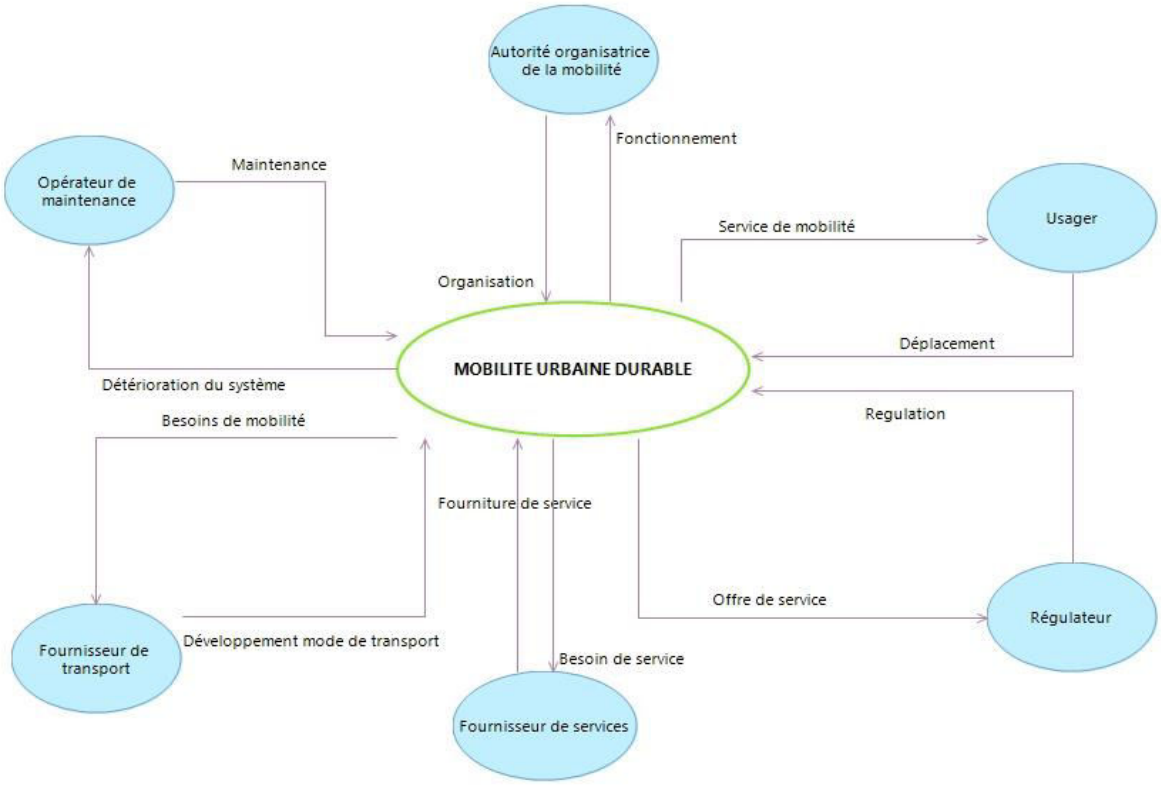


Figure 15 : Diagramme de contexte d'un système de mobilité urbaine durable

Suivant le diagramme de contexte présenté (cf. Figure 15), les relations entre les différentes parties prenantes et l'environnement du système ont été identifiées et matérialisées par les liens. Ces liens identifiés concernent principalement les services suivants : l'organisation du système de mobilité, sa

maintenance, sa gestion, la provision des services de mobilité, le déplacement des citadins et la régulation des systèmes de mobilité.

La vision fonctionnelle du système

Pour le système de mobilité urbaine durable, les principales fonctions du système ont été identifiées à travers la conception d'un diagramme de flux (cf. Figure 16) en vue de satisfaire les besoins des différentes parties prenantes préalablement identifiées. Elles concernent principalement :

- *L'organisation de la mobilité* : elle concerne principalement l'élaboration et la définition des politiques cibles ou des offres de mobilité au profit des usagers. Les choix stratégiques sont impulsés par les autorités organisatrices de la mobilité et les aspects techniques par les fournisseurs de services et les partenaires ;
- *L'information aux usagers des services disponibles :* il s'agit d'un mécanisme de vulgarisation de l'information en temps réel aux voyageurs concernant les différentes offres et les services (itinéraires, horaires, tarifs, etc.) mis à leur disposition. L'accès à l'information sur les services offerts est un critère essentiel de qualité. L'usager doit pouvoir avoir accès à l'information avant, pendant et après son déplacement ;
- *L'acquisition des titres de transport :* il s'agit des processus de réservation, d'achat et de validation des titres de transport par les usagers en vue d'utiliser les réseaux de transport ;
- *L'exploitation du réseau de transport :* il s'agit du processus d'exploitation d'un réseau de transport. Pour les usagers, principaux bénéficiaires du réseau de transport, il s'agit globalement de l'ensemble du processus de déplacement d'un point à un autre ;
- *La maintenance du réseau de transport :* l'exploitation du réseau de transport nécessite à terme la maintenance et le contrôle du réseau pour assurer la qualité et la sécurité des matériels d'exploitation, du personnel et des usagers de la mobilité. La maintenance du réseau est assurée par des agents de maintenance qui peuvent être des sous-traitants ou employés par des AOT. Ils sont également responsables de réaliser des études de création et de restructuration de lignes en vue d'optimiser les moyens d'exploitation, et l'organisation du réseau.
- *La régulation du système de mobilité :* il s'agit d'un ensemble d'entités qui veillent à ce que les différents prestataires et exploitants du système de mobilité accèdent de manière équitable et non discriminatoire, au réseau de transport. Ils sont également garants du respect des normes de durabilité par ces derniers aussi bien dans le matériel utilisé pendant

les phases de déploiement (éco-conception) et de l'exploitation (usage des espaces urbains et des infrastructures).

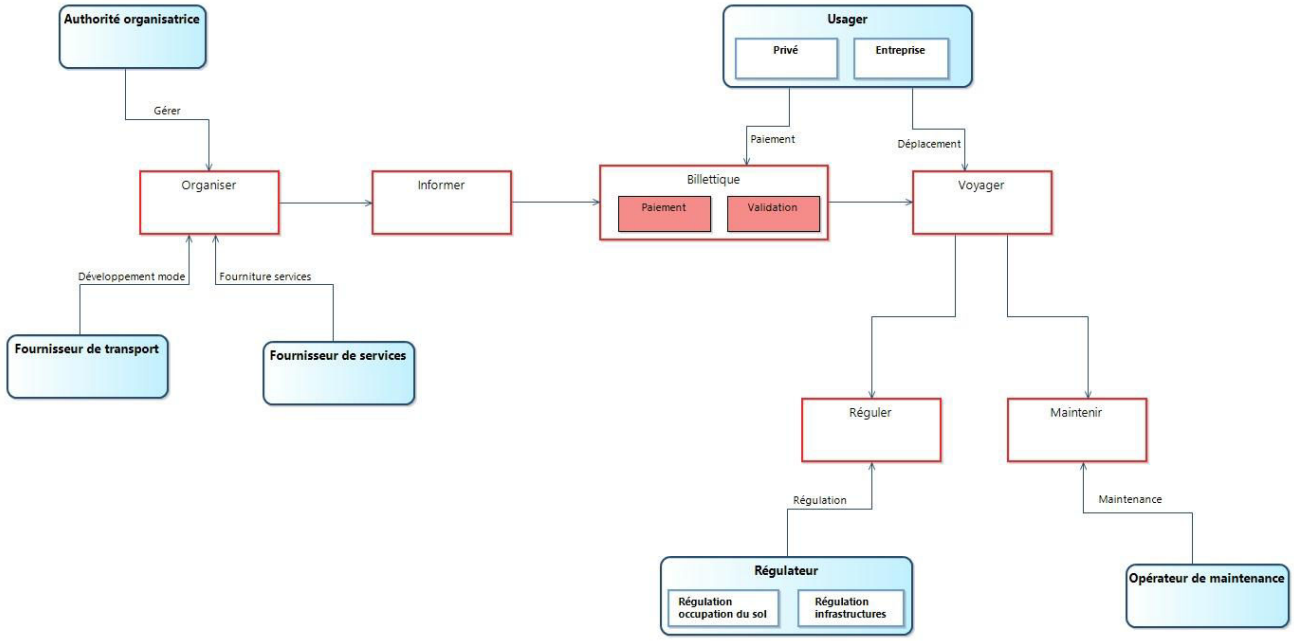


Figure 16 : Diagramme de flux de données d'un système de mobilité urbaine durable

Par la suite, les fonctions obtenues seront allouées à des constituants physiques et informationnels du système, aptes à les réaliser. Le système sera alors vu comme un ensemble de composants ou de sous-systèmes.

La vision organique du système

Pour réaliser la vision organique du système de mobilité urbaine, une démarche d'analyse ascendante a été optée. Afin de satisfaire aux besoins et exigences des parties prenantes élucidés, en prenant en compte les différentes contraintes entre les principaux constituants du système de mobilité urbaine, l'analyse organisationnelle se fera par étape successive (caractérisation des sous-systèmes) suivant le formalisme OPM (Object-Process Methodology) (Dori et al., 2003) précédemment présenté.

Une analyse des sous-systèmes qui constituent le système de mobilité urbaine (considéré comme un système de systèmes) sera faite dans un premier temps. Il s'agit principalement selon la littérature, des sous-systèmes représentant : la topologie du réseau de transport, les horaires du système, les services de mobilité et enfin la gestion de l'occupation urbaine.

(i) Sous-système représentant la topologique du système de mobilité

La topologie du système de mobilité urbaine est l'arrangement du réseau physique, c'est-à-dire la configuration spatiale d'un réseau de transport ou encore le système physique de transport. Elle constitue l'ensemble des moyens utilisés ou mis en œuvre pour réaliser les activités de mobilité urbaine. L'intégration de cet ensemble de constituants physiques permet aux décideurs de proposer des offres de mobilité qui correspondent à l'ensemble des activités disponibles dans un bassin de déplacements et permettant à l'usager d'effectuer des déplacements. Le modèle de la topologie de la mobilité urbaine proposé (cf. Figure 17) s'appuie sur un ensemble élémentaire de définitions données dans les normes Transmodel (CEN, 2006) et IFOPT (AFNOR, 2013), ainsi que la revue de la littérature effectuée.

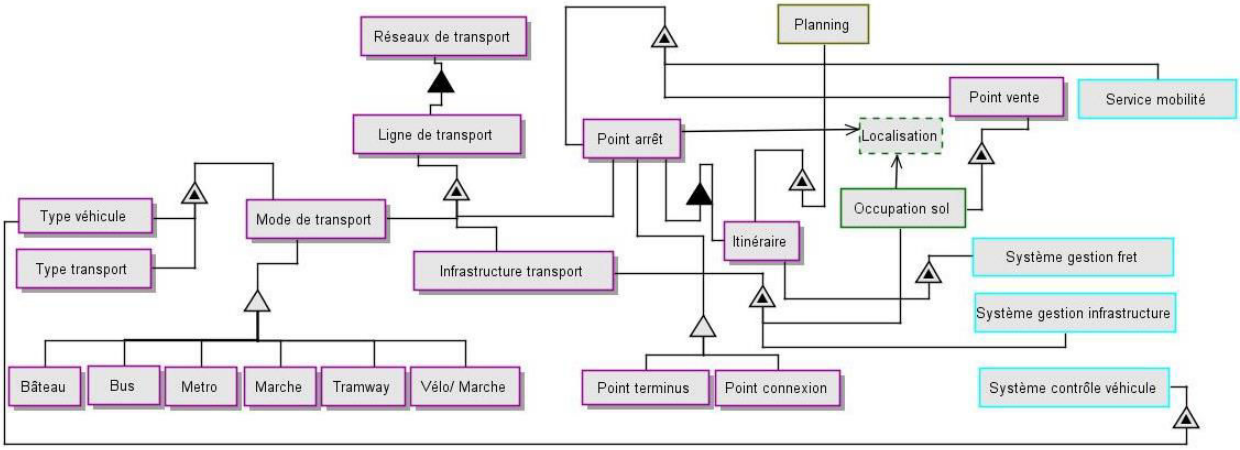


Figure 17 : Système de la topologie de la mobilité urbaine

La topologie proposée met en exergue l'ensemble des constituants physiques nécessaires pour le déploiement d'une offre de transport public. Dans le modèle proposé, les composant d'autres sous-systèmes en relation avec les composants physiques sont également représentés et identifiés avec des couleurs de contours différentes. Les composants physiques de la topologie de la mobilité concernent principalement les réseaux de transport, les lignes de transport, les modes de transport, les infrastructures de transport, les points d'arrêts et les itinéraires de transport. Une description de ce modèle est nécessaire pour une meilleure compréhension :

Les réseaux de transport. Une offre de transport public concerne principalement les réseaux de transport (ensemble de parcours constitué de différents modes de déplacements dans un périmètre donné) qui sont composés d'un ensemble de lignes de transport pour assurer la mobilité urbaine.

Les lignes de transport. Selon la définition proposée dans la norme Transmodel : *« une ligne est un groupe d'itinéraires qui sont généralement connus du public par une appellation commune (nom ou*

numéro). Deux Itinéraires utilisant le même cheminement d'infrastructure (ou des voies parallèles), mais dans des sens opposés, appartiendront généralement à la même ligne ». Une ligne est également identifiée par son emplacement géographique et les itinéraires qui la constituent. Le terme parcours est également très utilisé pour spécifier la manière dont les itinéraires sont utilisés dans une ligne de transport. Une ligne de transport est caractérisée par les modes de transport utilisés, les infrastructures de transport déployées et les points d'arrêts.

Les points d'arrêts. Un point d'arrêt est un endroit où les véhicules peuvent s'arrêter en vue de charger-décharger des passagers et où les passagers peuvent attendre les véhicules ou préparer leur déplacement. Il s'agit souvent des points de connexion. C'est un endroit où un véhicule peut s'arrêter pour faire monter ou descendre un passager (point de liaison) ou des points terminaux où le véhicule s'arrête automatiquement pour observer une pause de quelques minutes. Un ensemble de points d'arrêts consécutifs constitue également un itinéraire. Ces points d'arrêts sont généralement caractérisés par la présence de plusieurs services (service d'information aux usagers concernant les itinéraires, les horaires, l'acquisition des titres de transport, le compostage, etc.) et des points de ventes des titres de transport. Les points d'arrêts sont situés dans un espace géographique doté ou pas de services ou d'infrastructures telles que les parkings, les zones d'activités ou les hubs de transport.

Les points de vente. Caractéristiques des points d'arrêts, les points de vente constituent des points où les usagers du système de mobilité urbaine peuvent s'acquitter ou valider leur titre de transport. Les points de vente sont généralement situés dans les points d'arrêts intermédiaires ou terminaux. Ils sont caractérisés par leur emplacement et les infrastructures de service nécessaires pour la vente, la validation des titres de transport et l'information du voyageur sur les différentes possibilités à lui offertes.

Les modes de transport. Selon la norme Transmodel, un mode de transport est la caractérisation de l'exploitation en fonction des moyens de transport (bus, tramway, métro, train, ferry, bateau, etc.). Les différents modes de transport sont caractérisés par les types de véhicules utilisés (électriques, hybrides, à énergie fossile) et les types de transport dédiés pour usage (transport de marchandises, transport de personnes ou transport mixte). Dans le cadre de cette étude, la mobilité des personnes constitue notre priorité. Le choix du mode de transport définit également les infrastructures nécessaires pour concevoir le système de mobilité correspondant.

Les infrastructures de transport. Les infrastructures de transport constituent l'ensemble des installations fixes qu'il est nécessaire d'aménager pour permettre la circulation des véhicules et plus généralement le fonctionnement des systèmes de transport. Les infrastructures sont généralement

spécifiques d'un mode de transport, et sont conçues pour permettre la circulation de certains types de véhicules, plus ou moins diversifiés. Elles constituent également un support de base pour l'implémentation des infrastructures de service permettant l'exploitation des nouvelles technologies pour l'aide à la décision. Les infrastructures peuvent être organisées en réseaux et caractérisées par un emplacement géographique dédié (par exemple le réseau ferroviaire est constitué de gares).

Les itinéraires. Un itinéraire, suivant la norme Transmodel, représente un concept abstrait qui n'a en lui-même aucune réelle signification opérationnelle. Son but est de décrire un cheminement indépendamment des éléments d'infrastructure (voirie) et de l'aspect opérationnel (points d'arrêts, par exemple). Il est donc défini par une suite ordonnée des points d'itinéraire (par exemple PoR1 à PoR10). Les points d'itinéraire doivent être choisis de manière à permettre d'identifier la définition d'un itinéraire sans ambiguïté et en cela diffèrent des points d'arrêts (CERTU, 2013). Aussi, les itinéraires sont orientés c'est-à-dire, la suite des mêmes points d'itinéraire ordonnée dans le sens contraire constitue un autre itinéraire. Afin d'organiser un service régulier des offres de mobilité urbaine, les itinéraires sont planifiés afin de proposer aux usagers des informations y relatives.

Pour répondre à la finalité de l'offre de mobilité urbaine, le modèle de la topologique proposée (cf. Figure 17), met en exergue les interactions qui existent entre la topologie du système de mobilité et les aspects liés aux itinéraires, aux horaires et aux services à travers des interfaces.

(ii) Sous-système représentant les horaires du système de la mobilité urbaine

Pour fournir aux voyageurs une offre de mobilité urbaine planifiée, et des agents disponibles dans l'organisation de cette tâche, la notion d'horaire constitue un élément essentiel dans la définition de l'offre de mobilité urbaine durable. Le modèle proposé (cf. Figure 18) met en exergue les principaux constituants de la notion d'horaire d'un système de mobilité urbaine. Dans le modèle proposé, les composant d'autres sous-systèmes en relation avec les composants du sous-système représentant les horaires sont également représentés et identifiés avec des couleurs de contours différentes.

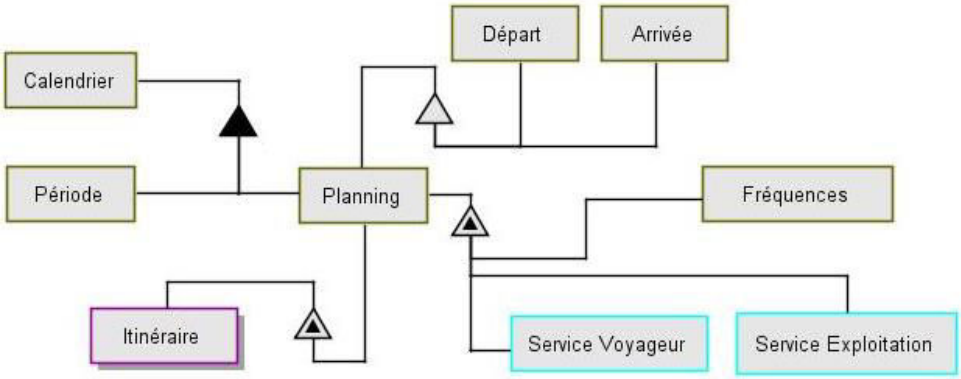


Figure 18 : Système des horaires de la mobilité urbaine

Le modèle représentant les horaires est principalement constitué des composants suivants : les calendriers d'exploitation, les périodes d'exploitation, les heures de départ et d'arrivée et les fréquences de dessertes. Les horaires constituent une caractéristique essentielle des itinéraires de transport et sont utilisés dans les activités relevant du « temps réel » de l'offre de mobilité urbaine (actions de régulation, gestion des modifications des services, information des usagers en temps réel, etc.).

Calendriers. Pour chaque jour d'exploitation, l'offre de mobilité urbaine est planifiée et définie selon un plan de production ou calendrier comprenant des tâches prévues pour chaque ressource disponible (en particulier les véhicules et les conducteurs) étalée sur une période donnée (CERTU, 2013). Une période correspond à un moment donné de l'année où il peut y avoir une emphase particulière sur l'activité de transport (par exemple la période de vacances). Elle caractérise également les saisons de l'année (printemps, automne, hivers, été). En fonction des périodes du calendrier, une AOM peut proposer aux usagers des services spécifiques. Un calendrier est également composé des horaires qui caractérisent la planification des trajets sous forme d'heures (heure de départ, heure d'arrivée et heure de passage).

Fréquences. La fréquence de desserte correspond au nombre de départs et d'arrivées journaliers. Elle caractérise l'intensité de l'activité en fonction des périodes. Par exemple, le nombre de départs pour une organisation du transport pendant la période scolaire n'est pas la même que pendant la période de vacances. Il en ressort que le modèle descriptif d'horaire du système de mobilité urbaine ainsi proposé, permet de mettre en exergue l'ensemble des informations relatives à la planification et à la fourniture des services en temps réel. Il permet également de mettre en exergue les interactions qui existent entre les horaires et la topologie du système de mobilité urbaine et les interactions entre les horaires et les services aux usagers.

(iii) Sous-système représentant les services de mobilité urbaine

Pour satisfaire les besoins de mobilité urbaine, généralement liés à la pratique de diverses activités sociales, telles que : les achats, le travail, la santé, le loisir, etc., l'offre de mobilité a pour but de garantir un certain nombre de services minimal pour sa réalisation. En d'autres termes, l'offre de la mobilité urbaine a pour but de satisfaire l'accomplissement de l'activité qui motive les usagers du transport à travers les divers services mis à leur disposition. Sans prétendre apporter satisfaction à toutes les sollicitations de mobilité, le modèle des services de la mobilité urbaine proposé (cf. Figure 19) s'est fait d'une part par identification des principales activités qui produisent un besoin de déplacement et d'autre part en prenant en compte les exigences des différentes parties prenantes. Dans le modèle proposé, les composant d'autres sous-systèmes en relation avec les composants du sous-système représentant les services de mobilité sont également représentés et identifiés avec des couleurs de contours différentes.

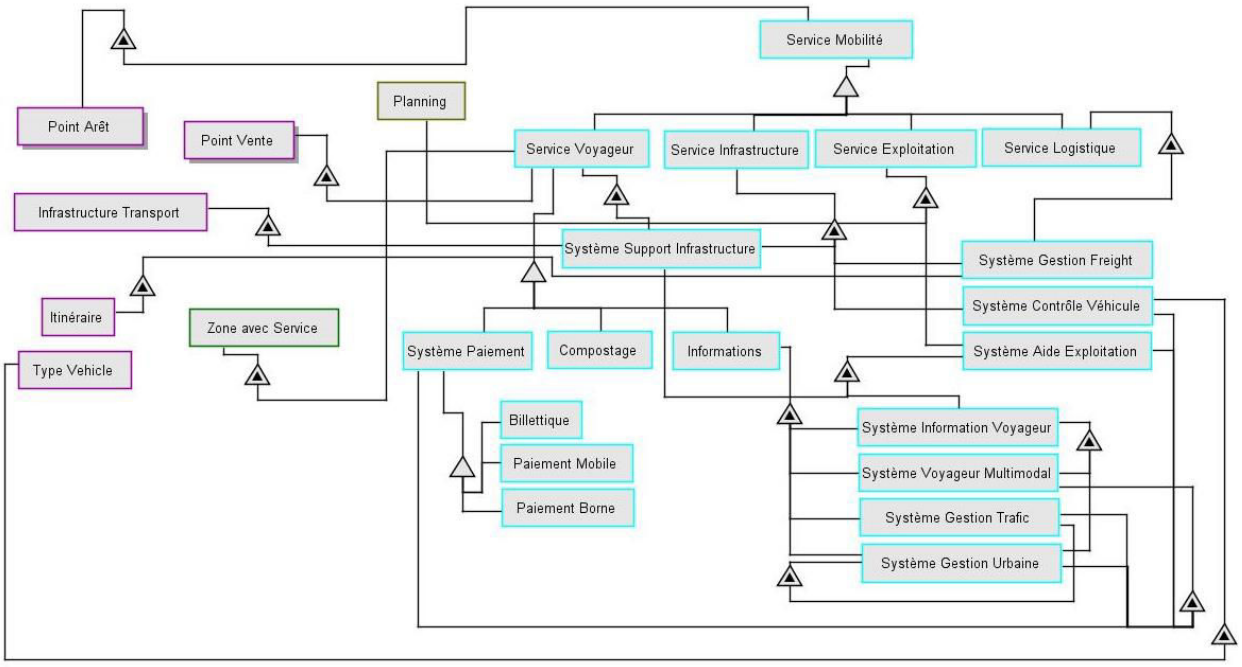


Figure 19 : Système des services de la mobilité

Les services de mobilité urbaine concernent généralement les services aux usagers de transport (paiement, compostage ou informations), les services liés aux infrastructures (à travers des équipements disponibles dans les véhicules, en station ou sur la voirie), les services d'aide à l'exploitation (SAE) qui associent à l'offre de mobilité urbaine théorique des informations en temps réel et les services dédiés aux compagnies et entreprises responsables du transport. Ils permettent d'automatiser et de simplifier les échanges d'informations entre les parties prenantes du domaine des transports (usagers, AOM, et pouvoirs publics). Les activités de mobilité urbaine nécessitent l'échange et la manipulation de

certaines informations concernant les déplacements des usagers du transport, l'agencement des différents modes de transport, la gestion du trafic, le transport des marchandises, la gestion urbaine, les systèmes de paiement électroniques, etc.

Les services aux voyageurs. Les services aux voyageurs concernent principalement les services liés à la réservation, l'acquisition d'un service (titre de transport, utilisation des stationnements, etc.), la validation des titres de transport et l'information en temps réel. Il s'agit des services que l'on retrouve dans les points de ventes et dans les endroits disposants d'une activité telle que les hubs de transport, les parkings, etc.

Les systèmes de paiement constituent un ensemble de dispositifs physiques et applicatifs mis en commun pour la réalisation du paiement électronique. Le paiement électronique est un moyen permettant d'effectuer des transactions commerciales pour l'échange de biens ou de services sur Internet ou à travers des bornes dédiées. Dans une politique de dématérialisation, ces systèmes sont utilisés aujourd'hui dans l'ensemble des activités liées à la mobilité urbaine (services de consommation, achat de ticket, paiement de parking, réservation, etc.). L'échange financier se fait soit par utilisation de la monnaie fiduciaire, par carte bancaire ou encore par paiement mobile. Dans le cadre de l'acquisition des titres de transport, on parle de la billettique[3]. Elle facilite les opérations d'achat et de validation (possibilité d'avoir sur un même support des produits tarifaires de réseaux différents). D'autre part, elle permet de faciliter l'intermodalité (utilisation de plusieurs modes de transport lors d'un déplacement) à travers des supports de technologie plus avancée (carte à puce, magnétique, cartes sans contact, etc.).

Un autre service aux voyageurs est la validation des tickets de services et titres de transports. Elle se fait à travers la notion de compostage qui consiste dans les réseaux de transport en commun à vérifier à l'entrée d'un réseau que le titre de transport détenu par l'usager est adéquat. Il s'agit d'un système automatisé qui vient remplacer la méthode artisanale de l'usage des poinçonneurs réalisés par les contrôleurs à bord des véhicules. Les supports de billets utilisés comportent des informations sur le nombre d'usages s'il est prédéfini, la durée ou les modes autorisés. La procédure de validation

[3] http://www.transport-intelligent.net, consulté en mai 2017.

consistera donc à vérifier et à modifier ces informations à chaque passage de l'usager. On retrouve ces équipements généralement dans les gares, les points d'arrêts ou à bord des véhicules.

Comme autre service aux voyageurs, le service d'information aux voyageurs caractérisé par les systèmes d'information dédiés aux informations relatives aux offres de mobilité doit être considéré, les applications d'affichage du tableau horaire et correspondances, de présentation cartographique et topologique des lignes et des points d'arrêts ou de calcul d'itinéraire. Les systèmes d'information voyageurs étant exhaustifs, avec l'avènement de nouveaux services tels que les systèmes de gestion de bicyclettes partagées (Kiefer & Behrendt, 2016) les systèmes de gestion des parkings (Akhavan-Rezai et al., 2016), les systèmes de co-voiturage (Brandstätter, et al., 2016), etc., L'objectif dans ce travail est de montrer l'intérêt de la prise en compte de ces derniers dans le déploiement de nouvelles offres de mobilité c'est pourquoi les plus usités ont été pris en compte :

- ***Les systèmes d'information voyageurs (SIV) :*** Il s'agit d'un ensemble de dispositifs installés dans les gares, les points d'arrêts, les véhicules de transport en commun, etc., permettant, de manière automatique et régulière, d'informer les voyageurs visuellement, par des dispositifs sonores ou par messages à propos du trajet (heure de départ, heure d'arrivée, terminaux, etc.) ou de donner toute autre forme de communication. Ils utilisent également des informations provenant d'autres systèmes, les systèmes d'information multimodaux ou les systèmes d'information urbaine.

- ***Les systèmes d'information de mobilité multimodaux (SIM)*** [4] **:** l'idée de ces systèmes est de pouvoir fournir de manière plus fine au voyageur toute l'information nécessaire à la réalisation de son déplacement. Les fonctions principales dans les SIM sont : la mise à disposition de plans du réseau (interactif ou en téléchargement), la consultation des arrêts, des lignes, des horaires, etc., la mise à disposition d'un service de recherche d'itinéraires, des informations sur l'état du trafic et les éventuelles perturbations, etc. Ces systèmes exploitent des informations fournies par les systèmes de contrôle de véhicules (afin de connaitre par exemple la position d'un train et prévoir son heure d'arrivée ou de passage à

[4] http://www.transport-intelligent.net, consulté en mai 2017.

une gare), les systèmes de gestion du trafic (pour signaliser les accidents, les voies congestionnées aux usagers par exemple), les systèmes de gestion de marchandises (pour assurer le suivi des colis et marchandises), les systèmes de gestion urbaine (pour relayer les informations relatives à une ville) et les systèmes de paiement (par exemple pour le paiement des titres de transport en ligne ou au niveau des bornes).

- ***Les systèmes de gestion du trafic*** **:** il s'agit des systèmes qui participent pleinement à la gestion du trafic au travers des moyens et équipements utilisés sur les réseaux de transport. Ils permettent également aux exploitants du transport d'adopter des mesures dynamiques en temps réel, de fournir des informations aux usagers telles que les informations afin d'éviter les zones de congestion et les risques d'accident, etc. Ces systèmes utilisent principalement des données provenant des systèmes de contrôle des véhicules, des infrastructures supports installées (capteurs, caméras et autres équipements) sur les lignes de transport et dans les points d'arrêt.

- ***Les systèmes de gestion urbaine :*** il s'agit des systèmes d'information mis à contribution pour la collecte et la diffusion des informations concernant une ville ou une agglomération donnée. Ils permettent généralement de fournir des informations telles que les emplacements vitaux d'une agglomération (hôpitaux, écoles, administrations, centres commerciaux, lieux de loisirs, stations-services, banques, poste de police, etc.) mais également des indicateurs pertinents et fiables pouvant guider les choix des décideurs dans le cadre d'un renouvellement urbain (Narayanaswami, 2017 ; Ayissi & Moskolaï, 2017).

Les services d'infrastructures. Les services d'infrastructures constituent l'ensemble des équipements supports aux modes de transport déployés. Ils servent également pour l'implémentation des systèmes de vente de tickets électroniques et de compostage (validation) dans les points d'arrêts pour les usagers de transport. On les retrouve également pour la gestion des feux de signalisation, les barrières automatiques de passage de trains, etc. Ils sont principalement caractérisés par les systèmes de contrôle de véhicules.

Il s'agit des systèmes installés sur des véhicules, qui utilisent des nouvelles technologies (capteurs, GPS, GSM, Wifi, etc.) afin d'améliorer la sécurité et l'efficacité dans la gestion de la flotte de véhicules par exemple. Un exemple concret est la synergie véhicule-réseau routier qui est un projet d'intégration et d'amélioration de la technologie de la mobilité intelligente. La mise en œuvre réussie de la synergie véhicule-réseau entraînera un changement révolutionnaire dans la sécurité des transports, simplifiera

d'autres technologies intelligentes telles que l'acquisition d'informations de signaux de circulation, l'acquisition d'images de points morts, les systèmes d'aide d'urgence avancés, les systèmes d'assistance et de contrôle adaptatif de vitesse etc.

Les services d'aide à l'exploitation (SAE). Il s'agit d'un service mis en place sur un réseau de transport urbain afin de transmettre les informations en continu vers des centres de supervision des réseaux concernant la localisation en temps réel et les déplacements des véhicules en utilisant des supports technologiques tels que les capteurs, GPS, etc. Ces services permettent également aux exploitants du système de mobilité urbaine d'améliorer la planification des horaires (par exemple connaître l'heure de passage des prochains bus) à travers des supports variables, de favoriser leur ponctualité, d'améliorer la qualité de service (en agissant en temps réel sur le réseau en cas de défection), etc. Ils exploitent les informations provenant des systèmes de contrôle de véhicules et des systèmes de gestion de trafic (à travers les données produites par les capteurs et autres équipements).

Les services de logistique. Il s'agit principalement des systèmes d'information dédiés à la gestion des chaines logistiques et des entreprises de transport des marchandises. Ils permettent d'effectuer par exemple la surveillance en temps réel des véhicules et l'identification des conditions de conduite dangereuses, la réduction des coûts et des délais du transport, par une optimisation des circuits et systèmes de distribution, le déclenchement en automatique ou proposition de réapprovisionnement des partenaires, etc. Ces technologies permettent d'améliorer de manière générale le pilotage de l'activité de logistique dans les systèmes de transport. Les systèmes de gestion des chaines logistiques utilisent des données provenant des systèmes de contrôle des véhicules (munis de capteurs, GPS, etc.) et des systèmes de gestion urbaine.

En résumé, le modèle de service de mobilité urbaine proposé (cf. Figure 19) met en exergue les interactions qui existent entre les services envisagés de l'offre de mobilité urbaine à travers les systèmes d'information et la topologie du réseau de transport d'une part et d'autre part les interactions entre les services, les horaires et la gestion urbaine. Les systèmes de mobilité urbaine étant au cœur des programmes de renouvellement urbain (extension des réseaux routiers, déploiement de nouvelles offres de transport, etc.), il est tout aussi important de prendre en compte dans la modélisation d'un système de mobilité urbaine durable la composante de la gestion de l'espace urbain.

(iv) Sous système représentant la gestion de l'occupation urbaine de la mobilité

Etant une composante importante du développement de la ville, les politiques liées aux offres de mobilité urbaine doivent prendre en compte la structuration de la ville dans leur phase d'élaboration.

En fonction de la taille de la population et de sa concentration, la ville peut exiger une configuration particulière. L'ensemble des contraintes de mobilité liées à l'occupation du sol au niveau de sa topologie sont : les infrastructures de transport en fonction des modes adoptés, les points de vente et les points d'arrêts. Le déploiement de ces éléments est lié au PDU (Plan de Déplacement Urbain). Un modèle représentant la gestion urbaine de la mobilité est proposé dans la Figure 20. Dans le modèle proposé, les composant d'autres sous-systèmes en relation avec les composants du sous-système représentant la gestion de l'occupation urbaine de la mobilité sont également représentés et identifiés avec des couleurs de contours différentes.

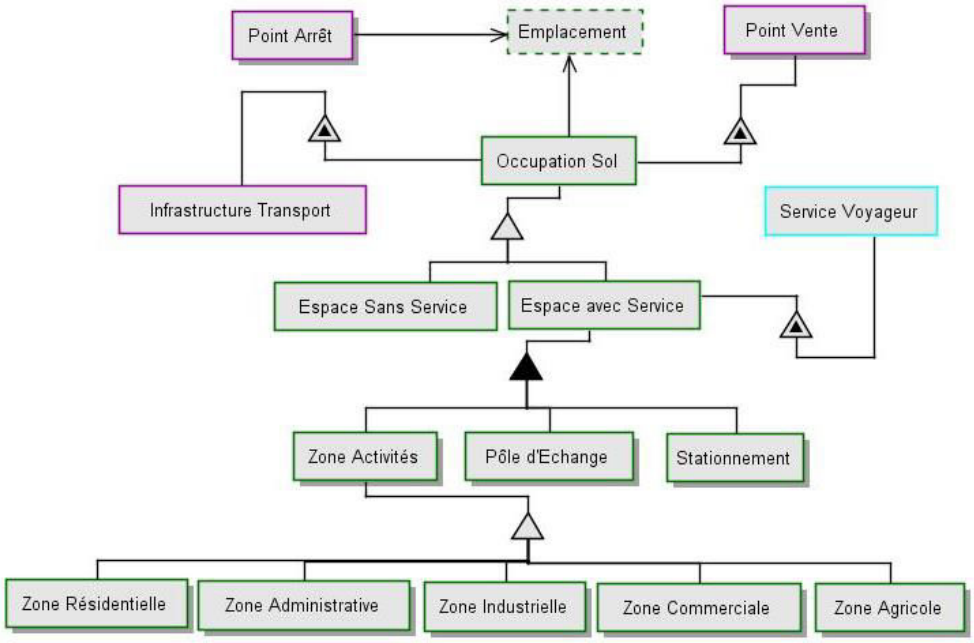


Figure 20 : Système de gestion urbaine de la mobilité

Un espace géographique de la mobilité est caractérisé par sa localisation qui peut généralement être de deux types : les espaces sans services et les espaces avec services.

Les espaces sans services. Il s'agit des espaces non occupés et non exploités dans une agglomération urbaine. En général l'on retrouve ces espaces dans les zones périphériques de ville pour maintenir l'équilibre de l'écosystème.

Les espaces avec services. Il s'agit des espaces aménagés, dotés des infrastructures de transport. Les usagers y retrouvent également des services d'information (systèmes de paiement et de validation, systèmes d'information de transport). On peut y retrouver des parkings, des pôles d'échanges ou des hubs de transports et des zones d'activités.

Les parkings constituent des installations destinées au stationnement de véhicules de transports individuels tels que les aires de stationnement et les cases de stationnement le long des routes. Plusieurs politiques de stationnements sont implémentées dans les villes afin de permettre à chaque usager de trouver la meilleure réponse à ses besoins. A cet effet, il existe des parkings payants et des parkings gratuits. Ils sont situés autour des habitats, des centres commerciaux, des points d'arrêts, etc., bref à proximité des zones d'activités. Ils favorisent aussi les activités de logistiques à travers des parkings réservés pour la livraison des marchandises, l'auto-partage de bicyclettes et le co-voiturage.

Généralement, lorsqu'il s'agit d'un lieu de correspondance entre différents modes de transport, on parle de pôle d'échanges. Le pôle d'échanges constitue le point central d'un réseau de transport et est généralement situé au niveau des arrêts terminus, des gares, des aéroports, etc. Ils concernent même souvent plusieurs exploitants concurrents du transport.

Les espaces avec services concernent aussi les zones à forte activité telles que les zones commerciales avec une forte présence des usagers, les zones administratives fréquentées aux heures de pointe, les zones agricoles et les zones industrielles. A ce modèle de la gestion urbaine de la mobilité proposé, on peut déceler plusieurs contraintes de mise en œuvre notamment entre la topologie du réseau de transport et la gestion urbaine d'une part et d'autre part entre la fourniture de services aux voyageurs et la gestion urbaine.

Une intégration des différents sous-systèmes présentés, permet d'obtenir une architecture globale du système de mobilité urbaine (cf. Annexe 3). En vue de prendre en compte les exigences des parties prenantes et de durabilité précédemment élicités, un méta-modèle de la mobilité urbaine durable sera proposée dans la suite.

3.3.3. Méta-modèle de la mobilité urbaine durable proposé

Le méta-modèle de mobilité urbaine durable présenté ci-dessous (cf. Figure 21) correspond à une intégration de l'architecture du système proposée et des exigences des parties prenantes et de durabilité élicitées. Une représentation plus détaillée mettant en exergue la prise en compte de la durabilité et des exigences sociétales est présentée en Annexe 4. Le code couleur utilisé dans la représentation du méta-modèle permet de mettre en exergue les différents sous-systèmes de la mobilité urbaine précédemment présentés.

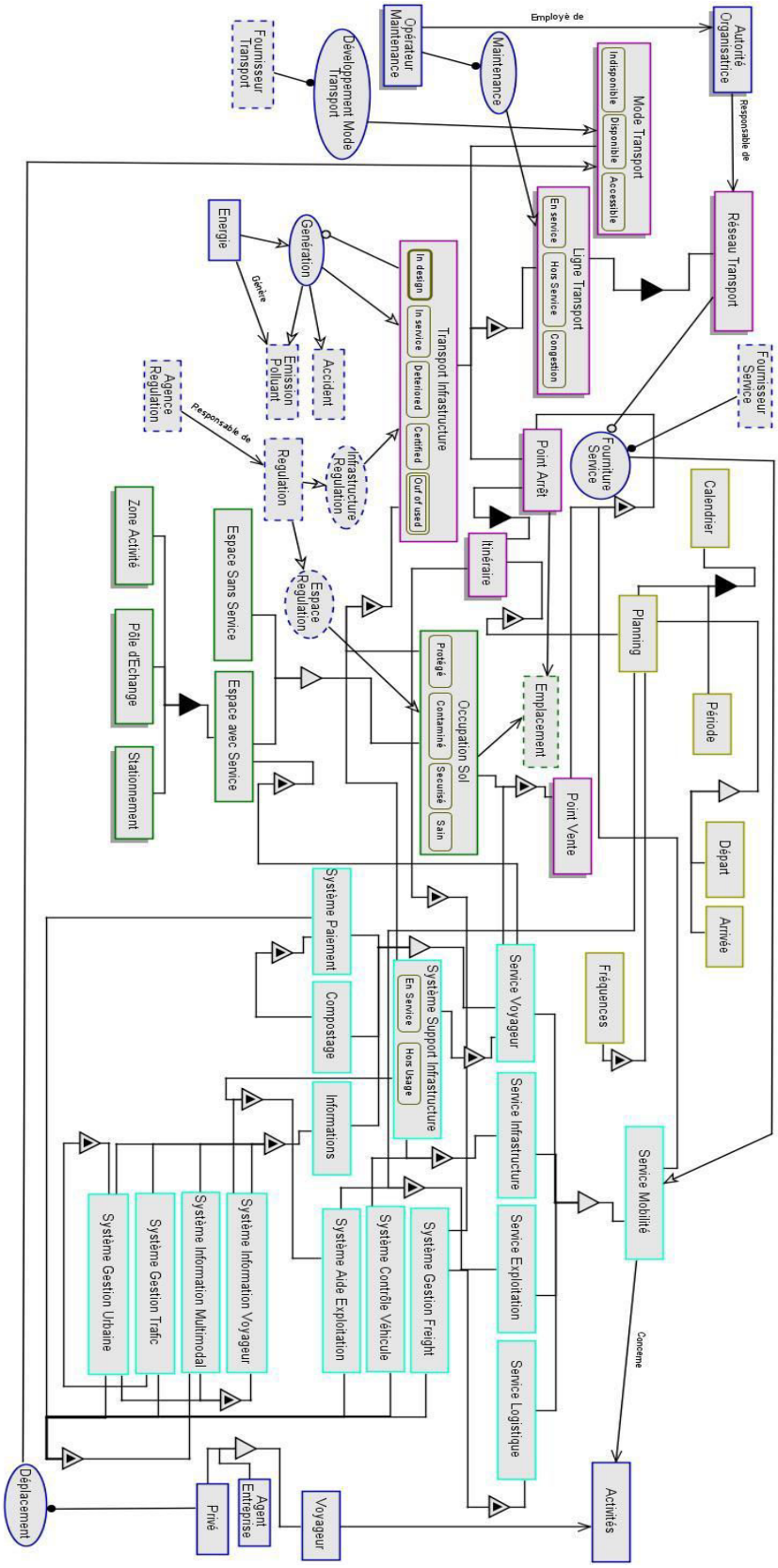


Figure 21 : Méta-modèle de la mobilité urbaine durable

En plus de représenter dans le même modèle les points de vue structurel, fonctionnel et comportemental du système sous forme de graphismes formels intuitifs, le formalisme OPM permet également de générer la description textuelle du modèle proposé à travers le langage OPL (Object Process Language). Un grand intérêt du langage naturel équivalent au modèle est celui de permettre à un non-spécialiste de la modélisation de comprendre ou même de valider un modèle fourni. Le modèle OPL correspondant est le proposé en annexe (cf. Annexe 5).

A l'issue de la phase de modélisation du système de mobilité urbaine à déployer, l'identification des infrastructures et services pertinents est nécessaire ainsi que leur orchestration. A cet effet, une analyse des interactions et dépendances complexes existantes entre les sous-systèmes de la mobilité urbaine durable permettra ainsi de mieux organiser le déploiement du futur système à travers une roadmap de co-déploiement qui constitue une forme de système de recommandations pour les décideurs.

Synthèse du chapitre

Bien qu'elle soit généralement adossée au principe général du développement durable en considérant conjointement les dimensions économique, sociale et environnementale, les règles pour caractériser la durabilité d'un système ne sont pas unanimement partagées. Dans le contexte de la mobilité urbaine, les connaissances pour formaliser les règles sont contenues dans des référentiels ou des standards, extraites à partir de l'expertise des spécialistes du domaine. Dans ce chapitre, après avoir rappelé les principales techniques d'élicitation des connaissances de la littérature, une méthode pour caractériser la durabilité d'un système de mobilité urbaine a été proposée et basée sur une hybridation de plusieurs techniques. Pour traiter la problématique de conception, une méthode d'ingénierie système prenant en compte plusieurs points de vue et plusieurs niveaux d'analyse a été proposée, notamment pour gérer la complexité induite par la constitution d'un système de mobilité urbaine. Ce qui a conduit à un méta-modèle représenté avec le formalisme OPM qui permet l'intégration de toutes les dimensions du système au sein d'un même modèle. C'est en outre un formalisme qui offre la possibilité de simuler le fonctionnement d'un système. Le prochain chapitre portera sur les méthodes d'aide au déploiement du système.

Chapitre 4 - Aide au déploiement du système : de la méthodologie à l'architecture distribuée

Chapitre 4 - Aide au déploiement du système : de la méthodologie à l'architecture distribuée *86*

4.1. Choix d'une méthode **87**

4.1.1. Avantages de la méthode choisie 87

4.1.2. Présentation des Design Structure Matrix (DSM) 88

4.2. Démarche d'élaboration de la roadmap **93**

4.3. Roadmap de déploiement proposée **95**

4.4. Architecture du système proposée **100**

4.4.1. Méthodologie de regroupement des composants du système 100

4.4.2. Architecture distribuée du système de mobilité urbaine 101

Synthèse du chapitre **106**

Le méta-modèle d'une mobilité urbaine durable a été proposé au chapitre précédent. Comme cela a été présenté, plusieurs éléments en interactions composent le modèle. Selon le nombre des éléments à considérer, sa mise en œuvre peut s'avérer fastidieuse et difficilement réalisable du fait du réseau d'interrelations complexes. L'utilisation d'une méthode facilitant sa réalisation peut s'avérer nécessaire. Ce chapitre vise à aider les concepteurs à déployer un système de mobilité urbaine par un mécanisme automatisé. Celui-ci doit permettre de gérer la complexité liée à la multiplicité de ses composantes et leurs interrelations. A la section suivante, la méthode choisie pour la caractérisation du système sera tout d'abord présentée. Ensuite, dans la deuxième section, une méthode d'élaboration de la roadmap de déploiement sera proposée. La troisième section porte quant à elle sur la mise en œuvre de ladite méthode, suivi de la présentation de l'architecture résultante. Enfin une synthèse clôturera le chapitre.

4.1. Choix d'une méthode

Pour mieux gérer la caractérisation et le déploiement des systèmes de mobilité urbaine considérés comme des systèmes complexes, une prise en compte des interrelations entre les composants du système de mobilité d'une part et la coordination des partenaires publics/privés d'autre part sont nécessaires. Dans la littérature, plusieurs méthodes analytiques aboutissant à des modèles constructifs et descriptifs du système à réaliser existent telles que la Design for eXcellence, la Design For Six Sigma, l'Axiomatic Design ou encore la Design Structure Matrix (Luzeaux et al., 2015).

Dans le cadre de ces travaux, l'outil de modélisation basé sur des méthodes matricielles d'ingénierie système appelé Design Structure Matrix (DSM) ou encore matrice structurelle de conception a été adopté. Les matrices DSM permettent en effet de représenter et de visualiser les interactions (de différentes natures) entre les composants d'un système complexe. Elles sont utiles d'abord lors de la définition de l'architecture organique (regroupement des modules ou sous-systèmes, optimisation des couplages) et ensuite lors de l'intégration pour vérifier que les zones de couplages et les interfaces entre composants sont bien réalisées. Les avantages d'une telle méthode ainsi que sa mise en œuvre seront présentés dans la suite.

4.1.1. Avantages de la méthode choisie

Les DSM constituent la méthode par excellence pour l'analyse des systèmes complexes (Bonjour et al., 2008). Les DSM offrent certains avantages tels que (Eppinger & Browning, 2012) :

- ***Concision.*** L'arrangement structuré des composants du système et leurs interactions fournissent un format de représentation compact. Par rapport à beaucoup d'autres approches

de modélisation de réseaux, une DSM peut représenter de façon significative un assez grand système complexe dans un espace relativement restreint.

- ***Visualisation.*** Les DSM mettent en évidence les modes de relation d'intérêt particulier pour un concepteur de système. Par exemple, l'architecture d'une DSM processus peut distinguer les interactions de rétroaction, qui ont magnifié les implications pour le comportement du système et l'architecture d'une DSM produit peut montrer les zones d'interaction forte indicative des avantages de l'affectation des composants particuliers aux sous-systèmes ou modules. En outre, la DSM offre une vue au niveau du système afin d'avoir une vision globale et permettre une prise de décision optimale.
- ***Compréhension intuitive.*** Une fois la DSM représentée, la compréhension de la structure de base d'un système très complexe devient aisée.
- ***Analyse.*** La nature matricielle des DSM ouvre la porte à l'application d'un certain nombre d'analyses puissantes en théorie des graphes et matricielle ainsi que des méthodes d'analyse DSM spécialisées (clustering, séquencement, etc.). Une analyse DSM permet également d'éclairer les liens indirects, itérations de processus, la convergence, la modularité, et d'autres motifs et effets importants.
- ***Flexibilité.*** La DSM est un outil de modélisation de système très flexible. Depuis son développement initial, il y a plus de trois décennies, de nombreux chercheurs et praticiens ont modifié et étendu la DSM de base avec des représentations graphiques utiles, les couleurs, et des données supplémentaires. De nouvelles possibilités continuent de se développer chaque année.

Les DSM offrent une perspective commune sur un système à savoir l'amélioration dans la compréhension des concepteurs des relations et des causes à effet qui se produisent au sein du système. Les DSM aident également à organiser les connaissances acquises, et à mettre en œuvre des canaux de la créativité et de l'innovation vers des améliorations du système. En bref, elles permettent en général de mieux gérer la complexité des systèmes et une meilleure coordination dans sa mise en œuvre.

4.1.2. Présentation des Design Structure Matrix (DSM)

La Design Structure Matrix (DSM) est une technique de modélisation sous forme de réseau permettant de représenter les composants d'un système et les relations qui existent entre eux (Eppinger & Browning, 2012). Une architecture de système peut être considérée comme un graphe où les éléments du système sont considérés comme les nœuds et les arcs représentés par les relations entre deux éléments. En cas de graphe orienté, une flèche entre deux éléments montre l'impact d'un élément sur un

autre. L'approche est devenue très répandue pour analyser des modèles de systèmes complexes sous forme d'une matrice carrée contenant des lignes et colonnes identiques représentant les éléments du système. Les cellules diagonales représentent les composants d'un système (ils sont très souvent laissés vides, noircis ou encore rappellent le nom de l'élément sur la diagonale pour faciliter la lecture d'une matrice de grande taille) et les cellules hors diagonale illustrent les possibilités de dépendance entre les composants. Outil très flexible, dans la littérature, les DSM ont été utilisées pour modéliser de nombreux types de systèmes. En fonction du type de système modélisé, les DSM peuvent représenter divers types d'architectures.

Exemple :

- Pour modéliser l'architecture d'un produit, les éléments de DSM seraient les composants du produit et des interactions seraient les interfaces entre les composants.
- Pour modéliser l'architecture d'une organisation, les éléments DSM seraient les personnes ou les équipes dans l'organisation, et les interactions pourraient être les communications entre les personnes.
- Pour modéliser une architecture de processus, les éléments DSM seraient les activités dans le processus, et les interactions seraient les flux d'informations et / ou des matériaux entre eux.

Les DSM modélisent également différents types d'architectures combinées pour représenter comment les différents domaines du système sont liés entre eux au sein d'un système plus vaste. Ainsi, la DSM est un outil générique pour modéliser tout type d'architecture de système.

Il existe principalement deux conventions pour la lecture des entrées et sorties d'un élément dans le modèle DSM (Eppinger & Browning, 2012).

- **IR / FAD :** Les marques hors diagonale dans les lignes représentent les entrées (IR) et dans les colonnes les sorties. Suivant cette convention, dans un processus DSM les "feedback ou rétroactions" sont représentés par toutes les marques se trouvant au-dessus de la diagonale principale.
- **IC / LOG :** Les marques hors diagonale (IC) dans les colonnes représentent les entrées et les sorties dans les lignes. Suivant cette convention, dans un processus DSM, les "feedback ou rétroactions " sont représentés par toutes les marques se trouvant en dessous de la diagonale principale.

Exemple :

Adoptons la convention IC dans cet exemple où les colonnes constituent les entrées et les lignes les sorties. Soit une DSM à huit éléments étiquetés de A à H. Les lignes et les colonnes portent les éléments.

On peut lire sur la ligne D que D a des entrées de A, B et F. On le matérialise avec la présence d'une croix et on peut dire que D dépend de A, B et F. On peut également lire sur les colonnes que F fournit des éléments à D et à B. Ainsi les marques dans les cellules hors diagonales symbolisent la présence d'une interaction entre les éléments ou composants (Eppinger & Browning, 2012).

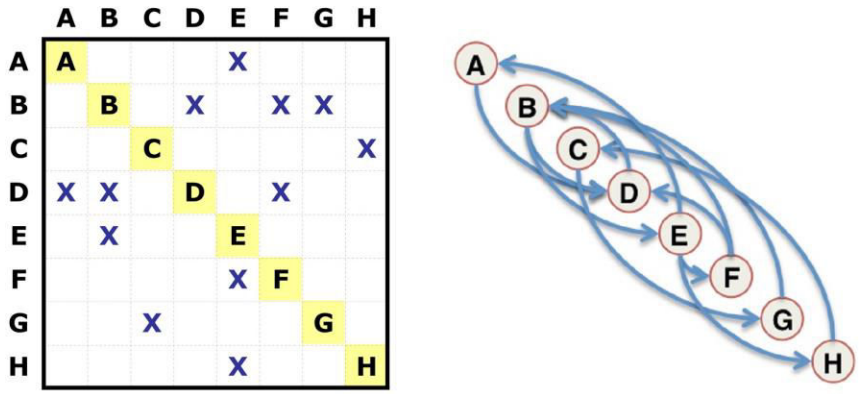


Figure 22 : Représentation schématique d'une DSM

Une DSM simple telle que représentée dans l'exemple ci-dessus (cf. Figure 22) est appelée DSM binaire parce que les marques hors diagonale indiquent simplement la présence ou l'absence d'une interaction. La représentation binaire d'une DSM peut être étendue en incluant d'autres caractéristiques de l'interaction, telles que le nombre d'interactions et/ou l'importance, l'impact ou l'intensité de chaque élément en interaction.

Il existe principalement trois types de relations entre les différents composants d'un système (Warfield, 1973). Prenons l'exemple d'un système à deux composants A et B (cf. Figure 23) ; les situations envisageables sont les suivantes : soit il existe une relation de contrainte entre les éléments (enchaînement séquentiel) (a), soit les éléments A et B sont indépendants et peuvent être réalisés en parallèle (b), ou soit les éléments se contraignent mutuellement (couplage) (c).

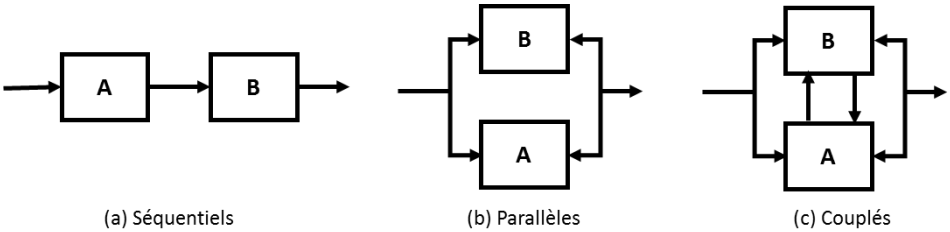


Figure 23 : Types de relations d'une DSM

Ces interactions peuvent également être représentées à l'aide d'une ou plusieurs valeurs numériques, des symboles, des nuances de couleurs au lieu de simples marques binaires dans chacune des cellules hors diagonale. Cette forme élargie de DSM est appelée DSM numérique.

Classification des DSM

Les modèles DSM peuvent être classés selon quatre catégories principales comme le montre Figure 24 ci-dessous :

- La première catégorie est composée de modèles d'architectures statiques, ce qui représente des systèmes dont les éléments existent simultanément. Dans cette catégorie, les applications peuvent être des systèmes tels que les produits (dont les composants interagissent physiquement avec un autre) et les organisations (dont les membres communiquent entre eux).
- La deuxième catégorie se compose de modèles de flux temporels, représentant des systèmes dont les éléments peuvent être actionnés au fil du temps et / ou sont liés par des relations de précédence. Les applications de la catégorie temporelle sont de types processus, représentés comme des modèles de processus basés sur les activités, les modèles basés sur des paramètres de bas niveau, et processus logiciels (bien que le logiciel est un produit et en fonction des cas peut être considéré comme statique, il exécute la procédure).
- La troisième catégorie est constituée de Domain Mapping Matrix (DMM) modèles, qui représente deux types de DSM (par exemple, produit/organisation) dans une seule matrice. Une DSM représentée en ligne et l'autre en colonne.
- La quatrième catégorie est constituée de Multi Domain Matrix (MDM) modèles, qui représente plus d'un type de DSM (par exemple, produit, processus, et / ou de l'organisation) dans une seule matrice.

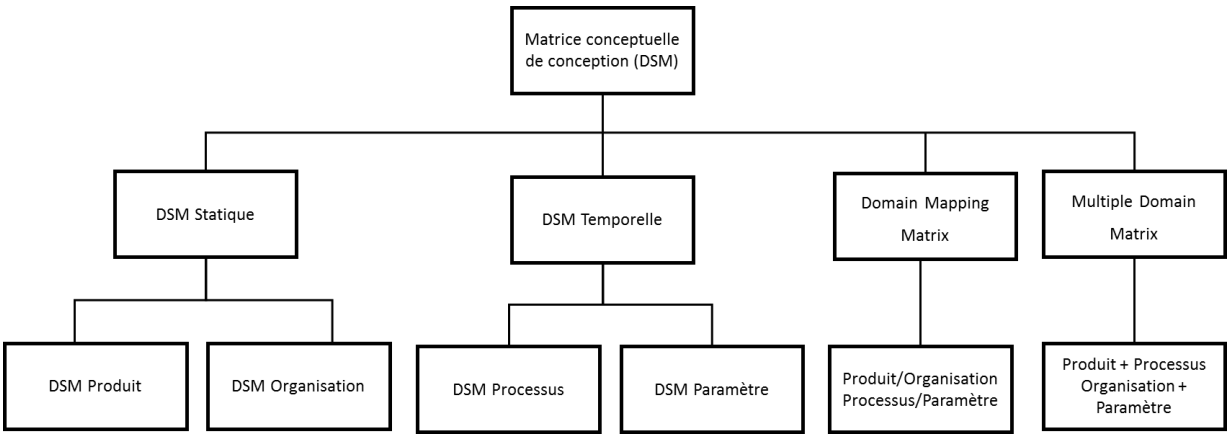


Figure 24 : Les catégories de DSM

Dans ces travaux deux catégories de DSM seront présentées (DSM statiques et temporels) car les deux autres catégories sont basées sur ces dernières.

(a) DSM statiques

Les DSM statiques permettent de modéliser les interactions entre les constituants d'un système d'une manière non hiérarchique, ce système pouvant être un produit ou une organisation (Harmel et al., 2006). Historiquement, les DSM statiques binaires ont été choisies (Kusiak et al., 1993) pour modéliser l'architecture des produits et modéliser les interactions qui lient leurs composants. Ces DSM sont binaires et permettent d'identifier l'existence ou non d'un type d'interaction étudiée. Les DSM statiques binaires sont encore utilisées malgré l'apparition des DSM numériques (Bohm & Stone, 2004).

Eppinger (1994) distingue qu'il existe différents types d'interactions entre les composants d'un système tels que la proximité spatiale, le flux de matières, le flux d'informations, et le transfert d'énergie. En utilisant les DSM pour modéliser les architectures du produit, de nombreux chercheurs et industriels ont été en mesure de mieux comprendre les réseaux d'interactions dans les systèmes complexes. La méthode la plus courante d'analyse appliquée à des modèles DSM pour l'architecture du produit est appelée clustering. Il s'agit d'une forme d'analyse de partitionnement qui permet de réorganiser les lignes et les colonnes d'une DSM afin de regrouper les composants selon certains objectifs, qui portent habituellement sur les intensités entre les différentes interactions.

Le type de DSM utilisé pour l'analyse et la conception d'une organisation est appelé DSM organisation. Ce modèle de DSM permet de décomposer la structure des unités organisationnelles et leurs interactions. Il représente les personnes, les équipes, les départements, ou d'autres unités organisationnelles en lignes et colonnes de la matrice. Parmi les travaux les plus populaires utilisant les DSM Organisationnelles, ceux de (Sosa et al., 2004) peuvent être cités. La méthode la plus courante d'analyse appliquée à des modèles DSM pour l'architecture des organisations est également le clustering.

(b) DSM temporelles

Les DSM temporelles permettent de représenter les systèmes dont les composants sont liés par des relations de précédence, qui peuvent être de type temporel (DSM Processus) ou des relations de hiérarchie ou de contrainte (DSM Paramètres) (Harmel, 2007).

Les DSM Processus permettent de modéliser l'enchaînement des tâches de tous les processus de l'entreprise. Dans l'entreprise les tâches déterminent principalement l'allocation des ressources et servent de base pour estimer la durée et le coût du projet.

Les DSM Paramètres quant eux, ont été initialement utilisées pour modéliser les relations de précédence et les contraintes entre les paramètres et variables en conception. Elles s'appliquent plus généralement à tous les systèmes dont les éléments ne sont pas homogènes.

L'objectif général lorsqu'on analyse des DSM temporelles est de réorganiser les éléments en ligne et en colonne de manière à réduire les retours en arrière lorsqu'il s'agit de tâches, ou d'identifier une hiérarchie entre les éléments. Cette réorganisation est assurée par des algorithmes de séquencement et de partitionnement.

L'ensemble des types de DSM, leurs applications et les algorithmes nécessaires pour leur analyse sont résumés dans le tableau suivant (cf. Tableau 8).

Tableau 8 : Les principaux types de DSM

Type de DSM	Applications	Méthode d'analyse	Type d'analyse
Produit	Conception et architecture des systèmes (interaction entres composants)	Clustering	DSM statique
Acteurs	Conception d'organisation, gestion des interfaces entre acteurs, coopération, gestion flux	Clustering	DSM statique
Activités ou processus	Planification des projets, structuration des processus (relations Input/Output entre activités)	Partitionnement	DSM dynamique
Paramètres	Relations de précédences et hiérarchies entre paramètres	Partitionnement	DSM dynamique

Pour la mise en œuvre de cette méthode, une démarche méthodologique a été proposée pour l'élaboration de la roadmap du système de mobilité urbaine durable étudié dans ces travaux.

4.2. Démarche d'élaboration de la roadmap

Une approche par étapes successives a été adoptée dans ce travail pour modéliser et analyser les interactions du système de mobilité urbaine en vue de son déploiement (cf. Figure 25).

Ces différentes étapes consistent à :

- **Décomposer** le système en plusieurs sous-systèmes ou domaines ;
- **Identifier** pour chaque sous-système ou domaine, ses différents composants encore appelés variables. Ensuite pour chaque variable, identifier si possible ses composants ;
- **Analyser** le système afin d'identifier d'une part les différentes interactions qui existent entre les sous-systèmes du système et d'autre part, identifier les différentes interactions qui lient les différents sous-systèmes entre eux à travers les variables afin d'avoir une idée précise du comportement du système global ;

- Faire une **représentation visuelle** graphique du modèle DSM en s'appuyant sur les différentes interactions identifiées, mais également après avis des experts du domaine ;
- **Améliorer :** La plupart des applications DSM entraînent non seulement une meilleure compréhension du système, mais aussi l'amélioration du système grâce à des mesures prises à la suite de l'analyse DSM et l'interprétation de son affichage.

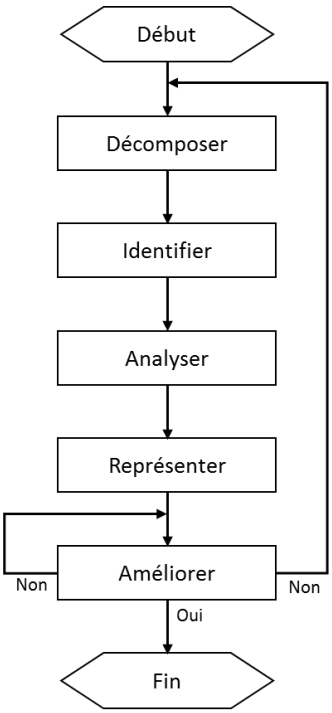


Figure 25 : Démarche d'élaboration de la roadmap

Ces cinq étapes doivent être précédées par une préparation et une planification appropriée à la lumière des buts, des objectifs et des contraintes élucidés (une bonne définition du problème, une collecte préalable des données, etc.). Idéalement, la dernière étape comprendrait une rétroaction au premier, non seulement la fermeture d'une boucle d'amélioration continue, mais aussi un cycle systématique de l'apprentissage qui augmente la connaissance du système et améliore la précision et la richesse du modèle.

Le temps réel et l'effort requis pour toute application DSM dépendra de plusieurs facteurs, y compris la familiarité avec le système au cours de la modélisation, l'accès aux informations nécessaires, aux produits et aux processus experts, la documentation disponible, le niveau de détail de modélisation désiré, et l'expérience des modeleurs DSM. Bien que certains modèles de DSM puissent être extraits automatiquement à partir de modèles de gestion de projet ou code logiciel, la plupart ont entraîné la participation directe des experts.

4.3. Roadmap de déploiement proposée

Une application de la démarche méthodologique proposée précédemment s'est faite comme suit :

1ère étape : Décomposition du système

Comme cela a été préalablement défini au premier chapitre, la présente étude se focalisera sur le système piloté basé sur des infrastructures et services de mobilité dont il faut garantir la durabilité. Dans ces travaux les deux principaux sous-systèmes de mobilité urbaine qui ont été identifiés dans le méta-modèle proposé au chapitre précédent (cf. chapitre 3), concernent : le sous-système physique et le sous-système d'information.

2ème étape : Identification des composants de chaque sous-système

Sur la base du modèle représentant la vision organique de la mobilité urbaine proposé dans le chapitre précédent avec le formalisme OPM, les différents composants des sous-systèmes considérés ont été identifiés clairement. Ces composants correspondent aux objets des modèles OPM proposés. Ils concernent :

- Pour le sous-système physique de transport (topologie physique) : les réseaux de transport, les lignes de transport, les infrastructures de transport, les modes de transport, les types de véhicules, les types de transport, les points d'arrêts, les points terminus, les points de connexion, les itinéraires et les points de vente. A cela, s'ajoutent les infrastructures relatives à l'occupation du sol telles que, les zones sans services, les zones d'activités, les pôles d'échanges et les stationnements.
- Pour le sous-système d'information : les systèmes de paiement, les systèmes de compostage, les systèmes de gestion de fret, les systèmes de contrôle véhicule, les systèmes d'information voyageurs, les systèmes d'information multimodaux, les systèmes de gestion du trafic, les systèmes de gestion urbaine, les services d'infrastructures, les services d'aide à l'exploitation, et les horaires.

3ème étape : Analyse des interactions

L'analyse des interactions entre les principaux composants des sous-systèmes de la mobilité urbaine a constitué dans ce travail à identifier les relations qui existent entre les différents objets du modèle OPM pour chaque sous-système considéré. Par exemple pour le sous-système physique (cf. Figure 17), les interactions existent entre : les réseaux de transport et les lignes de transport, les lignes de transport et les infrastructures physiques, les points d'arrêts et les points de vente, etc.

4ème étape : Représentation visuelle

Il s'agit dans cette étape, de faire une projection des interactions existantes entre les principaux composants des sous-systèmes (physique et d'information) dans la matrice DSM, organisée en ligne et en colonnes comme cela a été précédemment présenté. Les objets des modèles OPM deviennent les éléments de la matrice DSM et les interactions entre les différents objets sont représentées par ''□ '' qui symbolisent une relation entre les composants. La roadmap de déploiement proposée dans ce travail sera obtenue à partir d'une intégration des DSM des sous-systèmes physique et d'information associé.

(a) DSM du système physique

Une projection du modèle OPM représentant la topologie physique de la mobilité urbaine (proposé au chapitre précédant) permet d'obtenir la matrice suivante (cf. Figure 26) :

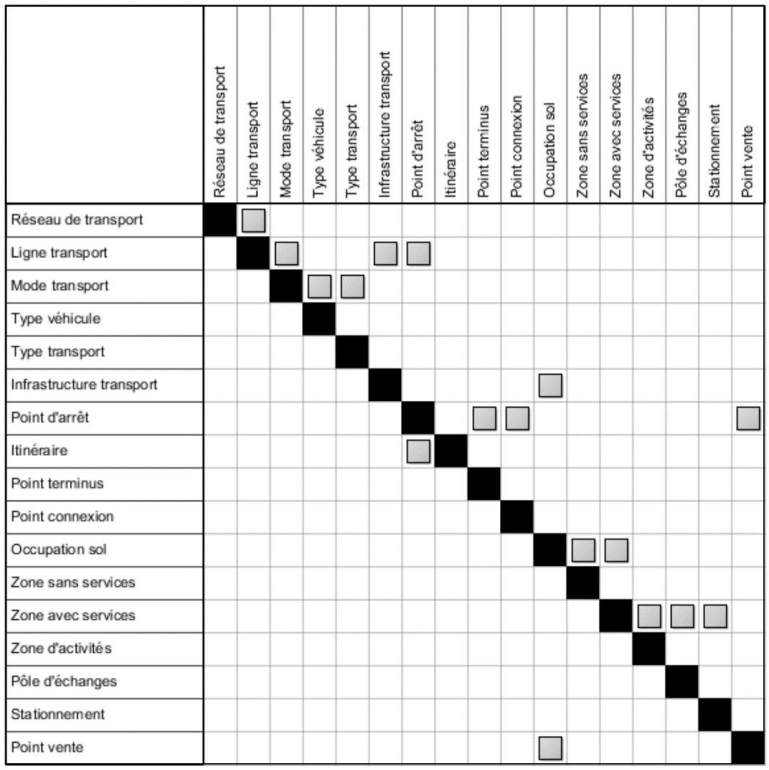


Figure 26 : DSM du sous-système physique

Suivant la Figure 26, plusieurs relations peuvent être identifiées entre les principaux composants du sous-système physique. Par exemple la ligne 1 (réseaux de transport) a pour entrée la colonne 2 (ligne de transport), la ligne 2 (ligne de transport) a pour entrées les colonnes 3, 6 et 7 (mode de transport, infrastructures de transport et point d'arrêt), etc. Ces entrées sont matérialisées par la présence d'une coloration et traduisent le fait que, pour la réalisation d'un réseau de transport, la prise en compte des

lignes de transport est nécessaire, pour la réalisation d'une ligne de transport la prise en compte des modes de transport, des infrastructures de transport et des points d'arrêts sont nécessaires. Il en est de même pour les autres composants de la DSM.

(b) DSM du système d'information

De même, en établissant la DSM du sous-système d'information, la matrice suivante est obtenue (cf. Figure 27) :

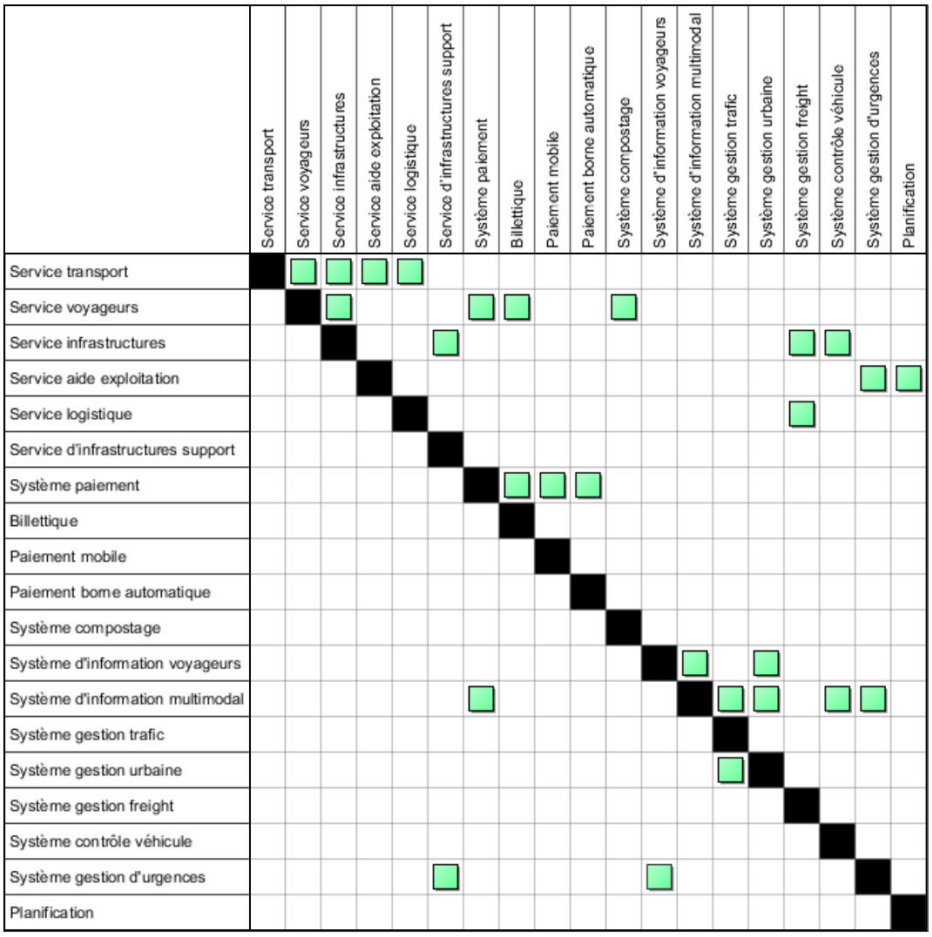


Figure 27 : DSM du sous-système d'information

Comme précédemment, les interactions avec les principaux composants du sous-système d'information sont matérialisées par la présence d'une coloration et s'interprètent de la même manière.

Pour enfin obtrenir la DSM générale correspondant à la roadmap de déploiement, une intégration des deux sous-systèmes est nécessaire.

(C) Intégration des sous-systèmes physique et d'information

En intégrant les DSM des sous-systèmes physique et d'information, correspondant au système de mobilité urbaine durable, la matrice suivante a été obtenue (cf. Figure 28) :

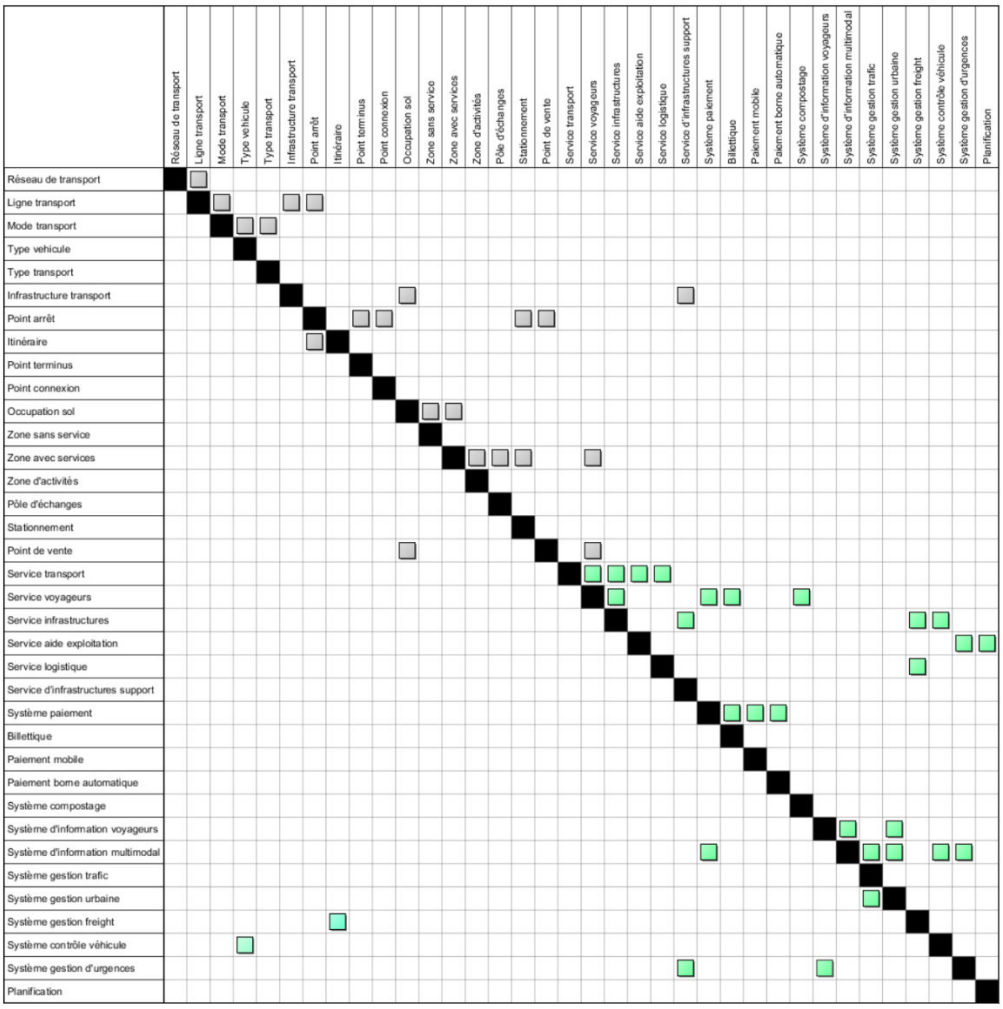


Figure 28 : DSM d'intégration des sous-systèmes physique et d'information de mobilité urbaine durable

Dans cette matrice (Figure 28), sont représentées : les interactions entre les composants de même nature (composants du sous-système physique entre eux, et composants du sous-système d'information) et les composants des sous-systèmes différents (sous-systèmes physique et d'information). Par exemple, pour les sous-systèmes physique et d'information, la ligne 6 (infrastructures de transport) a une entrée sur la colonne 23 (système des infrastructures support) qui correspond à un constituant du système d'information. Cette interdépendance traduit ainsi un déploiement conjoint des sous-systèmes de transport physique et d'information.

(D) Roadmap de co-déploiement

Pour obtenir la roadmap de co-déploiement (cf. Figure 29) qui constitue une feuille de route de mise en œuvre, les contraintes temporelles doivent être considérées. A cet effet, un algorithme de séquencement a été usité. Les algorithmes de séquencement ou de partitionnement permettent de modéliser l'enchaînement des tâches de tous les processus du système. L'objectif général d'une analyse des DSM temporelles du système est la réorganisation des composants du système en lignes et en colonnes de manière à réduire les retours en arrière lorsqu'il s'agit de tâches, ou d'identifier une hiérarchie entre les composants. Cela pourrait ainsi permettre aux décideurs d'optimiser le déploiement du système de mobilité urbaine (par exemple identifier l'ordre de déploiement des composants, les composant pouvant se réaliser en parallèle, etc.).

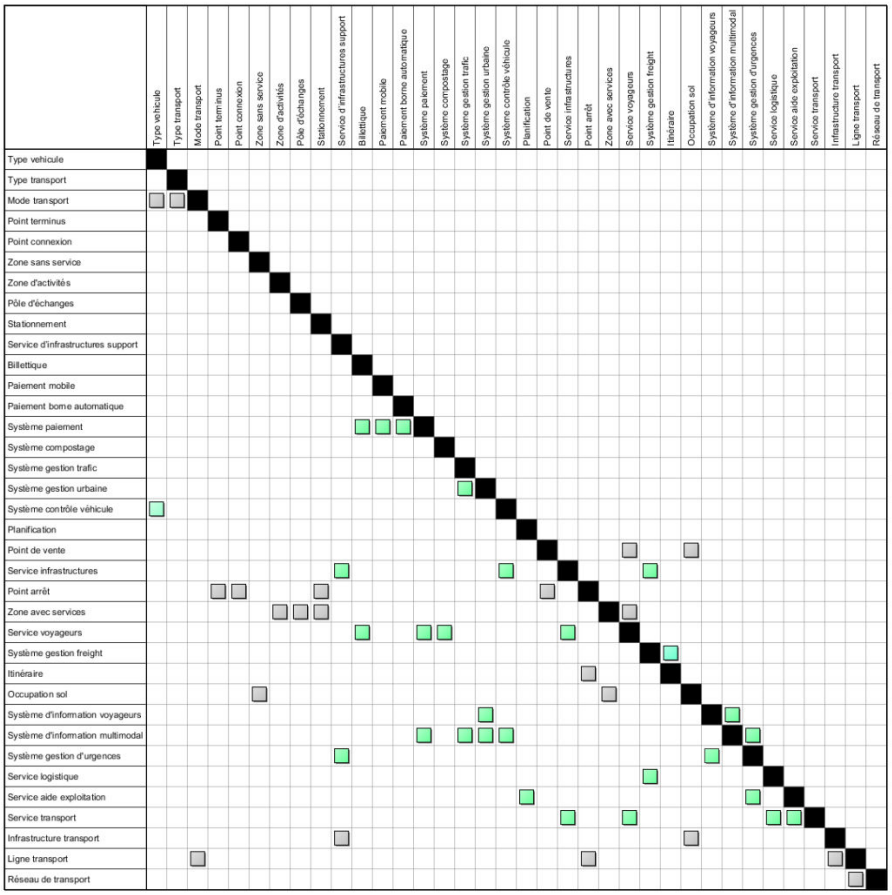


Figure 29 : Roadmap de co-déploiement du système de mobilité urbaine durable

La matrice ainsi proposée correspond à une roadmap de co-déploiement qui permet de manière visuelle de guider les décideurs dans le déploiement du futur système de mobilité urbaine. Seulement, la complexité pour la conception et le déploiement d'un tel système de mobilité urbaine demeure, car les différents composants du système de mobilité représentés à travers sa roadmap, relèvent des

domaines différents. Cette situation peut nécessiter une coordination aussi bien dans la réalisation des tâches de déploiement qu'entre les différents prestataires (partenaires publics/privés). Pour aider les décideurs à optimiser le déploiement du système de mobilité urbaine, une architecture distribuée du système sera proposée en regroupant les différents composants du système en modules ou sous-systèmes interconnectés.

4.4. Architecture du système proposée

L'architecture proposée dans ce travail, qui constitue un système de recommandations aux décideurs, a pour objectif d'optimiser la communication entre plusieurs systèmes offrant divers services de mobilité. A cette fin, une méthode d'analyse des interactions complexes entre les différents composants du système de mobilité urbaine a été adoptée. Cette méthode sera dans un premier temps décrite, ensuite l'architecture résultante sera proposée.

4.4.1. Méthodologie de regroupement des composants du système

Lorsque les éléments qui constituent la DSM représentant des composants d'un produit, la méthode d'analyse indiquée est le clustering. Le « clustering » fait référence au classement d'objets dans différents groupes, plus précisément au regroupement des données en paquets homogènes appelés « cluster ». Les objets appartenant à un cluster partagent des caractéristiques communes, qui correspondent le plus souvent à des critères de proximité que l'on définit en introduisant des mesures de distance. Le but originel du clustering est de trouver des similitudes entre les éléments d'un système afin de les grouper ensemble en se basant sur un seuil de ressemblance.

Selon Harmel (2006) il existe plusieurs algorithmes pour mettre en œuvre les clustering tels que ceux basés sur les coefficients de similarité, le tri, l'optimisation de coûts, l'itération et les algorithmes génétiques. Toutes ces méthodes nécessitent des mesures de distance ou de ressemblance pour caractériser les clusters. Les travaux les plus célèbres concernant les algorithmes de clustering sur les DSM s'appuient sur le tout premier algorithme qui est celui de Idicula (Idicula, 1995) qui sera utilisé dans le cadre de cette thèse. Cet algorithme de clustering développé par Idicula a été ensuite repris et amélioré par (Fernadez, 1998). Idicula (1995) s'est intéressé à deux problèmes rencontrés en ingénierie concurrente et liés aux tâches de conception. Le premier problème était « d'identifier l'ensemble de tâches ou composants interdépendants dans un processus de conception » et le second avait pour sujet « la détermination des groupements des tâches interdépendantes ».

En général, l'algorithme de Idicula sélectionne aléatoirement une tâche et calcule les enchères pour les différents modules. L'offre la plus élevée est choisie, la tâche est alors associée à ce module et le

nouveau coût total de coordination est calculé. S'il y a une amélioration des coûts, la tâche est incluse dans ce module. Ce processus se poursuit de manière itérative et se termine lorsque aucune amélioration du coût de coordination ne se produit pendant un "certain" nombre d'itérations (paramètre à spécifier). L'algorithme correspondant est représenté à la Figure 30.

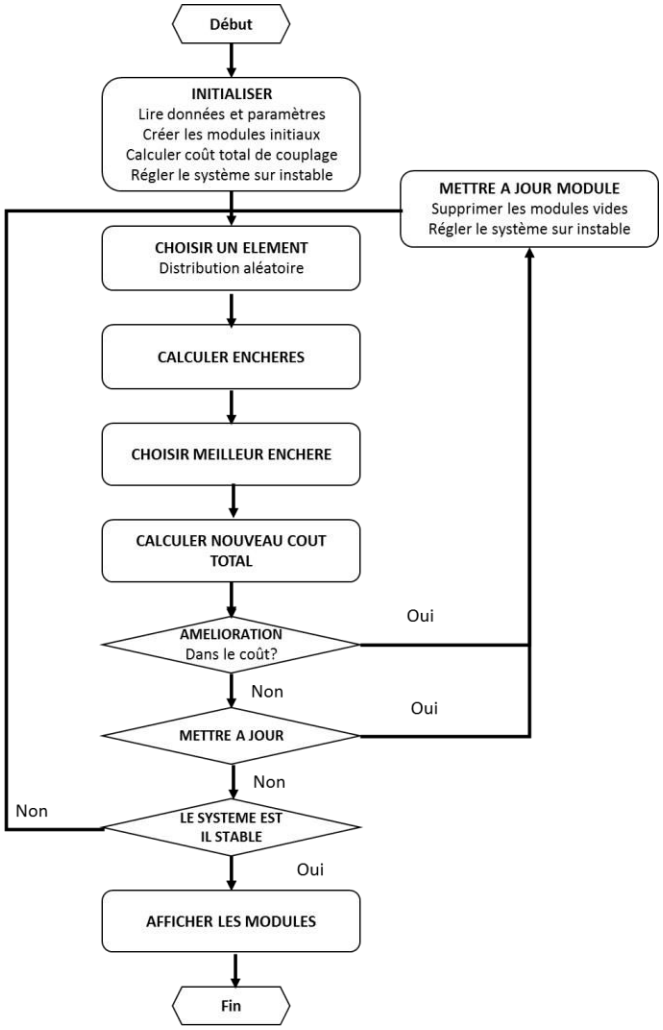


Figure 30 : Algorithme de clustering inspiré de Fernanadez (1998)

Pour la mise en œuvre, le logiciel académique Cambridge Analysis Modeler (CAM) a été utilisé. Les résultats de cette simulation seront présentés dans la suite.

4.4.2. Architecture distribuée du système de mobilité urbaine

La DSM suivante (cf. Figure 31) a été obtenue après application de l'algorithme du clustering. Elle détermine le regroupement de composants fortement interdépendants. Ces interdépendances mettent en évidence la nécessité d'une méthodologie de déploiement conjointe dans laquelle des modules

étroitement liés des sous-systèmes physique et d'information pourraient être conçus par des équipes unifiées.

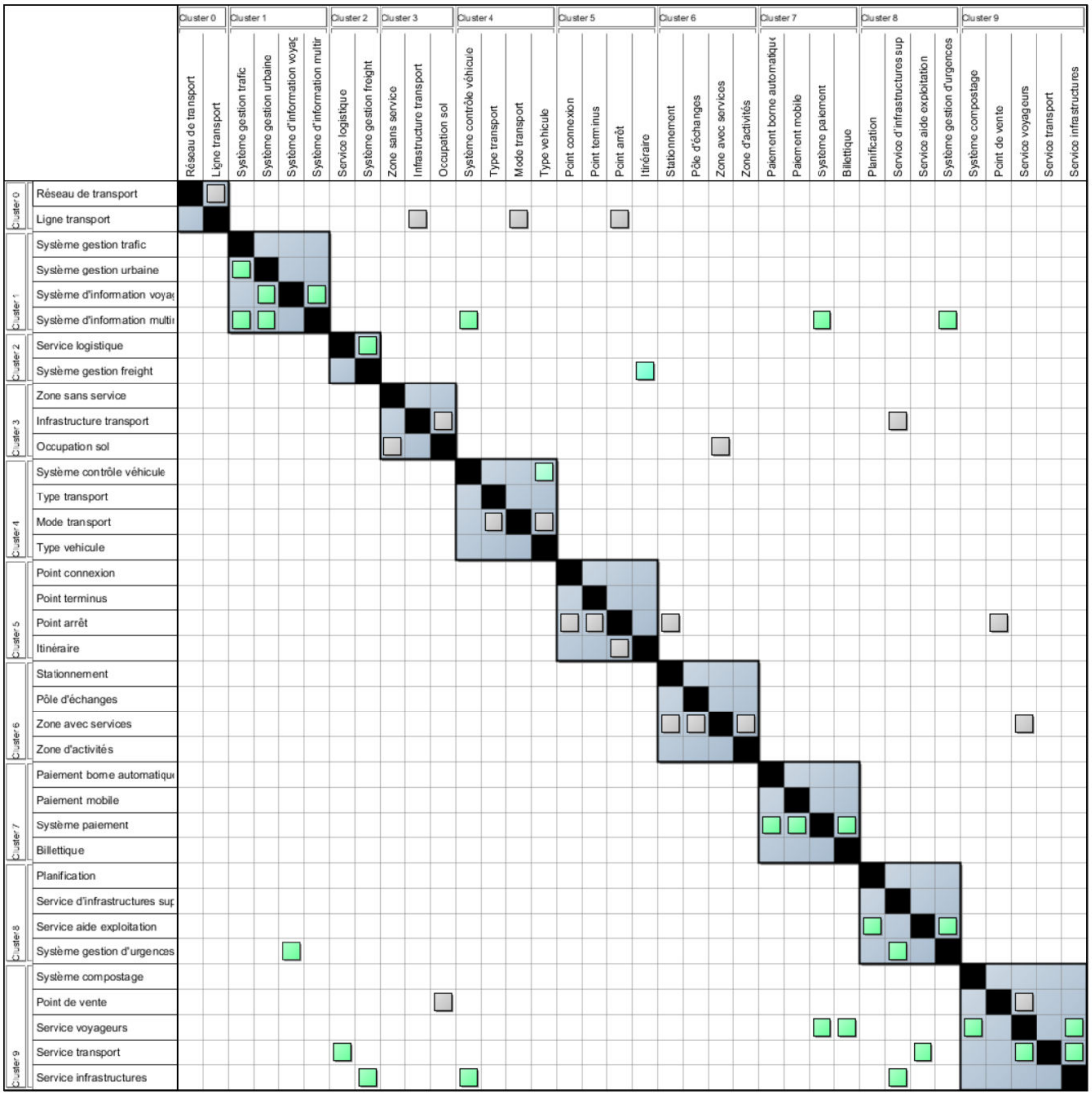


Figure 31 : DSM optimisée du système de mobilité urbaine durable

Suivant la Figure 31, 10 clusters se sont formés représentant ainsi des regroupements entre constituants :

- D'un même sous-système, par exemple les composants du sous-système physique (cluster 0, cluster 3, cluster 5 et cluster 6), les composants du sous-système d'information (cluster 1, cluster 2, cluster 7 et cluster 8) d'une part ;
- Et d'autre part les composants de sous-systèmes différents (cluster 4 et cluster 9).

Le résultat de la mise en clusters de la DSM suggère dans la phase de déploiement du système de mobilité urbaine durable, la prise en compte des modules de couplage formés. L'évolution technologique ou l'introduction de nouveaux concepts dans un domaine de la mobilité urbaine peut créer un besoin de réorganisation du système. Il en résulte également que, dans le déploiement de nouvelles offres de mobilité urbaine, l'achèvement de certaines tâches nécessite la prise en compte de plusieurs composantes de différents sous-systèmes (système physique, système d'information). Une architecture distribuée du système de mobilité est proposée (cf. Figure 32).

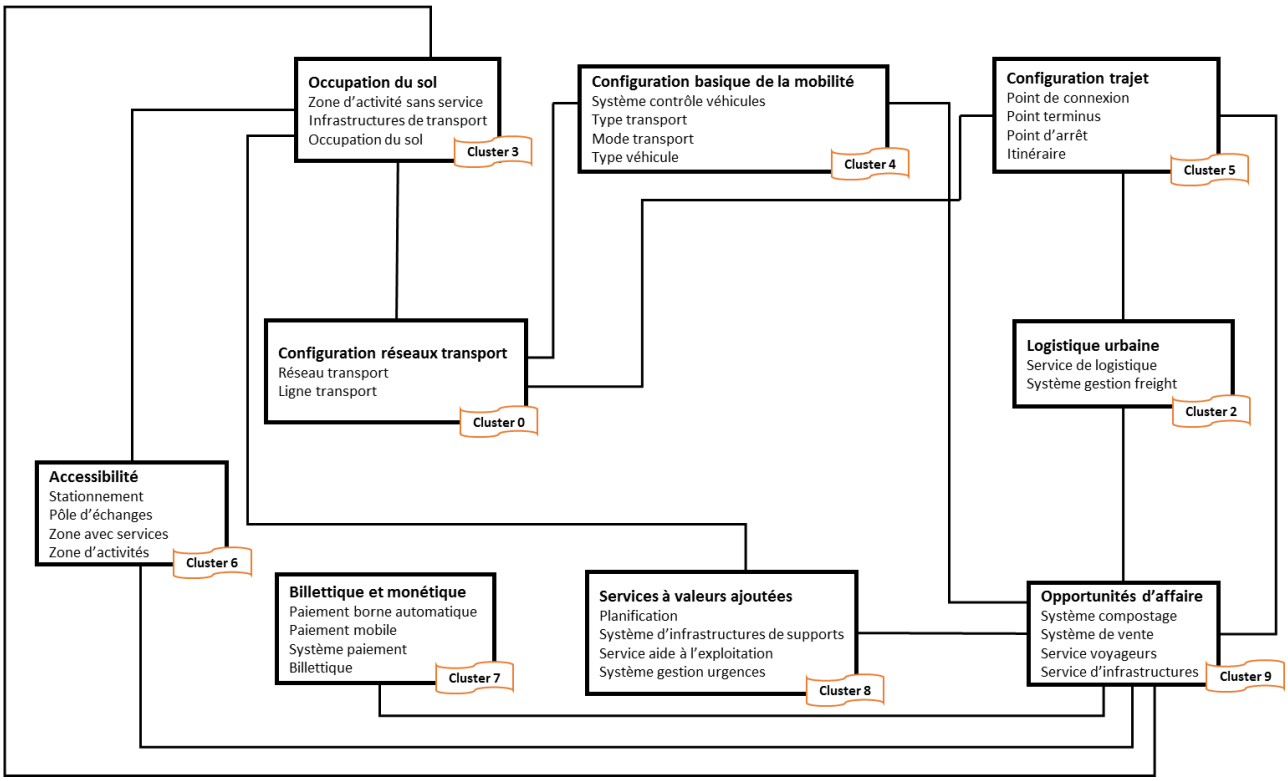


Figure 32 : Architecture distribuée du système de mobilité urbaine durable

Dans cette architecture, le cluster 1 qui caractérise le système d'information (système de gestion urbaine, système de gestion du trafic, système de transport multimodal, système d'informations voyageurs, etc.) n'est pas représenté car l'ensemble des infrastructures et services est basé sur cette dernière. Elle correspond ainsi à une architecture dite « distribuée ». Selon Coulouris (2005), une architecture distribuée peut se définir comme un ensemble d'entités (composants matériels ou logiciels) en réseau ou interconnectées qui communiquent et coordonnent leurs actions.

Le système reconfiguré (cf. Figure 32) est constitué : de composants de base assez stables (pouvant être affectés à des équipes différentes et pouvant être planifiés), il s'agit des cluster 0 (configuration de la topologie de base du système de mobilité), du cluster 2 (gestion de la logistique urbaine), du cluster

3 (occupation du sol), du cluster 4 (configuration des trajets), du cluster 5 (gestion de la connectivité), du cluster 6 (accessibilité) et du cluster 9 (opportunités commerciales). Après ces composants, d'autres servant de collecteurs de données peuvent être identifiés, il s'agit du cluster1 (collection des données). Les deux derniers composants peuvent être considérés comme des facilitateurs de la mobilité intelligente (billettique et monétique, cluster 7 et services à valeur ajoutée, cluster 8). En général, les clusters générés peuvent aider à optimiser le déploiement du système en séparant le système en modules interconnectés.

En vue d'une informatisation du système de mobilité urbaine, le cadre commun d'urbanisation proposé (cf. Figure 33) résultant des analyses précédentes permet de prendre en compte les opérations de maintenance et les évolutions technologiques des modules identifiés au cours du cycle de vie du système, sans affecter l'ensemble du système. Les principaux apports de la mobilité intelligente intégrée dans le système de mobilité urbaine traditionnel sont matérialisés par la couleur verte dans l'architecture. Ce cadre commun d'urbanisation proposé est représenté selon le modèle d'architecture OSI (Open Systems Interconnexion) et constitué de plusieurs vues : stratégique (concerne le choix des politiques cibles), processus et métier (prise en compte des besoins des usagers et caractérisation du système), fonctionnelle (informations et données du système), application (implémentation des nouveaux services de mobilité pour smartphones, etc.), et infrastructure (ensembles des infrastructures de transport, de télécommunication, d'énergie, etc.).

Le cadre commun proposé considère également l'ensemble des règles de conduite d'un système d'information. Il s'agit des Règles Générales d'Interopérabilité (RGI), des Règles Générales de Sécurité (RGS) et des Règles Générales d'Accessibilité (RGA) des systèmes d'information qui seront implémentés. Il doit alors en résulter un catalogue de services accessibles, ainsi qu'une base de connaissances constituant le patrimoine informationnel de la mobilité urbaine, alimenté par retour d'expériences des actions gouvernementales et des partenaires privés.

Pour son implémentation, la prise en compte des problèmes de collaboration (partenariats publics/privés), de même que les problèmes d'interopérabilité doivent être prises en compte. Aussi dans la mise en œuvre, de nombreux facteurs externes également peuvent influencer le fonctionnement d'un tel système et mériteraient d'être analysés.

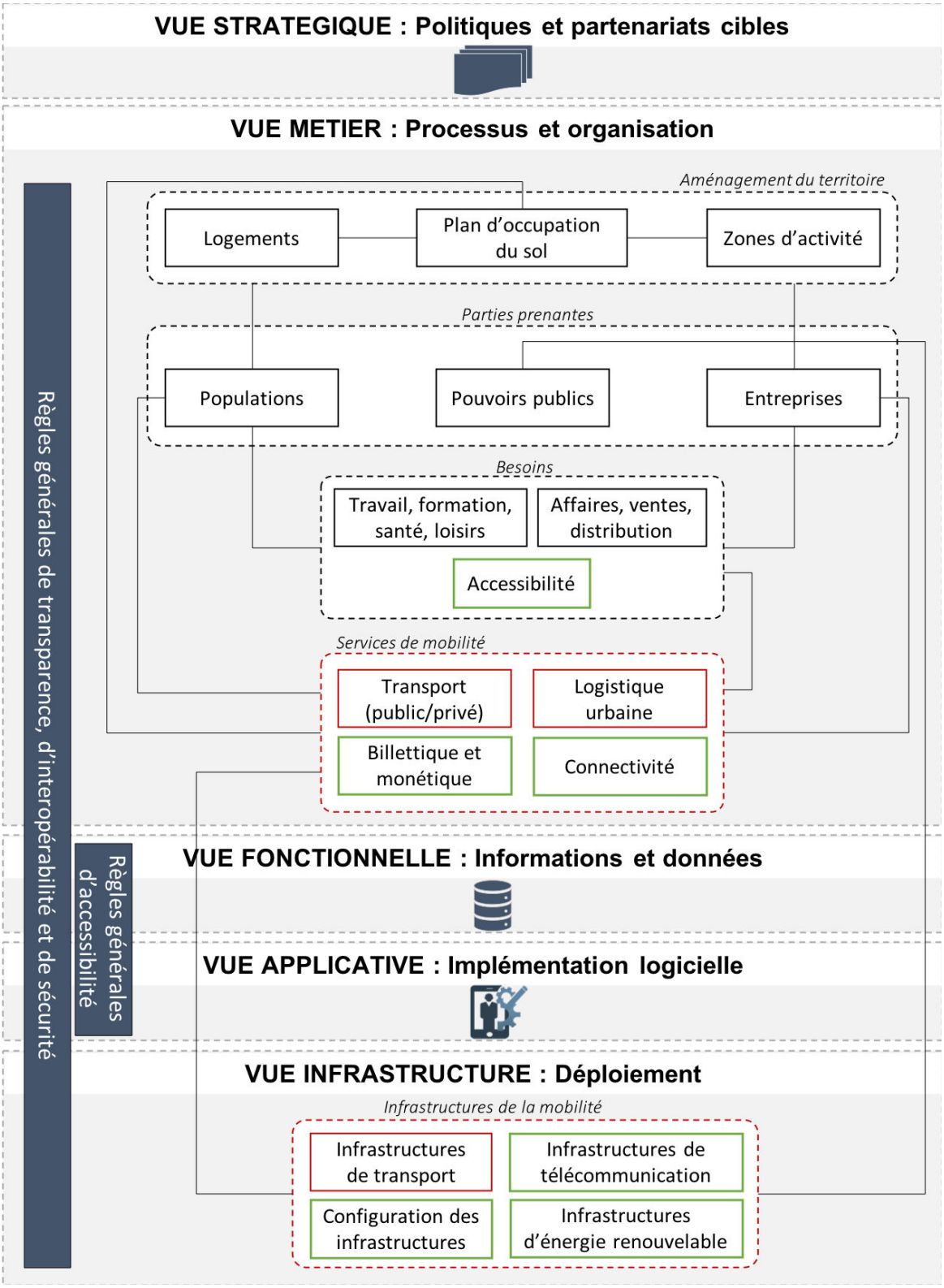


Figure 33 : Cadre commun d'urbanisation du système de mobilité urbaine durable

Synthèse du chapitre

Un système de mobilité urbaine étant par essence complexe, comme cela a été présenté, sa mise en œuvre peut s'avérer fastidieuse sans une aide. Une roadmap a pour cela été proposée dans ce chapitre. Elle vise principalement deux objectifs : (1) faciliter l'instanciation du méta-modèle de mobilité dans un contexte spécifique basé sur une aide pour gérer de la complexité ; (2) faciliter le déploiement des activités liées à la mise en œuvre du système. Dans les deux cas, la méthode DSM a été utilisée, fournissant l'aide sous forme de recommandations. Le premier objectif s'adresse plus particulièrement aux concepteurs du système, tandis que le second vise les gestionnaires de villes souhaitant optimiser la planification du développement urbain. Vu qu'elle nécessite la spécification de projets avec leurs tâches de réalisation, une illustration de sa mise en œuvre sera réalisée au chapitre 5. Dans le cadre de l'aide à l'instanciation du méta-modèle, la méthode DSM a permis d'obtenir une architecture distribuée de la mobilité urbaine du futur. Celle-ci met en exergue l'environnement distribué du système. Son implémentation nécessite la définition de règles générales d'interopérabilité, d'accessibilité, de sécurité, de partage ainsi que l'utilisation d'un protocole de communication approprié pour garantir la transparence et la sécurité des transactions. Ce travail est envisagé pour des études ultérieures.

Chapitre 5 - Simulation et étude de cas

Chapitre 5 - Simulation et étude de cas 107

5.1. Description du cadre d'étude 108

5.1.1. Contexte et problématique 108

5.1.2. Objectifs 110

5.2. Choix des politiques cibles 110

5.3. Architecture du système de mobilité du cas considéré 120

5.4. Roadmap du cas étudié 121

5.5. Analyse de la résilience 123

Synthèse du chapitre 127

Ce chapitre concerne une étude de cas basée sur une ville virtuelle. L'objectif est d'étudier la faisabilité et la pertinence des choix et propositions effectués dans ce travail de recherche. Les points suivants du cadre méthodologique proposé seront plus particulièrement abordés : le choix des politiques cibles, l'élaboration de l'architecture du système de mobilité proposé, l'élaboration de la roadmap correspondante et enfin l'analyse de sa résilience aux perturbations externes. A la section suivante, la description du cadre d'étude considéré sera présentée. A la deuxième section, un cadre d'aide au choix est proposé aux décideurs pour la sélection et l'évaluation de la durabilité d'un système de mobilité urbaine. A la troisième section, une architecture de système correspondante au choix effectué sera proposée. Cette architecture permettra ensuite d'élaborer la roadmap de déploiement du système étudié. Enfin, une analyse de la résilience du système est également proposée dans ce chapitre ainsi qu'une synthèse du chapitre.

5.1. Description du cadre d'étude

5.1.1. Contexte et problématique

L'étude de cas proposée dans ce travail, est celle d'une ville virtuelle. Comme de nombreuses autres villes dans le monde, cette ville fait face à un problème de développement urbain marqué par une forte croissance démographique qui résulte de l'attractivité économique des centres urbains. Cette ville est dotée d'un système de mobilité qui permet de desservir plusieurs communes d'arrondissements. Elle compte environs 300.000 habitants répartis sur une superficie de 100 km^2. Cette population est répartie en zone urbaine (environs 60% de sa superficie totale) et en zone rurale. La ville considérée a une densité linéaire de réseau routier d'environs 70km.

Le réseau routier mis en place dans cette ville permet de desservir trois communes et est caractérisé principalement par :

- Deux lignes de transport caractérisées par quelques points d'arrêts ;
- Un service de mobilité urbaine constitué des taxis classiques, et des véhicules personnels ;
- Un service de mobilité urbain à la demande (taxi VIP) que l'on retrouve généralement aux alentours de la gare voyageurs ;
- Un train régional qui permet de relier d'autres villes ;
- Des bus de transport interurbain exploités par des entités privées.

Le réseau de transport public est sous la responsabilité d'un Ministère en charge du transport, et est confié à une autorité organisatrice de la mobilité qui a la charge de l'entretien et de l'exploitation des infrastructures. Il est également responsable de l'application et de la mise en œuvre de la politique du Gouvernement en matière de mobilité. Ce réseau routier dont dispose la ville permet de desservir les principaux lieux d'activités de cette ville. Elle comporte :

- Un centre commercial ;
- Une gare ferroviaire ;
- Des services administratifs ;
- Des industries implantées, etc.
- Des établissements scolaires ;
- Des hôpitaux, etc. ;

A la faveur de la démocratisation de l'Internet et des smartphones, selon une enquête menée, le taux de pénétration de l'Internet est passé de 11 à 22% en quelques années. Cette situation a également favorisé l'émergence de nombreux services tels que le paiement mobile (capacité de payer un service à travers son téléphone portable), le e-commerce, l'intensification de l'utilisation des réseaux sociaux, etc. Cependant, en termes de mobilité urbaine, plusieurs problèmes ont été identifiés.

La grande majorité des principales zones d'activités de cette ville ne sont pas desservies par les transports publics conventionnels (bus de transport en commun) par exemple la gare voyageurs, les lieux de loisir, etc. ou alors, les points d'arrêts prévus étant éloignés des zones d'activités obligent les usagers à utiliser d'autres moyens supplémentaires de mobilité. Pourtant, ces zones d'activités sont fréquentées par de nombreux usagers. Aussi, le mauvais état des infrastructures routières (absence dans certaines zones), de système de régulation (feux de circulation) à tous les carrefours, et des voies non dédiées aux bus de transport en commun, obligent parfois les usagers à délaisser les modes de transports en commun afin d'éviter les congestions. Cette situation engendre de nombreuses conséquences néfastes telles quels que les nuisances sonores, l'augmentation de l'empreinte carbone, les accidents de circulations, etc.

En ce qui concerne les itinéraires, l'offre de mobilité existante ne permet pas à l'usager qui va d'un point à un autre de changer de ligne (correspondance) en utilisant le même titre de transport. Il doit à cet effet s'acquitter d'un nouveau titre de transport. Le règlement de tous les titres de transport se fait

en liquide. Pour les taxis, les règlements se font par transaction directe entre individus. Les horaires de départ et d'arrivée des bus de transport publics urbain étant très variables dus au comportement du trafic et par manque de systèmes d'information adéquats, les passagers sont en constance incertitude de leurs trajets et par conséquent une planification serait difficile.

5.1.2. Objectifs

En vue d'urbaniser la ville, afin de s'arrimer aux exigences du développement durable, de nombreux projets de renouvellements urbains ont été initiés. A cet effet, la municipalité a décidé de concevoir un nouveau système de mobilité urbaine durable, et le principal enjeu consistait à déterminer la politique cible parmi trois alternatives destinées à améliorer la mobilité dans la ville et ses alentours. Ces alternatives concernent : Politique 1 (développement d'un système d'auto-partage), Politique 2 (développement d'un système de mobilité par bus rapide) et Politique 3 (développement d'un système de mobilité multimodal). Il convient de noter que ces politiques ont été définies en fonction des besoins des citoyens de cette ville dans divers services, et que les problèmes de mobilité, en termes de développement d'infrastructures et d'équipements, sont induits.

Pour cela, une commission constituée d'un groupe d'experts de domaines différents a été mise sur pieds. Elle a pour mission de déterminer la politique cible à déployer. La commission est principalement constituée de trois experts représentants : des pouvoirs publics, des AOM et des prestataires de télécommunication. Le cadre de décision dans ce contexte est non collaboratif mais collectif.

Suivant le cadre méthodologique proposé dans ces travaux, pour aider les décideurs dans la l'élaboration du système de mobilité urbaine à déployer et l'évaluation de sa durabilité, la démarche suivante sera adoptée : (i) choix des politiques cibles (DS/AHP), (ii) proposition du modèle de mobilité urbaine durable, (iii) proposition d'une roadmap de déploiement (DSM), et (iv) analyse de la résilience du système.

5.2. Choix des politiques cibles

Dans le but de fournir aux autorités organisatrices de la mobilité une aide à la décision leur permettant de choisir la meilleure politique, en fonction des exigences de durabilité, un questionnaire a été soumis aux décideurs choisis (DM), portant sur les critères de mobilité identifiés préalablement (cf. annexe 6). Ces critères sont ceux élicités dans le chapitre 3 et représentés par la structure de l'ontologie de durabilité proposée (Moskolaï et al., 2017). Une vue globale de l'ontologie se trouve en annexe 2.

Dans le cadre de la présente étude, il apparaît nécessaire de disposer comme cela a préalablement été évoqué au chapitre 2, d'une méthode d'évaluation permettant de prendre en compte une décision collective des différents décideurs à travers l'agrégation des jugements et l'incomplétude induite par chaque évaluation. En effet, un DM devrait effectuer son évaluation de la durabilité, sur la base de sa propre expertise et de son jugement sur les politiques fournies. En outre, la méthode concernée devrait permettre de traiter de nombreux critères pour la même évaluation. Pour toutes ces raisons, nous avons adopté une approche AHP intégrée, en particulier la DS / AHP (Beynon, 2002), grâce à sa capacité à faire face à plusieurs problèmes comme cela a été décrit au chapitre 2. Cette approche se fera en deux phases : la première à travers une évaluation AHP, ensuite à travers la prise en compte de la subjectivité, des incertitudes et de l'incomplétude.

Méthode AHP

Fondamentalement, un problème basé sur AHP est résolu par les étapes suivantes : structurer le problème, obtenir des comparaisons par paires de critères, dériver le vecteur de priorités des critères, valider les résultats par un contrôle de cohérence des jugements. Dans un contexte de décision de groupe (ce qui est le cas dans le présent travail), une méthodologie spécifique est utilisée pour agréger les jugements uniques. La démarche décrite dans le chapitre 2 sera appliquée dans la suite.

Un modèle AHP est une hiérarchie de critères avec le but ou l'objectif de l'étude au plus haut niveau, les critères et sous-critères (utilisés pour choisir parmi les alternatives) dans les niveaux intermédiaires, tandis que le niveau le plus bas énumère les alternatives à évaluer. Le modèle AHP du présent travail est basé sur l'ontologie proposée décrite précédemment, et illustrée à la Figure 34, y compris les différentes politiques définies comme alternatives du problème.

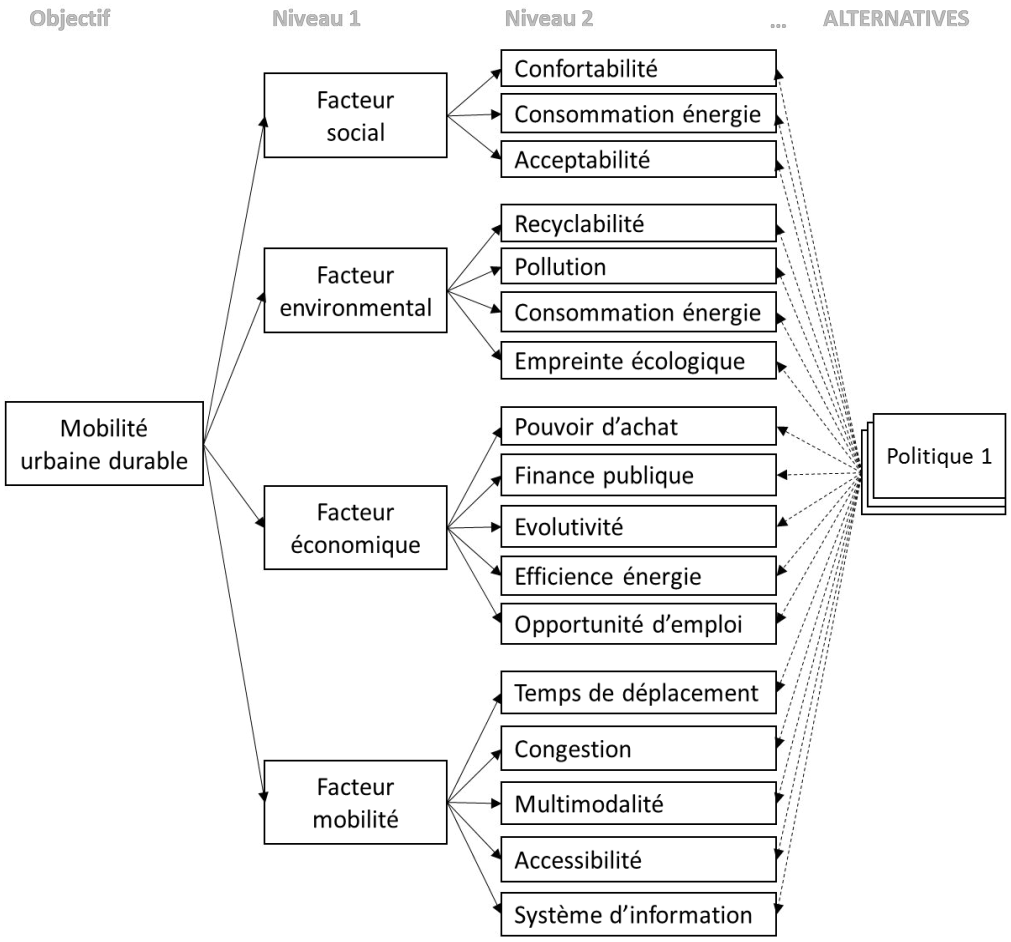


Figure 34 : Vue partielle de la structure des critères de durabilité

Comme indiqué précédemment, une étape préliminaire visant à calculer le vecteur des priorités a été réalisée, dans laquelle seuls les membres choisis de la municipalité sont invités à fournir leurs jugements. Par souci de concision, la matrice des jugements agrégés est présentée au tableau suivant (cf. Tableau 9) et une vue partielle du formulaire d'évaluation administré aux experts est présentée en Annexe 6. Dans le cadre de ce travail, la méthode de la moyenne géométrique telle que proposée par Saaty (1989) a été utilisée pour agréger les jugements individuels, qui sont calculés comme indiqué dans l'équation *(3)* du chapitre 2.

Tableau 9 : Jugements agrégés des critères en fonction de l'objectif

	Mob	Eco	Env	Soc
Mob	1,000	4,000	2,000	8,000
Eco		1,000	0,333	6,000
Env			1,000	8,000
Soc				1,000

Suivant le processus de AHP, le vecteur de priorités est calculé et nous avons obtenu le résultat suivant :

Tableau 10 : Vecteur de priorité de l'étude de cas

Critères	p_{mob}	p_{eco}	p_{env}	p_{soc}
Priorités	0, 491	0,146	0,324	0,039

Cette première étape, nous permet ainsi de mettre en œuvre la DS/AHP pour la prise en compte de la subjectivité, des incertitudes et de l'incomplétude.

Mise en œuvre DS/AHP

Nous avons effectué le processus DS/AHP, basé sur l'hypothèse que AHP traditionnel a été faite, spécifiquement à chaque niveau de la structure hiérarchique du problème, sauf le dernier niveau. Le but est de fournir le vecteur des priorités par rapport à chaque niveau de la structure hiérarchique, sauf le niveau le plus bas (dans lequel les jugements concernant les trois politiques sont faits).

Les valeurs de ces vecteurs sont appelées valeurs de priorité de critères (CPV) et sont utilisées dans le processus DS/AHP, comme détaillé dans la Figure 35. Les principales étapes présentées dans le chapitre 2 sont ainsi mises en œuvre.

Étape 1. Dans la littérature, la plupart des études ont utilisé un CPV distinct pour chaque DM. En ce qui concerne le contexte de notre étude, nous avons plutôt utilisé les mêmes valeurs, basées sur l'idée que ces valeurs pourraient influencer le choix final (au cours du processus d'élaboration des politiques) et devraient donc être les mêmes pour chaque DM. En d'autres termes, en réduisant la subjectivité du DM à ce niveau d'évaluation, nous renforçons la garantie que le choix final soit cohérent avec le point de vue politique (stratégique) des autorités. C'est pour cette raison que seuls les cadres supérieurs (experts) de la municipalité de notre étude de cas ont été impliqués dans cette étape préliminaire qui a abouti au calcul du CPV pour le niveau le plus élevé de la structure hiérarchique de notre problème.

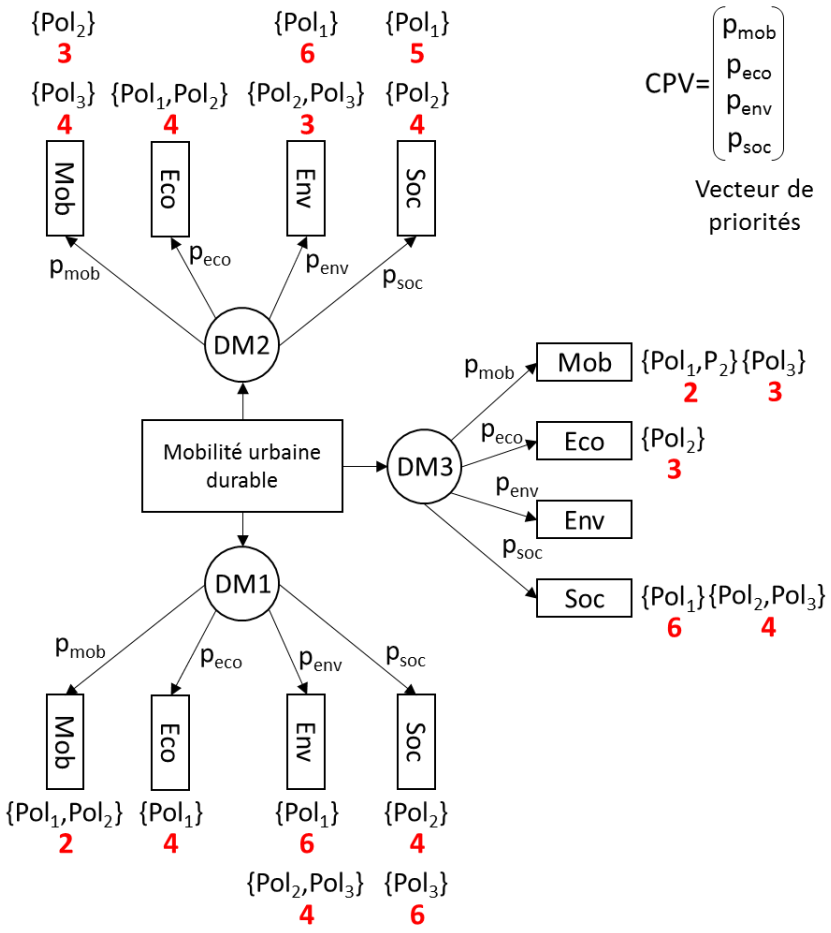


Figure 35 : Vue partielle du modèle DS/AHP pour le problème de la mobilité urbaine durable

Avec le CPV sous la main, chaque DM doit définir ses connaissances perçues sur chaque critère (comme illustré dans la Figure 35) : pour illustrer, le DM1 a identifié 1 groupe d'alternatives de décision (DA) pour le critère "mobilité" ie {Pol1, Pol2}, 1 groupe de DA pour le critère "économique" ie {Pol1}, 2 groupes de DA soit {Pol1} et {Pol2, Pol3}, et aussi 2 groupes de DA pour le critère "social" ie {Pol2} et {Pol3}. Ces ensembles de DA constituent les éléments focaux de l'ensemble des preuves fournies par DM1.

En outre, chaque groupe identifié de DA se voit attribuer une valeur d'échelle qui représente le degré de croyance du DM sur le groupe concerné (basé sur l'échelle de Saaty, comme mentionné au chapitre 2). Pour illustrer, DM1 a attribué la valeur 2 au groupe {Pol1, Pol2} en ce qui concerne le critère "mobilité", ce qui signifie qu'il n'a pu fournir des preuves que sur la politique 1 et la politique 2 avec la même croyance « faiblement modérée » c'est-à-dire la valeur 2 (le nombre inférieur à l'ensemble {Pol1, Pol2} en bas à gauche de la Figure 35).

Le modèle de la Figure 35 met également en évidence, pour les jugements du DM3, l'absence d'élément focal associé au critère "environnemental". En l'espèce, cela signifie que le DM concerné n'a pu fournir aucune preuve sur le critère "environnemental", concernant le choix de la meilleure politique ; ce qui est un avantage intéressant dans le processus d'élaboration des politiques, puisque la décision finale ne peut pas être biaisée par des jugements qui ne sont pas assez fiables.

Etape 2. En utilisant la formule de l'équation *(8)*, la BOE pour chaque DM, ainsi que leurs valeurs de *bpa* associées sont données ci-après.

Tableau 11 : BOE fourni par DM1

	BOE concernant chaque critère		
Mob	$\{Pol_1, Pol_2\}$		Θ
Eco	$\{Pol_1\}$		Θ
Env	$\{Pol_1\}$	$\{Pol_2, Pol_3\}$	Θ
Soc	$\{Pol_2\}$	$\{Pol_3\}$	Θ

Tableau 12 : *Bpa* associé pour DM1

	Valeurs *bpa*		
Mob	0.4955		0.5045
Eco	0.3687		0.6313
Env	0.4177	0.27.85	0.3039
Soc	0.0865	0.1297	0.7838

Tableau 13 : BOE fourni par DM2

	BOE concernant chaque critère		
Mob	$\{Pol_2\}$	$\{Pol_3\}$	Θ
Eco	$\{Pol_1, Pol_2\}$		Θ
Env	$\{Pol_1\}$	$\{Pol_2, Pol_3\}$	Θ
Soc	$\{Pol_1\}$	$\{Pol_2\}$	Θ

Tableau 14 : *Bpa* associé pour DM2

	Valeurs *bpa*		
Mob	0.3036	0.4048	0.2915
Eco	0.3687		0.6313
Env	0.4489	0.2245	0.3266
Soc	0.1105	0.0884	0.8012

Tableau 15 : BOE fourni par DM3

	BOE concernant chaque critère		
Mob	$\{Pol_1, Pol_2\}$	$\{Pol_3\}$	Θ
Eco	$\{Pol_2\}$		Θ
Env			Θ
Soc	$\{Pol_1\}$	$\{Pol_2, Pol_3\}$	Θ

Tableau 16 : *Bpa* associé pour DM3

	Valeurs *bpa*		
Mob	0.2538	0.3807	0.3655
Eco	0.3046		0.6954
Env			
Soc	0.1297	0.0865	0.7838

Étape 3. En utilisant la formule de l'équation *(7)*, le jugement agrégé de chaque DM a été effectué et nous avons obtenu les résultats présentés dans les tableaux 17, 18 et 19.

Sur la base de leurs jugements respectifs, il semble que tous les DM ont des choix distincts : en effet, le jugement de DM1 est en faveur de la Politique 1, alors que DM2 tend à préférer la Politique 2 et DM3 la Politique 3. Ce résultat est une pure coïncidence, et pourrait être discutable. Mais compte tenu de leurs degrés de confiance respectifs, DM1 semble plus confiant dans son jugement que DM2, qui à son tour semble plus confiant que DM3. Dans tous les cas, une telle question discutable ne rompt pas la tentative de fournir la meilleure politique en agrégeant les jugements de toutes les parties prenantes impliquées dans le processus décisionnel, puisque nous avons adopté une approche de décision collective. Dans cette perspective, une interprétation profonde des jugements de chaque DM est fournie à l'étape 4, basée sur les mesures de croyance et de vraisemblance.

Tableau 17 : Agrégation des jugements du décideur 1

DM1	
$\{Pol_1\}$	0.5469
$\{Pol_2\}$	0.1318
$\{Pol_3\}$	0.0317
$\{Pol_1, Pol_2\}$	0.0981
$\{Pol_2, Pol_3\}$	0.0916
Θ	0.0999

Tableau 18 : Agrégation des jugements du décideur 2

DM2	
$\{Pol_1\}$	0.2429
$\{Pol_2\}$	0.3412
$\{Pol_3\}$	0.2111
$\{Pol_1, Pol_2\}$	0.0526
$\{Pol_2, Pol_3\}$	0.0619
Θ	0.0901

Tableau 19 : Agrégation des jugements du décideur 3

DM3	
$\{Pol_1\}$	0.0677
$\{Pol_2\}$	0.2174
$\{Pol_3\}$	0.2792
$\{Pol_1, Pol_2\}$	0.1676
$\{Pol_2, Pol_3\}$	0.0266
Θ	0.2414

Étapes 4 et 5. Comme annoncé précédemment, dans cette étape, nous fournissons pour chaque DM, les résultats des valeurs de croyance et de plausibilité concernant chaque critère, en utilisant les équations *(5)* et *(6)*. De plus, une valeur mesurant la largeur de l'intervalle [Bel (.), Pls (.)] a été ajoutée, visant à évaluer le degré d'incertitude de chaque choix. Ces résultats sont présentés ci-dessous.

Contrairement aux résultats fournis à l'étape 3, compte tenu du degré de confiance présenté dans le Tableau 20 (mesure de la croyance), le jugement global de DM1 semble être en faveur de la politique 1 ou de la politique 2 (voir la deuxième ligne grise, au bas du tableau). Un autre regard sur la valeur de

la croyance, concernant la Politique 1, confirme que, parmi les deux, la Politique 1 est la meilleure (pour DM1), alors que le degré d'incertitude (voir la dernière colonne) semble acceptable et permet de valider le résultat inférieur à 20%.

Tableau 20 : Mesures de croyance et de vraisemblance pour le décideur 1

	$Bel(.)$	$Pls(.)$	$Pls(.) - Bel(.)$
$\{Pol_1\}$	0.5469	0.7450	0.1981
$\{Pol_2\}$	0.1318	0.4214	0.2896
$\{Pol_3\}$	0.0317	0.2232	0.1915
$\{Pol_1, Pol_2\}$	0.7768	0.9683	0.1915
$\{Pol_2, Pol_3\}$	0.2550	0.4531	0.1915

La même analyse s'applique aux jugements de DM2, ce qui tend à confirmer la préférence de la politique 2 par rapport à la politique 1, comme l'illustrent les résultats du Tableau 21.

Tableau 21 : Mesures de croyance et de vraisemblance pour le décideur 2

	$Bel(.)$	$Pls(.)$	$Pls(.) - Bel(.)$
$\{Pol_1\}$	0.2429	0.3857	0.1427
$\{Pol_2\}$	0.3412	0.5459	0.2047
$\{Pol_3\}$	0.2111	0.3632	0.1520
$\{Pol_1, Pol_2\}$	0.6368	0.7889	0.1520
$\{Pol_2, Pol_3\}$	0.6143	0.7571	0.1427

Après le calcul des mesures de croyance et de vraisemblance, tel qu'illustré dans le Tableau 22, la préférence générale de DM3 est en faveur de la politique 2 ou de la politique 3. Parmi les deux, la politique 3 semble la meilleure. Mais ce choix est discutable, car le degré d'incertitude (voir la dernière colonne du tableau) semble élevé.

Tableau 22 : Mesures de croyance et de vraisemblance pour le décideur 3

	$Bel(.)$	$Pls(.)$	$Pls(.) - Bel(.)$
$\{Pol_1\}$	0.0677	0.4767	0.4091
$\{Pol_2\}$	0.2174	0.6531	0.4357
$\{Pol_3\}$	0.2792	0.5473	0.2681
$\{Pol_1, Pol_2\}$	0.4527	0.7208	0.2681
$\{Pol_2, Pol_3\}$	0.5233	0.9323	0.4091

Afin de comprendre l'influence des jugements de DM3 sur le choix global de la meilleure politique, nous avons considéré deux cas : celui dans lequel les jugements de DM3 sont pris en compte dans l'agrégation des jugements de tous les DM (voir Tableau 23), et un autre dans lequel ils ne sont pas pris en compte (voir Tableau 24).

Étape 6. En utilisant l'associativité de l'opérateur d'agrégation des fonctions de masse, le résultat agrégé des trois jugements DM a été effectué, sur la base de la formule de l'équation *(7)*. Comme indiqué précédemment, deux cas ont été présentés afin d'analyser et d'atténuer l'influence du jugement de DM3 (dont le degré d'incertitude est élevé) sur le choix global. Leurs résultats respectifs sont présentés dans les tableaux 23 et 24.

Dans les deux cas (avec ou sans les jugements de DM3), les résultats suggèrent que le choix global est en faveur de la Politique 1 ou de la Politique 2, ce qui est logique compte tenu des résultats antérieurs sur les jugements du DA unique (c.-à-d. agrégation). De plus, le degré global d'incertitude est faible (moins de 10%).

Tableau 23 : Agrégation des jugements des décideurs y compris le décideur 3

	$Bel(.)$	$Pls(.)$	$Pls(.) - Bel(.)$
$\{Pol_1\}$	0.4788	0.5310	0.0522
$\{Pol_2\}$	0.3358	0.4252	0.0894
$\{Pol_3\}$	0.0960	0.1498	0.0538
$\{Pol_1, Pol_2\}$	0.8502	0.9040	0.0538
$\{Pol_2, Pol_3\}$	0.4690	0.5212	0.0522

Au cas où nous décidions de supprimer les jugements de DM3 (dont le degré d'incertitude a été jugé élevé), nous avons obtenu un résultat surprenant : même si le résultat global est le même, parmi les deux politiques de plébiscite, contrairement au précédent, Politique 2 est maintenant le meilleur, et les valeurs représentant le degré d'incertitude semblent plus faibles (voir la dernière colonne).

Tableau 24 : Agrégation des jugements des décideurs sans le décideur 3

	$Bel(.)$	$Pls(.)$	$Pls(.) - Bel(.)$
$\{Pol_1\}$	0.4017	0.4387	0.0370
$\{Pol_2\}$	0.4262	0.4813	0.0551
$\{Pol_3\}$	0.1171	0.1421	0.0250
$\{Pol_1, Pol_2\}$	0.8579	0.8829	0.0250
$\{Pol_2, Pol_3\}$	0.5613	0.5983	0.0370

De manière générale, un tel ajustement (suppression d'un jugement dans le processus d'agrégation) pourrait être généralisé en utilisant un DS/AHP pondéré dans lequel, en considérant certaines raisons, on peut diminuer ou augmenter l'influence des jugements de certains DM.

La matérialisation du choix des politiques se fera à travers la mise en œuvre de définition des projets pilotes. A cet effet, la politique de mobilité ciblée sera caractérisée pour une meilleure prise en compte de sa complexité.

5.3. Architecture du système de mobilité du cas considéré

Le système de mobilité urbaine de la ville considérée dans ce travail prend en compte la politique de mobilité choisie dans l'étape précédente (déploiement d'un système urbain de bus de transport rapide), et également les exigences des parties prenantes et de durabilité tel que proposé dans le cadre méthodologique (cf. Chapitre 2). Après l'instanciation du modèle de mobilité urbaine traditionnelle, l'architecture du système de mobilité urbaine suivante a été adoptée (cf. Figure 36) :

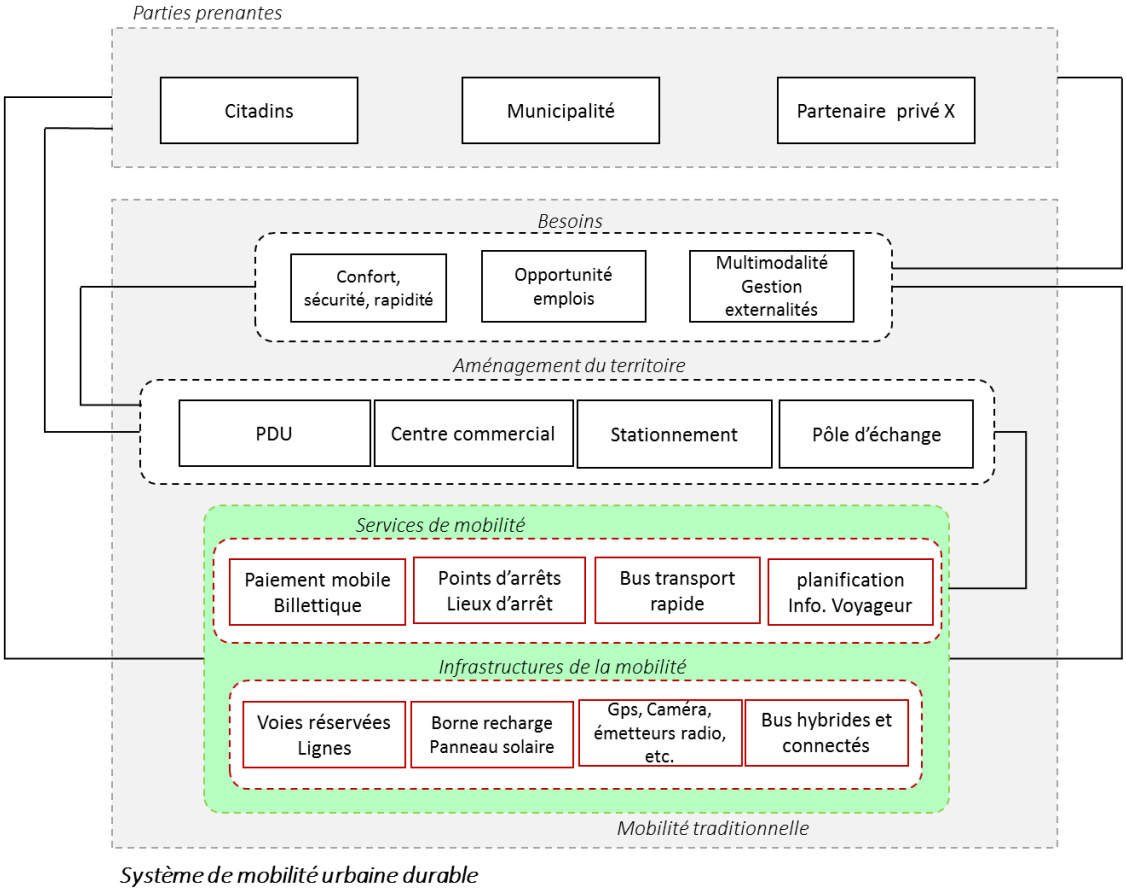


Figure 36 : Modèle du système de mobilité urbaine étudié

L'architecture considérée dans ce cas d'étude prend en compte les exigences des parties prenantes identifiées (les ménages, la municipalité et les partenaires privés), l'aménagement du territoire, les services de mobilité à mettre en œuvre ainsi que les infrastructures correspondantes. Les principaux besoins concernent : un système de mobilité confortable, sécurisé, rapide, prenant en compte la multimodalité, soucieuse de l'environnement et générant des emplois. La politique choisie sera déployée pour desservir le centre commercial de la ville selon un plan de déplacement urbain bien établit, des stationnements et des pôles d'échanges bien aménagés afin de permettre une meilleure accessibilité des services de mobilité offerts aux populations. Ces services qui concourent à déployer le système de Bus Transport Rapide, concernent : la mise en service des systèmes d'information multimodale, d'information aux voyeurs et d'aide à l'exploitation, des systèmes de billettique et de paiement par mobile. Les lignes aménagées devront être dotées de voies réservées, des points d'arrêts et lieux d'arrêts, des bornes de recharge pour véhicules hybrides connectés, des infrastructures supports aux télécommunications (GPS, caméras de surveillance, émetteurs radio, etc.), etc.

Pour sa mise en œuvre, une identification des différents composants du système est nécessaire en en vue de formuler aux décideurs des recommandations pour favoriser un déploiement coordonné et maîtrisé des solutions envisagées.

5.4. Roadmap du cas étudié

Suivant la démarche méthodologique proposée dans le chapitre 4, la DSM du système de mobilité urbaine durable considéré est proposée dans la figure ci-dessous (cf. Figure 37).

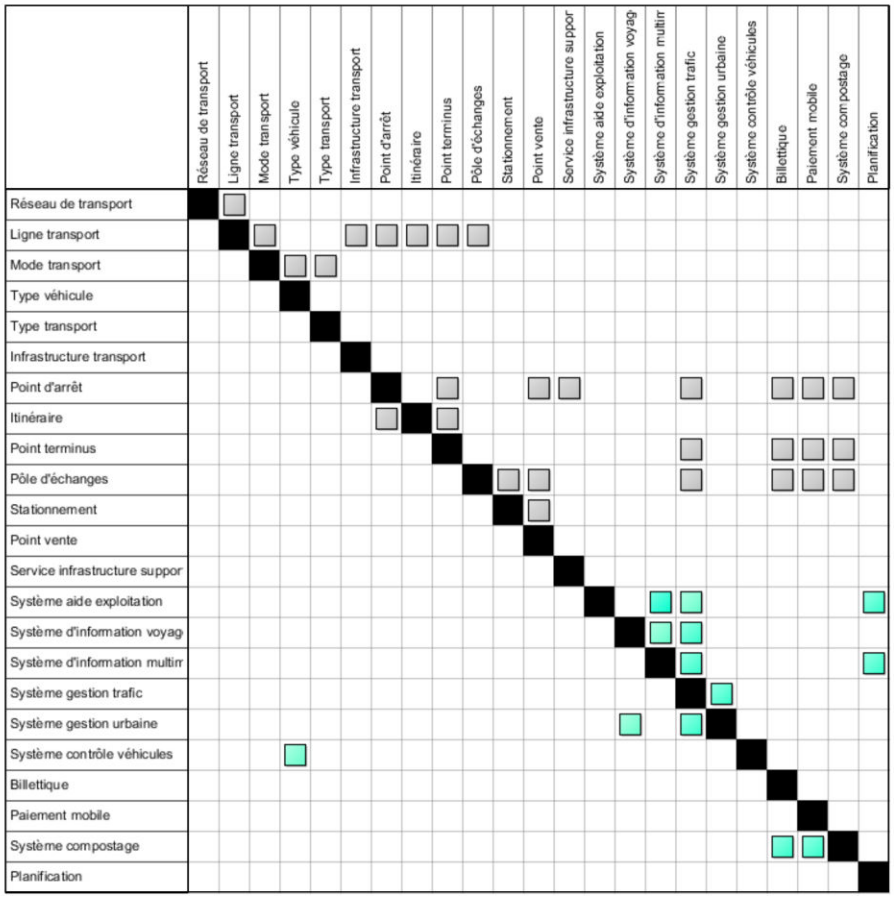


Figure 37 : DSM du système de mobilité considéré

Pour aider les décideurs dans la coordination et le déploiement maîtrisé de la politique de mobilité envisagée, l'algorithme de partitionnement a été adopté. L'algorithme de partitionnement qui concerne les DSM dynamiques tel que présenté dans le chapitre précédent, est le processus de réorganisation des lignes et des colonnes d'une DSM de sorte qu'on réduise les interactions représentant les retours en arrière. Cela revient à rendre la DSM le plus triangulaire possible. En effet, elle constitue une forme de recommandations pour les décideurs, qui peuvent de manière visuelle identifier les tâches qui peuvent se réaliser en parallèles (surtout dans le cas des systèmes comportant un nombre élevé de composants) et celles qui nécessitent une réalisation préalable d'un certain nombre de tâches. Par exemple, dans l'architecture du système proposé (cf. Figure 38), les composants type de véhicule, type de transport, infrastructures transports, points de ventes sont indépendants (peuvent être confiées à des entités indépendantes), mais sont également impliqués dans la réalisation d'autres tâches. Pour la réalisation d'un pôle d'échanges, les composants suivants doivent au préalable être conçus : points de ventes, stationnement, billettique, système de paiement mobile, système de compostage, système de gestion de trafic. Cependant cette action

n'est pas toujours synonyme de réduction de la durée globale du processus modélisé mais permet une meilleure coordination entre les différentes équipes impliquées dans la réalisation du projet et un meilleur séquencement des activités à réaliser. Il est important de noter que ce cas d'étude n'est qu'une illustration de la démarche.

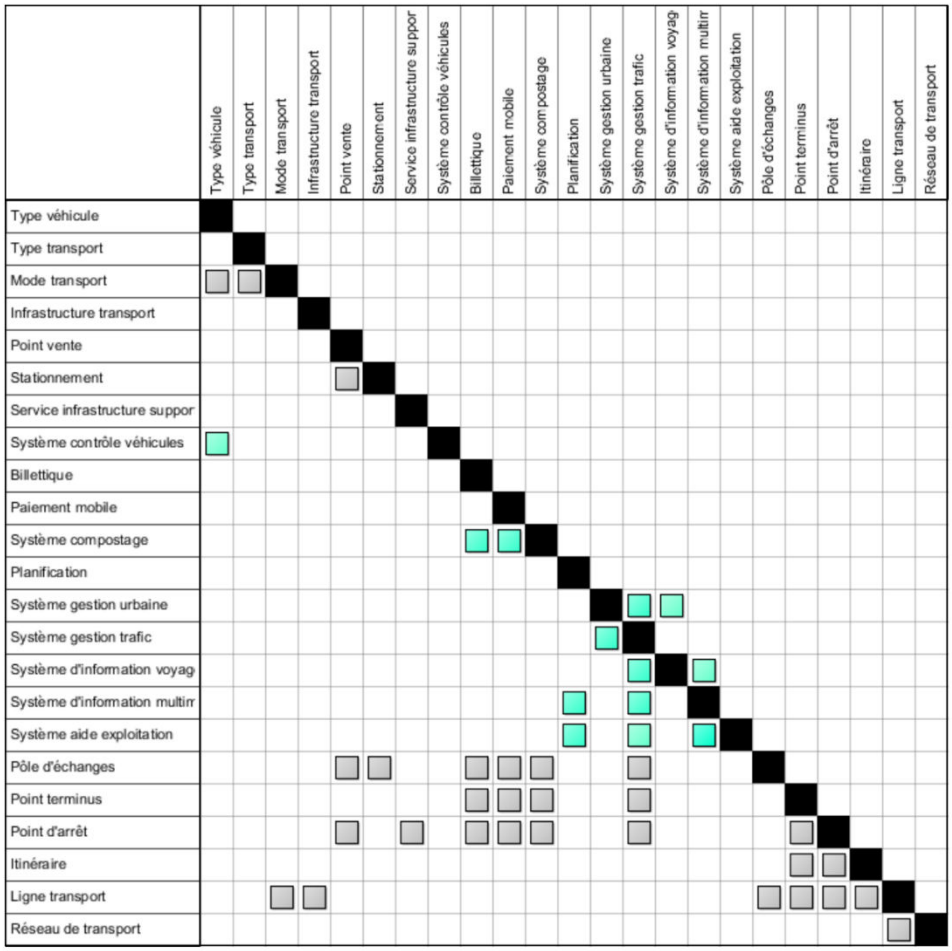


Figure 38 : Roadmap de déploiement du cas étudié

Telle que considérée dans cette étude, la conception de l'écosystème de mobilité urbaine durable prend en compte de nombreux systèmes interdépendants dont toute défaillance peut affecter l'équilibre de l'ensemble. C'est pourquoi, une analyse de la résilience du système à travers une simulation des infrastructures critiques de la mobilité urbaine en tant que système de systèmes, basé sur le modèle d'entrée-sortie inopérabilité (IIM) a été proposée.

5.5. Analyse de la résilience

La politique de mobilité urbaine durable déployée, fera face au cours de son cycle de vie à des attaques externes pouvant ainsi perturber le système. Pour analyser les performances de ce système en

prenant en compte les perturbations externes telles que : catastrophe naturelle, attaque des plateformes numériques, etc., une analyse de son comportement semble nécessaire. Dans le cadre de ces travaux, une analyse de la résilience du système face à ces perturbations a ainsi été proposée à travers un scénario choisi de notre cas d'étude.

Le scénario réalisé dans ce cas d'étude est basé sur une vision macroéconomique des interdépendances entre les secteurs d'un système de systèmes de mobilité urbaine. Comme l'illustre la Figure 39, le système de systèmes concerné reflète les interactions entre cinq secteurs industriels de la mobilité : « fournisseurs d'énergie » (A) par exemple les fournisseurs d'énergie électrique pour l'alimentation des voies ferrées ou des véhicules hybrides et électriques, « fournisseurs de réseaux de télécommunication » (B) par exemple des opérateurs téléphoniques ou fournisseurs d'accès Interent, « fournisseurs de services de réseaux » (C) par exemple des entreprises de maintenance et d'entretien du réseau, « fournisseurs de services » (D) par exemple les prestataires divers et « fournisseurs de transport » (E) par exemple une entreprise exploitante du transport. La limite du système est représentée sur la figure proposée (cf. Figure 39) avec une ligne pointillée. Les nœuds "grève du travail" et "baisse soudaine de la demande de transport" représentent deux sources de perturbation externe du système de mobilité.

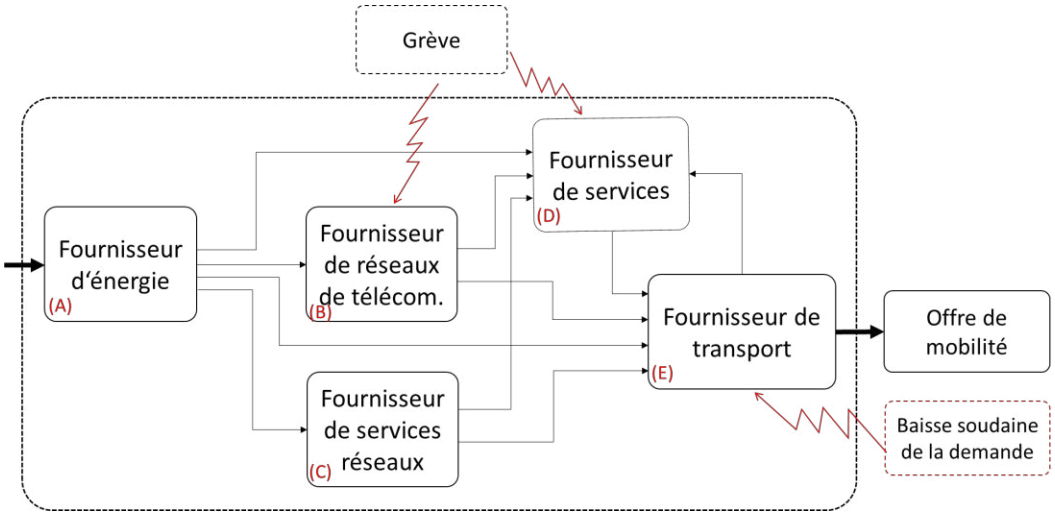


Figure 39 : Le modèle d'interdépendance d'un écosystème de mobilité urbaine

L'analyse proposée est basée sur le modèle d'entrée-sortie d'inopérabilité proposé par Haimes et Jiang (2001). Une analyse de la résilience par simulation sera également proposée.

Selon Haimes et Jiang (2001), l'inopérabilité correspond à l'incapacité d'un système à remplir ses fonctions prévues. Elle peut être provoquée par des défaillances internes ou des perturbations externes et représente donc le niveau de dysfonctionnement du système, exprimé en pourcentage du niveau de

production prévu du système. Comme proposé dans (Haimes, et al., 2005), l'inopérabilité décrit également la qualité de la fonction d'un système : un système défectueux dont la performance est de qualité dégénérée, par opposition à un système sain considéré comme partiellement fonctionnel ; par conséquent, son inopérabilité n'est pas nulle.

$$q = A^*q + c^* \Longrightarrow q = (I - A^*)^{-1}c^* \qquad (9)$$

Avec :

c^*, la perturbation de la demande, exprimée en termes de demande finale dégradée normalisée (c'est-à-dire, la demande finale habituelle moins la demande finale réelle, divisée par le niveau de production habituel) ;

A^*, la matrice d'interdépendance normalisée de la matrice de coefficients techniques de Leontief. Les éléments d'une rangée définissent le degré d'inopérabilité supplémentaire apporté par une industrie dans la colonne j à la $i^{ème}$ industrie ;

q, représente l'inopérabilité et mesure la proportion de production « non réalisée » par production planifiée (c'est-à-dire production habituelle moins production dégradée) par rapport au niveau de production habituel des secteurs industriels.

Le vecteur d'inopérabilité initial obtenu, en utilisant *(9)*, est la suivante : $q(0) = [0, 0.52, 0, 0.93, 0.98]$. Ce résultat signifie que les trois secteurs (B, D et E) impactés par les perturbations externes sont caractérisés par les inopérabilités initiales suivantes : $q_B(0) = 0.52$, $q_D(0) = 0.93$ et $q_E(0) = 0.98$. Un premier commentaire est que D et E sont les plus affectés par les perturbations externes dans ce scénario de simulation, de sorte que les efforts pour ajuster leur état pour un rétablissement complet doivent être les plus importants.

Afin d'analyser la résilience de ces trois secteurs, nous avons ensuite calculé leurs trajectoires de récupération respectives en utilisant *(10)*, comme illustré par les courbes de la Figure 40 : le secteur B est représenté par une ligne pointillée avec des carrés, D par une ligne pointillée avec des cercles et E par une ligne continue avec des triangles. Les trois autres lignes continues de la figure (avec étoile, losange fin et le signe plus) représentent trois stratégies différentes pour la reprise du secteur E. Rappelons que le taux de recouvrement d'un secteur représente la volonté des décideurs d'investir dans les actions visant à récupérer son état d'origine. Ainsi, l'idée derrière les trois courbes supplémentaires est d'analyser différentes stratégies d'investissement, visant à fournir aux décideurs politiques des idées pour optimiser leurs investissements.

$$1 - q_i(t) = 1 - e^{-k_i\left(1-a_{ii}^*\right)t} q_i(0), \forall t > 0 \qquad (10)$$

En effet, le facteur q_i détermine l'inopérabilité, la fonction de l'équation *(10)* pourrait aussi être vu comme l'opérabilité du secteur i à l'instant t, où le terme $k_i\left(1-a_{ij}^*\right)$ est appelé le paramètre de récupération. Initialement appliqué dans le domaine économique, ce modèle a été largement transposé dans le domaine de l'ingénierie pour l'analyse des défaillances en cascade, chaque secteur industriel étant considéré comme une infrastructure unique (Ouyang, 2014).

Pour le scénario actuel, le taux de récupération de chaque secteur a été calculé selon la même méthode que pour les coefficients techniques et l'intensité des perturbations externes : d'abord, prendre une valeur brute puis appliquer une simulation de Monte-Carlo.

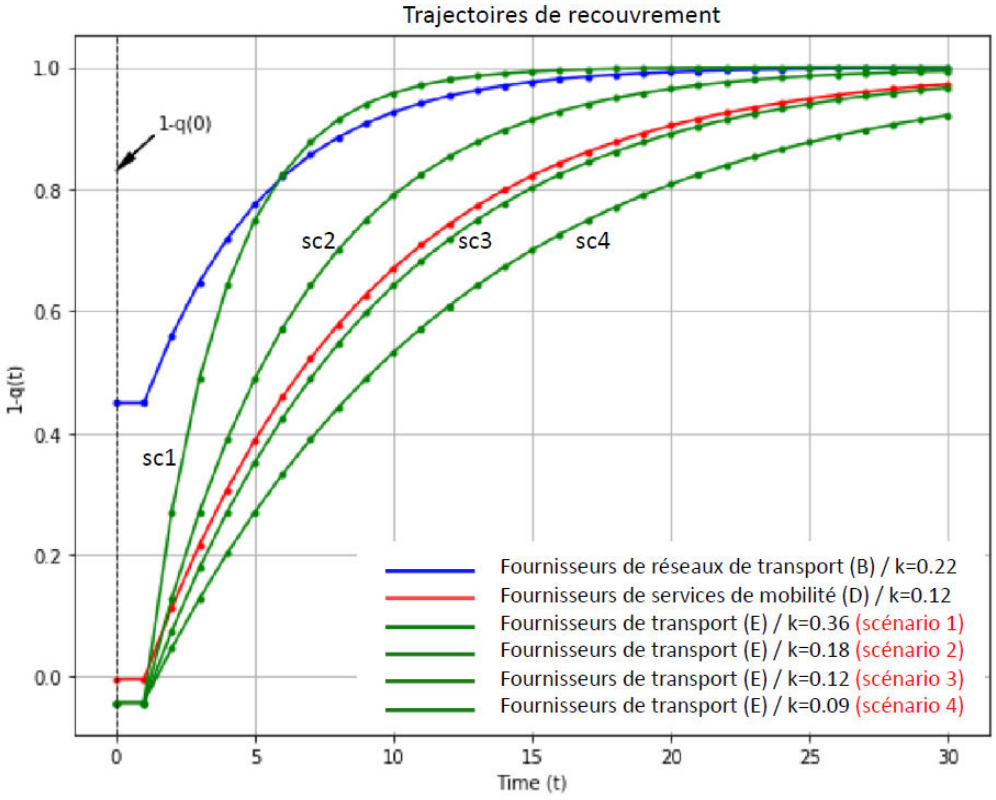


Figure 40 : Les courbes de résilience des trois secteurs impactés par des perturbations externes

Nous avons obtenu les taux de récupération suivants, qui ont ensuite été utilisés pour l'analyse de la résilience : $k_B = 0.16$, $k_D = 0.17$ et $k_E = 0.39$. Selon les courbes, il apparaît que même étant moins impactée, la raison pour laquelle B retrouve trop tard son état d'origine, c'est-à-dire vers le 25ème jour, est que son taux est très faible ($k_B = 0.16$). En revanche, E qui est le plus impacté, récupère son état d'origine le plus tôt, puisque son taux de récupération est le plus élevé ($k_E = 0.39$). Selon ces résultats,

nonobstant les différences entre les trajectoires de récupération des trois secteurs impactés, le système de systèmes de mobilité est résilient : mais il faut attendre le 28ème jour pour voir la reprise complète de tous les secteurs, à moins que les secteurs B et D n'investissent davantage pour une récupération rapide. En ce qui concerne l'analyse des trois stratégies supplémentaires pour la relance du secteur E, il est remarquable que diminuer les efforts de redressement, c'est-à-dire baisser le taux de recouvrement, soit risqué : donc, si le secteur E investit 39% des ressources nécessaires pour un rétablissement complet, il faut au plus 15 jours ; mais si ces investissements sont réduits de 39% à 20% par exemple, 10 jours supplémentaires sont nécessaires. Avec un taux de récupération de 13% ou 10%, la résilience ne se produit pas en un mois (Moskolaï et al., 2018).

Enfin, il convient de noter que ces résultats sont obtenus, sur la base d'un scénario avec une connaissance approximative du niveau réel d'influences mutuelles entre les systèmes qui caractérisent un écosystème de mobilité urbaine durable. En outre, la théorie de Leontief suppose la linéarité des relations entre les secteurs interconnectés, ce qui n'est pas vrai dans certains cas. Cependant, la mise en œuvre de la méthode d'évaluation des risques, consistant à analyser l'inopérabilité de chaque système, combinée à la simulation de Monte-Carlo pour surmonter l'incertitude, a montré des perspectives intéressantes pour les décideurs.

Synthèse du chapitre

L'étude de cas considérée dans ce chapitre a permis de mettre en œuvre le cadre méthodologique proposé dans ce travail, partant de l'évaluation de la durabilité du système de mobilité urbaine pour le choix des politiques cibles, à l'analyse de sa résilience. Tour à tour, une illustration du choix des politiques cibles à travers une méthode d'aide à la décision multicritère basée sur la méthode intégrée DS/AHP a été présentée, ensuite le choix d'architecture correspondante et la roadmap de déploiement. Ensuite, un modèle et une méthode de simulation pour l'évaluation des risques d'un système de systèmes de mobilité urbaine durable, basé sur le modèle d'entrée-sortie de l'inopérabilité dynamique a également été présenté. Les résultats obtenus, fournissent des indications intéressantes pour les décideurs afin qu'ils comprennent mieux les dommages initialement causés localement par des attaques externes et qu'ils évaluent la performance des actions d'ajustement. Différentes perspectives pourraient être envisagées, notamment pour l'analyse multicritère, la proposition d'une approche collaborative afin d'aller vers un consensus et un processus itératif. Aussi, les critères considérés pour l'évaluation sont indépendants, ce qui n'est pas toujours le cas dans la réalité et qui pose le problème de la gestion de la complexité entre les critères. En ce qui concerne les DSM, les interactions sont analysées sur la base des standards et référentiels sur une approche d'analyse binaire. Une prise en compte de la qualité des flux échangés (énergie, matière ou information) semble plus intéressante afin d'obtenir des résultats

plus précis dans l'analyse des interactions complexes. Enfin, en ce qui concerne l'analyse de la résilience, la méthode proposée gagnerait à être combinée avec des algorithmes d'apprentissage automatique afin d'extraire des connaissances (sur les coefficients techniques, les taux de récupération) des données réelles.

Conclusion générale et perspectives

Il y a quelques décennies déjà, les technologies de l'information et de la communication ont tellement renforcé l'intégration globale et temporelle des solutions de mobilité urbaine qu'elles étaient considérées comme des signes avant-coureurs d'une transformation profonde des relations sociales. La démocratisation de ces technologies et leur irruption dans les ménages ont ainsi modifié le comportement des usagers et leur rapport aux systèmes de mobilité. Ces derniers offrent aujourd'hui de potentiels de vitesse, de sécurité et de convivialité plus importants (dispositifs de régulation de vitesse, d'assistance à la conduite, système de recommandation d'itinéraires, de paiement en ligne, etc.), produisant de jour en jour une compression du temps et de l'espace, mais également une augmentation de la demande de solutions de plus en plus innovantes pour accroître leur efficacité. Pour relever ce défi, une transition lente mais constante s'est opérée vers des services de mobilité partagés (auto-partage, covoiturage, vélo en libre-service, etc.), en combinaison avec les modes traditionnels, pour permettre aux différents modes de s'unir et remplacer les véhicules personnels. Or les solutions innovantes de mobilité sont fournies pour la plupart par des entreprises privées qui en détiennent à la fois l'expertise et la technologie pour les déployer. De plus, leur gestion fonctionne encore dans un environnement trop fragmenté, chaque fournisseur voulant tirer le meilleur parti de ses propres solutions et, malgré l'évolution de ces dernières années, les systèmes de mobilité ne réunissent pas encore suffisamment d'acteurs clés pour travailler ensemble afin de favoriser l'apprentissage collectif pour développer des solutions innovantes pouvant rencontrer les attentes de toutes les parties prenantes. C'est généralement l'usager qui paie au prix fort cette fragmentation. Les fournisseurs de ces solutions en sont eux-mêmes, également affectés, car la complexité de l'utilisation d'une variété de modes et de services (différents types de paiement, d'abonnements, différentes applications pour chaque opérateur, manque d'informations intégrées, etc.) peut décourager les usagers au point d'affecter la demande et par conséquent la rentabilité espérée des investissements.

Dans ce contexte, l'intégration des différents modes de transport, couplée à la fourniture d'une mobilité porte-à-porte sans rupture, est devenue une des priorités des décideurs et des autorités organisatrices de la mobilité urbaine. Grâce à l'apport des technologies de l'information et de la communication, la mobilité en tant que service (*Mobility as a Service – MaaS*) a ainsi émergé comme l'un des nouveaux concepts de mobilité qui pourrait contribuer à la réalisation d'une mobilité sans rupture. Dans le cadre de cette thèse, nous avons proposé une démarche générale pour accompagner les décideurs des villes à concevoir et à déployer un système de mobilité urbaine durable basé sur le *MaaS*, qui prend en compte les exigences de toutes les parties prenantes (fournisseurs de services, usagers,

pouvoirs publics) et fonctionne dans un environnement distribué. Nous avons considéré deux hypothèses : (1) les pouvoirs publics assurent un rôle régulateur et de contrôle pour garantir une transparence et veiller à la satisfaction des usagers ; (2) un partenariat public/public est instauré pour permettre aux fournisseurs de solutions de jouer un rôle actif dans l'élaboration et la conduite du système de mobilité.

A cette fin, nous avons tout d'abord proposé un cadre méthodologique qui intègre le cycle de vie complet du système. Un modèle BPMN (*Business Process Modeling*) représentant la méthodologie proposée et montrant les interactions entre différents niveaux de décision (stratégique, tactique et opérationnel) a pour cela été élaboré. Pour caractériser la durabilité du système étudié, une méthode d'élicitation des connaissances s'appuyant sur des standards de la littérature considérée comme corpus a été mise en œuvre. En considérant les objectifs du système ainsi que les exigences de durabilité comme éléments d'entrée, l'étape suivante a consisté à concevoir le système étudié. Afin de gérer la complexité de ce système, une méthode d'ingénierie système permettant de prendre en compte plusieurs points de vue et plusieurs niveaux d'analyse a pour cela été mise en œuvre, conduisant à la définition d'une architecture distribuée : cette architecture met notamment en exergue les interactions entre les différentes parties prenantes (les populations, les pouvoirs publics, les entreprises partenaires), entre leurs besoins respectifs, et entre les services composant les solutions à fournir. Elle permet en outre de voir l'articulation entre le système existant et les éléments nouveaux (besoins, services, infrastructures). Pour faciliter le déploiement du système, une roadmap a ensuite été élaborée, basée sur un système de recommandations obtenu à partir de la démarche DSM (Design Structure Matrix). Une étude de cas d'une ville virtuelle a enfin été réalisée (par simulation) afin d'étudier la faisabilité de la méthodologie proposée et analyser la résilience du système face à des perturbations externes (attaque du système d'information, grève, baisse soudaine de la demande, etc.).

En guise de perspectives, il est envisagé :

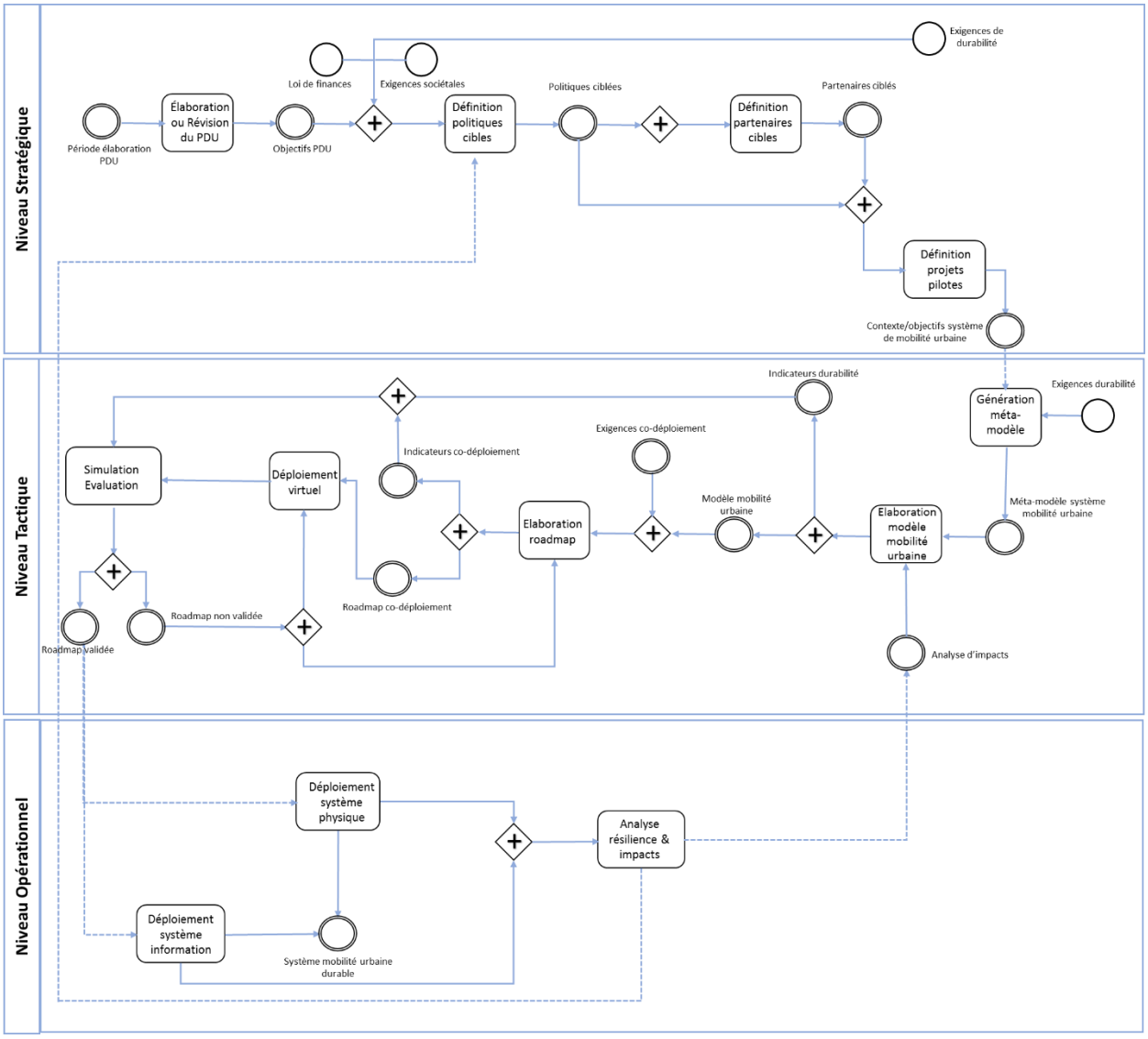
- D'améliorer l'évaluation collective réalisée dans ce travail par une évaluation collaborative afin d'aller vers un consensus et un processus itératif. Un verrou qui pourrait être considéré ici est celui de la gestion des influences mutuelles des décideurs. Aussi, les critères considérés dans ce travail sont indépendants ; ce qui n'est pas toujours le cas dans le cas réel, ce qui pose le problème de la gestion de la complexité des critères. A cette fin, une modélisation à base de réseaux de neurones est prévue. Sauf que dans cette optique le problème de disponibilité des données demeure.
- D'améliorer l'analyse des interactions complexes entre les différents composants du système en prenant en compte la qualité des flux échangés (énergie, matière, information et voire

l'emplacement géographique). Le verrou à considérer serait de trouver une agrégation de mesure des différents flux pour quantifier les interactions.

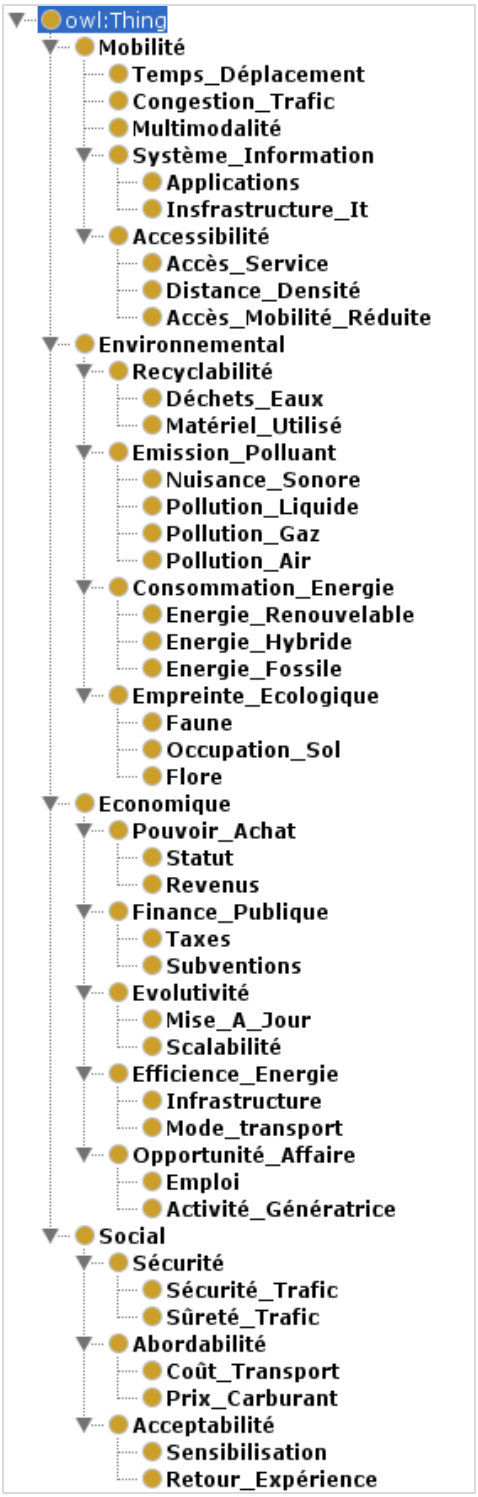
- De simuler et déployer virtuellement la roadmap de co-déploiement envisagée avant un déploiement réel du système de mobilité urbaine durable. Une approche multi-agent ou des outils de simulation tels que WITNESS ou ARENA pourraient être envisagés.
- De mettre en œuvre des méthodes appropriées pour spécifier les vues fonctionnelle et applicative de l'architecture proposée en vue de leur intégration dans le système d'information d'une ville. A cette fin, il est prévu de déployer des protocoles appropriés de communication entre les systèmes d'information en présence afin de garantir la transparence dans les transactions des usagers ainsi que la sécurité globale du système. Les technologies basées sur les *Blockchain* et les *Smart contracts* semblent être des choix pertinents.

Annexes

Annexe 1 : Cadre méthodologique de co-déploiement d'un système de mobilité urbaine durable



Annexe 2 : Hiérarchie de l'ontologie de durabilité d'un système de mobilité urbaine dans Protégé



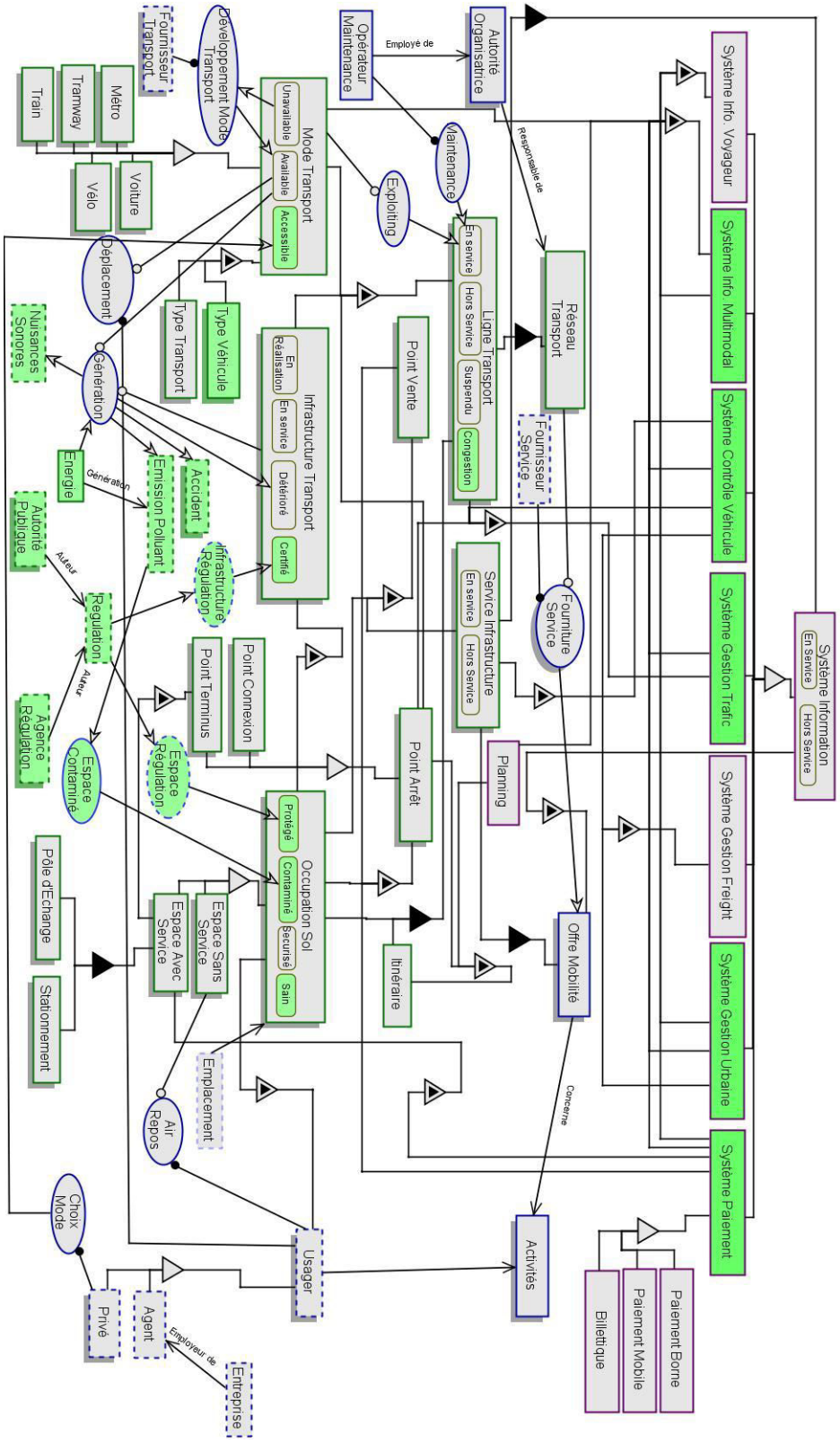
Annexe 3 : Glossaire de l'ontologie proposée

Glossaire des concepts économiques	
Concepts	***Définitions/exemples***
Opportunité d'affaire	Possibilité permanente de générer des revenus par tout représentant d'une entreprise de marketing de réseau
- Opportunité d'activités	Toute opportunité d'activité loisirs, shopping, sport ...
- Création d'emploi	Emploi régulier créé
Efficacité énergétique	Minimisation de l'utilisation d'énergie
- Mode de transport	Caractéristique de transport selon la moyenne utilisée
- Infrastructure de transport	Typologie physique et organisationnelle de base
Finances publiques	Affaires financières, questions d'argent, questions fiscales
- Taxation	Taxe prélevée
- Subventions directes	Subventions
Pouvoir d'achat	Capacité d'achat
- Emplacement	Lieu, position, site, etc.
- Revenus	Gains, salaire, rémunération, allocation, etc.

Glossaire des concepts environnementaux	
Concepts	***Définitions/exemples***
Empreintes écologiques	Impact d'un humain ou d'une communauté sur l'environnement
- Flore	Les plantes d'une région particulière
- Occupation du sol	La partie de la surface terrestre qui n'est pas couverte d'eau
- Faune	La faune d'une région particulière
Consommation d'énergie	L'utilisation d'une ressource énergétique
- Energie fossile	Combustible naturel tel que le charbon ou le gaz, formé dans le passé géologique à partir des restes d'organismes vivants
- Energie hybride	Caractère mixte de l'énergie fossile et renouvelable
- Energie renouvelable	L'énergie provenant d'une source qui n'est pas épuisée lorsqu'elle est utilisée, comme l'énergie éolienne ou solaire
Emission polluants	Emission de substance ayant des effets nocifs ou toxiques sur l'environnement
- Pollution de l'air	Effet de l'émission de polluants sur l'air
- Pollution de gaz	Effet du gaz polluant libéré dans la nature
- Pollution de liquide	Effet du liquide polluant libéré dans la nature
- Nuisances sonores	Bruit désagréable, qui provoque des perturbations générés par les engins de transport
Recyclabilité	Capacité d'un matériau à être capturé et séparé d'un flux de déchets pour être converti ou réutilisé
- Matériel utilisé	Matériel ou objet mis à contribution pour un but
- Eau	Réutilisation des eaux usées

Glossaire des concepts sociaux	
Concept	***Définitions/exemples***
Acceptabilité	Admissibilité, satisfaction
- Retour sur expérience	Information en réaction à un service, exécution d'une tâche par une personne, etc., utilisée comme base d'amélioration
- Sensibilisation	Informer, former, partager
Accessibilié	Facilité d'accès aux services de mobilité
- Distance/densité	La distance entre deux points d'arrêt en fonction du nombre d'habitants
- Accès aux services	Facilité d'accès aux services (piste réservée, disponibilité, etc.)
- Accès à mobilité réduites	Accès aux installations pour une personne à mobilité réduite
Abordabilité	L'état d'être assez bon marché pour les populations
- Prix carburant	Montant requis pour le paiement du carburant
- Cout de transport	Inclinaison vers une caractéristique particulière ou type de comportement de transport
Système d'information	Combinaison de matériel, de logiciel, d'infrastructure et de personnel formé pour faciliter la planification, le contrôle, la coordination, etc.
- Applications informatiques	Logiciel de base nécessaire pour informer les usagers du transport à travers l'informatique
- Infrastructures informatiques	Structures physiques et organisationnelles de base et facilités nécessaires pour la communication par l'informatique
Mobilité	Capacité de se déplacer librement et facilement
- Multimodalité	Implication de plusieurs modes de transport pour la réalisation d'un déplacement
- Temps de déplacement	Travel time between a starting and an end point
- Congestion	Embouteillages, encombrement routière, etc.
- Sécurité routière	La condition d'être protégé ou peu susceptible de causer un danger, un risque ou une blessure
- Sureté	L'état d'être libre hors de danger ou de menace

Annexe 4 : Méta-modèle de la mobilité urbaine durable



Annexe 5 : Méta-modèle du système de mobilité urbaine durable en langage naturel (OPL)

Réseau Transport is physical.

Réseau Transport consists of *Ligne Transport*.

Ligne Transport is physical.

Ligne Transport can be *En service*, *Hors Service*, or *Congestion*.

Ligne Transport exhibits *Mode Transport*, *Point Arrêt*, and *Transport Infrastructure*.

Mode Transport is physical.

Mode Transport can be *Indisponible*, *Disponible*, or *Accessible*.

Point Arrêt is physical.

Point Arrêt exhibits *Service Mobilité* and *Point Vente*.

Service Mobilité Concerne *Activités*.

Point Vente is physical.

Point Vente exhibits *Service Voyageur* and *Occupation Sol*.

Service Voyageur is a *Service Mobilité*.

Service Voyageur exhibits *Système Support Infrastructure*.

Système Support Infrastructure can be *En Service* or *Hors Usage*.

Occupation Sol can be *Protégé*, *Contaminé*, *Securisé*, or *Sain*.

Occupation Sol relates to *Emplacement*.

Point Arrêt relates to *Emplacement*.

Transport Infrastructure can be *In design*, *In service*, *Deteriored*, *Certified*, or *Ouf of used*.

In design is initial.

Ouf of used is final.

Transport Infrastructure exhibits *Occupation Sol* and *Système Support Infrastructure*.

Emplacement is environmental.

Calendrier consists of *Période* and *Planning*.

Planning exhibits *Fréquences*.

Autorité Organisatrice is physical.

Autorité Organisatrice Responsable de *Réseau Transport*.

Opérateur Maintenance is physical.

Opérateur Maintenance Employé de *Autorité Organisatrice*.

Opérateur Maintenance handles *Maintenance*.

Fournisseur Transport is environmental.

Fournisseur Transport handles *Développement Mode Transport*.

Regulation is environmental.

Energie Génère *Emission Polluant*.

Accident is environmental.

Emission Polluant is environmental.

Agence Regulation is environmental.

Agence Regulation Responsable de *Regulation*.

Fournisseur Service is environmental.

Fournisseur Service handles *Fourniture Service*.

Voyageur relates to *Activités*.

Service Infrastructure is a *Service Mobilité*.

Service Infrastructure exhibits *Système Contrôle Véhicule* and *Système Support Infrastructure*.

Service Exploitation is a *Service Mobilité*.

Service Exploitation exhibits *Planning* and *Système Aide Exploitation*.

Système Aide Exploitation exhibits *Système Information Voyageur* and *Système Support Infrastructure*.

Système Information Voyageur exhibits *Système Gestion Urbaine* and *Système Information Multimodal*.

Système Gestion Urbaine exhibits *Système Gestion Trafic*.

Système Information Multimodal exhibits *Système Paiement*, *Système Contrôle Véhicule*, *Système Gestion Freight*, *Système Gestion Trafic*, *Système Gestion Urbaine*, and *Système Aide Exploitation*.

Système Paiement is a *Service Voyageur*.

Système Paiement exhibits *Compostage*.

Compostage is a *Service Voyageur*.

Système Gestion Freight exhibits *Itinéraire*.

Itinéraire is physical.

Itinéraire exhibits *Planning*.

Itinéraire consists of *Point Arrêt*.

Informations is a *Service Voyageur*.

Informations exhibits *Système Gestion Trafic*, *Système Gestion Urbaine*, *Système Information Multimodal*, and *Système Information Voyageur*.

Stationnement is physical.

Pole d'Exchange is physical.

Espace Sans Service is an *Occupation Sol*.

Espace avec Service is an *Occupation Sol*.

Espace avec Service exhibits *Service Voyageur*.

Espace avec Service consists of *Stationnement*, *Pole d'Exchange*, and *Zone Activité*.

Zone Activité is physical.

Service Logistique is a *Service Mobilité*.

Service Logistique exhibits *Système Gestion Freight*.

Arrivée is a *Planning*.

Départ is a *Planning*.

Privé is a *Voyageur*.

Privé handles *Déplacement*.

Agent Entreprise is a *Voyageur*.

Maintenance yields *Ligne Transport*.

Développement Mode Transport yields *Mode Transport*.

Genération requires *Transport Infrastructure*.

Genération consumes *Energie*.

Genération yields *Transport Infrastructure*, *Accident*, and *Emission Polluant*.

Espace Regulation is environmental.

Espace Regulation consumes *Regulation*.

Espace Regulation yields *Occupation Sol*.

Infrastructure Regulation is environmental.

Infrastructure Regulation consumes *Regulation*.

Infrastructure Regulation yields *Transport Infrastructure*.

Déplacement yields *Mode Transport*.

Fourniture Service requires *Réseau Transport*.

Fourniture Service yields *Service Mobilité*.

Annexe 6 : Vue partielle de l'enquête proposée aux décideurs

Lisez les questions suivantes et cochez les tableaux de comparaison par paire : si un critère sur la gauche est plus important que celui de droite, placez votre coche à gauche, en face du niveau d'importance correspondant, sinon utilisez le côté droit.

Les valeurs intermédiaires sont autorisées, tandis que « égal » doit être utilisé lorsque les critères sont d'égale importance.

Question	***Critères***	Extrême		Très fort		Fort		Moyen		Egalité		Moyen		Fort		Très fort		Extrême	***Critères***
		9		7		5		3		1		3		5		7		9	
I.1	Mobilité																		Mobilité
I.2	Environmental																		Environmental
I.3	Economique																		Economique
I.4	Social																		Social

Références bibliographiques

ACTIF. (2003). *Architecture cadre des Transports intelligents en France - Description d'une architecture multi-agents.*

Adams, R., Jeanrenaud, S., Bessant, J., Denyer, D., & Overy, P. (2016). Sustainability-oriented innovation: a systematic review. *International Journal of Management Reviews, 18(2)*, 180-205.

Adl-Zarrabi, B. (2017). What is 'Infrastructure Physics? *Energy Procedia, 132*, 520-524.

AFIS, G. (2009). *Découvrir et comprendre l'Ingénierie Système.* Association Française d'Ingénierie Système.

AFNOR. (2013). *Identification of Fixed Objects for Public Transport (IFOPT).* NF EN 28701.

Akhavan-Rezai, E., Shaaban, M., El-Saadany, E., & Karray, F. (2016). Online intelligent demand management of plug-in electric vehicles in future smart parking lots. *IEEE Systems Journal, 10(2)*, 483-49.

AMF. (2008). *(Association des Maires de France), Indicateurs des performances des services de Transport.*

Arthur, D. L. (2018). *The Future of Mobility 3.0 : Reinventing Mobility in the era of disruption and creativity.*

Ayissi, E., & Moskolaï, N. (2017). Urban Master Data Management: Case of the YUSIIP Platform. *Handbook of Research on Geographic Information Systems Applications and Advancements*, 441-465.

Bandeira, R. A., D'Agosto, M. A., Ribeiro, S. K., Bandeira, A. P., & Goes, G. V. (2018). A fuzzy multi-criteria model for evaluating sustainable urban freight transportation operations. *Journal of Cleaner Production, 184*, 727-739.

Banister. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport policy, 15(2)*, 73-80.

Bank-World. (2007). *"Global Economic Prospects: Managing the Next Wave of Globalization.".* Washington, DC: World Bank.

Benevolo, C., Dameri, R. P., & D'Auria, B. (2016). Smart mobility in smart city. *Springer, Empowering Organizations*, 13-28.

Beynon. (2002). DS/AHP method: A mathematical analysis, including an understanding of uncertainty. *European Journal of Operational Research, 140(1)*, 148-164.

Beynon, M. (2005). A method of aggregation in DS/AHP for group decision-making with the non-equivalent importance of individuals in the group. *Computers & Operations Research, 32(7)*, 1881-1896.

Birdsall, N., Graham, C., & Pettinato, S. (2000). *Stuck in The Tunnel: Is Globalization Muddling The Middle Class?* Brookings Institution, Center on Social and Economic Dynamics WP No. 14.

Bohm, M. R., & Stone, R. B. (2004). Representing functionality to support reuse: conceptual and supporting functions. *ASME 2004 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 411-419.

Bonjour, Harmel, G., & Dulmet, M. (2008). Defining product architectures. *Extended Product and Process Analysis and Design*.

Bouyssou, T., Marchant, D., Tsoukias, A., & Pirlot, M. (2000). *Evaluation and Decision Models : a critical perspective*. Kluwer Academic,.

Brandi, H. S., Dos Santos, S. F., & Sikdar, S. K. (2017). *Measuring Sustainability Systems.*

Brandstätter, G., Gambella, C., Leitner, M., Malaguti, E., Masini, F., Puchinger, J., & Vigo, D. (2016). Overview of Optimization Problems in Electric Car-Sharing System Design and Management In Dynamic Perspectives on Managerial Decision Making. *Springer International Publishing*, 441-471.

Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). *Management science, 31(6)*, 647-656.

Büyüközkan, G., Feyzioğlu, O., & Göçer, F. (2018). Selection of sustainable urban transportation alternatives using an integrated intuitionistic fuzzy Choquet integral approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 58*, 186-207.

Buzási, A., & Csete, M. (2015). Sustainability Indicators in Assessing Urban Transport Systems. *Periodica Polytechnica, Transportation Engineering, 43(3)*, 138.

Cascetta, E. (2009). Transportation systems analysis: models and applications. *Springer Science & Business Media, (Vol. 29)*.

CEN. (2006). *Reference Data Model for Public Transport (Transmodel), EN 12896*.

CERTU. (2013). *Référentiel de données de l'offre de transport public : Guide de mise en oeuvre et de gestion*. Collection Références, numéro 136.

Chang, D. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European journal of operational research, 95(3)*, 649-655.

Chao, Y., & Zishan, M. (2013). System dynamics model of Shanghai passenger transportation structure evolution. *Procedia-Social and Behavioral Sciences, 96*, 1110-1118.

Cohen-Blankshtain, G., & Rotem-Mindali, O. (2016). Key research themes on ICT and sustainable urban mobility. *International Journal of Sustainable Transportation, 10:1*, 9-17.

Cooke, N. J. (1994). Varieties of knowledge elicitation techniques. *International Journal of Human-Computer Studies, 41(6)*, 801-849.

Corbusier, L. (1967). Elements of a doctrine of urbanism to be used as the basis of our machine-age civilization. *Orion Press*.

Cordingley, E. S. (1989). Knowledge elicitation techniques for knowledge-based systems. In Knowledge elicitation: principle, techniques and applications. *Springer-Verlag New York, Inc*, 87-175.

Costa, P. B., Neto, G. M., & Bertolde, A. I. (2017). Urban Mobility Indexes: A Brief Review of the Literature. *Transportation research procedia, 25*, 3645-3655.

Coulouris, G. F., Dollimore, J., & Kindberg, T. (2005). *Distributed systems: concepts and design*. Pearson education.

CST. (2005). *Defining sustainable transportation*. Transport Canada's Sustainable Development Strategy 2004-2006.

Da Silva, A. N., da Silva Costa, M., & Macedo, M. H. (2008). Multiple views of sustainable urban mobility: The case of Brazil. *Transport Policy, 15(6)*, 350-360.

De Paula, L. B., & Marins, F. A. (2018). Algorithms applied in decision-making for sustainable transport. *Journal of Cleaner Production, 176*, 1133-1143.

Dori, D. (1995). Object-process analysis: maintaining the balance between system structure and behaviour. *Journal of Logic and Computation, 5(2)*, 227-249.

Dori, D. (2011). *Object-Process Methodology: A Holistic Systems Paradigm*. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K.

Dori, D. (2015). *Model based systems engineering with OPM and SysML*. New York: In Springer.

Dori, D., Reinhartz-Berger, & Sturm. (2003). Developing complex systems with object-process methodology using OPCAT. *Conceptual Modeling-ER*, 570-572.

Dori, D., Renick, A., & Wengrowicz, N. (2016). When quantitative meets qualitative: enhancing OPM conceptual systems modeling with MATLAB computational capabilities. *Research in Engineering Design, 27(2)*, 141-164.

Easterly, W. (2001). "The Middle Class Consensus and Economic Development." . *Journal of Economic Growth, 6(4)*, 317–335.

Eppinger, S. D., Whitney, D. E., Smith, R. P., & Gebala, D. A. (1994). A model-based method for organizing tasks in product development. *Research in engineering design, 6(1)*, 1-13.

Eppinger, S., & Browning, T. (2012). Design structure matrix methods and applications. *MIT press*.

Fernadez, C. I. (1998). *Integration analysis of product architecture to support effective team co-location*. Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology.

Fiksel, J. (2006). Sustainability and resilience: toward a systems approach. *Sustainability Science, Practice and Policy, 2:2*, 14-21.

Giffinger, R. (2015). Smart city concepts: Chances and risks of energy efficient urban development. *International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems* (pp. 3-16). In Springer International Publishing.

Goh, Y. M., & Love, P. E. (2012). Methodological application of system dynamics for evaluating traffic safety policy. *Safety science, 50(7)*, 1594-1605.

Goldman, T., & Gorham, R. (2006). Sustainable urban transport: Four innovative directions. *Technology in society, 28(1)*, 261-273.

Goodall, W., Dovey, T., Bornstein, J., & Bonthron, B. (2017). The rise of mobility as a service-Reshaping how urbanites get around. *Deloitte Revue, 20*, 112–130.

Graindorge, T., & Breuil, D. (2016). Evaluation of the urban freight transportation (UFT) projects. *Towards Innovative Freight and Logistics, 2*, 369-384.

Gudmundsson, H., & Höjer, M. (1996). Sustainable developmen tprinciples and their implications for transport. *Ecological Economics 19*, 269–282.

Haghshenas, H., Vaziri, M., & Gholamialam, A. (2015). Evaluation of sustainable policy in urban transportation using system dynamics and world cities data: A case study in Isfahan. *Cities, 45*, 104-115.

Haimes, Y. Y., Horowitz, B. M., Lambert, J. H., Santos, J. R., Lian, C., & Crowther, K. G. (2005). Inoperability input-output model for interdependent infrastructure sectors. I: Theory and methodology. *Journal of Infrastructure Systems, 11(2)*, 67-79.

Haimes, Y., & Jiang, P. (2001). Leontief-based model of risk in complex interconnected infrastructures. *Journal of Infrastructure systems, 7(1)*, 1-12.

Halpin, T., & Bloesch, A. (1999). Data modeling in UML and ORM: a comparison. *Journal of Database Management (JDM), 10(4)*, 4-13.

Harmel, G. (2007). *Vers une conception conjointe des architectures du produit et de l'organisation du projet dans le cadre de l'Ingénierie Système*. Université de Franche-Comté: Doctoral dissertation.

Harmel, G., Bonjour, E., & Dulmet, M. (2006). Architecture des produits et des organisations: modélisation et pilotage par l'incertitude. *MOSIM'06. Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes: défis et opportunités*, (pp. 9-pages).

Hietanen, S. (2014). Mobility as a Service. *The new transport model*.

Ho, W., X., X., & Dey, P. (2010). Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review. *European Journal of operational research, 202(1)*, 16-24.

Houda, M., Khemaja, M., Oliveira, K., & Abed, M. (2010). A public transportation ontology to support user travel planning. *In Research Challenges in Information Science (RCIS)* (pp. 127-136). 2010 Fourth International Conference, IEEE.

Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. In Multiple attribute decision making. *Springer, Berlin, Heidelberg*, 58-191.

Hygounenc, E. (2015). Mise en oeuvre d'une ontologie d'ingénierie système : pour faciliter les échanges dans l'entreprise. *JIAE 2015*. Labinal Power Systems Corporate Presentation.

Idicula, J. (1995). Planning for concurrent engineering. *Gintic Institute, Singapore*.

INCOSE. (2010). *System Engineering Handbook, A guide For System Life Cycle Processes and Activities.*

Jia, Z., Deschamps, J., & Dupas, R. (2016). A negotiation protocol to improve planning coordination in transport-driven supply chains. *Journal of Manufacturing Systems, 38*, 13-26.

Jittrapirom, P., Caiati, V., Feneri, A. M., Ebrahimigharehbaghi, S., González, M. J., & Narayan, J. (2017). Mobility as a Service: a critical review of definitions, assessments of schemes, and key challenges. *Urban Planning, 2(2)*, 13.

Kiefer, C., & Behrendt, F. (2016). Smart e-bike monitoring system: real-time open source and open hardware GPS assistance and sensor data for electrically-assisted bicycles. *IET Intelligent Transport Systems, 10(2)*, 79-88.

Kumara, P., Manoranjan, P., & Mansha, S. (2005). Advanced traveller information system for hyderabad city. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 6(1)*, 26-37.

Kusiak, A., Boe, W. J., & Cheng, C. (1993). Designing cellular manufacturing systems: Branch-and-bound and A∗ approaches. *IIE transactions, 25(4)*, 46-56.

Le Moigne, J. L. (1990). *La modélisation des systèmes complexes*. Paris: Collection AFCET Systèmes, Dunod.

Litman, T. (2017). *Developing Indicators for comprehensive and Sustainable transport planning.*

Luzeaux, D., & Ruault, J. (2013). *L'ingénierie système : 100 questions pour comprendre et agir.* AFNOR EDITION.

Luzeaux, D., Ruault, J. R., & Wippler, J. L. (2015). Introduction à l'ingénierie système - Mise en oeuvre. *Techniques de l'Ingénieur, Réf: S7301 V1*.

Lyons, G. (2016). Getting smart about urban mobility–aligning the paradigms of smart and sustainable. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*.

Mardani, A., Jusoh, A., & Zavadskas, E. (2015). Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications–Two decades review from 1994 to 2014. *Expert Systems with Applications, 42(8)*, 4126-4148.

Mardani, A., Zavadskas, E. K., Khalifah, Z., Jusoh, A., & Nor, K. M. (2016). Multiple criteria decision-making techniques in transportation systems: a systematic review of the state of the art literature. . *Transport, 31(3)*, 359-385.

Memon, M., Archimède, B., & Letouzey, A. (2013). Planification des activites de transport d'une entreprise 3PL par une approche multi-agent. *CIGI 2013*. La Rochelle, France.

Montgomery M. R., Stren R., Cohen B., & Reed H. E. (2004). *Cities Transformed: Demographic Change and Its Implications in the Developing World*. Washington DC.

Moskolaï, N. J., Houé, R. N., & Archimède, B. (2015). Cadre méthodologique de co-déploiement des systèmes physique et d'information: contexte de la gestion durable du transport dans les pays en voie de développement. *11e Congres International de Genie Industriel – CIGI2015*. Québec, Canada.

Moskolaï, N., Houé, N., Archimède, B., & Nlong, J. (2017). Sustainability assessment of a transportation system under uncertainty: an integrated multicriteria approach. *The International Federation of Automatic Control* (pp. 7742-7747). IFAC Proceedings.

Moskolaï, N., Houé, N., Fouda, N., & Archimède, B. (2018). A simulation model for risk assessment in a smart mobility ecosystem based on the inoperability input-output theory. *SummerSim-SCSC 2018, July 9-12*. Bordeaux, France.

Murphy, Kevin, M., Andrei, Shleifer, & Robert, W. V. (1989). Income Distribution, Market Size and Industrialization. *Quarterly Journal of Economics 104 (3)*, 537-564.

Narayanaswami, S. (2017). Urban transportation: innovations in infrastructure planning and development. *International Journal of Logistics Management, The, 28(1)*.

Ouyang, M. (2014). Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. *Reliability engineering & System safety, 121*, 43-60.

Pérez, J. C., Carrillo, M. H., & Montoya-Torres, J. R. (2015). Multi-criteria approaches for urban passenger transport systems: a literature review. *Annals of Operations Research, 226(1)*, 69-87.

Perra, V. M., Sdoukopoulos, A., & Pitsiava-Latinopoulou, M. (2017). Evaluation of sustainable urban mobility in the city of Thessaloniki. , . *Transportation research procedia, 24*, 329-336.

Raedts, I., Petkovic, M., Usenko, Y. S., van der Werf, J. M., Groote, J. F., & Somers, L. J. (2007). Transformation of BPMN Models for Behaviour Analysis. *MSVVEIS, 2007*, 126-137.

Richardson, B. C. (2005). Sustainable transport: analysis frameworks. *Journal of Transport Geography, 13(1)*, 29-39.

Roy, B. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Economica.

Roy, B., & Bertier, P. (1971). La méthode ELECTRE II : une méthode de classement en prédence de critères multiples.

Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process.* . New York : McGraw-Hill International.

Saaty, T. L. (1989). Group decision making and the AHP. In The analytic hierarchy process. *Springer, Berlin, Heidelberg*, 59-67.

Saelens, B. E., Sallis, J. F., & Frank, L. D. (2003). Environmental correlates of walking and cycling: findings from the transportation, urban design, and planning literatures. *Annals of behavioral medicine, 25(2)*, 80-91.

Shiau, T. A., Huang, M. W., & Lin, W. Y. (2015). Developing an indicator system for measuring Taiwan's transport sustainability. *International Journal of Sustainable Transportation, 9(2)*, 81-92.

Smets, P. (1991). Varieties of ignorance and the need for well-founded theories. *Information Sciences, 57*, 135-144.

Smith, T. W., Axon, C., & Darton, R. (2013). A methodology for measuring the sustainability of car transport systems. *Transport Policy, 30*, 308-317.

Sosa, M. E., Eppinger, S. D., & Rowles, C. M. (2004). The misalignment of product architecture and organizational structure in complex product development. *Management science, 50(12)*, 1674-1689.

Stead, D. (2016). Identifying key research themes for sustainable urban mobility. *International Journal of Sustainable Transportation, 10:1*, 1-8.

SteadieSeifi, M., Dellaert, N., & Woensel, T. V. (2014). *A multimodal network flow problem with product quality preservation, transshipment, and asset management.* Technische Universiteit Eindhoven.

Tiwari, G., & Jain, D. (2012). Accessibility and safety indicators for all road users: case study Delhi BRT. *Journal of Transport Geography, 22*, 87-95.

UN - DESA. (2014). *(United-Nations) World Urbanization Propsects.*

Un-Habitat. (2013). *Planning and design for sustainable urban mobility: Global report on human settlements 2013*. Routledge.

Vafa-Arani, H., Jahani, S., Dashti, H., Heydari, J., & Moazen, S. (2014). A system dynamics modeling for urban air pollution: A case study of Tehran, Iran. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 31*, 21-36.

Wang, J., Lu, H., & Peng, H. (2008). System dynamics model of urban transportation system and its application. *Journal of Transportation Systems engineering and information technology, 8(3)*, 83-89.

Wang, Y., Chau, C. K., Ng, W. Y., & Leung, T. M. (2016). A review on the effects of physical built environment attributes on enhancing walking and cycling activity levels within residential neighborhoods. *Cities, 50*, 1-15.

Warfield, J. N. (1973). Binary matrices in system modeling. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 3(5)*, 441-449.

WBCSD. (2016). *Sustainable Mobility Project 2.0.* India: Project Report for the city of Indore.

Wegener, M. (1994). Operational Urban Models State of the Art. *Journal of the American Planning Association, 60:1*, 17-29.

Wirth, L. (1938). Urbanism as a Way of Life. *American journal of sociology, 44(1)*, 1-24.

Yüksel, I. (2012). Developing a multi-criteria decision making model for PESTEL analysis. *International Journal of Business and Management, 7(24), 52*.

Résumé/Abstract

Titre : Contribution à la conception d'un système de mobilité urbaine durable : de l'élicitation des connaissances à l'architecture distribuée du système

Résumé

Un des fondements de l'Ingénierie Système réside dans la compréhension et la formulation des exigences de différentes parties prenantes pour mieux maîtriser et contrôler la complexité du système à concevoir. L'évaluation des performances du système nécessite par ailleurs la prise en compte des expertises interdisciplinaires qui peuvent être incertaines, voire incomplètes. La prise en compte des interdépendances entre plusieurs domaines d'activité dans la conception et le déploiement d'un système de mobilité urbaine durable est un bon exemple, qui reflète la problématique de l'élicitation des connaissances pluridisciplinaires, puis de leur utilisation dans la définition d'une architecture distribuée. Le renouveau de la mobilité urbaine a en effet fait émerger des alternatives aux déplacements habituels, faisant place à la mobilité douce, à l'usage raisonnée des véhicules personnels, à la multimodalité et à l'inter-mobilité. Dans ce contexte, la convergence tend à s'opérer vers des plateformes numériques offrant des services variés, à la demande, adaptés aux besoins immédiats des usagers. Ces services sont généralement développés par des acteurs du secteur privé qui détiennent à la fois l'expertise et la technologie pour les déployer. Il s'agit donc, pour les pouvoirs publics considérés comme organe de contrôle et de régulation de la mobilité, de définir quelles infrastructures et quels services offrir et selon quelles modalités. Le travail de recherche effectué dans cette thèse vise à proposer puis valider, une démarche générale pour accompagner les décideurs des villes dans la conception et la mise en place des solutions de mobilité du futur. Un cadre méthodologique prenant en compte l'aide au choix de politiques et de partenaires cibles a pour cela été proposé, basé sur une méthode d'analyse multicritère, dans un cadre de décision collective et sous incertitude. Un méta-modèle d'un système de mobilité durable a ensuite été élaboré, à partir des connaissances élicitées d'un ensemble de standards et référentiels, de même qu'une architecture distribuée du système. Afin d'étudier la faisabilité de l'implémentation de cette architecture, en considérant le point de vue de l'aide à la décision, une roadmap de mise en œuvre a enfin été proposée, basée sur un système de recommandations visant à optimiser la réalisation de projets de mobilité nouveaux.

Mots clés : Mobilité urbaine, mobilité intelligente, système durable, ingénierie système, décision collective, décision multicritère.

Title: Contribution to the design of a sustainable urban mobility system: from the elicitation of knowledge to the distributed architecture of the system

Abstract

One basics of System Engineering consists in understanding and formalizing the requirements of different stakeholders in order to better control and handle the complexity of the system to be designed. The evaluation of the system's performance also requires taking into account interdisciplinary expertise, which may be uncertain or ill-known. The consideration of interdependencies among several fields of activity in the design and deployment of a sustainable urban mobility system is a good example, which reflects the issue of the elicitation of multidisciplinary knowledge, then its use in the definition of a distributed architecture. The renewal of urban mobility has indeed given rise to alternatives to the usual forms of travel, leading to soft mobility, rational use of personal vehicles, multi-modality and inter-mobility. In such a context, convergence is tending towards digital platforms offering various services, on demand adapted to the immediate needs of end-users. These services are usually developed by private companies who have both the expertise and the technology to deploy them. It is therefore a matter for the public authorities, considered as a regulating and controlling organism of the urban mobility, to define which infrastructures and which services to offer and under which conditions. The present research work aims at proposing and validating a general method to assist city decision-makers in the design and implementation of mobility solutions for the future. A methodological framework taking into account a support in the choice of targeted policies and partners was proposed for this purpose, based on a multi-criteria analysis method, within a group decision-making framework and under uncertainty. A meta-model of a sustainable mobility system was then elaborated, based on the knowledge elicited from a set of standards, as well as a distributed architecture of the system. In order to study the feasibility of implementing this architecture, from a decision support point of view, a deployment roadmap was finally proposed, based on a system of recommendations aiming at optimizing the implementation of new mobility projects.

Keywords: Urban mobility, intelligent mobility, sustainable system, system engineering, group decision, multi-criteria decision.