



HAL
open science

Modélisation et génération d'itinéraires contextuels d'activités urbaines dans la ville

Ines Jguirim

► **To cite this version:**

Ines Jguirim. Modélisation et génération d'itinéraires contextuels d'activités urbaines dans la ville. Informatique [cs]. Université de Bretagne Occidentale (UBO), Brest, 2016. Français. NNT: . tel-01419081v1

HAL Id: tel-01419081

<https://hal.science/tel-01419081v1>

Submitted on 21 Dec 2016 (v1), last revised 27 Jun 2017 (v2)

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

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

THÈSE / UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

Mention : Informatique

École Doctorale des Sciences de la Mer

présentée par

Ines JGUIRIM

Préparée à

Institut de Recherche de l'Ecole Navale (IRENav)

Modélisation et génération d'itinéraires contextuels d'activités urbaines dans la ville

Thèse soutenue le 28 novembre 2016

devant le jury composé de :

Alain Bouju,

Maître de conférences-HDR, L3I Université de la Rochelle / Rapporteur

Paule-Annick Davoine

Maître de conférences-HDR, LIG Universitaire de Saint-Martin-d'Hères /
Rapporteur

Laurent Nana

Professeur des universités, Université de Bretagne Occidentale / *Examineur*

Yvon Kermarrec

Professeur à l'Institut Mines Télécom, TELECOM Bretagne/ *Examineur*

Christophe Claramunt

Professeurs des Universités - Directeur de l'IRENav - Ecole Navale de Brest /
Directeur de thèse

David Brosset

Maître de conférences - IRENav - Ecole Navale de Brest / Encadrant

N° d'ordre : 5545

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

Mention *Informatique*

par

Ines JGUIRIM

Modélisation et génération d'itinéraires contextuels d'activités urbaines dans la ville

soutenue le - - Novembre 2016 devant la commission d'examen :

Composition du Jury

- Rapporteurs* : Dr. Alain Bouju, Maître de conférences - HDR, Université de La Rochelle
Dr. Paule-Annick Davoine, Maître de conférences - HDR, Université de Saint-Martin-d'Hères
- Examineurs* : Pr. Laurent Nana, Professeur des universités, Université de Bretagne Occidentale
Pr. Yvon Kermarrec, Professeur à l'Institut Mines Télécom, TELECOM Bretagne
- Encadrant* : Dr. David Brosset, Maître de conférences, IRENav Brest
- Directeur* : Pr. Christophe Claramunt, Professeur des universités, IRENav Brest

Table des matières

| | |
|--|-------------|
| Table des matières | i |
| Table des figures | v |
| Liste des tableaux | viii |
| 1 Introduction générale | 4 |
| 1.1 Contexte général | 5 |
| 1.2 Problématique de la recherche | 6 |
| 1.3 Objectifs de la thèse | 6 |
| 1.4 Structure du manuscrit | 7 |
| 2 Etat de l’art | 10 |
| 2.1 Structure spatiale de la ville | 11 |
| 2.1.1 Les caractéristiques spatiales de la ville | 11 |
| 2.1.2 La modélisation de l’espace urbain | 13 |
| 2.1.3 L’analyse spatiale | 18 |
| 2.2 Mobilités dans la ville | 21 |
| 2.2.1 Les caractéristiques spatio-temporelles de la mobilité | 23 |
| 2.2.2 Modélisation de la mobilité urbaine | 27 |
| 2.2.2.1 La typologie du système du transport | 28 |
| 2.2.3 Analyse spatiale des flux de mobilité | 31 |
| 2.2.4 Les limites du modèle des déplacements | 31 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.3 | Activités dans la ville | 33 |
| 2.3.1 | Les approches et les théories à base d'activités | 33 |
| 2.3.2 | Modèles d'activités mobiles urbaines dans la ville | 35 |
| 2.3.3 | Applications basées sur les activités | 38 |
| 2.3.4 | L'analyse spatiale des activités urbaines | 42 |
| 2.4 | Synthèse et questions de recherche | 42 |
| 3 | Modélisation de la structure et de l'usage de la ville | 45 |
| 3.1 | Un modèle structurel de système de transport | 47 |
| 3.1.1 | Modèle structurel du réseau piétonnier | 48 |
| 3.1.2 | Le modèle structurel de transport routier motorisé | 48 |
| 3.1.3 | Le modèle structurel du réseau ferroviaire | 50 |
| 3.2 | Modélisation de la mobilité urbaine | 50 |
| 3.2.1 | Modélisation de la mobilité monomodale | 50 |
| 3.2.2 | Modèle de mobilité multimodale | 52 |
| 3.2.2.1 | La planification de réseau de transport multimodal | 53 |
| 3.2.2.2 | L'utilisation du transport multimodal | 53 |
| 3.2.2.3 | Les approches de modélisation de la mobilité multimodale | 55 |
| 3.2.3 | Approche multi-échelle pour la modélisation de la mobilité multimodale | 58 |
| 3.3 | Modélisation des activités urbaines | 62 |
| 3.3.1 | Modèle à base d'activités urbaines | 63 |
| 3.3.2 | Modèle conceptuel à base d'activités | 69 |
| 3.3.2.1 | Cadre contextuel d'une activité urbaine | 69 |
| 3.3.2.2 | Modèle conceptuel proposé | 70 |
| 3.4 | Conclusion | 73 |
| 4 | Génération d'itinéraires multimodaux des activités | 75 |
| 4.1 | Problématique | 76 |
| 4.2 | Approche proposée de génération d'itinéraires multimodaux | 80 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.2.1 | Principe du système de génération d'itinéraires | 80 |
| 4.2.2 | Méthode de génération d'itinéraires | 83 |
| 4.3 | Enrichissement des activités | 88 |
| 4.3.1 | Collecte de données | 89 |
| 4.3.2 | Fouille de données et extraction de connaissances | 89 |
| 4.3.2.1 | Les techniques de fouille de données | 89 |
| 4.3.2.2 | Fouille de données ENTD | 90 |
| 4.3.3 | Représentation des connaissances | 94 |
| 4.4 | Conclusion | 95 |
| 5 | Implémentation et Expérimentation | 97 |
| 5.1 | Outil de génération d'itinéraires des activités | 99 |
| 5.1.1 | Module de construction de réseaux | 99 |
| 5.1.2 | Module d'extraction et de gestion des connaissances | 101 |
| 5.1.3 | Module de génération d'itinéraires | 101 |
| 5.2 | Expérimentation | 102 |
| 5.2.1 | Définition de l'activité | 103 |
| 5.2.2 | Génération d'itinéraires | 107 |
| 5.2.3 | Validation de la méthode | 120 |
| 5.3 | Analyse spatiale des activités | 123 |
| 5.4 | Conclusion | 126 |
| 6 | Conclusion | 128 |
| 6.1 | Bilan | 129 |
| 6.2 | Perspectives | 130 |
| | Bibliographie | 132 |
| | Annexes | 151 |
| A | Construction de super-réseau | 152 |

| | |
|---|------------|
| A.1 Réseaux mono-modaux | 152 |
| A.2 Création de super-réseau | 154 |
| B Code de génération d'itinéraire | 156 |
| C Règles de planification d'activité | 161 |
| D L'acquisition des tweets | 162 |
| E Résultats d'analyse spatiale classique | 165 |

Table des figures

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Les dimensions d'étude de la ville Manheim [1979] | 5 |
| 1.2 | Les couches conceptuelles de la ville. | 7 |
| 1.3 | Le plan du manuscrit. | 8 |
| 2.1 | Les relations topologiques de RCC-8 - Randell et al. [1992]. | 12 |
| 2.2 | Les éléments du modèle de Lynch | 13 |
| 2.3 | Le modèle des lieux centraux | 14 |
| 2.4 | La théorie de la zone concentrique Hannerz [1983] Haggett [1965] | 15 |
| 2.5 | La théorie de secteurs Hannerz [1983] Haggett [1965] | 16 |
| 2.6 | Modèle multiples noyaux Hannerz [1983] Haggett [1965] | 16 |
| 2.7 | Le graphe d'un espace urbain de la ville | 18 |
| 2.8 | Modélisation de l'espace urbain par la syntaxe spatiale Jiang et al. [2000] | 19 |
| 2.9 | Typologie des systèmes de transport Mérenne and Bouvry [1995] | 23 |
| 2.10 | la structure d'un chemin spatial dans une ville | 24 |
| 2.11 | Les relations temporelles Allen and Hayes [1989] | 25 |
| 2.12 | la granularité temporelle Dyreson et al. [2000] | 26 |
| 2.13 | Les concepts de chemin et de prisme du Time Geography Hagerstrand [1976] | 34 |
| 2.14 | Le modèle de la théorie de l'activité intégrant l'espace et le temps Kofod-Petersen and Cassens [2006] | 35 |
| 2.15 | Le diagramme d'activité proposé par Frihida et al. [2004] | 36 |
| 2.16 | Le modèle d'activité physique et virtuel de Shaw et Yu [2009] | 37 |
| 2.17 | Modèle ontologique proposé par Gu et al. [2004] | 38 |

| | |
|---|----|
| 2.18 Représentation ontologique du modèle de contexte proposé par Kofod-Petersen [2006] | 38 |
| 2.19 Le modèle d'accessibilité d'activité proposé par Geurs and Van Wee [2004] | 40 |
| 3.1 L'approche proposée pour la modélisation multidimensionnelle de la ville. | 47 |
| 3.2 Approche duale pour la modélisation de réseau piéton. | 49 |
| 3.3 le réseau de mobilité diachronique et synchronisé. | 51 |
| 3.4 La mobilité multimodale dans la ville. | 54 |
| 3.5 Les différentes parties d'un déplacement multimodal. | 54 |
| 3.6 Exemples d'hypergraphe. | 57 |
| 3.7 Un super-réseau de 3 sous-réseaux (couches). | 58 |
| 3.8 Le modèle de transport multimodal basé sur le super-réseau Sheffi [1985]. | 58 |
| 3.9 Exemple d'une mobilité intra-modale modélisée par un super-réseau. | 59 |
| 3.10 Exemple d'une inter-modalité entre deux modes de transport public. | 60 |
| 3.11 Exemple d'une mobilité intermodal entre un mode privé et un mode public. | 61 |
| 3.12 un super-réseau multimodal. | 62 |
| 3.13 Les trajectoires brutes dans un mouvement. | 64 |
| 3.14 Les trajectoires sémantiques dans un cadre de tourisme dans la ville de Monastir. | 64 |
| 3.15 La réalisation d'une activité dans l'Espace-Temps. | 66 |
| 3.16 L'enchaînement d'une activité à base de transport multimodal. | 68 |
| 3.17 Une modélisation multimodale d'une activité urbaine. | 69 |
| 3.18 Le besoin d'un modèle conceptuel pour représenter les contextes de l'activité. | 71 |
| 3.19 Modèle de classe UML des activités urbaines | 72 |
| 3.20 La typologie des POI. | 74 |
| 4.1 Processus de génération d'itinéraires d'une activité | 77 |
| 4.2 Conditions interagissant dans le choix des itinéraires | 78 |
| 4.3 Méthode de génération d'itinéraires | 81 |
| 4.4 Principe de l'algorithme de recherche d'itinéraire | 86 |
| 4.5 Exemple d'un FP-tree sur les POI | 93 |
| 4.6 Architecture de système de gestion de connaissances | 94 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.1 | Les modules de système de génération d'itinéraires | 99 |
| 5.2 | Diagramme de séquence par le système de génération d'itinéraires | 102 |
| 5.3 | Le temps de visite des magasins | 103 |
| 5.4 | Le temps de visite des restaurants | 104 |
| 5.5 | Les centres des clusters de temps de visite des restaurants | 104 |
| 5.6 | Les groupes des données pour la durée de marche par profil | 105 |
| 5.7 | Les centres de clusters des données de temps d'attente | 105 |
| 5.8 | Les motifs séquentiels de visites de POI | 106 |
| 5.9 | Les réseaux d'activité de tourisme de la ville de Paris pour les quatre profils | 109 |
| 5.10 | Les réseaux d'activité de shopping de la ville de Paris pour les quatre profils | 111 |
| 5.11 | Les réseaux d'activité de tourisme de la ville de Lyon pour les quatre profils | 112 |
| 5.12 | Les réseaux d'activité de shopping de la ville de Lyon pour les quatre profils | 113 |
| 5.13 | Les réseaux d'activité de tourisme de la ville de Nantes pour les quatre profils | 115 |
| 5.14 | Les réseaux d'activité de shopping de la ville de Nantes pour les quatre profils | 116 |
| 5.15 | Les réseaux d'activité de tourisme de la ville de Lille pour les quatre profils | 118 |
| 5.16 | Les réseaux d'activité de shopping de la ville de Lille pour les quatre profils | 119 |
| 5.17 | Les tweets associés à l'activité de tourisme sur le réseau d'activité généré par le système pour l'activité de tourisme | 122 |
| 5.18 | Application des opérateurs de couverture sur les réseaux d'activité des villes étudiées | 126 |
| 5.19 | Les valeurs de la distance de couverture associées aux différentes villes | 127 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|--|-----|
| 2.1 | Les différentes approches d'application de la syntaxe spatial sur les réseaux de transport | 22 |
| 2.2 | les applications de l'analyse spatiale sur les réseaux de la mobilité | 32 |
| 2.3 | L'analyse spatiale des activités urbaines dans la ville | 43 |
| 3.1 | Les modèles pertinents de la mobilité multimodale dans la littérature | 55 |
| 3.2 | Les correspondances entre le modèle de Kofod-Petersen et le modèle d'activité urbaine | 70 |
| 4.1 | Approches de génération d'itinéraires proposées dans la littérature | 78 |
| 5.1 | Classification de rues selon le type | 101 |
| 5.2 | Le pourcentage de fréquence de tweets touristiques par langue | 122 |
| 5.3 | Les valeurs de centralité pour les centres de différents réseaux de villes étudiées | 124 |
| 5.4 | Les valeurs de couverture de différents réseaux associés aux quatre villes | 125 |

Résumé

La ville est une agrégation urbaine permettant d'offrir divers services à ses citoyens. Elle constitue un système complexe qui dépend de plusieurs facteurs sociaux et économiques. La configuration de l'espace influence d'une manière importante l'accessibilité aux différentes fonctionnalités de la ville. L'analyse spatiale de la structure urbaine est réalisée sur les villes afin d'étudier les caractéristiques de l'espace et pouvoir évaluer son potentiel fonctionnel. L'enjeu de la thèse est de proposer une approche d'analyse spatiale qui prenne en compte les différents aspects structurels et sémantiques de la ville. Un modèle basé sur les graphes a été proposé pour représenter le réseau de transport multimodal de la ville qui garantit l'accessibilité aux différents points d'intérêt. Les super-réseaux ont été utilisés pour intégrer la possibilité d'un transfert intermodal dans le modèle de transport par des liens d'interdépendance entre les sous-graphes associés aux différents modes de transport. L'aspect temporel a été représenté dans le modèle par des attributs spécifiant les contraintes temporelles caractérisant le parcours de chaque nœud et chaque arc tels que le temps d'exploration, le temps d'attente et le temps requis pour les pénalités routières. L'aspect fonctionnel est introduit par le concept d'activité. Nous avons proposé un modèle conceptuel qui vise à modéliser les différents éléments contextuels qui peuvent affecter la planification et l'exécution des activités urbaines tels que le cadre spatio-temporel et le profil de l'utilisateur. Ce modèle conceptuel de données a été enrichi par un système de gestion de connaissances qui vise à représenter des informations sur les comportements des individus dans le cadre d'une activité selon les profils et le contexte spatio-temporel. Nous nous basons sur des données collectées dans le cadre d'une enquête de déplacement pour l'extraction de connaissances à l'aide d'algorithmes de classement et de recherche de motifs séquentiels. Les connaissances extraites sont représentées par un système de gestion de règles permettant la planification contextuelle de l'activité. À partir d'un programme d'activité adapté à un profil donné, des itinéraires assurant la réalisation de l'activité sont générés en formant un réseau d'activité contextuel. L'algorithme de recherche d'itinéraires s'appuie sur l'algorithme A* qui permet, à travers une fonction heuristique, la réduction de la complexité de la recherche en prenant en compte l'aspect temporel de l'activité et la structure multimodale de réseau. L'expérimentation de l'approche a été réalisée sur quatre villes Françaises dans l'objectif de générer des réseaux thématiques associés aux différentes activités réalisées par des profils différents. L'aspect fonctionnel représenté dans ces réseaux fait l'objet d'une analyse spatiale qui consiste à étudier la configuration de l'espace tout en prenant

en compte l'usage contextuel des utilisateurs. L'analyse est basée sur les opérateurs de centralité définis par la syntaxe spatiale ainsi que des opérateurs d'étude de couverture des réseaux thématiques originaux.

Mots clés

Théorie des graphes, Analyse spatiale, Modélisation contextuelle, Extraction des connaissances, Recherche opérationnelle

Liste de notations

Les différentes notations définies dans le manuscrit sont représentées par la liste suivante.

| | |
|----------------------|--|
| POI | Point d'intérêt |
| O | point d'origine |
| D | point de destination |
| G_{pieton} | Réseau piétonnier |
| N_{pieton} | Rues utilisées par les piétons |
| E_{pieton} | Intersections de rues de N_{pieton} |
| ξ_{pieton} | Fonction qui retourne la longueur de chaque rue $\in N_{pieton}$ |
| G_{vehi} | Réseau de transport routier motorisé |
| E_{vehi} | Rues utilisées par les véhicules |
| N_{vehi} | Intersections de rues de E_{vehi} |
| ξ_{vehi} | Fonction qui retourne la longueur d'un arc de réseau de transport routier motorisé |
| G_{bus} | Réseau de bus |
| lgb_i | Ligne de bus i |
| $stopbus_i$ | Station de bus |
| $ebus_i$ | Lien entre deux stations de bus reliées par la même ligne |
| ξ_{bus} | Fonction qui retourne la longueur de lien de la ligne de bus |
| m_{ferr} | Mode de transport ferroviaire |
| m_{priv} | Mode de transport privé |
| m_{pub} | Mode de transport public |
| G_{mferr} | Réseau de transport ferroviaire |
| lgf | Ligne ferroviaire |
| $stopferr_i$ | Station ferroviaire |
| $eferr_i$ | Lien entre deux station ferroviaire de la même ligne |
| ξ_{ferr} | Fonction retourne la longueur de lien ferroviaire |
| $P_{piechemin}$ | chemin piéton |
| $P_{vehpriv}$ | chemin de véhicule |
| P_{mpub} | chemin par transport public |
| <i>Tablehoraires</i> | table d'horaires d'une ligne de transport |
| G_{multi} | Super-réseau de transport multimodal |
| N_{multi} | Ensemble de nœud de super-réseau |
| E_{multi} | Ensemble d'arcs de super-réseau |
| M | Ensemble de mode de transport de la ville |
| P_{multi} | Chemin multimodal |

| | |
|---------------------|---|
| t_{acces} | Temps d'accès à une station |
| t_i | Temps de départ d'une station de transport public |
| $\delta_{attente}$ | Temps d'attente d'une station public |
| act | Activité |
| tr_i | Trajectoire |
| Δtr_i | Durée de la trajectoire |
| $vites_{mj}$ | Vitesse d'un moyen de transport |
| T_{POIi} | Durée de visite d'un POI |
| $Itin$ | Itinéraire |
| $\Delta itin$ | Durée d'itinéraire |
| G_{act} | Réseau d'activité |
| VM | Vitesse de marche |
| $\delta itin_{max}$ | La durée maximale d'activité |
| t_{depart} | Temps de départ |
| δ_{pieton} | Pénalité temporelle pour un piéton |
| $\delta_{vehicule}$ | Pénalité temporelle des véhicules pour le passage d'intersection |
| δ_{arret} | Pénalité temporelle de temps d'arrêt dans une station de transport public |

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Contexte général

La notion de ville dans son sens le plus large est un concept largement étudié par différentes disciplines telles que la géographie, l'urbanisme, l'architecture, le transport, l'économie ou encore la sociologie pour ne citer que quelques exemples. Cette diversité d'intérêts s'explique largement par l'inhérente complexité de la ville, ses multiples dimensions sociales et thématiques, et enfin par ses complexités structurelles et spatiales qui n'ont de cesse d'évoluer avec le temps et les différentes mutations auxquelles elle fait face. Toute tentative de représentation plus ou moins formelle de la ville doit prendre en compte plusieurs composantes spatiales et facteurs anthropiques qui la caractérisent. Plusieurs scientifiques ont tenté d'introduire des définitions générales de la ville à l'instar de [Janin \[2009\]](#) qui définit la ville comme un espace habité par un ensemble de citoyens où moins de 25% d'entre eux travaillent dans l'agriculture. L'observation de la ville varie également d'une personne à une autre. [Batty \[2013\]](#) considère la ville comme une constellation d'interactions, de communications, de relations, de réseaux et de flux plutôt qu'une simple localisation. [Hamilton et al. \[2005\]](#) définit la ville par des facteurs économiques, sociaux et environnementaux qui caractérisent sa structure. [Remy and Voyer \[1992\]](#) décrivent la ville comme un espace limité avec un mode précis de regroupement de population et des activités. Une ville peut être également définie en se reposant sur deux concepts d'après [Knox and Pinch \[2014\]](#) : (1) un concept descriptif qui définit la partie matérielle concrète de la ville. Cette partie se manifeste par une certaine densité de l'habitat ainsi qu'une dominance de bâti sur le non-bâti, (2) un concept interprétatif qui évoque les fonctions sociales de la ville. Plus généralement, la ville est souvent représentée d'une manière multidimensionnelle prenant en compte la structure de l'espace ainsi que son utilisation. [Manheim \[1979\]](#) a proposé une approche illustrée dans la Figure 1.1 et qui à partir de l'espace offre un système de transport et socio-économique qui est en interaction étroite à travers la mobilité et les flux de déplacements des humains interagissant dans la cité. Avec l'émergence de nouvelles et multiples

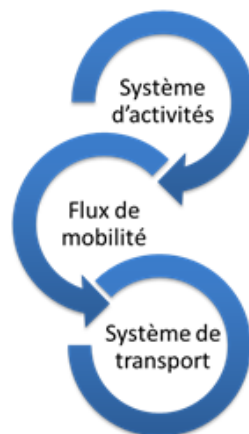


FIGURE 1.1 : Les dimensions d'étude de la ville [Manheim \[1979\]](#)

technologies, la ville évolue vers un système beaucoup plus connecté à travers les médiations réalisées par

les humains connectés. La ville devient ainsi un objet d'étude pour les experts en ingénierie et en traitement d'informations. Face à la complexité de l'environnement urbain, qui comporte des éléments imprévisibles et dynamiques, et pas toujours faciles à modéliser, plusieurs solutions méthodologiques ont été conçues dans le but de mieux comprendre les fonctions de la ville et d'analyser les comportements des personnes dans l'espace et le temps. L'étude des activités urbaines et de la mobilité dans la ville ont particulièrement eu un grand intérêt pour de nouvelles applications telles que le développement des systèmes de recommandation d'activités ou des systèmes de génération d'itinéraires. Ces systèmes ont pour objectif de proposer un usage de la ville adapté aux besoins de l'utilisateur, mais aussi d'acquérir des données représentant les divers usages de la ville.

1.2 Problématique de la recherche

La morphologie urbaine de la ville peut être définie comme l'étude de la structure de la ville et de ses caractéristiques dans l'espace et le temps. Au regard de la complexité de la ville et de ses multiples dimensions thématiques, l'étude de la morphologie de la ville doit dépasser la dimension structurelle et physique pour aussi tenir compte des fonctionnalités de l'espace et de l'usage humain. La Figure 1.2 représente la ville à travers trois couches : la première couche indique la structure de l'espace urbain, la deuxième couche se focalise sur les systèmes de transport et les déplacements humains et la dernière couche prend en compte les activités et les points d'intérêt (POIs). Dans cette thèse, l'intérêt est centré sur les problèmes liés à la modélisation multidimensionnelle de la ville et à l'étude dynamique de la morphologie de l'espace. L'analyse spatiale offre plusieurs techniques pour étudier la morphologie et la configuration de l'espace. Ces techniques sont utilisées fréquemment pour modéliser la structure spatiale sans considérer la complexité et la diversité des interactions humaines. En effet, les individus se comportent dans la ville d'une manière différente les uns des autres. Ce comportement se manifeste dans l'espace dans le contexte de la réalisation des activités mobiles.

1.3 Objectifs de la thèse

Ce travail de thèse s'articule autour de plusieurs objectifs émanant d'axes de recherche croisés entre la modélisation et l'étude spatiale de la ville. La complexité de la ville se manifeste clairement par la structure multimodale du transport et par la diversité et le nombre important des POIs. Le premier objectif de cette thèse consiste à proposer un modèle de représentation de la structure multimodale de transport assurant l'accessibilité aux différents POIs d'un espace urbain considéré. Les différentes contraintes spatio-temporelles associées à la mobilité doivent être représentées par le modèle multimodal proposé. Plusieurs techniques de

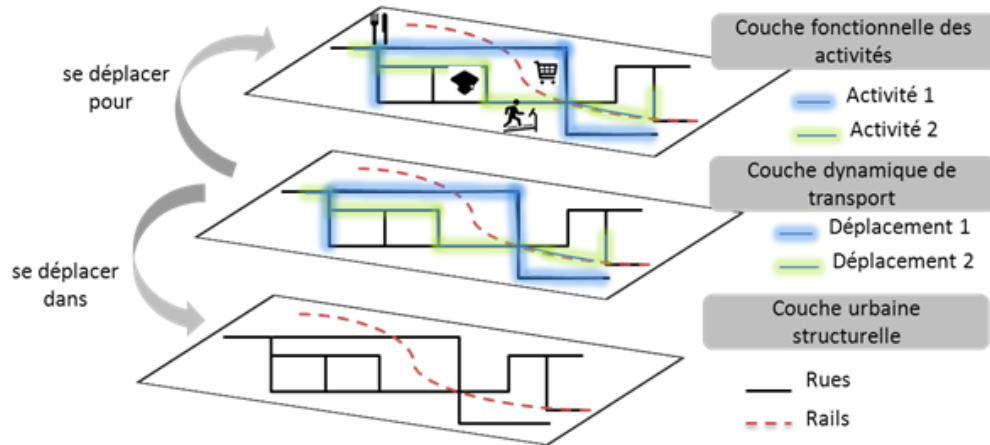


FIGURE 1.2 : Les couches conceptuelles de la ville.

modélisation ont été utilisées pour représenter des systèmes de transport. Nous opterons dans nos travaux pour l'utilisation de la théorie des graphes pour exploiter son formalisme mathématique et dériver des propriétés structurelles. Les utilisateurs de notre système ville sont considérés par notre démarche comme des praticiens du transport multimodal pour accéder aux POIs requis pour la réalisation d'une activité. Une activité est planifiée par un utilisateur selon ses préférences, ses caractéristiques et objectifs et un contexte spatio-temporel. La représentation de ces propriétés impose la construction d'un modèle qui devrait idéalement prendre en compte les différents éléments contextuels intervenant dans la planification et la réalisation des activités de ces utilisateurs de la ville. À partir de ce modèle contextuel, nous tenterons de générer des réseaux thématiques contextuels associés à une situation donnée. L'étude fonctionnelle de la ville que nous souhaitons développer demande la prise en compte de cette notion d'activité que nous introduirons plus formellement, et en se basant ensuite sur l'analyse des réseaux d'activités ainsi générés. Les travaux réalisés au cours de cette thèse ont pour objectifs de répondre aux questionnements suivants :

1. Comment modéliser la structure multimodale de l'espace ville ?
2. Comment représenter l'usage de la ville et définir un modèle contextuel d'activités ?
3. Comment générer des réseaux associés aux activités dans l'espace ville ?
4. Comment étudier la morphologie et la configuration spatiale et dynamique de la ville par la prise en compte de l'aspect fonctionnel ?

1.4 Structure du manuscrit

Le manuscrit de thèse est organisé en quatre chapitres comme illustré dans la Figure 1.3.

1. **Le chapitre 2** détaille les dernières approches proposées pour l'étude de la morphologie de la ville.

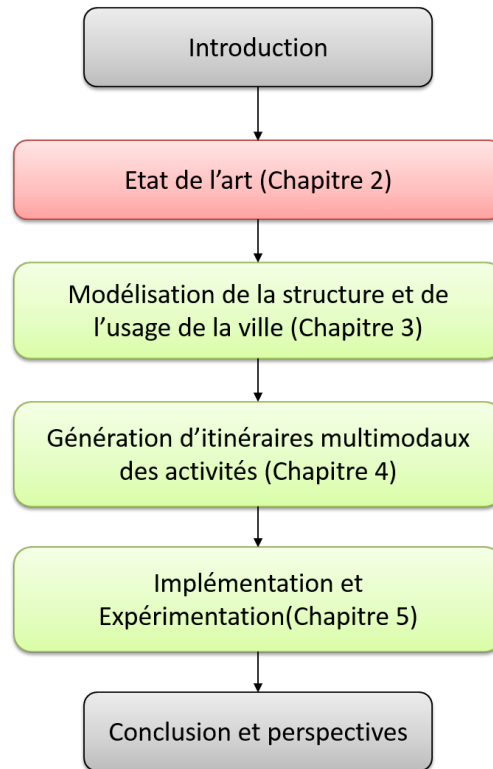


FIGURE 1.3 : Le plan du manuscrit.

Ce chapitre étudie les modèles proposés dans la littérature selon les points de vue suivants : structure, mobilité et activité.

2. **Chapitre 3** développe notre modèle basé sur la théorie des graphes et prenant en considération le transport dans ses multiples modalités et les activités mobiles dans la ville. Ce modèle a été conçu dans le but de tenir en compte le cadre contextuel de l'usage de la ville, le contexte spatio-temporel et différents profils d'utilisateurs de la ville.
3. **Chapitre 4** présente une méthode de génération d'itinéraires d'activité. Cette méthode de générations dynamique sera appliqué sur le réseau multimodal de la ville en prenant en considération les différents éléments contextuels de ces activités. Nous réaliserons une extraction de comportements des personnes dans un espace urbain afin d'enrichir la méthode proposée par la prise en compte de contraintes utilisateurs simulées.
4. **Chapitre 5** a pour objectif de valider le modèle d graphes proposé dans le chapitre 3, ainsi que la validation de la méthode de génération d'itinéraires développée dans le chapitre 4. Quatre villes françaises constituent les cas d'étude et permettent de générer des réseaux d'activités contextuels, d'étudier l'usage de l'espace ville par différents profils d'utilisateurs. L'analyse spatiale de ces réseaux d'activités permet de projeter et simuler différents usages dans l'espace ville et d'effectuer une comparaison analyse comparative des propriétés émergentes.

5. Enfin, la dernière partie synthétise nos contributions et quelques perspectives de recherche envisagées.

Chapitre 2

Etat de l'art

La ville est un système complexe interprété selon plusieurs dimensions. La morphologie urbaine est basé sur l'étude structurelle et physique de l'espace. L'étude de la morphologie de la ville reste jusqu'à ce jour un challenge important en recherche scientifique vu les divers aspects qui les caractérisent. Dans ce contexte relativement complexe, il paraît logique d'aborder les différentes approches proposées dans la littérature et qui visent à modéliser et à étudier la ville et son dynamisme [Remy and Voye \[1992\]](#). Ce premier chapitre présente un aperçu des travaux issus de la littérature visant à étudier la ville. La première section s'intéresse aux approches structurelles de la ville. Les différentes modélisations spatio-temporelles de déplacement sont ensuite présentées ainsi que les techniques de simulation réalisées dans le but de représenter un système multimodal de transport. La dernière partie présente la richesse sémantique de la ville en exposant les différents travaux menés pour l'étude des activités urbaines.

2.1 Structure spatiale de la ville

2.1.1 Les caractéristiques spatiales de la ville

L'étude de l'espace de la ville demande de prendre en considération les éléments individuels qui la constituent et les relations entre ces derniers. Les éléments caractérisant la ville peuvent être des objets naturels (e.g. arbre, colline etc.) ou des objets construits par l'homme. Un objet urbain e peut être défini comme une entité spatiale qui possède une empreinte qui l'associe à l'espace [Del Mondo \[2011\]](#). L'étude de la morphologie de l'espace s'appuie sur les géométries de chaque entité qui forment un tissu urbain dans l'espace [Frankhauser \[2005\]](#). Chaque entité possède une position spécifique définie dans un système cartographique de référence. Nous introduisons les différentes caractéristiques de l'espace et la notion de granularité spatiale.

i Les relations spatiales

L'espace est le lieu de différentes relations spatiales qui relient les objets urbains. Une relation spatiale décrit la disposition d'un objet par rapport à un autre selon un référentiel donné. Ces relations spatiales peuvent être catégorisées en trois types : métriques (e.g. la distance), topologiques et d'orientations (e.g. à droite, à gauche) [Pullar and Egenhofer \[1988\]](#). Les relations métriques sont des relations quantitatives basées sur des critères géométriques comme par exemple la distance euclidienne qui permet de mesurer la proximité entre les objets. Les relations topologiques entre entités spatiales ont été étudiées et formalisées dans plusieurs travaux [Chateaufneuf \[1987\]](#), [Papadias et al. \[1995\]](#). La topologie peut être définie comme un ensemble de règles et de comportements qui permettent l'étude du partage de géométries entre entités spatiales [Del Mondo \[2011\]](#). [Egenhofer \[1989\]](#) a été le premier à proposer un formalisme des relations topologiques dans l'espace. Dans son modèle, Egenhofer définit la topologie par un ensemble de concepts comme la continuité, la proximité, la frontière et l'intérieur étudiés dans un contexte de

voisinage. Le formalisme RCC-8 (Region Connection Calculus) a été proposé dans [Randell et al. \[1992\]](#) afin de décrire les relations topologiques entre les entités spatiales. Ce formalisme introduit huit relations élémentaires présentées par la Figure 2.1. D'autres travaux ont été développés dans l'objectif d'étudier

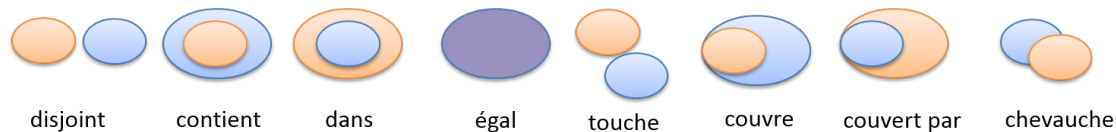


FIGURE 2.1 : Les relations topologiques de RCC-8 - [Randell et al. \[1992\]](#).

particulièrement les relations topologiques entre deux lignes [Egenhofer \[1993\]](#) et entre une ligne et une région [Egenhofer and Mark \[1995\]](#). L'étude des relations topologiques entre entités spatiales a été réalisée pour le raisonnement spatial [Sharma \[1996\]](#), l'analyse spatiale [Domingo et al. \[2013\]](#) et la gestion des bases de données spatiales [Clementini et al. \[1994\]](#). La géométrie d'un objet dans certains cas peut être floue et incertaine. [Clementini and Di Felice \[2001\]](#) ont proposé le concept de larges frontières qui consiste à absorber l'incertitude de la géométrie en prenant la géométrie la plus large. [Dilo \[2006\]](#) a développé une autre méthode basée sur les approches floues pour intégrer la notion d'incertitude géométrique.

ii La représentation cartographique et numérique de l'espace

La cartographie consiste à représenter l'espace à travers des cartes dans le but de représenter des phénomènes pertinents [Morrison \[1978\]](#). Une carte est conçue par la mise en avant des caractéristiques géométriques de l'espace. En effet, elle représente un outil efficace pour représenter de nombreuses informations sur l'espace géographique : la topologie et la géométrie des objets, la localisation et la dynamique thématique (démographique, naturel, urbain etc.). Dans les dernières décennies, la représentation spatiale a suivi la croissance technologique des systèmes d'informations. Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont conçus afin d'effectuer des traitements sur les données spatiales et géographiques [Aronoff \[1989\]](#) ; [Chrisman et al. \[1989\]](#). Le SIG est un système conçu dans le but d'assurer la collecte, le stockage, le traitement et la visualisation des données. La science de l'information géographique, appelée aussi la Géomatique, englobe les différents concepts et les théories d'étude de l'information spatiale [Frank \[2000\]](#). Ces méthodes sont implémentées dans des outils logiciels basés sur les SIG permettant d'établir l'interaction entre les utilisateurs et les données collectées. Les outils SIG sont utiles dans différents axes de recherche sur les données géographiques tels que l'aménagement du territoire [Prévil et al. \[2003\]](#), les systèmes de transport [Rao et al. \[2003\]](#) et les systèmes de géo-localisation [Faust et al. \[1991\]](#).

2.1.2 La modélisation de l'espace urbain

La modélisation de la ville est un outil de simplification de la représentation de la ville. Un modèle permet aux gestionnaires de la ville et aux scientifiques d'étudier les phénomènes sociaux et économiques qui peuvent apparaître mais aussi de simuler et de prévenir des situations probables dans le futur. Plusieurs techniques et concepts ont été exploités afin de modéliser la structure de la ville dont nous pouvons citer la théorie des graphes. Nous avons reparti ces méthodes en trois classes. Chaque classe se base sur un critère précis : la géométrie, la topologie et la fonction.

i La modélisation urbaine basée sur la géométrie de l'espace : Modèle de Lynch

Dans son livre « The image of the city », Lynch [1960] a proposé un modèle qui décrit la ville en se basant sur des enquêtes de terrain. Le modèle de Lynch classe les objets spatiaux de la ville en cinq catégories : voies, limites, nœuds, points de repères et quartiers (voir Figure 2.2).



FIGURE 2.2 : Les éléments du modèle de Lynch

- **Nœuds** : Ils représentent les points stratégiques de la ville accessibles par les individus. Les nœuds présentent des transitions lors de déplacements dans la ville comme les carrefours et les stations de transport. Les nœuds offrent des fonctions dans l'espace permettant d'évaluer la ville.
- **Points de repère** : Ce sont des points de référence dans la ville. Ils peuvent être repérés facilement dans l'espace. Les points de repères offrent une orientation à la structure urbaine de la ville.
- **Limites** : Ce sont les éléments linéaires qui représentent les frontières entre les quartiers. Les limites représentent les changements de la topographie dans l'espace comme par exemple les bords de la mer et les rues.
- **Voies** : Ce sont les chemins le long desquelles les personnes se déplacent. Les chemins peuvent inclure les rues et les passages qui assurent la connexion entre les autres différents éléments.
- **Quartiers** : Ce sont des sections de la ville, conçus en deux dimensions. Un quartier est identifié par un caractère général. Plusieurs paramètres définissent le caractère d'un quartier tels que l'identité sociale, économique, historique ou fonctionnel (e.g. zone résidentielle ou zone industrielle).

ii La modélisation urbaine basée sur la fonctionnalité de l'espace

La ville a été modélisée par plusieurs scientifiques en se basant sur les fonctions offerts par différents

secteurs. Les méthodes ont été conçues à partir de plusieurs cas d'études.

- **Le modèle christallérien**

Le modèle Christallèrien nommé également modèle des lieux centraux a été proposé par Walter Christaller [1933] (voir Figure 2.3). Cette théorie vise à étudier le rôle joué par les lieux centraux dans la ville. Un lieu central est défini comme un lieu qui offre une bonne qualité de vie par rapport aux services disponibles. Les services sont classifiés selon l'ordre d'importance des services, des plus importants (e.g. écoles) aux moins importants (e.g. magasins), selon plusieurs facteurs tels que la distance et le coût de déplacement ou la portée définit comme la distance maximum qui sépare un lieu central et qui garantit une bonne accessibilité aux services.

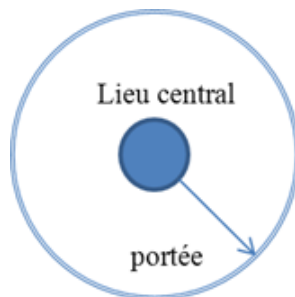


FIGURE 2.3 : Le modèle des lieux centraux

- **La théorie de la zone concentrique**

Une ville peut avoir un plan radioconcentrique lorsque l'organisation des quartiers prend la forme des cercles concentriques Park et al. [1925] (voir Figure 2.4). Cette forme est due au développement urbain vers l'extérieur de la ville. Les cercles présentent des quartiers qui regroupent des classes sociales différentes. Le noyau de ce modèle est le quartier central d'affaires. Autour du centre d'affaires, la ville se développe selon différents critères. La zone suivante est une zone transitoire entre le centre d'affaires de la ville et les zones résidentielles. Vient ensuite la zone caractérisée par une forte présence de logements ouvriers (petits appartements). Les zones suivantes de la ville sont plutôt réservées aux classes aisées et supérieures. Une des limites de ce modèle est son manque de généralité. En effet, conçu spécifiquement pour la ville de Chicago il est difficile à utiliser pour représenter la structure d'autres villes.

- **La théorie de secteurs**

Hoyt [1939] a conçu le modèle de secteurs. Son modèle est une modification du modèle de la zone concentrique permettant de prendre en compte de nouveaux paramètres comme illustré par la Figure 2.5. L'évolution de la ville d'après Hoyt est due au développement urbain autour des réseaux de

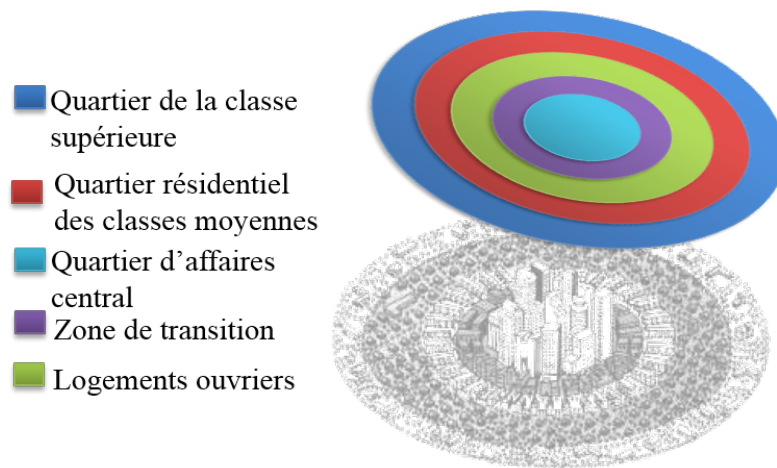


FIGURE 2.4 : La théorie de la zone concentrique Hannerz [1983] Haggett [1965]

transport (les rues et les arrêts publics). Cette évolution prend une autre forme celle de secteurs qui se chevauchent avec le quartier d'affaires situé en partie centrale. Les zones résidentielles de la classe ouvrière se situent à proximité des zones industrielles de la ville alors que la classe aisée s'installe plus loin. La ville de Chicago a été prise comme un exemple pour cette modélisation à base des secteurs.

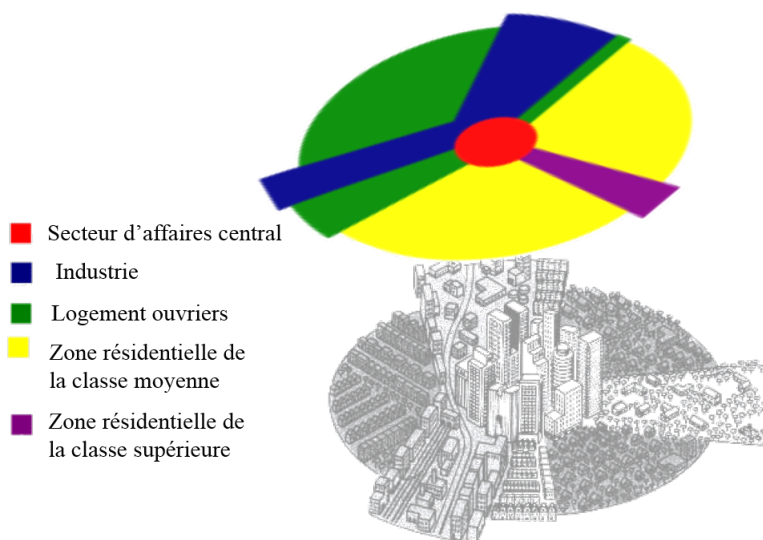


FIGURE 2.5 : La théorie de secteurs Hannerz [1983] Haggett [1965]

- **Modèle des noyaux multiples**

Harris and Ullman [1945] propose un modèle qui valide l'hypothèse qu'une ville ne possède pas un

seul centre d'affaires comme indiqué dans le modèle de la zone concentrique et le modèle de secteurs (voir Figure 2.6). Le modèle des noyaux multiples repose sur le fait que la ville peut se développer autour de plusieurs centres avec une densité homogène. Le modèle prend en compte les agrégations et ses effets sur la configuration de l'espace.

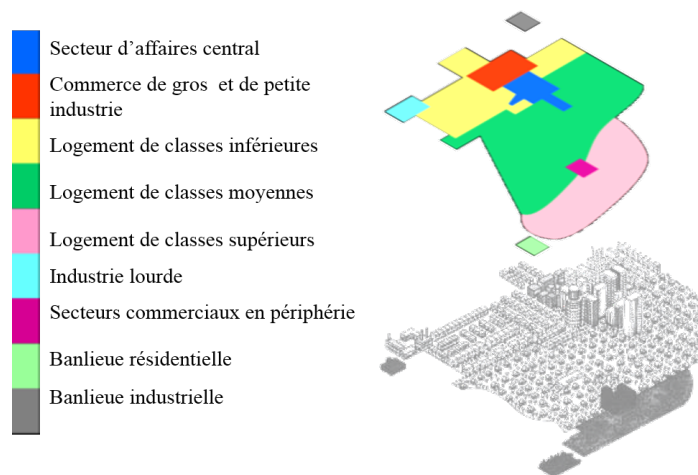


FIGURE 2.6 : Modèle multiples noyaux Hannerz [1983] Haggett [1965]

iii La modélisation urbaine basée sur la topologie de l'espace

Un espace urbain est représenté par un ensemble d'éléments tels que des lieux et des zones connectées par un réseau routier linéaire. Le réseau routier représente le substrat de développement de la ville. Comme tout objet dans l'espace, les éléments urbains sont caractérisés par des relations topologiques qui les relient. Les graphes sont parmi les concepts les plus utilisés pour modéliser un espace urbain. Un graphe est défini par un ensemble d'objets connectés entre eux par des liens. Les objets sont appelés des nœuds et les connexions entre eux sont appelées des arêtes. Les graphes permettent de résoudre le problème de modélisation de la ville par un formalisme mathématique. Formellement, un graphe est défini par $G = (N, A)$ tel que N est l'ensemble des nœuds et A est l'ensemble des arêtes qui relient les nœuds. La théorie des graphes offre de nombreux outils et algorithmes pour étudier les relations topologiques dans un graphe. Un graphe possède un ensemble de propriétés dont :

- **L'adjacence** : s'il existe une connexion directe entre deux nœuds alors les deux nœuds sont adjacents.
- **La connectivité** est le nombre de nœuds directement connecté à un nœud donné.
- **Le chemin** : en précisant le nœud de départ et le nœud d'arrivée, un chemin présente la partie parcourue de graphe pour les relier.
- **La distance topologique** est la distance du plus court chemin qui sépare un nœud de départ et un nœud d'arrivée. La distance est calculée comme le nombre de nœuds intermédiaires entre les deux nœuds.
- **Les graphes orientés** : les graphes orientés sont des graphes dont les nœuds sont connectés par des

arcs possédant une direction particulière. Dans le contexte d'une modélisation urbaine, les graphes peuvent être utiles afin de préciser le sens d'accessibilité d'un réseau routier.

- **Les graphes pondérés** : les graphes pondérés sont caractérisés par l'association d'un poids pour chaque arc. Soit $G_{pond} = (N, A, mu)$ tels que N est l'ensemble de nœuds, A est l'ensemble d'arcs et mu est une fonction qui attribue une valeur pour chaque arc $mu : A \rightarrow Va$. Pour un réseau routier, un ensemble de paramètres caractérisent les arcs comme par exemple : la distance, la vitesse, le temps de parcours et les modalités.

Les modèles basés sur la théorie des graphes sont des modèles formels dans le sens où l'analyse des graphes est assurée par des opérateurs mathématiques dérivés des caractéristiques topologiques et quantitatives des graphes. Les approches basées sur la théorie des graphes permettent la modélisation d'objets linéaires tels que le réseau routier. Deux méthodes de modélisation à base des graphes ont été proposées dans la littérature pour modéliser le réseau routier. La première méthode (Figure 2.7) est basée sur une approche primaire qui consiste à définir les nœuds comme les intersections des rues et les arcs comme les segments des rues reliant les différentes intersections [Jiang and Claramunt \[2004a\]](#); [Jiang \[2007\]](#). Cette représentation garde le même aspect géométrique de la ville mais n'assure pas la continuité des rues (une rue peut être représentée par plusieurs arcs). Le modèle proposé par [Cardillo et al. \[2006\]](#) représente les nœuds dans un réseau routier en deux dimensions pour préciser la localisation de chaque intersection. Le graphe résultat est planaire i.e. deux arcs ne peuvent se croiser. Des graphes orientés et pondérés ont été utilisés dans le travail de [Mackanness and Beard \[1993\]](#) à une échelle plus large dans un but de généralisation cartographique. La deuxième représentation est basée sur l'approche duale qui

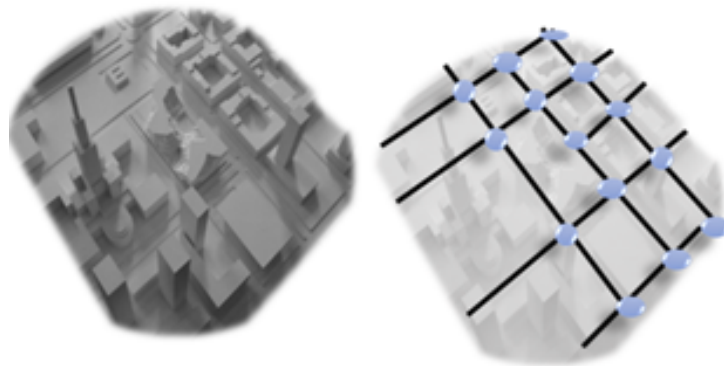


FIGURE 2.7 : Le graphe d'un espace urbain de la ville

consiste à modéliser les rues par des nœuds et les intersections entre eux par des arcs. Cette approche garantit la continuité de réseau routier puisque chaque rue est représentée par un nœud. Cependant, cette représentation nécessite une méthode d'agrégation de rues basée sur différents critères tels que : le nom de la rue [Jiang and Claramunt \[2004a\]](#), la visibilité de la rue telle que définie par la syntaxe spatiale [Penn](#)

et al. [1998], le type de la rue, etc. Les graphes duaux ont été utilisés dans plusieurs travaux qui visent à modéliser des réseaux structurels Hillier and Hanson [1984] et les réseaux de trafic Hu et al. [2008]. Les graphes sont utilisés pour la modélisation de différents réseaux de transport : le réseau routier Jiang and Claramunt [2004a]; Porta et al. [2006], le réseau de transport public Sienkiewicz and Hołyst [2005a], le transport ferroviaire Sen et al. [2003].

2.1.3 L'analyse spatiale

L'analyse spatiale consiste à étudier les phénomènes géographiques et sociaux dans l'espace Fothingham and Rogerson [2013]. L'objectif de l'analyse spatiale est de comprendre les causes d'un fait qui existe (agrégation, étalement, etc.) ou d'anticiper les conséquences des scénarios possibles. Comprendre la configuration de l'espace et les interactions sociales nécessite la prise en compte de caractéristiques quantitatives et qualitatives de l'espace : distance, réseau, localisation etc. Hillier and Hanson [1984] ont proposé la théorie de la syntaxe spatiale pour la modélisation et l'analyse de l'espace afin d'étudier les interactions entre la structure de l'espace et la société. La syntaxe spatiale est une théorie basée sur le principe de la connexion des objets urbains Hillier [1996, 1999]. Cependant, la modélisation proposée par la syntaxe spatiale pour présenter la morphologie de l'espace prend uniquement en compte les espaces ouverts. Ces espaces ont été représentés par deux manières différentes : les espaces convexes et les lignes axiales. Ces deux représentations sont liées à la notion de l'inter-visibilité. Une ligne axiale est un isovist¹ désignant la ligne de visibilité la plus longue par l'œil nu pour présenter l'environnement urbain. L'ensemble de ces lignes compose la carte axiale de l'espace. La figure 2.8 illustre un exemple d'un espace urbain et son modèle de graphe suggéré par la syntaxe spatiale. La carte axiale est modélisée par des graphes duaux dans le but d'utiliser ses

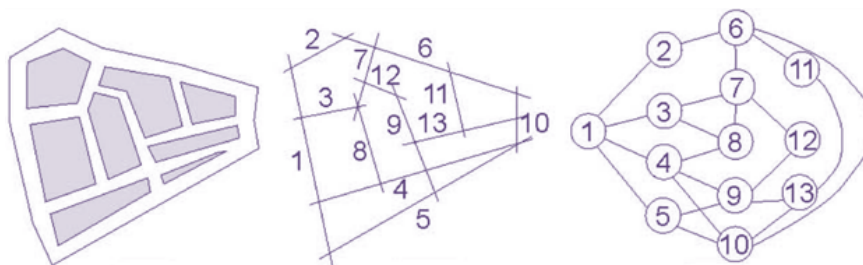


FIGURE 2.8 : Modélisation de l'espace urbain par la syntaxe spatiale Jiang et al. [2000]

différentes caractéristiques métriques et topologiques formalisées par des opérateurs mathématiques pour étudier la morphologie de la ville. Nous allons détailler quelques opérateurs qui entrent en compte dans l'étude de la connectivité, l'accessibilité et la proximité dans l'espace Jiang et al. [2000] :

1. Un isovist réfère à l'espace de visibilité d'un observateur dans un espace urbain.

- **La connectivité** c_i est le nombre de nœuds directement connectés à un nœud donné i .

$$C_i = k \quad (2.1)$$

Où k est le nombre de nœuds connectés à n_i

- **La valeur de contrôle** ctr_i est le degré de choix d'un nœud donné i de passer par un des nœuds voisins (les nœuds directement connectés)

$$ctr_i = \sum_{j=1}^m \frac{1}{c_j} \quad (2.2)$$

Où m est le nombre de nœuds directement connectés à n_i

- **La profondeur** est le nombre d'étapes qui séparent un nœud donné du reste des nœuds dans le graphe. Un nœud profond est un nœud éloigné des autres nœuds. Soit d_i la somme des plus courtes distances qui séparent n_i et des autres nœuds du graphe tel que :

$$d_i = \sum_{j=1}^n d_{ij} \quad (2.3)$$

Où d_{ij} est la distance la plus courte qui sépare n_i de n_j et n le nombre total de nœuds dans le graphe
La profondeur moyenne de n_i est définie donc comme suit :

$$MD_i = \frac{d_i}{(n-1)} \quad (2.4)$$

La plus faible profondeur est obtenue pour un graphe centralisé où tous les nœuds sont liés à un nœud central. Alors que la profondeur la plus élevée correspond à un graphe sous la forme d'une séquence linéaire.

- **L'intégration** est un paramètre qui détermine le taux d'intégration ou de ségrégation d'un nœud pour la totalité dans le graphe. L'intégration est calculée par deux opérateurs différents : l'asymétrie relative (AR) et l'asymétrie relative réelle (ARR).

$$AR_i = \frac{2(MD_i - 1)}{k - 2} \quad (2.5)$$

L'asymétrie relative réelle est calculée en divisant l'asymétrie relative par une valeur D_n qui correspond à la racine de diamant de la carte axiale. Nous recommandons [Teklenburg et al. \[1993\]](#) comme une référence pour connaître plus d'informations sur la structure diamant de la carte axiale.

$$ARR_i = \frac{AR_i}{D_n} \quad (2.6)$$

Où

$$D_n = \frac{2[n(\log_2(\frac{n+2}{3} - 1) + 1)]}{(n-1)(n-2)} \quad (2.7)$$

Les valeurs de ARR sont réparties entre autour de la valeur 1 de façon que les valeurs qui sont largement en dessous de 1 montrent que les nœuds sont fortement intégrés alors que les valeurs proches et au-dessus de 1 montrent une ségrégation des nœuds par rapport au graphe entier.

- Les opérateurs de centralité permettent d'évaluer les nœuds d'un graphe en attribuant à chaque nœud des mesures de centralité différentes. Le nœud central est donc le nœud qui possède des mesures de centralité élevées par rapport aux autres nœuds du graphe. À l'origine, l'étude de la centralité dans un graphe a été proposée pour l'analyse des réseaux sociaux afin de classer les individus selon leurs places stratégiques dans le réseau. Certains opérateurs ont été utilisés dans le contexte urbain dans le but d'étudier les relations topologiques dans un réseau. Nous allons détailler certains opérateurs utiles pour l'analyse de réseaux urbains adoptés par la syntaxe spatiale.

La centralité de proximité Bavelas [1950] permet de déterminer le taux de rapprochement d'un nœud du reste des nœuds dans le graphe. La proximité est définie comme l'inverse de l'éloignement.

$$cp_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^n d_{ij}} \quad (2.8)$$

Où d_{ij} est la distance la plus courte qui sépare n_i par n_j //

La centralité d'intermédiaire Freeman [1977] mesure pour chaque nœud son pouvoir d'être un intermédiaire dans le graphe. Ce paramètre consiste à compter le nombre de passages à travers un nœud dans les plus courts chemins qui relient chaque paire de nœuds dans le graphe.

$$cb_i = \sum_{j \neq k \neq i < n} \frac{\delta_{jk}(n_i)}{\delta_{jk}} \quad (2.9)$$

La centralité de rectitude (ou d'efficacité) **Crucitti et al. [2006]** mesure l'efficacité de la communication entre un nœud donné et le reste des nœuds du graphe. L'efficacité de la communication est calculée comme l'inverse de la plus courte distance entre deux nœuds. La centralité de rectitude est définie comme suit :

$$cr_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j \neq i} \frac{d_{ij}^{euc}}{d_{ij}} \quad (2.10)$$

Où d_{ij} est la distance euclidienne de la ligne droite qui sépare n_i et n_j // La centralité d'information d'un nœud est un opérateur qui permet de mesurer l'efficacité de graphe dans le cas de la suppression du nœud.

$$cinf_i = \frac{\Delta E}{E} = \frac{(E(g) - E(g'))}{E} \quad (2.11)$$

Où

$$E = \frac{1}{(n(n-1))} \sum_{j \neq i} \frac{d_{ij}^{euc}}{d_{ij}} \quad (2.12)$$

et g' est le graphe associé au graphe entier g possédant $n-1$ nœuds et $e-e_i$ arcs tel que e_i est le nombre d'arcs connectés à n_i . Les différents opérateurs ont été expérimentés dans plusieurs travaux pour analyser les réseaux spatiaux de la ville. Certains outils logiciels ont été développés mettant en disposition les implémentations des différents opérateurs de la syntaxe spatiale **Jiang et al. [2000]**; **Beyhan [2011]**. La tableau 2.1 expose les travaux d'analyse spatiale basés sur la syntaxe spatiale

Tableau 2.1 : Les différentes approches d'application de la syntaxe spatial sur les réseaux de transport

| Auteurs | Contribution d'analyse spatiale. |
|--|---|
| Jiang and Claramunt [2004a] | Ce travail a expérimenté les opérateurs de centralité et de connectivité sur le réseau routier de la ville de Gävle en se basant sur la modélisation duale par les graphes. Les résultats de cette expérimentation montrent une classification des rues selon le taux d'intégration et de proximité de chacune. |
| Crucitti et al. [2006] | Les auteurs ont modélisé les réseaux routiers de dix-huit villes par une approche primaire afin de comparer les différents paramètres de centralité qui les caractérisent. |
| Porta et al. [2006] | Les expérimentations dans les travaux de Porta et al. [2006] ont été réalisées sur un modèle basé sur une approche duale. |
| Jun et al. [2007]; Chiaradia et al. [2005] | Le réseau de transport public a été étudié par des techniques de syntaxe spatiale dans le but d'étudier sa connectivité et la qualité d'accessibilité offerte. |

et appliqués sur les réseaux structurels de transport. Malgré la large utilisation des techniques de syntaxe spatiale, certains travaux ont montré quelques lacunes qui sont dues principalement à la structuration et à la modélisation de l'espace. Les modèles conçus dans le cadre de l'analyse de l'espace par la syntaxe spatiale sont à base de graphes duaux qui consistent à représenter les réseaux urbains. Ils considèrent uniquement la topologie de l'espace en se désintéressant des caractéristiques quantitatives et métriques de l'espace Ratti [2004]. Ce rejet selon Hillier [1999] est expliqué par la régularité de la structure urbaine. Cependant les villes sont en réalité des systèmes complexes qui possèdent une structure irrégulière. En effet, l'aspect géométrique des objets urbains est aussi perdu dans la modélisation associée à la syntaxe spatiale. Ratti Ratti [2004] a détaillé les déformations et les ambiguïtés géométriques de la texture urbaine modélisée par la carte axiale. Hanson [1998] a expliqué l'ambiguïté dans la phase de la modélisation de l'espace par la syntaxe spatiale par les différentes interprétations humaines. Cette différence est due à la manière par laquelle les individus qui se comportent et interagissent dans l'espace. Letesson [2009] a affirmé que l'ambiguïté découle de la complexité sociale plutôt qu'au tissu urbain qui est souvent clair et déterminé.

2.2 Mobilités dans la ville

La mobilité fait partie des concepts les plus étudiés en analyse spatiale. Vaultier [2010] a défini la mobilité comme l'ensemble des déplacements d'une entité quelle que soit la durée la distance ou la motivation. Marilleau [2005] a proposé une catégorisation de la mobilité urbaine en quatre classes : la mobilité quotidienne, le voyage, la mobilité résidentielle et la migration. Nous nous intéressons dans nos travaux à la mobilité quotidienne des personnes dans la ville puisqu'elle explique la manière d'utiliser l'espace dans une petite échelle temporelle. Une forte interaction existe entre la mobilité et l'espace urbain dans la mesure où les déplacements des individus sont effectués dans un espace libre (des rues et des rails). Les demandes de déplacement influencent sur la structure de système de transport de l'espace urbain dans le but de satisfaire les besoins humains dans la ville. L'évolution technologique des systèmes de transport et de communication a amélioré les performances individuelles et collectives de la mobilité. La modélisation de la mobilité urbaine est une tâche complexe à cause de plusieurs paramètres qui entrent en jeu dans la caractérisation des systèmes de transport. La Figure 2.9 Mérenne and Bouvry [1995] montre les différentes typologies qui caractérisent le système de transport. Le mode de transport indique le réseau utilisé qui peut être le réseau de transport routier (i.e. voiture, bus etc.) ou le réseau de transport ferroviaire (i.e. métro, tramway, etc.). Un déplacement peut être assuré par des opérateurs publics (i.e. bus) ou par des entreprises privées (i.e. taxi), par un transport individuel ou collectif et peut assurer le transfert des personnes ou des marchandises. Le concept de site est associé à la terminologie de transport pour définir l'emprise exploitée par les lignes de transport. Deux types de sites peuvent être identifiés : les sites propres sont les sites utilisés par un mode unique du transport alors qu'un site banal représente l'infrastructure utilisée par plusieurs modes de transport (les rues réservées pour les voitures individuelles et les bus).

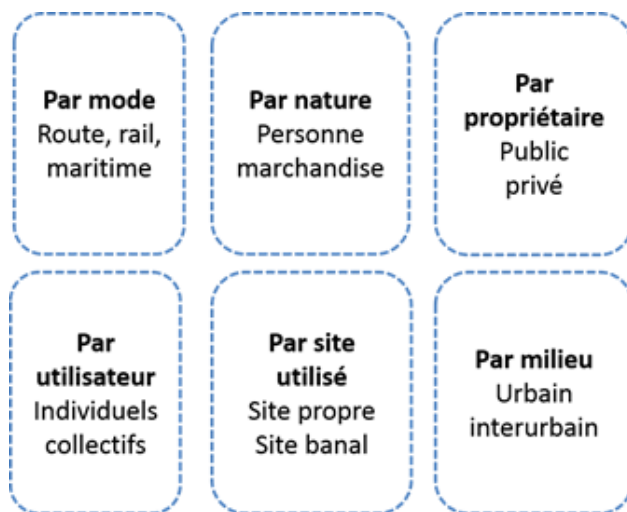


FIGURE 2.9 : Typologie des systèmes de transport Mérenne and Bouvry [1995]

2.2.1 Les caractéristiques spatio-temporelles de la mobilité

La mobilité est une tâche à réaliser dans un contexte spatio-temporel bien défini. Nous introduisons certaines contraintes qui caractérisent les déplacements humains dans l'espace.

Les contraintes spatiales

La deuxième section de ce chapitre est consacrée à la modélisation et à la spécification de l'espace urbain en tant que structure physique. Cependant, plusieurs paramètres spatiaux peuvent apparaître si l'on modélise les usages et les déplacements dans l'espace.

i **Localisation spatiale** La mobilité urbaine dans la ville représente les déplacements des individus dans le but de satisfaire leurs besoins dans l'espace. Les mouvements générés durant les déplacements possèdent des empreintes spatiales représentées par une séquence de localisations atteintes par les acteurs. Le concept de chemin spatial résume cet enchaînement de positions géographiques comme montré dans la Figure 2.10.

ii **Accessibilité spatiale** L'étude de la mobilité requiert d'étudier la notion d'accessibilité spatiale. L'accessibilité est définie comme la possibilité d'entrer, d'arriver et d'accéder à un lieu avec une facilité variable. En géographie, l'accessibilité expose la facilité par laquelle les individus peuvent attendre un lien ou une opportunité dans l'espace [Ingram \[1971\]](#). Nous focalisons sur l'accessibilité topologique expliquée par



FIGURE 2.10 : la structure d'un chemin spatial dans une ville

les nombreuses contraintes dues aux réseaux de transport urbains. [Dupuy \[1991\]](#) a défini l'espace réservé aux déplacements en trois éléments :

- **Le point** représente la position courante d'un acteur dans l'espace,
- **Le maillage** est les zones de satisfaction des besoins (points d'intérêt),
- **Le réseau** établit les relations entre les différentes régions de l'espace. Il assure la mobilité urbaine en se limitant sur sa structure.

En effet, l'espace peut être composé d'un espace aréolaire où les obstacles de la mobilité (bâtiments, zones privées) sont présents et un espace linéaire qui expose les réseaux circulatoires disponibles Dupuy [1991]. L'accessibilité topologique est l'étude de l'efficacité du réseau de transport pour atteindre des points quelconques de la ville.

Les contraintes temporelles

Les déplacements humains dans l'espace génèrent des trajectoires qui possèdent des caractéristiques spatiales et temporelles. Les déplacements sont limités dans le temps et se déroulent dans une durée variante selon plusieurs facteurs. En effet, chaque position d'une trajectoire possède des projections sur l'échelle temporelle qui indiquent l'instant de l'arrivée et de l'instant de départ. L'analogie entre le temps et l'espace est décrite par Raza [2001] par deux contraintes : (1) une personne se situe à une seule position dans un instant donné et (2) une personne peut être en des endroits différents à des instants du temps différents. Le temps est un concept ouvert et non borné alors que l'espace est souvent limité et moins accessible Easterfield et al. [1991]. De nombreuses interprétations sont possibles pour la sémantique du temps. Le temps réel qui représente un événement vrai dans le temps est nommé temps valide. Alors que le temps transactionnel fait référence au temps défini par l'utilisateur comme l'insertion des données dans une base de données Sondgrass and Ahn [1985]. Deux représentations sont possibles pour le concept de temps Jensen et al. [1994] : quantitative et qualitative. La représentation quantitative, ou dite aussi absolue, consiste à mesurer le temps en indiquant la date et l'heure. La mobilité urbaine est un événement qui dure dans le temps, sa représentation est assurée par un intervalle de temps borné par deux instants temporels. La représentation qualitative du temps est basée sur des données historiques visant à positionner le temps entre plusieurs événements. Cette représentation relative requiert un positionnement sur une séquence temporelle Schreiber [1994]. Les modèles ontologiques temporels ont défini le concept d'unité primitive de temps dans le but d'introduire les différentes mesures possibles dans l'échelle temporelle Moens and Steedman [1988]; Santos and Staab [2003]. Trois types d'unités temporelles ont été proposés dans la littérature Pan [2005] :

- Les points temporels représentent les instants dans le temps utilisés dans la modélisation quantitative du temps afin d'attribuer à un événement quelconque une mesure temporelle.
- Les intervalles temporels sont des périodes de temps consommées pendant un événement particulier qui demande plus d'un instant pour s'accomplir. Cette représentation est quantitative et définie par un ensemble fini de points temporels.
- Les occurrences temporelles sont des événements établis ou des actions réalisées dans l'espace. La description qualitative du temps est basée sur une séquence d'événements exploitée pour interpréter la temporalité d'un événement donné.

i **La topologie temporelle** Un chemin définit une trajectoire temporelle en précisant un ordre entre

les entités spatiales parcourues. La notion d'ordre permet de représenter le temps par une topologie comme dans l'espace. [Worboys \[1990\]](#) propose différentes structures topologiques pour l'étude des phénomènes dans le temps : linéaire, parallèle et cyclique. La structure cyclique, dite aussi périodique, définit les phénomènes répétitifs et continus dans le temps. La modélisation parallèle de temps concerne les événements qui se déroulent en parallèle dans le temps dans des endroits différents alors que la représentation linéaire décrit l'évolution d'une entité dans le temps dans un ordre donné. Les relations temporelles dans les différentes structures sont basées sur l'ordre des événements. [Allen and Hayes \[1989\]](#) ont formalisé les différentes relations temporelles comme illustrées dans la Figure 2.11.

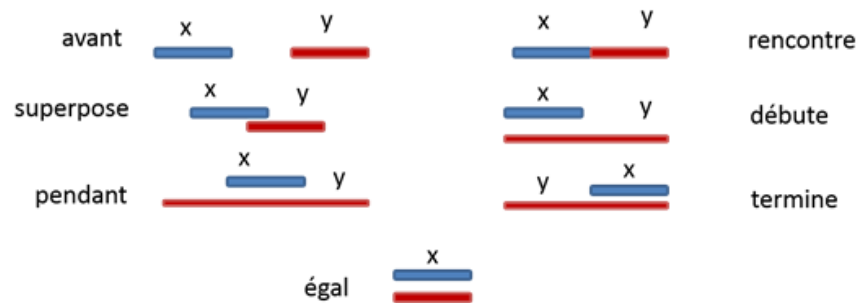


FIGURE 2.11 : Les relations temporelles [Allen and Hayes \[1989\]](#)

- ii **La granularité temporelle** Le temps est représenté selon plusieurs résolutions pour définir une échelle de granularité. La mobilité des personnes peut être analysée par exemple à l'échelle de l'heure ou à l'échelle de la journée. Le niveau de granularité est choisi par l'utilisateur dans un contexte donné. Par exemple, la date de naissance est une date importante définie souvent par la journée et l'heure [Bettini et al. \[1998\]](#). Alors que pour indiquer le début de printemps, l'utilisateur fixe juste la date de la journée. [Dyreson et al. \[2000\]](#) ont proposé un graphe dans le but de définir les différentes granularités temporelles. Le graphe suggère de noter \perp le niveau atomique dans le temps assurant un chemin entre les niveaux comme montré dans la Figure 2.12. Des opérateurs sémantiques ont été développés dans le travail de [Dyreson et al. \[1995\]](#) visant à faciliter le changement dans l'échelle temporelle.

Autres contraintes

Un déplacement peut être défini comme un chemin spatio-temporel dont les principales propriétés sont

:

- la durée du parcours entre l'instant où un acteur quitte le point de départ jusqu'au lieu de destination,
- les points de passage du parcours.
- Le chemin spatio-temporel peut varier selon les contraintes de l'utilisateur.

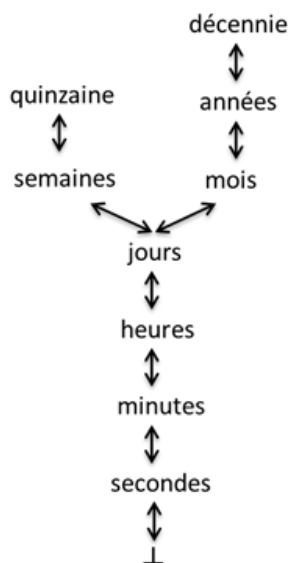


FIGURE 2.12 : la granularité temporelle Dyreson et al. [2000]

i **La modalité** Le réseau urbain de transport autorise l'utilisateur à se déplacer dans la ville par différents moyens de transport. Chaque moyen de transport représente une modalité possible à utiliser. En effet, un ensemble de moyens de transport est mis en place afin de satisfaire les besoins de déplacements dans la ville des personnes tels que la voiture personnelle, le bus, le métro, le tramway etc. La notion d'inter-modalité a été défini afin d'introduire le phénomène de changement de modalité entre un point d'origine et un point de destination. Cette possibilité de changer de moyen de transport dans un espace urbain s'explique par la multi-modalité de l'espace. Un réseau de transport multimodal est défini comme une distribution des lignes utilisées par plusieurs moyens de transport dans le but d'assurer les déplacements quotidiens des utilisateurs dans un espace urbain Zgaya et al. [2005].

ii La vitesse de déplacement

La vitesse est un facteur important du déplacement dans la ville. Ce facteur dépend de plusieurs paramètres tels que la structure de l'espace, le temps de déplacement, les modalités utilisées. La structure urbaine influence la vitesse de déplacement de chaque modalité. Plusieurs pénalités sont présentes ralentissant la vitesse classique d'un individu en prenant l'exemple d'un piéton qui rencontre des passages piétons, des feux de circulation ou des escaliers pendant son déplacement dans la ville. Les utilisateurs des moyens de transport motorisés rencontrent quant à eux des pénalités routières telles que les feux de circulation, les carrefours et des vitesses limites fixées.

Moyens d'acquisition des données de déplacement

L'étude de la mobilité urbaine demande d'obtenir l'historique des trajectoires réalisées sur le terrain dans le but de les analyser. [Andrienko et al. \[2008\]](#) ont détecté quatre méthodes de détection des mouvements dans l'espace : la détection pour chaque intervalle de temps, la détection pour chaque changement de position, l'approximation d'un lieu particulier où la détection de chaque nouvel événement. L'acquisition de ces données se fait par deux techniques différentes :

- i **Enquête OD** : Les enquêtes d'Origine/Destination consistent à réaliser des interviews selon un questionnaire d'utilisateurs de réseaux de transports dans l'objectif d'étudier leurs mobilités quotidiennes entre leurs points de départ et leurs points d'arrivée (domicile, hôtel etc.). Cette méthode coûteuse est basée sur les observations et les entretiens directs ou téléphoniques selon des règles précises [Abrahamsson \[1998\]](#). Cette méthode classique permet de collecter les données sur un échantillon de la population. Les informations acquises par les enquêtes OD concernent aussi les modes de transport utilisés, le temps et la durée de la mobilité.
- ii **Les données GPS** : Le GPS (Global Positioning System) est un système de géolocalisation mondial exploitant les satellites. Les détecteurs GPS sont intégrés partout dans la vie quotidienne : les voitures, les téléphones portables, des bracelets etc. Les capteurs GPS offrent des traces digitales pour chaque action et mouvement à travers le système de détection. Les données GPS sont mises en disposition des utilisateurs dans certaines plateformes gratuitement. Cette collecte est basée sur la participation des utilisateurs de GPS qui acceptent de mettre en lignes les données.

2.2.2 Modélisation de la mobilité urbaine

La mobilité urbaine est un concept intéressant à étudier en raison de ses diverses fonctionnalités offertes par la ville et sa structure multimodale. Plusieurs approches ont été proposées dans la littérature pour modéliser les concepts qui garantissent la mobilité urbaine.

2.2.2.1 La typologie du système du transport

La modélisation du système de transport doit prendre en compte la complexité structurelle et fonctionnelle des réseaux de transport. Deux types de réseaux de transport ont été distingués par les modèles proposés. Le réseau de transport public est caractérisé par plusieurs paramètres :

- Les itinéraires sont fixes dans un réseau de transport public où les points d'entrée et de sortie sont limités et correspondent rarement aux points d'origine/destination d'un déplacement réel.
- Les horaires de départ et d'arrivée sont définis à l'avance par le calcul des différents trajets de la

ligne.

- Le coût de trajet ne dépend pas nécessairement de la distance ou du temps de déplacement mais plutôt par des prix prédéfinis par les opérateurs de transport.
- La transformation modale est un critère primordial pour évaluer la conception d'un réseau de transport public. Le transport public doit assurer la connexion entre les différents modes de transport et les lignes de chaque mode dans le but de garantir une flexibilité et une proximité pour les utilisateurs.
- La qualité de service peut être dégradée pour des raisons de sécurité. Le réseau de transport individuel occupe la grande partie du réseau routier de la ville. Ce réseau possède plusieurs caractéristiques :
- Le réseau individuel est multimodal, c'est à dire qu'il peut être utilisé par différents modes de transport en prenant en compte les contraintes qui peuvent émerger comme par exemple l'obligation pour les piétons d'utiliser les trottoirs pour se déplacer où les cyclistes qui doivent utiliser les rues et les pistes cyclables.
- Les règles de circulation se présentent dans les réseaux de transport dans le but d'organiser les flux de déplacements pour assurer la sécurité des utilisateurs.
- Le réseau de transport individuel permet aux utilisateurs d'accéder au réseau de transport public. Les modèles de système de transport proposés ont exposé la structure multimodale des réseaux ainsi que les contraintes temporelles qui sont liées notamment au réseau de transport public. Les graphes ont été utilisés pour modéliser le transport multimodal de la ville en exploitant la structure hiérarchique [Li et al. \[2007\]](#); [Bielli et al. \[2006\]](#). En effet, chaque mode de transport peut être représenté par un sous-graphe comme montré dans la Figure. La structure multimodale du réseau de transport a été modélisée par des approches conceptuelles qui mettent en évidence les modalités et les caractéristiques temporelles qui associent chaque mode [Chen S. and C. \[2011\]](#). D'autres approches se sont basées sur les ontologies² afin d'enrichir le modèle de transport par la sémantique [Saad \[2010\]](#); [Lorenz et al. \[2005\]](#).

La mobilité et la gestion des flux

La mobilité demande la présence des acteurs qui se déplacent dans un cadre spatio-temporel à travers une modalité donnée. Ce dynamisme a été représenté dans plusieurs modèles dont le but d'étudier des phénomènes et de résoudre les problématiques associés à la gestion des ressources (temps, distance etc.). Dans la suite de cette section, nous représentons certains modèles proposés ainsi les problématiques de recherche reconnus pour la gestion de la mobilité urbaine.

2. Ontologie est un modèle conceptuel à base des graphes qui représente les concepts, les relations et les instances d'un domaine et qui permet d'enrichir le modèle par une base des connaissances

i La modélisation du trafic urbain

La modélisation du réseau de trafic demande des outils et des techniques capables de gérer le dynamisme temporel et spatial.

- **Les réseaux de Pétri** sont utilisés pour la modélisation des comportements dynamiques comme la mobilité urbaine. Un réseau de Pétri est constitué de places, d'arcs et de transitions. Le dynamisme de modèle est représenté par des jetons qui se transfèrent d'une place à une autre à travers les arcs et les transitions si les conditions de franchissement sont valides. La modélisation des flux des acteurs pendant les déplacements urbains par le réseau de Pétri est réalisée dans le cadre de travaux de [Saade \[1982\]](#).
- **Les automates cellulaires** offrent un cadre conceptuel pour l'étude géométrique des objets dynamiques. Les automates cellulaires sont une sorte de grille où chaque cellule explicite un état particulier dans le temps [Wolfram \[1983\]](#). Ce modèle évolutif montre bien son utilité pour la gestion des problématiques dynamiques tel que le déplacement des objets mobiles dans le temps. Les automates cellulaires sont utilisés comme un outil de modélisation mais aussi pour le calcul. Pour gérer le dynamisme de déplacement dans la ville et la multi-modalité du système de transport, les automates cellulaires ont été utilisés afin de concevoir la mobilité individuelle des agents. À travers cette modélisation, les chercheurs formalisent mathématiquement l'espace et définissent les différents processus géographiques possibles.

Le formalisme proposé pour les automates cellulaires est représenté sous forme d'un quadruplet (U, V, E, F) avec :

- U est l'ensemble des unités spatiales régulièrement arrangées dans la grille des automates cellulaires.
- V est l'ensemble des voisinages de chaque unité. Le voisinage est décrit selon un critère topologique ou métrique. L'ensemble des unités u_i est : $v_i = \{u_k, u_l, u_m, \dots, u_p\}$ considérées comme les voisins de u_i .
- E est l'ensemble des états possibles des unités. Chaque état est défini par des variables qualitatives ou quantitatives, continues ou discrètes.
- F est l'ensemble de fonctions de transition et d'évolution des unités dans le temps tandis que le prochain état de chaque unité dépend de sa situation courante. L'automate cellulaire assure d'un côté l'aspect structurel de l'espace défini par l'ensemble U et V mais aussi le côté dynamique et évolutif à travers l'ensemble E et F. Les automates cellulaires sont utilisés fréquemment pour résoudre les problématiques de simulation dans l'espace urbain [Batty and Xie \[1999\]](#); [Badariotti et al. \[2007\]](#); [Tonguz et al. \[2009\]](#).
- Les systèmes multi-agents (SMA) sont utilisés afin de mettre en place des acteurs évolutifs qui possèdent une capacité de communication entre eux afin de résoudre des problèmes dynamiques. Le système multi-agents a été exploité par plusieurs chercheurs pour résoudre des problèmes de transport et de déplacement dans l'espace [Zgaya \[2007\]](#), [Ligtenberg et al. \[2004\]](#), [Balmer et al. \[2004\]](#).

ii Les systèmes de transport intelligents

Les systèmes de transport intelligents (ITS) sont les applications des nouvelles technologies de l'information et de la communication au domaine du transport (NTIC) [Haddon \[2004\]](#). Les systèmes ITS utilisent des techniques de communication et d'extraction d'information pour la gestion du trafic de transport en temps réel. L'objectif des ITS est d'optimiser les déplacements par le système transport et de garantir la sécurité routière des utilisateurs [Dimitrakopoulos and Demestichas \[2010\]](#). Les informations sur le trafic sont acquises par les techniques de localisation (GPS, téléphones mobiles etc.) et les techniques des capteurs. La gestion du trafic de transport dans la ville implique l'étude de plusieurs problématiques qui se résument principalement en deux axes : l'optimisation et la simulation.

iii **L'optimisation combinatoire** Les utilisateurs de la ville cherchent en continuité à planifier et à optimiser leurs déplacements selon un ou plusieurs critères tels que : la distance, la durée, le coût etc. L'optimisation combinatoire est une branche dédiée à résoudre les problématiques d'optimisation sur une structure sous-jacente et discrète par l'utilisation des techniques mathématiques et informatiques [Papadimitriou and Steiglitz \[1982\]](#). Selon la situation, l'optimisation peut être mono-objective ou multi-objectives. L'optimisation combinatoire consiste à définir des fonctions d'un ou plusieurs paramètres dans le but de chercher à la maximiser ou à la minimiser selon le besoin. Les algorithmes heuristiques conçus dans le cadre d'un problème d'optimisation combinatoire visent à chercher des solutions optimales en prenant en considération les contraintes qui caractérisent le problème. La recherche du chemin le plus court est une des problématiques mono-objectif classiques de transport qui visent à trouver le chemin optimal entre des points donnés. La recherche demande souvent une modélisation par des graphes des réseaux de transport dans le but d'exploiter la richesse algorithmique de la théorie des graphes. Les algorithmes de parcours de graphes sont utilisés pour explorer les graphes de transport afin de détecter le chemin optimal (plus court, moins coûteux, etc.). En effet, les graphes sont pondérés et chaque arc possède un poids qui représente sa longueur ou le temps nécessaire pour le parcourir. Plusieurs algorithmes de parcours de chemin le plus court ont été proposés dans la littérature tels que l'algorithme A* [Hart et al. \[1968\]](#) et l'algorithme Dijkstra [Dijkstra \[1959\]](#) qui ont comme objectif de retourner le chemin le plus court à partir d'un point initial et d'un point d'arrivée donnés par des processus récursifs. L'optimisation multi-objectifs est recommandée dans des problèmes plus complexes qui nécessitent la prise en compte de plusieurs contraintes, ou critères, et paramètres pour obtenir des solutions optimales. Les contraintes sont définies par un ensemble $E = e_1, e_2, \dots, e_n$ où chaque élément possède un poids $w(e_1), w(e_2), \dots, w(e_n)$. Le poids d'une contrainte réfère à son importance par rapport aux autres contraintes. La résolution de ce problème est assurée par la recherche du maximum ou du minimum d'une fonction d'adaptation (fitness function) ou dite aussi fonction de coût qui assure l'évaluation des solutions en tenant en compte le poids de chaque critère. Les méthodes méta-heuristiques ont été appliquées dans ce genre de problèmes comme par exemple les algorithmes génétiques. L'optimisation multicritère d'un déplacement urbain est une problématique traitée dans plusieurs travaux qui se sont focalisés sur de nombreux facteurs économiques,

sociaux et temporels Campos et al. [2009]; Macharis et al. [2009].

iv La simulation de la mobilité urbaine

La méthode de simulation consiste à créer un environnement artificiel à partir d'un ensemble de règles et d'hypothèses dans le but de simuler des comportements, des interactions et des actions des acteurs dans un environnement dynamique Hagerstrand [1976]. La simulation a été appliquée pour les questions en lien avec la mobilité dans la ville afin d'expérimenter des hypothèses et des scénarios des déplacements. Kitazawa et Batty Kitazawa and Batty [2004] ont proposé un mode de simulation pour les flux des piétons. La simulation a été réalisée pour le trafic automobile Taniguchi et al. [1999]. Le réseau de transport multimodal a été le support d'une simulation qui gère les changements de modes de transport des acteurs Nguyen et al. [2012]; Y. and P. [2007].

2.2.3 Analyse spatiale des flux de mobilité

La disponibilité des données sur la mobilité urbaine et les déplacements des individus dans l'espace a facilité la tâche du traitement et de l'exploitation des informations liées à la mobilité. D'un point de vue structurel, les données de mobilité permettent d'observer les parties des réseaux de transport les plus utilisés par les acteurs. D'ici vient l'idée de réaliser de l'analyse spatiale sur les réseaux des déplacements dans le but d'étudier la configuration spatiale de la mobilité humaine et d'interpréter la fiabilité des réseaux de transport. Les techniques de l'analyse spatiale peuvent être exploitées pour l'étude des réseaux générés. L'analyse spatiale des réseaux de mobilité offre un aspect plus fonctionnel et sémantique aux résultats qui sont plus spécifiés. Le tableau 2.2 donne une illustration sur les travaux qui existent dans la littérature pour l'analyse spatiale de trafic par la syntaxe spatiale.

2.2.4 Les limites du modèle des déplacements

Les approches basées sur la mobilité et les déplacements urbains consistent à étudier les flux de transport de la ville et de générer les itinéraires qui relient des points particuliers. Le choix d'itinéraires par des techniques de simulation et d'optimisation combinatoire est un des principaux objectifs de ces approches spatio-temporelles. La procédure de demande du transport reste en revanche statique et séquentielle dans le sens où les POIs à parcourir sont fixés auparavant par les acteurs ou ils sont choisis aléatoirement pour la génération des déplacements. Les approches à base de déplacement ont été discutées dans McNally and Rindt [2008] dont nous précisons quelques limites :

- l'ignorance que les déplacements sont effectués pour le but de participer à l'activité,
- la limitation des déplacements individuels qui représente un trajet entre un point de départ et le premier point d'arrivée sans prendre en compte les relations spatio-temporelles entre les différents

Tableau 2.2 : les applications de l'analyse spatiale sur les réseaux de la mobilité

| Auteurs | La contribution |
|--|---|
| Teklenburg et al. [1993]; Jiang [1999] | Ces travaux représentent une analyse spatiale des flux des piétons par les opérateurs de la syntaxe spatial en se basant sur des données collectées ou des trajectoires simulées. |
| Hu et al. [2008] | L'analyse spatiale de réseau routier utilisé par les voitures à l'aide des données GPS. |
| ElBanhawy et al. [2013] | Les auteurs ont proposé un modèle qui intègre la syntaxe spatiale à la simulation de la mobilité des voitures électriques dans le but d'évaluer l'infrastructure exploitée. |
| Leung et al. [2011]; Gao et al. [2013] | Plus particulière, l'étude de la mobilité des voitures taxi dans la ville par la syntaxe spatiale permet d'observer les flux de déplacement des utilisateurs des taxis. |
| Van Nes and Stolk [2012] | La syntaxe spatiale a été appliquée sur le réseau ferroviaire de train entre plusieurs villes au nord des Pays-Bas |
| Law et al. [2012] | Le réseau d'étude dans ce travail est le réseau multimodal de la mobilité qui incorpore une partie de réseau routier et une autre partie de réseau ferroviaire. |

trajets effectués dans le cadre d'une activité d'un individu,

- la déconsidération des interrelations entre les déplacements et la planification des activités influencée par des contraintes personnelles,
- la minimisation de coût en négligeant les stratégies de décisions qui varie d'une personne à une autre (les habitudes, le profil etc.),
- le manque d'une observation générale des comportements des individus qui est uniquement basé sur les déplacements sans essayer de comprendre l'acheminement des activités.

2.3 Activités dans la ville

Les modèles proposés dans la section précédente présentent la mobilité urbaine de personnes dans la ville. Les individus se déplacent dans la ville dans le but de réaliser leurs activités et tout changement

dans le programme de l'activité entraîne un changement dans les déplacements. Les approches basées sur les activités se focalisent sur les relations entre le choix de l'activité et les déplacements à effectuer pour la réaliser. Afin d'explicitier cette relation, ces approches demandent d'enrichir les modèles spatio-temporels par un enchaînement et une planification des activités. La déviation vers des systèmes basés sur les activités a été expliquée par l'intérêt d'élargir le champ d'étude pour étudier l'utilisation du sol et pour obtenir un cadre d'analyse des activités dans l'espace **Y. and P. [2007]**. Une définition de l'activité a été proposée par **Axhausen K. W. [1992]** comme une action effectuée dans un lieu qui demande une durée de temps limitée et qui peut être réalisée par un individu ou un ensemble d'individus. Une activité est considérée comme une échelle unitaire de l'usage de la ville qui demande de répondre aux questions : Où ? Quand ? Qui ? et pourquoi ? Des questions qui cherchent à enrichir le cadre spatio-temporel par un cadre sémantique et humain.

2.3.1 Les approches et les théories à base d'activités

Les approches à base d'activité ont été développées afin de combler les lacunes des approches classiques à base de déplacement. Leur principe est de lier les modèles de transport par la notion de POI définie par **Mitchell and Rapkin [1954]**. À travers la mobilité urbaine, les acteurs arrivent à accéder à leurs activités dans la ville. Les caractéristiques du modèle de transport telles que le mode de transport, le temps de déplacement etc. sont étudiées dans les approches à base d'activité. D'autres attributs qui spécifient la modélisation des activités concernent la visite des POIs. Plusieurs approches ont été proposées pour modéliser les activités urbaines dont nous spécifions quelque unes dans la suite de ce chapitre.

i Les facteurs économiques

La modélisation d'une activité demande de prendre en compte le cadre économique qui caractérise la ville. Les acteurs de la ville cherchent à satisfaire leurs besoins par le bénéfice de différents services disponibles. Une intense complexité est alors apparue entre les demandes des acteurs et l'environnement économique **Chapin [1974]**. Plusieurs paramètres économiques s'imposent dans le déroulement de l'activité et influencent les déplacements ainsi que la planification de l'activité (les services à visiter).

- les caractéristiques économiques de l'individu : son pouvoir d'achat, sa zone de résidence, son mode de transport,
- les caractéristiques économiques de l'espace urbain : la disponibilité des services, les localisations et les horaires des services, l'efficacité du transport public.

ii Time Geography

La Time Geography **Hagerstrand [1976]** est l'une des principales théories proposées pour la modélisation du concept d'activité à un niveau désagrégé en milieu urbain. La Time Geography apporte une contribution théorique pour la prise en compte de l'individu dans un système et modélise les activités et les déplacements dans un milieu urbain à un niveau microscopique. La combinaison entre l'espace, le temps

et l'activité offre une souplesse à la mobilité plutôt qu'un dynamisme spatial [Chardonnel and Thévenin \[2012\]](#). Hagerstrand a suggéré trois types de contraintes qui accompagnent l'accomplissement d'une activité :

- les contraintes liées à la capacité humaine et ses besoins vitaux comme travailler ou se nourrir,
- les contraintes de couplage cadrent le contexte spatio-temporel (où, quand, la durée) ainsi que les contraintes techniques liées aux modalités utilisées,
- les contraintes d'autorité sont les contraintes spatio-temporelles qui dépassent le contrôle des individus (e.g. les accidents, les catastrophes etc.).

De nombreux concepts sont offerts par la Time Geography pour définir les contraintes des activités (voir Figure 15). Le concept de « chemin spatio-temporel » est défini dans la Time Geography comme un parcours bidimensionnel dans l'espace-temps. Le concept de mobilité d'un individu donne un cadre support pour la modélisation des modalités et des opportunités. De nombreux modèles se sont depuis orientés vers la modélisation des activités urbaines à partir du chemin spatio-temporel [Chen et al. \[2011\]](#); [Shaw S. L. \[2009\]](#); [Recker W. W. \[1986\]](#). Le prisme est un concept dérivé du chemin spatio-temporel qui définit les limites spatio-temporelles totales atteintes par un individu durant une période de la journée [Neutens T. and F. \[2011\]](#); [Miller \[1991\]](#).

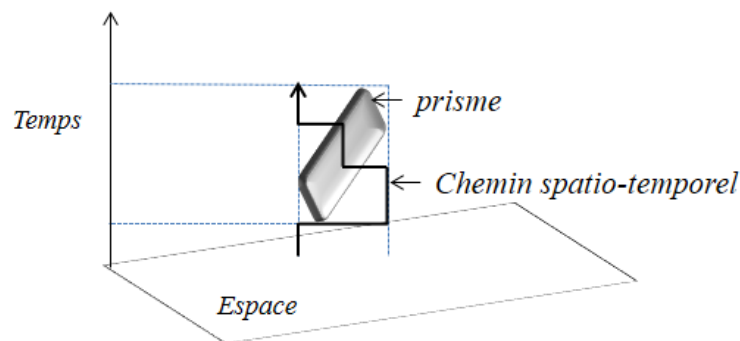


FIGURE 2.13 : Les concepts de chemin et de prisme du Time Geography [Hagerstrand \[1976\]](#)

- iii **La théorie d'activité** Une activité possède un aspect cognitif qui se manifeste par des actions due à des décisions prises par l'acteur dans une situation particulière. La planification des activités est effectuée par l'aide d'un ensemble de règles cognitives de décision [Hayes-Roth and Hayes-Roth \[1979\]](#). La théorie de l'activité a été fondée par des psychologues soviétiques [Vygotsky \[1967\]](#) dans le but d'étudier le principe d'exécution d'une activité. La théorie de l'activité affirme que toute action préserve un cadre social et technique [Engeström \[2001\]](#). En effet, plusieurs concepts ont été proposés pour appréhender les relations entre les individus et les différents moyens disponibles pour l'exécution d'une activité. La généralisation de cette théorie l'a permis d'être appliquée dans plusieurs domaines telles que la gestion des activités dans un cadre industriel [Dhuieb et al. \[2015\]](#), l'étude des activités d'interaction entre Homme-machine (IHM) [Kuutti \[1996\]](#) ou également en géographie et l'analyse des comportements dans l'espace. Les approches

classiques de la théorie de l'activité offrent un cadre social et technique aux actions mais qui n'intègrent pas l'espace et le temps. **Kofod-Petersen and Cassens [2006]** s'est appuyé sur cette théorie pour enrichir ses concepts en ajoutant dans son modèle le contexte spatio-temporel. La Figure 2.14 montre les concepts classiques de la théorie de l'activité et la nouvelle approche de Kofod-Petersen.

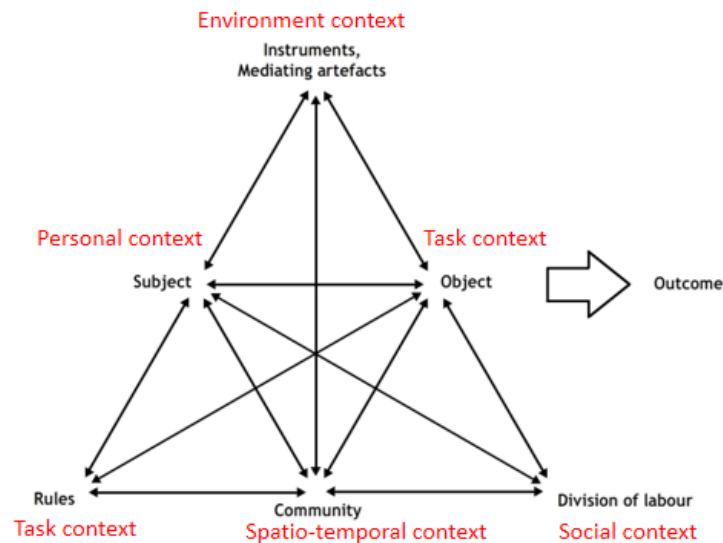


FIGURE 2.14 : Le modèle de la théorie de l'activité intégrant l'espace et le temps **Kofod-Petersen and Cassens [2006]**

2.3.2 Modèles d'activités mobiles urbaines dans la ville

L'activité urbaine est un concept complexe qui exige une modélisation multidimensionnelle. Les modèles proposés sont basés sur les théories présentées dans la section précédente. Les contextes et les contraintes qui entourent les activités ont été les champs d'intérêt des modèles proposés. Dans la littérature, plusieurs formalismes ont été proposés pour modéliser les activités urbaines qui vont être exposés à la suite.

i Les modèles conceptuels

Les modèles conceptuels ont pour but de structurer les données et les informations. UML³. UML est l'un des formalismes les plus utilisés pour la structuration conceptuelle des données. Ce formalisme a été utilisé dans plusieurs travaux pour la modélisation des activités urbaines. **Frihida et al. [2004]** ont suggéré un modèle conceptuel pour modéliser une activité possédant trois classes principales comme illustré dans la Figure 2.15. La classe « Person » représente les informations individuelles de la personne ainsi que les listes de déplacements et d'activités planifiées par l'individu. Les informations associées à l'activité comme la durée, les points de départ et d'arrivée sont modélisées par la classe « Activity ». La classe « Trip » se réfère aux déplacements réalisés durant l'activité et intègre les données spatiales et temporelles

3. UML (Unified Modeling Language) est un langage formel défini par l'OMG (Object Management Group)

liées à chaque déplacement. Les travaux de [Shaw and Yu \[2009\]](#) proposent un modèle conceptuel qui

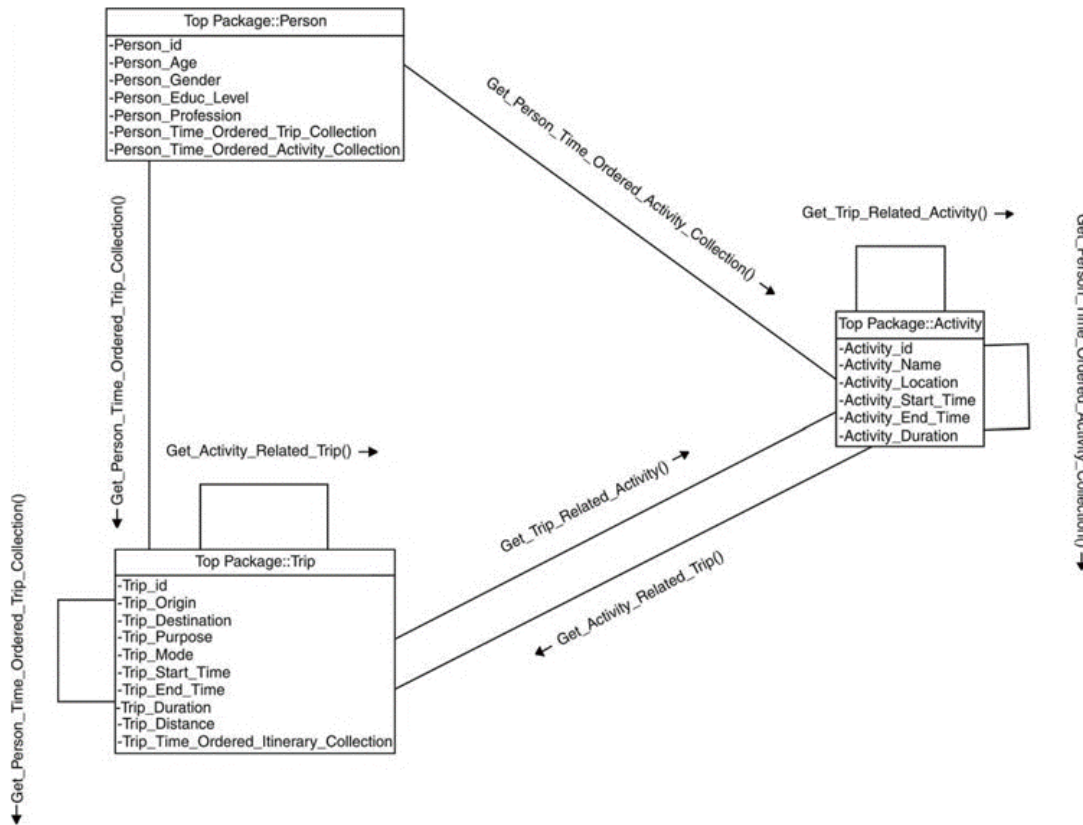


FIGURE 2.15 : Le diagramme d'activité proposé par Frihida et al. [2004]

intègre les systèmes d'informations et de communication afin de prendre en compte les activités virtuelles (e-commerce, loisir sur internet etc.). Leur modèle est basé sur le concept de chemin spatio-temporel de la Time Geography dans le but d'exposer les interactions spatio-temporelles (voir Figure 2.16). La classe « *SpaceTimePath* » représente la trajectoire de l'individu incorporant des informations spatiales et temporelles sur l'activité. La classe « *Individual* » indique les caractéristiques non spatiales de chaque individu et possède une relation avec la classe « *SpaceTimePath* » car chaque individu possède un chemin spatio-temporel. La classe « *Activity* » est réservée pour les informations associées à l'activité.

ii Les modèles ontologiques

Une ontologie permet la représentation des données et des connaissances à l'aide d'un formalisme approprié et particulier pour un domaine d'application donné [Gruber et al. \[1993\]](#). L'ontologie est définie comme une approche d'organisation des données possédant un mécanisme de raisonnement. [Gómez-Pérez and Benjamins \[1999\]](#) ont introduit les ontologies comme un outil qui apporte les moyens de décrire la conceptualisation des données. Cette technique riche de la sémantique a été exploitée dans certains travaux pour modéliser et conceptualiser les activités. [Gu et al. \[2004\]](#) ont proposé une ontologie pour définir les contextes qui assistent les déroulements des activités. Le modèle proposé met en place

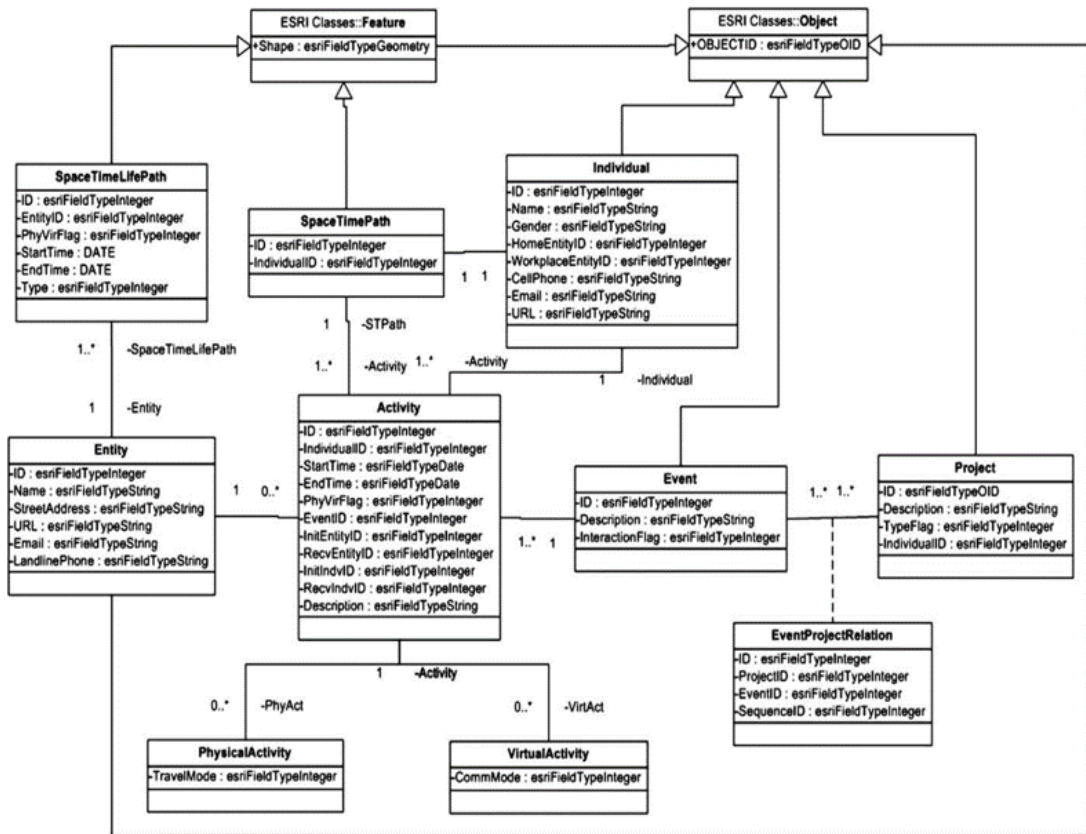


FIGURE 2.16 : Le modèle d'activité physique et virtuel de Shaw et Yu [2009]

un paradigme d'environnement intelligent comme montré dans la Figure 2.17. Les entités contextuelles ont été suggérées dans le modèle : le contexte spatial « Location », le contexte de l'utilisateur « Person », le type de l'activité « Activity ». Dans leur modèle illustré dans la Figure 2.18, Kofod-Petersen and

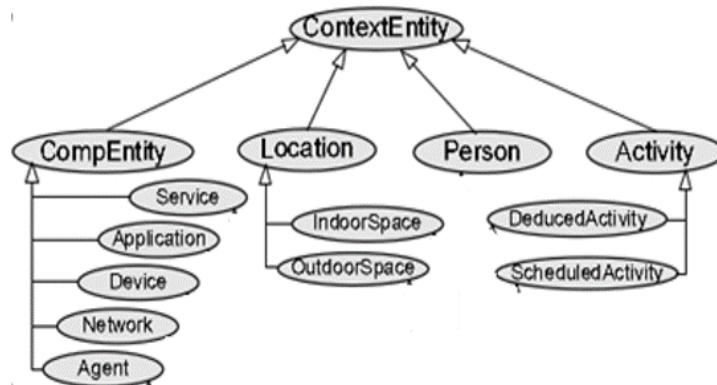


FIGURE 2.17 : Modèle ontologique proposé par Gu et al. [2004]

Cassens [2006] s'appuie sur la théorie d'activité pour proposer un modèle ontologique générique du

contexte basé sur quatre catégories : le contexte personnel regroupant les différentes informations sur les acteurs ; le contexte social représentant les interactions de l'acteur ; le contexte des tâches définissant les différentes actions qu'un acteur doit réaliser et le contexte spatio-temporel qui cadre le déroulement de l'activité. Ce modèle est applicable dans le cas d'une activité urbaine au vu de sa généralité.

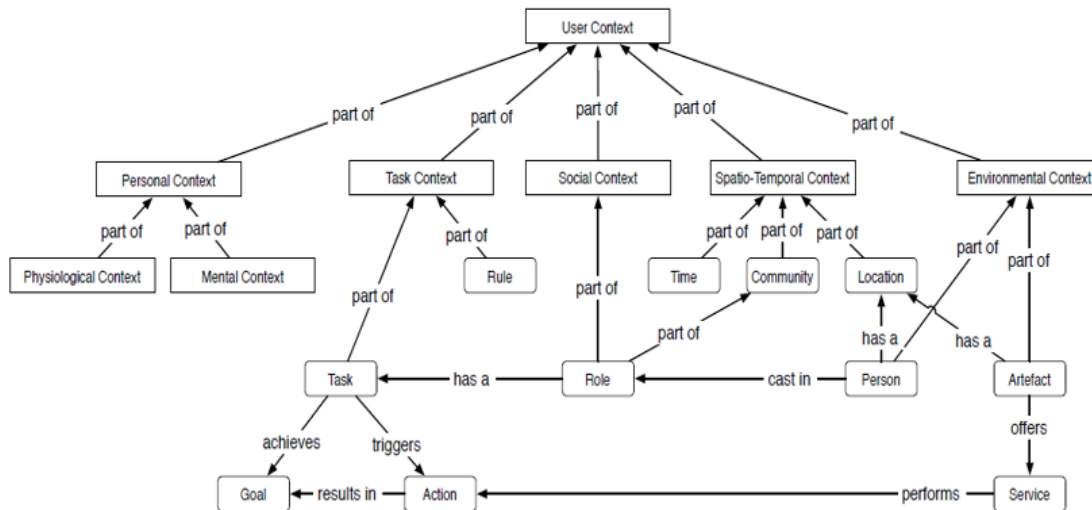


FIGURE 2.18 : Représentation ontologique du modèle de contexte proposé par Kofod-Petersen [2006]

2.3.3 Applications basées sur les activités

Les applications qui s'intéressent aux activités urbaines sont diverses et nombreuses. Nous pouvons distinguer deux champs d'étude sur les activités. Le premier est l'analyse des comportements humains par l'étude des activités. Cette analyse demande des données historiques sur la planification temporelle et spatiale des activités dans le but d'observer le dynamisme fonctionnel de la ville et d'étudier l'accessibilité aux activités par les différents acteurs. Le deuxième champ d'études consiste à anticiper et à générer des activités selon une situation particulière en se basant sur des connaissances de comportement des individus dans la ville.

i L'analyse des activités urbaines

L'analyse des comportements humains s'appuie sur des données historiques sur les informations activités/déplacements. L'objectif des travaux proposés dans la littérature est d'identifier des corrélations entre les différents attributs définissant une activité. Plusieurs dimensions sont prises en compte dans l'analyse des activités urbaines telles que le temps, l'espace, le type d'activité et les caractéristiques des acteurs. Pietilä et al. [2015] ont proposé une analyse des activités de loisirs dans la nature en s'appuyant sur une enquête réalisée en Finlande dans le but de relever les corrélations entre les variables qui caractérisent l'environnement, l'individu (âge, genre, niveau éducationnel) dans deux milieux différents : le milieu urbain et la zone périurbaine. La relation entre la disponibilité des zones vertes et les activités physiques

a été aussi le thème de recherche de Zhang et al. [2015]; Forsyth et al. [2006]; Duncan and Mummery [2005]. Lipperman-Kreda et al. [2015] se sont focalisés sur le phénomène d'addiction du tabac par les adolescents en essayant d'analyser les localisations des points de vente de tabac par rapport à leurs activités. Les données des mobilités associées aux activités ont été acquises à travers des capteurs GPS des téléphones portables des individus. Yao et al. [2015] ont proposé un modèle pour l'étude des accidents voitures-piétons en s'appuyant sur les activités des piétons dans la ville. Certaines études sur les activités se basent sur la différence des caractéristiques individuelles des acteurs comme le travail proposé par Kwan [2000, 1999] qui évoque une analyse spatio-temporelle des activités selon le genre de l'acteur (femmes et hommes). L'analyse des comportements humains dans un espace urbain menée par Kang and Scott [2008] montre une analyse des contraintes spatio-temporelles (temps départ/arrivée, durée, distance etc.) selon le type de l'activité et le déplacement qu'il nécessite. Chen et al. [2011] se sont basés sur une technique de visualisation de chemin spatio-temporel de la Time Geography pour étudier chaque type d'activité (loisir, étude, nécessité vitale etc.).

ii L'analyse d'accessibilité des activités

Nous avons introduit dans la première partie de ce chapitre l'accessibilité topologique de l'espace qui présente la capacité d'accéder à un point de la ville à partir du réseau urbain disponible. L'accessibilité d'une activité prend un aspect plus fonctionnel en représentant la facilité d'accéder aux objets urbains offrant des services particuliers à partir d'une position spécifique et à l'aide de moyens de transport particuliers Dalvi and Martin [1976]. Les mesures d'accessibilité permettent d'indiquer les effets des politiques d'usage du sol et le développement du transport et permettent également la caractérisation du fonctionnement général de la ville. L'accessibilité par un système de transport est définie comme la mesure dans laquelle il permet aux personnes d'atteindre les activités grâce à un moyen de transport ou la combinaison de plusieurs moyens de transport. Geurs and Van Wee [2004] ont introduit différents composants définissant l'accessibilité des activités illustrées dans la Figure 2.19.

- **L'utilisation du sol** influence l'accessibilité des activités urbaines par l'observation de la quantité, la quantité et la distribution des opportunités offertes par l'espace. Les points d'intérêt (POIs) sont des points qui offrent des services pertinents aux utilisateurs de la ville (commerce, santé, travail etc.) qui doivent correspondre à leurs demandes.
- **Le transport** est le composant qui assure l'accessibilité entre les différents POIS durant la réalisation de l'activité. Les paramètres liés au système de transport dans la ville sont divers tels que la modalité, la durée (déplacement, attente) et le temps d'attente.
- **Le temps** limite l'accès à certaines activités qui possèdent des contraintes temporelles (le temps d'ouverture et de fermeture).
- **L'acteur** a une accessibilité aux activités qui varie selon ses caractéristiques physiques, économiques et sociales.

Les mesures d'accessibilité des activités permettent notamment d'étudier les aspects économiques et

d'analyser les comportements humains et ses effets ainsi que l'accessibilité de ses activités aux différents acteurs de la ville. Les travaux proposés sont basés sur des données historiques sur les activités et les déplacements des individus dans la ville. La programmation d'activité est la planification des actions réalisées pendant l'activité par un individu en considérant la dimension spatiale et temporelle **Damm [1980]**. **Recker et al. [1986]** ont défini le programme des activités d'un individu comme les positions et les durées des activités influencées par les modes de transport disponibles et la densité des opportunités pour la réalisation des activités. La planification est effectuée selon plusieurs contraintes budgétaires, sociales et spatio-temporelles ce qui rend la tâche difficile. La planification d'une activité est généralement catégorisée en trois types selon l'échelle temporelle : journalière, quotidienne et hebdomadaire. La planification quotidienne indique les actions répétitives et principales dans une journée (e.g. travailler, amener les enfants à l'école). La planification journalière touche les activités non programmées à l'avance mais qui ont été mises en évidence en raison de contraintes ou d'opportunités imprévues. A un niveau de granularité plus élevé, la planification hebdomadaire explicite les activités majeures de l'individu. Le processus de génération est lié à des connaissances préalables sur les comportements des individus selon leurs caractéristiques personnelles, économiques et sociales mais aussi selon le cadre spatio-temporel. La planification des activités a été traitée dans plusieurs travaux dans la littérature. **Bhat and Koppelman [1993]** ont proposé une plateforme de conceptualisation du processus de génération d'un programme d'activité. La plateforme de génération est conçue pour ne dépendre que de deux critères principaux qui sont la zone de résidence et les services à proximité autour d'elle. La typologie de ces besoins donne deux types d'activités **Reichman [1976]** : (1) les activités de subsistance se réfèrent au travail ou les affaires professionnelles des personnes (2) et les activités de maintenance préservent les activités du bien-être des individus (achat, soin, loisir). **Doherty and Miller [2000]** a proposé un modèle décisionnel de la planification des activités qui supporte les mises à jour temporelles ou spatiales. **Bowman and Ben-Akiva [2001]** ont eu l'idée de proposer un prototype de différents scénarios des activités dans la ville de Boston. Le travail et la maison sont les positions principales où des activités peuvent apparaître le long du trajet effectué entre les deux positions ou pour une autre sortie de la maison. Les règles de décision sont déduites à partir du recueil des données comme le système d'enquêtes développé par **Doherty and Miller [2000]** visant à enregistrer les programmes d'activités des individus. Ces données permettent de comprendre le processus de décision des activités selon les caractéristiques de l'utilisateur. Le modèle proposé par **Dekker et al. [2014]** se focalise sur l'activité de loisirs par l'étude de trois choix possibles : la visite de musée, l'écoute de concert et la marche en nature. La décision entre ses différentes alternatives est effectuée à partir de l'analyse des données de traces des activités contenant des informations sur les individus (genre, âge etc.) et les paramètres temporels et budgétaires.

Tableau 2.3 : L'analyse spatiale des activités urbaines dans la ville

| Auteurs | Contribution |
|-------------------------------------|--|
| Porta et al. [2012]; Van Nes [2005] | Dans ce travail, l'analyse spatiale est appliquée sur le réseau routier de la ville de Barcelone. Les résultats des analyses ont été corrélés avec l'ensemble de POIs des activités économiques (administration, commerce, shopping etc.) |
| Gospodini [2001] | L'auteur propose un modèle qui étudie les relations entre la morphologie urbaine de la ville et l'activité de tourisme. Le modèle est théorique et les opérateurs de la syntaxe spatiale n'ont été pas expérimentés. |
| Edwards and Griffin [2013] | En se basant sur les traces GPS et sur une enquête sur des touristes, les auteurs ont essayé de comprendre les comportements généraux des touristes de la ville de Sydney à l'aide d'analyses spatiales réalisées par syntaxe spatiale. |
| Li et al. [2016] | Les auteurs se sont focalisé sur l'activité de tourisme et particulièrement sur les sites historiques de la ville de Gulangyu. La syntaxe spatiale était appliquée sur la ville par l'étude des relations entre les réseaux routiers et les préférences des touristes. |
| Agryzkov et al. [2014] | L'analyse spatiale effectuée dans ce travail consiste à classifier les points qui offrent une activité de tourisme aux individus |

2.3.4 L'analyse spatiale des activités urbaines

L'étude de l'aspect fonctionnel de la ville a émergé récemment des tentatives d'analyse spatiale des activités afin d'évaluer la configuration spatiale d'une activité donnée. La [tableau 2.3](#) offre une vision globale sur les travaux proposés pour l'analyse spatiale des activités urbaines. Plusieurs critiques peuvent être faites sur les travaux proposés pour l'analyse spatiale des réseaux d'activités de la ville. Les modèles manquent souvent de généralité et sont appliqués sur un type d'activité particulier. Les réseaux d'activités sont des réseaux monomodaux conçus par la projection de POIs sur le réseau routier sans prendre en compte le contexte spatio-temporel de l'activité et les profils des utilisateurs.

2.4 Synthèse et questions de recherche

L'état de l'art présenté dans ce chapitre peut nous conduire à un nombre de constats et de réflexions autour de la structure et l'usage de la ville et des différentes techniques d'analyse spatiale. En effet, l'étude de la ville peut prendre en considération trois niveaux différents : le niveau structurel, le niveau dynamique et le niveau sémantique. Les approches structurelles de la modélisation de l'espace se basent sur quelques échelles d'étude qui est l'échelle spatiale et qui consistent principalement à analyser les réseaux de transport ainsi que la configuration des bâtis. Il est clair que les approches structurelles se limitent à l'aspect physique de la ville qui ne représente pas toujours une image réaliste. Les approches dynamiques sont mises en évidence afin d'enrichir les concepts structurels avec la dimension temporelle. A grande échelle, l'aspect temporel permet de visualiser les évolutions structurelles de l'espace. Alors qu'à une échelle microscopique, le temps englobe tous les événements déroulés dans l'espace et qui se basent sur la mobilité. Les approches dynamiques permettent d'étudier la mobilité urbaine et les flux de déplacement dans l'espace. En revanche, elles ignorent la particularité de demande de déplacement et le choix du système origine/destination. Le dernier niveau incorpore la sémantique des déplacements de la ville en enrichissant le modèle dynamique par le concept d'activité qui définit les objectifs des déplacements selon les caractéristiques des acteurs. Les approches d'activités proposées dans la littérature tendent à modéliser l'enchaînement des activités et les déplacements ce qui explique le grand nombre de difficultés à surmonter. Les modèles des activités relèvent d'un problème de généralité où chaque modèle peut être validé pour des activités particulières. La complexité du problème liée à la programmation des activités et des déplacements est due au manque de méthodes de modélisation de la dynamique de l'enchaînement des activités. Les travaux cités dans ce chapitre possèdent certaines lacunes qui sont détaillées par la suite :

- Le manque de données sur l'enchaînement des activités et les déplacements générés est expliqué par un coût élevé d'acquisition. Certains travaux manquent d'analyses de données réelles ou se basent sur des données incomplètes qui n'offrent pas le cadre entier de déroulement de l'activité (les caractéristiques des individus, les caractéristiques spatio-temporelles, etc.) ;
- des lacunes peuvent être observées dans les modèles des activités et qui peuvent souligner davantage certains composants par rapport à d'autres selon la particularité de l'activité. Ce problème est dû souvent au manque de généralité ;
- les approches à base d'activités ne s'appuient pas sur l'espace et sa structure complexe mais plutôt sur le déplacement et la séquence des points visités ;
- les approches de génération des activités proposées dans la littérature se limitent à la proposition d'un agenda avec un programme d'activités associé à chaque acteur qui correspondent à une connaissance sur les comportements des individus. Cependant, ces approches ne retournent pas les itinéraires à parcourir afin d'assurer le programme fixé ;
- l'analyse spatiale de l'activité permet à travers un ensemble d'outils d'étudier la configuration

fonctionnelle de l'espace. Les approches proposées manquent de dynamisme pour la création des réseaux d'activités puisqu'elles sont basées sur les réseaux de transport et les POIs de la ville sans prendre en considération le cadre spatio-temporel et individuel de chaque activité.

Dans ce chapitre d'état de l'art, nous apportons des éléments de réponse à l'ensemble des questions de recherche suivantes :

1. Qb-1 : Comment modéliser la structure de la ville ?
2. Qb-2 : Comment peut-on définir les outils et les concepts d'analyse spatiale ?
3. Qb-3 : Comment modéliser les déplacements et la mobilité dans la ville ?
4. Qb-4 : Quels sont les théories et les modèles dans la littérature qui concernent les activités ?

En se basant sur cette synthèse des travaux présentée dans ce chapitre, nous pouvons conclure sur le caractère complexe de l'étude de la ville et les multiples concepts et dimensions à prendre en compte. Cette complexité représente un verrou majeur pour la proposition d'approches génériques qui englobent les différents composants de la ville. Ce qui explique les limites d'applications de l'analyse spatiale sur la structure de la ville.

Chapitre 3

Modélisation de la structure et de l'usage de la ville

Dans le chapitre précédent, nous avons illustré les différents modèles permettant une représentation structurelle et fonctionnelle de la ville. Nous avons également mis l'accent sur les limites des modèles existants qui se manifestent notamment par le manque de généralité dans certains cas, et la prise en compte d'un nombre réduit de facteurs dans d'autres cas. Afin de mieux prendre en compte les différentes propriétés caractérisant la ville, nous proposons dans ce chapitre un modèle générique et exhaustif autant que faire se peut. Le modèle est composé de trois sous-modèles principaux qui représentent des composantes complémentaires :

- le modèle structurel du transport,
- le modèle dynamique spatio-temporel de mobilité,
- le modèle sémantique des activités.

La Figure 3.1 illustre les paramètres et les interdépendances entre les différents sous- modèles. Le modèle de système de transport représente la structure multidimensionnelle de transport basé sur la typologie urbaine. Le modèle de mobilité représente les déplacements possibles en prenant en compte les modalités disponibles. Pour une mobilité monomodale, le modèle représente les trajectoires parcourues sur le réseau associé à un mode de transport donné. Le modèle de transport doit tout autant supporter la possibilité d'un transfert entre les modes de transport. Le modèle multimodal de transport est conçu à l'aide des réseaux monomodaux interconnectés. L'aspect sémantique de la mobilité est intégré dans le modèle afin d'introduire le concept d'activité. Un ensemble de POIs est défini d'une manière qu'ils correspondent aux besoins et aux profils des utilisateurs. Le modèle d'activités supporte la multimodalité de l'utilisateur modélisant un ensemble de déplacement entre des paires de points OD. Dans la suite de ce chapitre, nous détaillons chaque sous modèle proposé. Nous nous intéressons dans la section 3.2 à la structure du système de transport. La section 3.3 est consacrée à la représentation de la mobilité monomodale et multimodale. Le modèle d'activités est représenté dans la dernière section de ce chapitre.

3.1 Un modèle structurel de système de transport

Dans la première section du chapitre 2, nous avons souligné certains critères utilisés pour modéliser la structure spatiale de la ville : la géométrie, la fonction et la topologie. Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéressons à la topologie de la ville et plus particulièrement aux réseaux de transport. Les graphes sont fréquemment utilisés dans les problématiques de modélisation de structures urbaines Jiang and Claramunt [2004b] Cardillo et al. [2006]. Nous adoptons ce choix afin de bénéficier de la richesse formelle et mathématique de la théorie des graphes et de la possibilité de les manipuler par des opérateurs prédéfinis. Une modélisation à base de graphes est présentée dans cette section afin de concevoir la structure physique du système de transport. Le support urbain de transport peut être classifié en trois catégories : une structure piétonne, une structure routière et une structure ferroviaire.

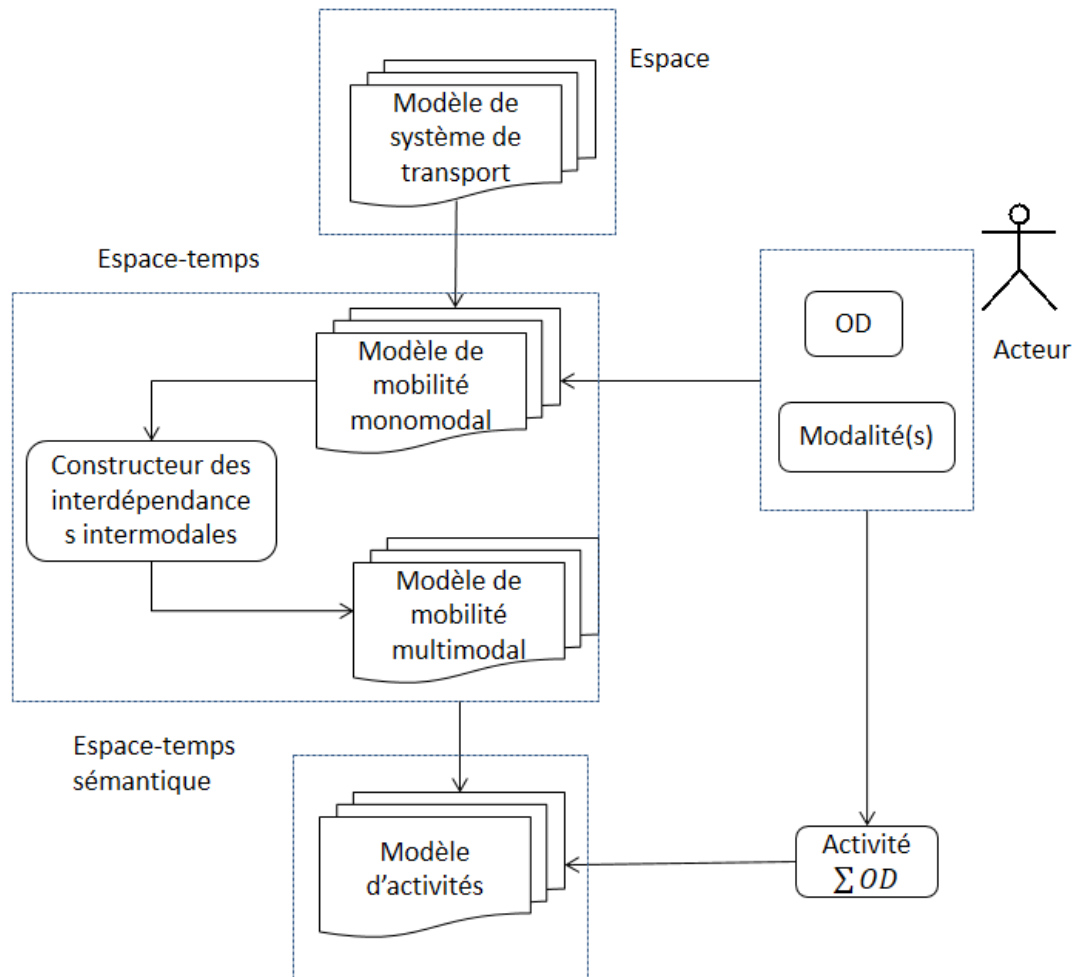


FIGURE 3.1 : L'approche proposée pour la modélisation multidimensionnelle de la ville.

3.1.1 Modèle structurel du réseau piétonnier

Ce réseau offre des opportunités de déplacement pour les piétons dans la ville. Il est souvent large et couvre la majorité du réseau de transport de la ville. Les rues qui supportent les déplacements des piétons sont souvent équipées par des chemins piétons (e.g., trottoirs, passages piétons). Le réseau piéton est représenté par un graphe dual afin de prendre en compte sa large accessibilité dans la ville. Le graphe dual offre plus de simplicité pour représenter les connexions routières dans la mesure où les rues sont représentées par des nœuds, ce qui permet également de centrer la modélisation sur ces rues. Le réseau piéton est considéré comme un support de déplacement privilégié dans la ville et souvent celui qui est le plus couramment utilisé pour assurer un transfert entre les différents réseaux. On considère que le réseau piéton assure un rôle de médiation et de transfert entre les différents réseaux. L'approche duale de graphe a l'avantage de faciliter la liaison entre la représentation du réseau routier et celles des autres réseaux de transport. Une telle modélisation permet

également une prise en compte des impédances d'accessibilité entre les différents services. En effet, l'apport important de cette modélisation duale est celui de mieux refléter l'accessibilité du réseau piéton dans le cas d'un transfert modal ou de l'atteinte des POIs. Les points de transfert et les POIs sont accessibles directement par le réseau piéton. La prise en compte de l'accessibilité vers ces points est assurée par une connexion entre les nœuds qui les représentent et les rues où ils se situent (Voir Figure 3.2). Le réseau piéton est modélisé par un graphe pondéré $G_{pieton} = (N_{pieton}, E_{pieton}, \xi_{pieton})$ tel que N_{pieton} est l'ensemble de nœuds qui représentent les segments des rues à chemin piétonnier. Soit $\xi_{pieton} : N_{pieton} \rightarrow \mathfrak{R}$ la fonction qui attribue à chaque nœud la longueur du segment de rue qui la représente afin de pouvoir spécifier la distance parcourue par un piéton au moment de l'exploration. L'ensemble d'arcs E_{pieton} représente les intersections des segments des rues à chemin piéton.

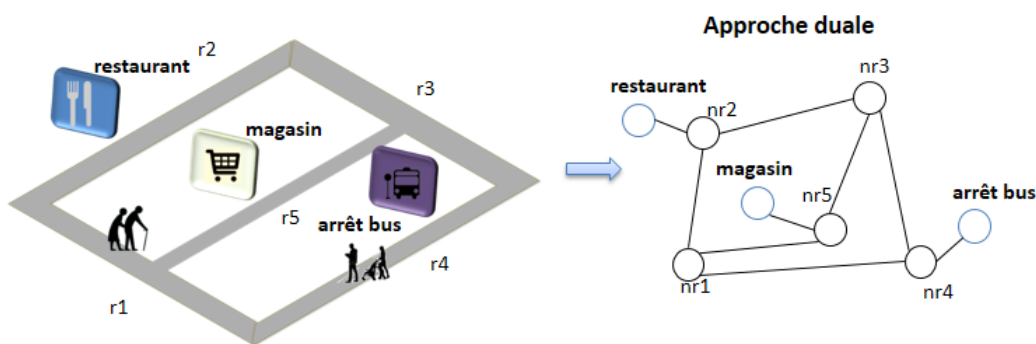


FIGURE 3.2 : Approche duale pour la modélisation de réseau piéton.

3.1.2 Le modèle structurel de transport routier motorisé

Le réseau routier de la ville est exploité de deux manières différentes dans la mesure qu'il soit utilisé par les moyens de transport individuels ou publics.

- i **Réseau de transport routier individuel** Le réseau de transport routier individuel donne plus de liberté aux utilisateurs dans le choix des itinéraires à parcourir par rapport au réseau public. Les rues représentent le support de transport de plusieurs types de véhicules individuels. La conception de ce réseau est basée sur les points d'accessibilité à celui-ci. Le réseau de transport individuel est connecté avec les autres réseaux de transport et les POIs à travers le réseau piéton. Nous choisissons de présenter le réseau des véhicules individuels à l'aide d'une approche primaire de graphe afin de le lier logiquement au réseau piéton. Cette liaison va être assurée par la connexion entre les nœuds représentant les points de transfert de véhicules (e.g., parking) et les nœuds associés aux rues à travers lequel ils sont accessibles. Le réseau est modélisé par un graphe orienté pondéré $G_{vehi} = (N_{vehi}, E_{vehi}, \xi_{vehi})$ où $N_{vehi} = \{n_1, n_2, \dots, n_p\}$ est l'ensemble d'intersections des rues et les points de stationnement (parkings) et $E_{vehi} = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$

représente les segments des rues qui les relient. Soit $\xi_{veh_i} : N_{veh_i} \rightarrow \mathfrak{R}$ est la fonction de pondération de chaque lien par la longueur de segment qui le représente. L'orientation des arcs montre les sens autorisés pour la navigation. Un déplacement autorisé dans les deux sens est modélisé par un arc orienté dans les deux sens.

- ii **Réseau routier de transport public** Le réseau de transport public, qui occupe une partie du réseau routier, est modélisé par la notion de ligne de transport, à savoir, des lignes de bus. Une ligne de bus est modélisé par un parcours dans l'espace associé à une table horaire. Le réseau de transport public routier est défini comme un ensemble de lignes de transport de bus qui sont caractérisées par des contraintes d'accessibilité spatiales et temporelles fixées à l'avance comme les arrêts qui représentent les points d'accès, de sortie et les horaires prédéfinis pour chaque départ. Une ligne de bus est composée de plusieurs arrêts donnant accès à celle-ci. Le réseau de transport public est défini par un ensemble de lignes de transport en bus $lgb_1, lgb_2, \dots, lgb_n$. Un réseau de bus est représenté par un graphe orienté pondéré $G_{bus} = \{lgb_1, lgb_2, \dots, lgb_n\}$. Chaque ligne de bus représente un itinéraire composé par un ensemble de segments et de nœuds. Une ligne est représentée par le chemin $stopbus_1, ebus_1, stopbus_2, ebus_2, \dots, ebus_{y-1}, stopbus_y$, où $stopbus_i$ est un arrêt utilisé par la ligne lgb_i et y est le nombre total d'arrêts traversés par la ligne. $ebus_i$ est un segment reliant deux arrêts successifs par la ligne lgb tel que $ebus_i = (stopbus_i, stopbus_{i+1}, long_{lgb_i})$ et $long_{lgb_i} = \xi_{bus}(ebus_i)$ où ξ_{bus} est la fonction qui attribue à chaque lien la longueur de segment. La ligne de bus assure l'aller et le retour pour le même chemin. $ebus_i$ est un lien orienté dans les deux sens.

3.1.3 Le modèle structurel du réseau ferroviaire

Chaque moyen de transport ferroviaire possède son propre site représenté par un réseau indépendant. Pour les déplacements à l'intérieur de la ville, trois moyens de transport ferroviaires sont pris en compte : le tramway, le train et le métro. Comme le réseau routier, la modélisation du réseau de transport ferroviaire public est basée sur la représentation des lignes de transport. Soit m_{ferr} un mode de transport ferroviaire tel que $m_{ferr} = \{train, metro, tramway\}$. Le réseau de chaque mode de transport ferroviaire m_{ferr} est composé d'un ensemble de lignes $lgf_1, lgf_2, \dots, lgf_n$ où n est le nombre de lignes qui construisent le réseau de m_{ferr} dans une ville. Le graphe orienté qui représente le réseau de transport de m_{ferr} est défini par $G_{m_{ferr}} \in \{G_{tram}, G_{metro}, G_{train}\}$ où $G_{m_{ferr}} = \{lgf_1, lgf_2, \dots, lgf_n\}$. Chaque ligne est modélisée comme suit : $lgf = stopferr_1, eferr_1, stopferr_2, eferr_2, \dots, eferr_{u-1}, stopferr_u$ où $stopferr_i$ est une station ferroviaire de m_{ferr} et u est le nombre de stops utilisés par la ligne lgf . $eferr_i$ est le segment reliant les arrêts ferroviaires successifs $stopferr_i, stopferr_{i+1}$ tel que $eferr_i = (stopferr_i, stopferr_{i+1}, long_{lgf_i})$. La fonction ξ_{ferr} associe à chaque segment un attribut qui reflète sa longueur tel que $long_{lgf_i} = \xi_{ferr}(eferr_i)$. $eferr_i$ est un arc orienté dans les deux sens connectant $stopferr_i$ et $stopferr_{i+1}$.

3.2 Modélisation de la mobilité urbaine

Les différents réseaux structurels de la ville représentés dans la section précédente sont des réseaux indépendants des uns aux autres. Ces réseaux sont exploités par des utilisateurs dans le but d'assurer leur déplacement quotidien. Dans un premier temps, nous nous intéressons à la mobilité monomodale qui consiste à utiliser un seul mode de transport entre deux points OD. Par la suite, nous aborderons le transfert modal pour l'introduction de la mobilité multimodale.

3.2.1 Modélisation de la mobilité monomodale

Un déplacement monomodal consiste à parcourir le réseau associé à un unique mode de transport employé par l'utilisateur. Pour la représentation des trajectoires des utilisateurs, nous tenons à enrichir les modèles de graphes classiques afin de supporter la composante temporelle. Le but est d'enrichir le modèle structurel déjà identifié afin de représenter les mouvements et les déplacements des humains dans la ville. Le réseau de la mobilité monomodale représente la partie explorée du réseau spatial associé à une seule modalité utilisée par un utilisateur dans le but d'atteindre sa destination. Pour suivre l'enchaînement temporel d'un déplacement, le modèle structurel du réseau doit être enrichi par une composante temporelle. Le réseau de mobilité monomodale est une séquence logique de transitions qui représentent les positions parcourues dans un ordre chronologique. Cette séquence est monomodale car elle est basée sur un unique réseau associé à la modalité adoptée au moment du déplacement. Les POIs sont représentés dans le réseau de mobilité qui sont notamment les points d'accès et de sortie. À la différence des réseaux structurels représentés dans la section précédente, le réseau de mobilité monomodale intègre des informations temporelles sur chaque nœud afin de suivre le déplacement spatio-temporel des utilisateurs. En effet, chaque nœud doit posséder deux paramètres : la position et les instants d'accès et de sortie. Pour un réseau de mobilité, le temps est représenté de deux manières différentes. Tout d'abord pour un réseau synchronisé où chaque nœud est caractérisé par un intervalle de temps qui modélise le temps passé sur ce nœud. Ce type de réseau est modélisé pour représenter les phénomènes dans lesquels les nœuds sont caractérisés par une durée dans le temps. Un réseau diachronique est un réseau qui associe à chaque nœud un instant particulier *Cascetta [2013]*. Ce réseau utilisé pour modéliser les graphes dans lesquels les nœuds ne demandent pas plus qu'un instant de temps. Les points OD sont souvent des POIs qui assurent les besoins des utilisateurs de la ville comme un magasin, un restaurant etc.. Les points OD sont connectés au réseau de mobilité. Deux types des liens sont distingués pour assurer la connectivité entre les points OD et les différents points *accs\sortie* de réseau de mobilité : les liens réels et les connecteurs *Fiorenzo-Catalano [2007]*. Les connecteurs sont des liens qui relient un point d'origine ou un point de destination au réseau de mobilité. Ils ne sont pas des liens réels dans le sens où ils ne représentent pas forcément le segment d'une rue ou d'un rail mais qui assurent l'accessibilité au réseau de transport comme un jardin, un couloir, une place etc. Les liens réels sont l'ensemble des arcs

parcourus pendant le déplacement entre les POIs de réseau. Chaque lien d'un réseau de mobilité indique une étape de déplacement. La Figure 3.3 illustre les différents types de réseaux de mobilité. Chaque réseau de

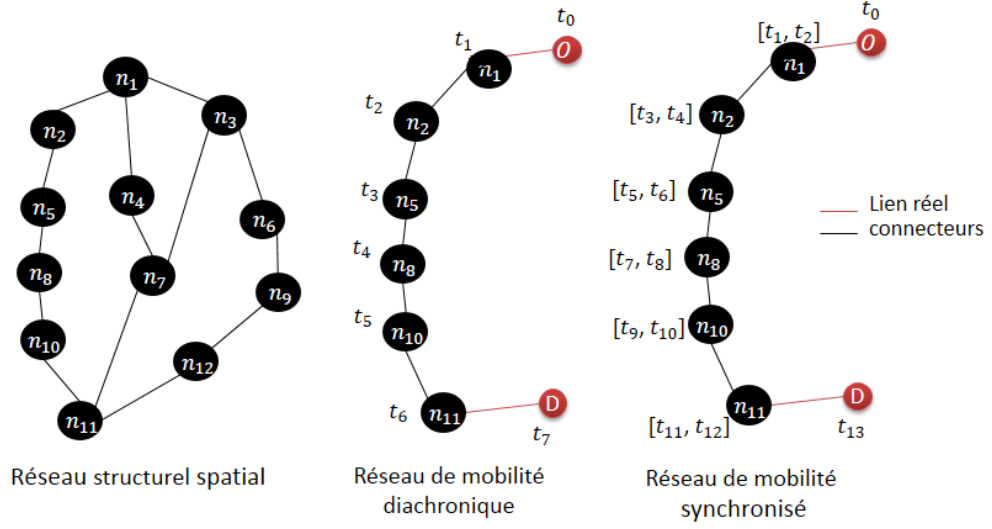


FIGURE 3.3 : le réseau de mobilité diachronique et synchronisé.

mobilité est associé à un seul mode de transport. Des contraintes spatio-temporelles supplémentaires sont associées à l'usage du transport public afin de prendre en compte les horaires et les arrêts fixes. Soit m la modalité utilisée pour un déplacement monomodal où $m \in \{m_{priv}, m_{pub}\}$. Le réseau de mobilité de transport m est le graphe P_m tel que $P_m \subset \{G_{pïton}, G_{vehi}, G_{tram}, G_{bus}, G_{train}, G_{metro}\}$. P_m représente la partie de graphe physique de mode de transport m utilisée dans le cadre d'un déplacement. Les réseaux synchronisés intègrent le temps d'une manière plus réelle dans le contexte d'un déplacement puisque chaque mouvement dans l'espace nécessite une durée de temps y compris le parcours des nœuds (intersection, rues, points transfert). Un chemin piéton est défini par le graphe orienté

$$P_{piechemin} = n_{piechemin1}(Tn_1), e_{piechemin1}, n_{piechemin2}(Tn_2), e_{piechemin2}, n_{piechemin3}(Tn_3), \dots, e_{piecheminN-1}, n_{piecheminN}$$

où $\{n_{piecheminJ}\}_{J=1}^N$ est l'ensemble des rues traversées et $\{e_{piecheminI}\}_{I=1}^{N-1}$ est l'ensemble d'intersections explorées. Soit $Tn_J = [t_j, t_{j+1}]$ l'intervalle de temps réservé pour le parcours de $n_{piecheminJ}$ tel que t_j est l'instant de départ et t_{j+1} est l'instant d'arrivée. Le parcours des intersections $e_{piecheminI}$ par le piéton nécessite une pénalité temporelle définie par $\delta_{pïton}$. Dans le cas de l'utilisation d'un mode de transport des véhicules privés, $P_{vehpriv}$ est le chemin défini par $P_{vehpriv} = n_{vehpriv1}, e_{vehpriv1}(Te_1), n_{vehpriv2}, e_{vehpriv2}(Te_2), n_{vehpriv3}, \dots, e_{vehprivN-1}(Te_{N-1}), n_{vehprivN}$ où $\{n_{vehprivJ}\}_{J=1}^N$ est l'ensemble d'intersections et parking explorés et $\{e_{vehprivI}\}_{I=1}^{N-1}$ est l'ensemble de segments des rues traversés. $Te_K = [t_k, t_{k+1}]$ est l'intervalle de temps de parcours de segment $e_{vehprivK}$ tel que t_k, t_{k+1} sont respectivement les instants d'arrivée et de départ. Le parcours des nœuds produit également une pénalité temporelle associée aux intersections des rues définie par ξ_{veh} . L'utilisation de mode de transport public nécessite la représentation des horaires temporels. Soit **Tablehoraires**

une fonction qui attribue à une ligne de transport dans un arrêt donné une liste d'horaires. Soit P_{mpub} le chemin représentant la mobilité monomodale par le mode de transport m et la ligne lg telle que $P_{mpub} = n_{mpub1}, e_{mpub1}(Te_1), n_{mpub2}, e_{mpub2}(Te_2), n_{mpub3}, \dots, e_{mpubN-1}(Te_{N-1}), n_{mpubN}$ Où $\{n_{mpubl}\}_{l=1}^{N-1}$ est l'ensemble d'arrêts traversés et $\{e_{mpubl}\}_{l=1}^N$ est l'ensemble de segments parcourus. $Te_K = [t_k, t_{k+1}]$ est l'intervalle de temps de parcours de segment e_{mpubK} tel que t_k, t_{k+1} sont respectivement les instants d'arrivée et de départ. Ce temps dépend principalement des impédances de moyen de transport qui sont définies a priori et qu'elles peuvent être mises à jour en temps réel au moment de la réalisation du parcours. $Tablehoraires(n_{mpubl}, lg, m) = \{h_1, h_2, \dots, h_k\}$ est l'ensemble d'horaires de la ligne lg du mode de transport m dans la station n_{mpubl} . Cependant, nous ne traitons pas les contraintes dues au déplacement en temps réel mais plutôt nous estimons à partir des données réelles certaines valeurs et nous les affectons à des paramètres temporels (e.g, temps d'attente).

3.2.2 Modèle de mobilité multimodale

La modélisation de l'usage multimodal du système de transport est plus proche de la réalité de l'usage quotidien de l'espace. En effet, la mobilité d'un individu pour un déplacement entre un OD demande dans la majorité des cas plus qu'un seul mode de transport. Par exemple, un déplacement par bus dans la ville demande d'accéder à pied à une station à proximité du point d'origine. L'intérêt d'une approche multimodale est de gérer les cas de changement de mode de transport. Dans cette section, nous montrons les avantages de l'implémentation et de l'utilisation d'un système multimodal. Nous présentons également notre approche à base des graphes permettant de garantir le transfert et la combinaison des différents moyens de transport.

3.2.2.1 La planification de réseau de transport multimodal

Le système de transport de la ville est conçu de manière à optimiser son usage et satisfaire au mieux les besoins des utilisateurs. Chaque moyen de transport couvre une zone plus au moins large. Dans le but d'améliorer la qualité de couverture et de réduire la faiblesse relative des opportunités de déplacement offertes par les réseaux de transport public ou privé, la conception du réseau de transport doit assurer la flexibilité de transfert d'un mode de transport à un autre ou d'une ligne à une autre. L'utilisation de plusieurs moyens de transport pour un même déplacement permet d'optimiser l'usage des ressources mises à disposition des usagers de la ville. Cette multi-modalité est également encouragée par la mise à disposition de parkings gratuits pour les utilisateurs des transports publics dans le but de diminuer le nombre de voitures dans les centres ville. Le transport combiné entre les modes de transport privé et les modes de transport public visent à diminuer le temps de transport et d'attente ainsi que le coût financier des déplacements. Van Nes [2002] a classifié les points de transfert en deux types de transport selon leur proximité au centre et leur localisation en trois catégories :

- Les points de transfert dans le centre de la ville offrent un fort accès aux différents moyens de transport public pour les piétons et les cyclistes dans la ville. Ces points assurent le transfert entre plusieurs lignes et moyens de transport public comme les grandes stations de métro ou de tramway.
- Les points de transfert dans les centres locaux sont accessibles par plusieurs moyens de transport privé : piéton, vélo et voiture privée. La correspondance entre les différents moyens de transport public est assurée par une distance moyenne.
- Les points de transfert à la périphérie de la ville permettent l'accès au centre-ville à travers l'usage du transport public et sont accessibles directement aux utilisateurs des voitures privées. Les parking-relais (*P&R*) sont des points de transfert qui assurent le stationnement des automobiles en périphérie à proximité du transport public pour encourager les utilisateurs à utiliser le transport en commun.

3.2.2.2 L'utilisation du transport multimodal

La mobilité multimodale consiste à se déplacer entre deux points en passant par un ou plusieurs points de transfert. Un déplacement est considéré comme monomodal sauf si l'utilisateur a utilisé plus qu'un mode de transport en passant par au moins un point de transfert. La figure 3.4 illustre un exemple de déplacement multimodal. Les caractéristiques de chaque mode de transport, telles que : la proximité à pieds entre les points de transfert, la vitesse, le temps d'attente et la fréquence, expliquent son utilisation ou pas par les utilisateurs. Le type de transfert offert par un point permet de distinguer deux types de points de transfert : (1) les points

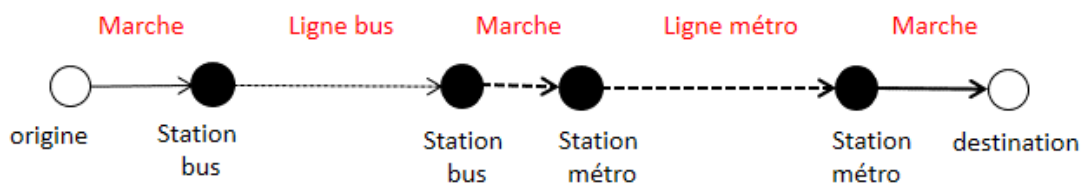


FIGURE 3.4 : La mobilité multimodale dans la ville.

intramodaux qui correspondent à des points de transfert entre les lignes du même mode de transport et (2) les points intermodaux de transfert qui offrent la possibilité aux utilisateurs de combiner des modes de transport différents. Marcher est une modalité particulière qui se présente dans toute sorte de déplacement (e.g. pour atteindre le parking ou la station de bus). Les modalités utilisées pour un déplacement peuvent être classifiées selon leur importance. D'après l'INSEE [Caenen et al. \[2011\]](#), le mode de transport principal est le moyen de transport utilisé pour parcourir la plus grande distance avec la plus grande vitesse durant le déplacement. Par exemple, dans le cas où une personne a emprunté le bus, le train de banlieue et le métro, le mode principal est le train de banlieue puisqu'il traverse une large distance à une vitesse élevée. Selon cette classification, un déplacement peut être composé en trois parties : la partie principale est celle qui est assurée par le mode de transport principal. La partie d'accès représente la partie de déplacement pour accéder à la partie principale

et la dernière partie de déplacement est la partie de sortie qui indique la phase après la sortie de la partie principale (voir Figure 3.5).

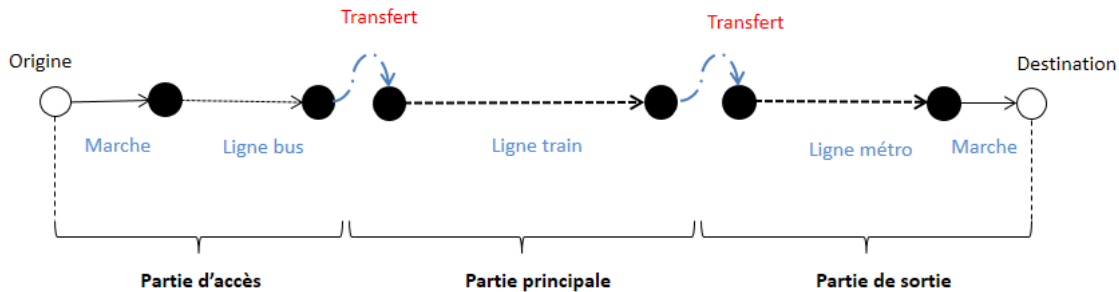


FIGURE 3.5 : Les différentes parties d'un déplacement multimodal.

3.2.2.3 Les approches de modélisation de la mobilité multimodale

La représentation multimodale des déplacements nécessite la prise en compte de plusieurs paramètres dédiés aux interactions entre les différents modes de transport. Les critères de classification de ces approches sont nombreux :

- le support de transfert et la combinaison entre les modes de transport,
- la flexibilité de la représentation multimodale de réseau de transport,
- la généralité du modèle.

La généralisation et la réutilisation des modèles multimodaux ont intéressé plusieurs travaux résumés dans le tableau 3.1 proposé par *Fiorenzo-Catalano* [2007]. Le modèle monomodal séparé est un modèle classique qui consiste à modéliser chaque mode indépendamment de l'autre comme nous l'avons proposé dans la section 3.2 Les différents modes ne communiquent pas entre eux et supportent uniquement les déplacements monomodaux.

i Modèle monomodal joint

Le modèle monomodal joint consiste à assurer la communication entre les différents modes de transport *Cascetta* [2013]. Le déplacement est assuré par un ensemble de modes de transport sachant que chaque mode est utilisé d'un point de départ à un point d'arrivée. Le modèle monomodal joint vise en conséquence de diviser le déplacement en plusieurs parties sachant que l'utilisateur choisit pour chaque partie le mode de transport utilisé.

ii Modèle multimodal classique

Le modèle multimodal classique intègre la combinaison des modes de transport en prenant les points de transfert comme des modes virtuels qui assurent le changement d'un mode de transport à un autre *Fernández et al.* [1994]. En prenant l'exemple d'un déplacement multimodal qui consiste à utiliser la

Tableau 3.1 : Les modèles pertinents de la mobilité multimodale dans la littérature

| Critères/Modèles | Monomodal joint Cascetta [2013] | Multimodal clas- sique Fernández et al. [1994] | Intermodal fixe Florian et al. [2002] | Intermodal libre Lozano and Stor- chi [2002] |
|------------------------------|------------------------------------|--|---|--|
| Multi-modalité de réseaux | Réseaux séparés | Réseaux séparés | Réseaux couplés | Réseaux intégrés |
| Combinaison des modes | non | oui | oui | oui |
| Choix de modes | non | fixe | fixe | libre |

voiture et après le transport en commun, le Parc Relais (*P&R*) est un mode additionnel qui assure le déplacement multimodal. Cette méthode est compliquée au niveau de l'implémentation puisqu'elle demande pour chaque changement de mode de transport de choisir des modes virtuels représentant les points de transfert.

iii **Modèle intermodal fixe**

Florian et al. [2002] ont proposé un modèle spatial permettant de modéliser la mobilité multimodale. Leur approche consiste à fixer à l'avance un ensemble de combinaisons possibles de mode de transport dont certains ont deux modes principaux, tels que la voiture-métro. Le modèle ne supporte pas des combinaisons non prédéfinies à l'avance et manque par conséquent de souplesse.

iv **Modèle intermodal libre**

Les modèles intermodaux libres sont conçus afin de supporter la demande de transport multimodal des utilisateurs d'une manière plus flexible. Différents scénarios de combinaison de différents modes de transport sont possibles dès la présence de points de transfert. Le principe adopté par ce modèle est d'interconnecter les différents réseaux des modes de transport. Nous détaillons deux types de modèles à base de graphes qui ont servis pour la modélisation multimodale de la mobilité urbaine : les hypergraphes et les super-réseaux.

• **Les hypergraphes**

Les hypergraphes sont une extension des graphes conceptuels Whiteley [1989]. Soit H un hypergraphe tel que $H = (V, E)$: V est l'ensemble de sommets et E est l'ensemble d'hypers-arêtes. Un hypergraphe est considéré comme un ensemble de sous-graphes interconnectés. Un graphe peut donc incorporer d'autres graphes ce qui est utile pour la modélisation multimodale de la mobilité urbaine. Il existe deux types d'hypergraphes :

- l'hypergraphe non orienté est caractérisé par un ensemble d'hyper-arêtes telles que chacune est représentée sous la forme d'un ensemble non ordonné. Prenant l'exemple d'un hypergraphe h_1 proposé dans la figure 3.6, la représentation ensembliste de h_1 est la suivante :

$$h_1 = (V, E)$$

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10}\}$$

$$E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\} = \{\{v_1, v_2, v_3, v_4\}, \{v_1, v_3\}, \{v_5, v_6, v_7\}, \{v_5, v_7, v_8, v_9, v_{10}\}\}$$

— l'hypergraphe orienté possède un ensemble d'hyper-arêtes de telle sorte que chaque hyper-arête orientée est écrite sous la forme $\prec T, H \succ$ où $T \subset V$ est la queue, $H \subset V$ est la tête, $H \cup T = \emptyset$ et $H \cap T = \emptyset$ La figure 3.6 illustre un exemple d'un hypergraphe orienté h_2 tel que

$$h_2 = (V, E), V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7\} \text{ et}$$

$$E = \{(\{v_1\}, \{v_2, v_3\}), (\{v_2, v_4\}, \{v_5\}), (\{v_3, v_5, v_6\}, \{v_7\})\}$$

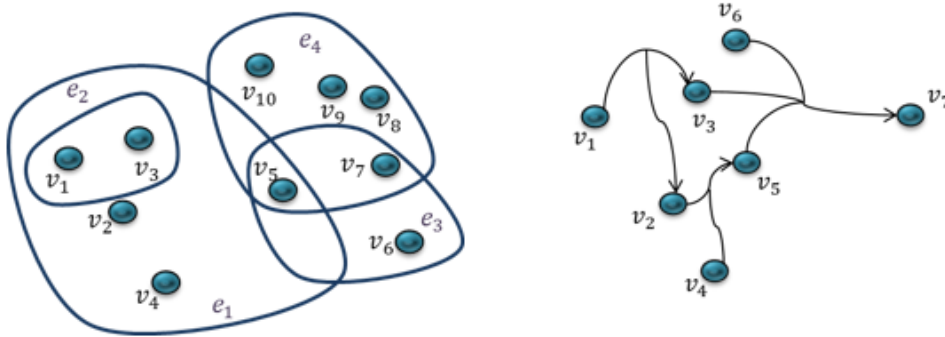


FIGURE 3.6 : Exemples d'hypergraphe.

Les hypergraphes sont des réseaux qui supportent les interactions entre différents réseaux ce qui explique leurs utilisation pour les problématiques de transport multimodal [Nguyen and Pallottino \[1989\]](#); [Lozano and Storchi \[2002\]](#); [Carlier et al. \[2003\]](#). Les hypergraphes orientés possèdent une riche topologie qui rend possible l'interconnexion entre des réseaux des modes de transport différents. En effet, les hyper-arêtes permettent de représenter plusieurs alternatives possibles par un transport multimodal puisqu'ils assurent la connexion entre un nœud (e.g., station, parking) et plusieurs autres nœuds [Flores and Lozano \[2014\]](#).

• Les super-réseaux

Les super-réseaux « super-networks » sont classifiés comme des graphes complexes permettant de représenter les interdépendances entre des graphes [Buldyrev et al. \[2010\]](#). Les couches représentant les graphes sont connectées à travers des nœuds particuliers de chaque graphe et qui permettent de connecter tous les nœuds des graphes. Le super-réseau représente les interdépendances entre les sous-réseaux en les présentant sous forme des couches tandis que l'hypergraphe les présentent d'une manière hiérarchique. Un super-réseau est formalisé par M couches qui représentent les différents modes de transport [Bianconi and Dorogovtsev \[2014\]](#). M est le nombre des réseaux monomodaux où $\alpha = 1, 2, \dots, M$. Chaque réseau est composé par un nombre fini de nœuds n_α qui représentent les points de transfert de réseau α tel que $i = 1, \dots, n_\alpha$. Les nœuds de super-réseau sont identifiés par le sous-réseau à lequel ils appartiennent. Chaque nœud (i, α) peut être connecté par des nœuds

dans la même couche (j, α) et par d'autres nœuds d'autres couches (k, μ) . L'exemple dans la figure 3.7 montre un super-réseau de $\alpha = 3$ couches. Les super-réseaux possèdent des caractéristiques

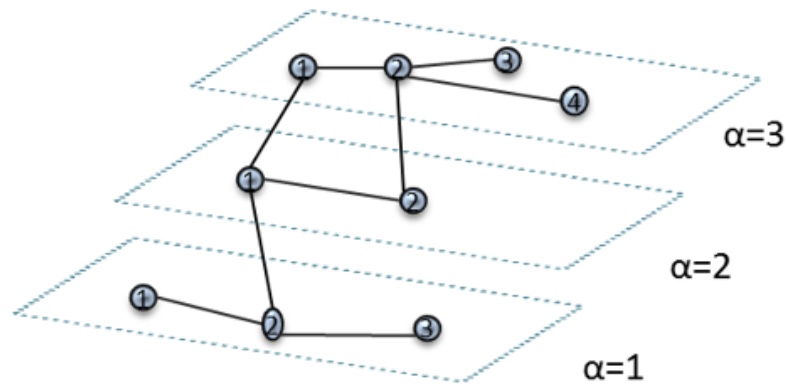


FIGURE 3.7 : Un super-réseau de 3 sous-réseaux (couches).

topologiques riches qui leur permettent de représenter l'interdépendance entre plusieurs sous-réseaux. Sheffi [1985] a proposé les super-réseaux pour modéliser la mobilité intermodale libre des utilisateurs dans l'espace. L'idée est de combiner les différents réseaux monomodaux de transport dans un super-réseau multimodal. La connexion entre les réseaux est garantie par des liens de transfert entre les différentes modalités. La figure 3.7 illustre la structure de transport modélisée par les super-réseaux. Les liens de transfert entre les modes de transport disponibles dans l'espace permettent de représenter le coût de transfert (e.g. temps, coût financier pour un parking etc.). Les points de transfert sont des nœuds destinés aux piétons afin de changer de mode ou d'accéder à leur destination. En effet, le changement entre deux moyens de transport est effectué à pied par l'utilisateur. Les super-réseaux ont été implémentés dans plusieurs travaux dans le but de représenter la mobilité multimodale Liao et al. [2012]; Meng et al. [2014]. Les approches proposées consistent à modéliser dans un premier temps les réseaux monomodaux disponibles dans la ville. Dans un deuxième temps, il est indispensable de représenter les liens d'interdépendance connectant les différentes couches afin d'assurer l'accessibilité d'un mode de transport à l'autre. Abdelghany [2001] a proposé une approche qui consiste à modéliser chaque mode de transport par un graphe urbain et à étudier les différentes possibilités de transfert de mode. Chaque combinaison possible entre deux modes est interprétée par un lien artificiel entre les graphes associés à chaque mode. Ce modèle nécessite de définir à l'avance les liens de transfert possibles ce qui le rend statique.

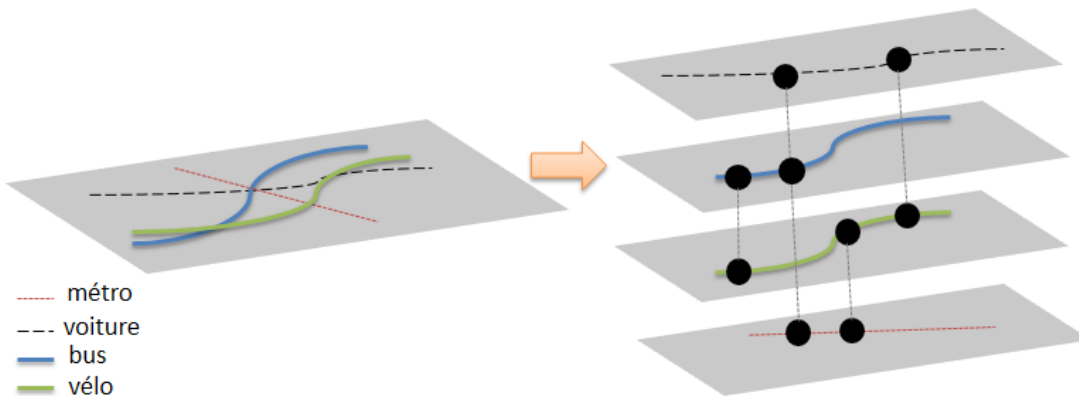


FIGURE 3.8 : Le modèle de transport multimodal basé sur le super-réseau Sheffi [1985].

3.2.3 Approche multi-échelle pour la modélisation de la mobilité multimodale

Dans cette section, nous représentons la mobilité multimodale de la ville par un modèle de transfert libre et flexible. L'objectif principal est de créer les liens d'interdépendance entre les différents réseaux. Les modes de transport pris en compte dans notre modèle sont les suivants :

- modes privés : piéton, utilisateurs de véhicule.
- modes publics : bus, train, métro, tramway.

Le modèle multimodal est représenté par un ensemble de couches dont chacune correspond à un mode de transport. Notre modèle prend en compte le transfert de mode de transport (l'inter-modalité) mais aussi l'interactivité dans le même mode de transport (l'intra-modalité). Nous définissons dans cette section la méthode proposée pour traiter le transfert intermodal et intra-modal à l'aide des super-réseaux.

- i **L'intra-modalité de transport public** Il est évident que le transfert intra-modal ne concerne pas nécessairement le transport privé puisque les piétons et les utilisateurs des véhicules de la ville possèdent une liberté de navigation qui leur permet de fixer eux-mêmes les itinéraires pour atteindre leurs destinations. Cependant, le transport public est plus concerné par le transfert intra-modal qui consiste à changer les lignes de transport en gardant le même mode de transport. Les points de transfert intra-modaux sont les stations associées au mode de transport. La possibilité de transfert est liée aux contraintes d'accessibilité spatiales et temporelles d'une ligne à l'autre. Le changement de lignes pour un même mode de transport est réalisé à pied. La structure de super-réseaux permet de relier la couche d'un mode de transport public m_{pub} au réseau piéton. La figure 3.9 montre les relations d'interdépendance entre la couche de réseau piéton et la couche de transport public pour le transfert d'une ligne à l'autre. La structure duale du réseau piéton offre une accessibilité directe à chaque station publique puisqu'elles se trouvent toutes sur une rue représentée par un nœud. Chaque lien possède un coût spatial défini par la distance parcourue entre les deux stations S_{prece} et S_{nouv} et un coût temporel qui incorpore le temps d'accès à la nouvelle station S_{nouv} ainsi que le temps d'attente pour prendre la ligne 2.

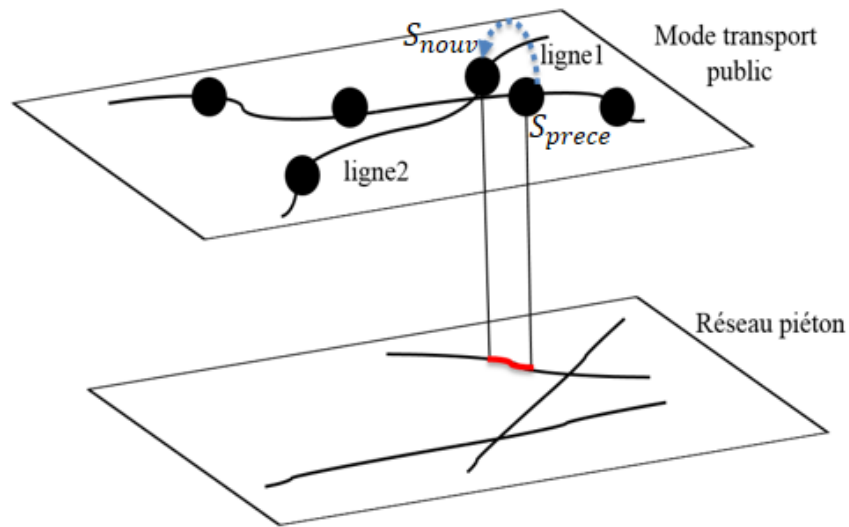


FIGURE 3.9 : Exemple d'une mobilité intra-modale modélisée par un super-réseau.

ii **L'inter-modalité de réseau de mobilité** Le changement de mode de transport peut être effectué entre un réseau de transport public et un réseau de transport privé ou aussi entre deux réseaux publics.

- **Transfert entre les modes de transport public** Le transfert entre des modes de transport public est réalisé à pied dans le cas d'une proximité spatiale entre des points de transfert de chaque mode. Les points de transfert sont les stations de chaque mode de transport. La figure 3.10 illustre un exemple d'une correspondance entre le réseau de tramways et le réseau de bus dans la ville. Le changement est possible si les deux stations concernées pour le transfert sont proches à pied de telle sorte que chaque station est accessible directement sur le réseau piéton. Le lien qui relie les deux stations correspond alors à un transfert intermodal entre deux modes de transport public. Le temps est notamment considéré comme un paramètre décisif pour le choix du transfert. Le coût de transfert modal doit également intégrer le temps d'accès d'un mode en plus du temps d'attente pour prendre le nouveau mode de transport.
- **Transfert entre un mode de transport privé et un mode de transport public** Le transfert entre le réseau de transport public et le réseau privé est souvent plus facile à réaliser. Le réseau de transport public est fait pour être facilement accessible par les piétons. Cependant, les utilisateurs des modes motorisés privés (véhicules) possèdent des contraintes liées au stationnement. Les endroits de stationnement sont les points de transfert pour les utilisateurs motorisés (e.g. parking, les parcs-relais etc.). La Figure 3.11 montre un transfert de mode véhicule privé à un mode de transport public par une connexion piétonne entre un parking à proximité d'une station. Le lien de connexion possède deux paramètres principaux qui sont la distance entre les deux points de transfert ainsi que le temps nécessaire entre la sortie du véhicule et le début du voyage en transport public.

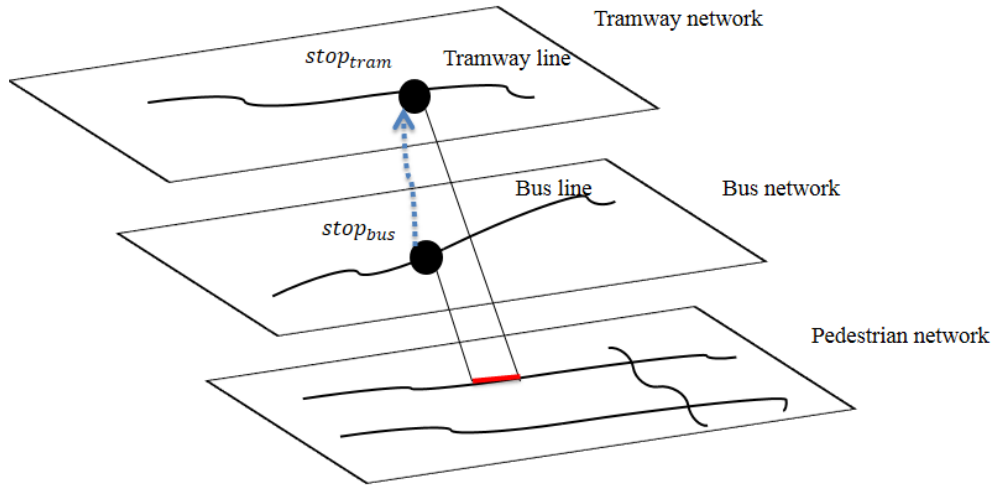


FIGURE 3.10 : Exemple d'une inter-modalité entre deux modes de transport public.

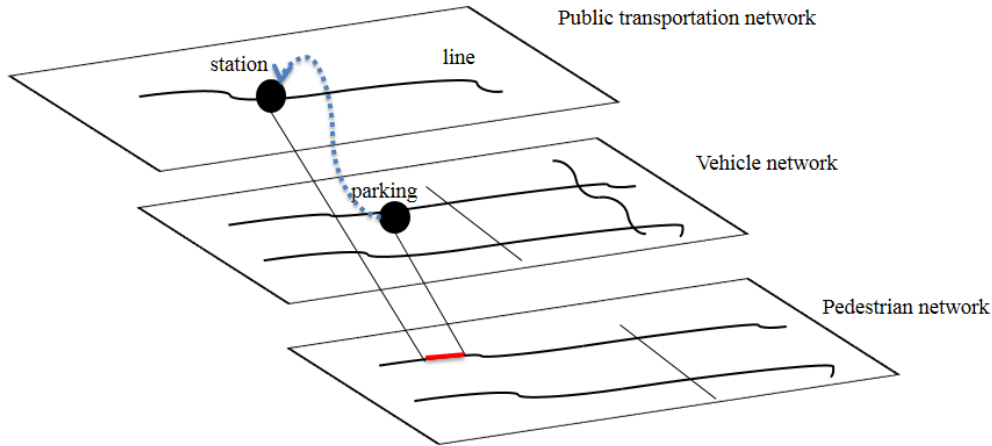


FIGURE 3.11 : Exemple d'une mobilité intermodal entre un mode privé et un mode public.

iii **La structure de super-réseau multimodal** Soit $G_{multi} = (N_{multi}, E_{multi}, M)$ un super-réseau multimodal de transport urbain. N_{multi} est un ensemble fini de nœuds qui représente les points de transfert entre les différents réseaux tel que $N_{multi} = n_1, n_2, \dots, n_m$. Chaque nœud appartenant à N_{multi} est un point dans lequel l'utilisateur peut décider de changer de mode de transport ou continuer avec le même. E_{multi} est un ensemble fini de segments qui relient les points de transfert tel que $E_{multi} = \{e_1, e_2, \dots, e_p\}$. Chaque segment $e_i \in E_{multi}$ peut relier des nœuds qui se présentent sur le même sous-réseau monomodal ou entre des sous-réseaux différents. M est l'ensemble des modes de transport. Un mode de transport $m \in M$ peut être un mode de transport public m_{pub} ou privé m_{priv} . Chaque mode de transport est représenté par un réseau monomodal tel que $N_{multi} = \{N_{piton}, N_{vehi}, N_{tram}, N_{bus}, N_{train}, N_{metro}\}$ Les sous-réseaux sont connectés au réseau piéton à l'aide des liens d'interconnexion qui connectent chaque rue de réseau piéton par les points de transfert de chaque sous-réseau. $E_{multi} = \{E_{piton}, E_{vehi}, E_{tram}, E_{bus}, E_{train}, E_{metro}\} \cup interLiens$

Chaque nœud $n_p \in N_{multi}$ appartient à un ou plusieurs modes de transport, à une ou plusieurs lignes de transport et une table d'horaires si le nœud appartenant à l'un des réseaux de transport public. **interLiens** est l'ensemble de liens d'interconnexion qui sont des connecteurs exposant la position de chaque point de transfert dans le réseau routier piéton. Chaque lien de E_{multi} possède une longueur qui réfère à la distance de parcours. Soit $e_i = (n_j, n_k) \in interLiens$ un lien orienté tel que n_k est un point de transfert et $n_j \in N_{pieton}$ est le nœud associé à la rue où n_k se situe. Le parcours d'un super-réseau offre la possibilité de changer le mode de transport à l'intermédiaire des liens d'interconnexion. Soit $P_{multi} = n_{chmul1}, e_{chmul1}, n_{chmul2}, e_{chmul2}, \dots, e_{chmulZ-1}, n_{chmulZ}$ le graphe orienté représentant le chemin spatio-temporel généré par l'exploration de super-réseau tel que $P_{multi} \subset G_{multi}, \{n_{chmul1}, n_{chmul2}, \dots, n_{chmulZ}\}$ représente l'ensemble des nœuds explorés, $\{e_{chmul1}, e_{chmul2}, \dots, e_{chmulS}\}$ est l'ensemble des liens parcourus dans le temps : soit $e_{chmul_i} = (n_{multij}(t_j), n_{multik}(t_k), m) \in E_{chmul}$ où $n_{multij}, n_{multik} \in N_{chmul}, t_j$ et $t_k \in T$

- Le coût d'exploration de l'arc e_{chmul_i} est $(tk - tj)$ référant le temps de parcours de la distance entre n_{multij} et n_{multik} par le mode de transport m .
- Le temps d'exploration d'un nœud est relatif au contexte de déroulement. En sus des pénalités qui confrontent les utilisateurs pour traverser les réseaux de transport, le transfert modal vers un réseau de transport public nécessite un temps d'attente. Le temps d'attente est calculé à partir de la table d'horaires fixée à l'avance et de l'instant à lequel l'utilisateur a achevé la station de transport public. Soit t_{acc} est l'instant d'accès à la station de transport n_{multi} et $Tablehoraires(n_{multi}, m, lg) = \{ti_1, ti_2, \dots, ti_g\}$ est la liste d'horaires de la station n_{multi} pour la ligne lg dans le mode de transport m . Le temps d'attente est la durée qui limite l'heure de départ la plus proche au temps d'accès à la station par l'utilisateur t_{acc} . Soit $\delta_{attente}$ est la pénalité temporelle d'attente dans un point de transfert tel que $\delta_{attente} = ti_j - t_{acc}$ et ti_j est le prochain départ.

La Figure 3.12 montre un exemple d'un déplacement multimodal. Les points OD sont directement projetés sur le réseau piéton grâce à la structure duale du réseau. Chaque point OD peut être représenté par le nœud associé à la rue où il se situe dans le réseau de piéton. Le transfert vers le bus est effectué dans le niveau de nœud représentant la rue où la station se situe. Le deuxième transfert vers la ligne de tramways est effectué à l'aide de réseau piéton sachant que chaque station est accessible directement par le réseau piéton. À la fin, l'accessibilité à un point OD nécessite de retourner au réseau piéton par un lien d'interconnexion entre la station de sortie de tramway et le nœud de la rue où la station se situe.

3.3 Modélisation des activités urbaines

Nous avons proposé dans la section 3.2 de ce chapitre, un modèle spatio-temporel de la mobilité urbaine. Par ailleurs, le modèle multimodal ne permet pas de traiter les besoins des utilisateurs mais uniquement de représenter leurs déplacements. Dans cette section, nous allons enrichir le modèle de transport multimodal

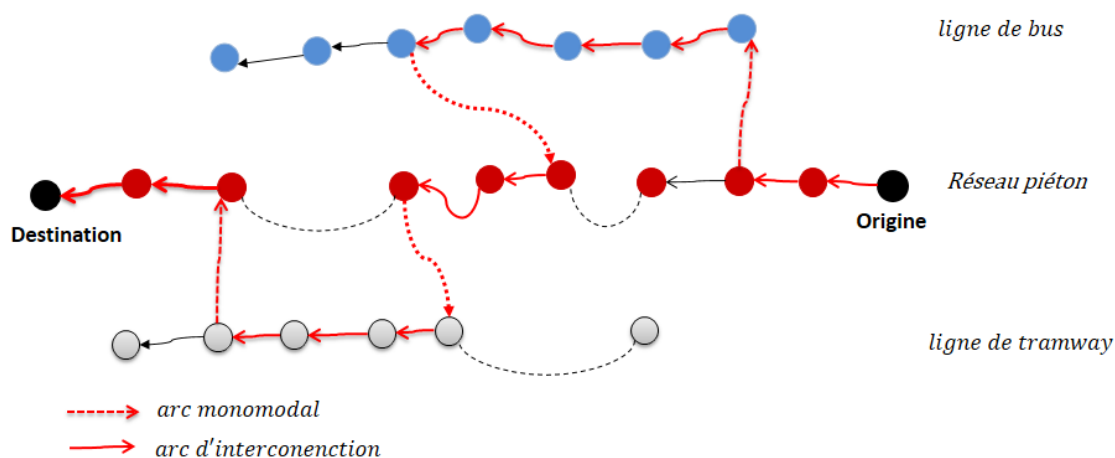


FIGURE 3.12 : un super-réseau multimodal.

pour intégrer la notion d'activité. Les demandes de déplacements sont dues aux besoins individuels d'effectuer des activités urbaines. Pour gérer cette nécessité, le modèle de transport doit intégrer la richesse sémantique de la mobilité. D'autre part, le modèle basé sur le transport ne traite pas la mobilité d'une manière similaire aux utilisateurs humains. En effet, le modèle de transport ne gère pas l'enchaînement de déplacements tandis que l'individu se déplace en prenant en compte tous les trajets à faire et l'ensemble de POIs à visiter. Dans cette section, nous visons à proposer un modèle conceptuel dans le but d'enrichir le modèle de déplacements par la sémantique. Une approche formelle à base de graphes sera exposée par la suite afin de montrer la sémantique des trajectoires.

3.3.1 Modèle à base d'activités urbaines

Plusieurs travaux ont été proposés dans la littérature dans le but de représenter la sémantique de la mobilité et des activités urbaines. Certains travaux sont basés sur des approches formelles [Nguyen \[2015\]](#); [Miller \[2005\]](#); [Du Mouza and Rigaux \[2005\]](#) ainsi que des approches moins formelles [Spaccapietra et al. \[2008\]](#); [Alvares et al. \[2007\]](#). Nous pouvons classer ces approches en deux catégories selon le concept utilisé pour représenter la sémantique :

- Selon la localisation : L'activité peut être représentée par une séquence de positions des POIs visités dans le temps.
- Selon le réseau : L'activité peut être exprimée dans le réseau représentant les itinéraires qui reflètent les déplacements entre les POI.
- Combinaison de deux représentations pour prendre en compte la topologie et les positions de POIs d'une activité.

Cette section est consacrée à la définition d'un modèle à base d'activités qui intègre la multi-modalité et la multi-trajectoire.

i Des trajectoires brutes aux trajectoires sémantiques

Les utilisateurs sont en mouvement dans l'espace pour un certain temps limité. La détection de ces mouvements permet d'élaborer des trajectoires brutes qui retracent les itinéraires parcourus entre deux points comme illustré à travers la Figure 3.13. Les mouvements sont des actions continues dans l'espace. Les trajectoires sont des mouvements limités par des points d'origine et de destination OD. Une trajectoire brute est un chemin de déplacement qui possède uniquement des données brutes sur les mouvements des objets entre deux points donnés. Une trajectoire est définie formellement par un ensemble de points qui séparent les points OD telle que : $tra_jbrut = \{O(t_{start}), Points(t), D(t_{end})\}$. Les trajectoires brutes ne

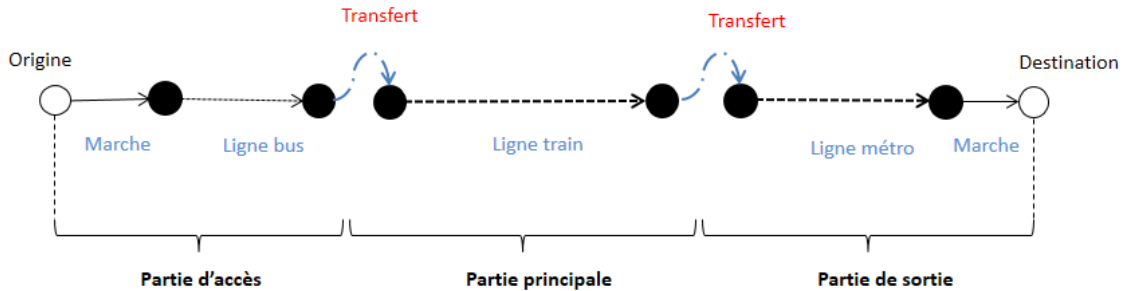


FIGURE 3.13 : Les trajectoires brutes dans un mouvement.

permettent pas d'extraire des données relatives aux comportements individuels mais uniquement des données spatio-temporelles. Cependant, l'analyse de la mobilité demande plus de connaissances associées au cadre de déplacement et aux propriétés de l'espace Parent et al. [2013]. La figure 3.13 montre un exemple de trajectoires sémantiques touristiques réalisées dans la ville de Monastir.

ii Le concept d'activité

La modélisation de la mobilité sémantique demande de prendre en compte les différentes demandes des utilisateurs inscrites dans le cadre d'une activité en fonction du potentiel de l'espace, des objectifs et des préférences des utilisateurs. Les déplacements sont intégrés dans un processus de réalisation des activités. L'activité est considérée comme un cadre humain et individuel de mobilité qui permet d'enrichir les trajectoires par les connaissances associées aux comportements humains. Une activité est définie comme un ensemble d'actions à accomplir par des individus dans un objectif précis Kozulin [1986]. En effet, la planification d'une activité doit impacter les choix des itinéraires à parcourir. Une forte relation est donc évidente entre le calendrier d'une activité donnée et les réseaux de transport urbain. Une activité urbaine est un cadre sémantique associé à la mobilité de manière qu'elle s'intéresse aux contextes qui entourent les individus et leurs besoins interprétés par des demandes de services. Notre enjeu dans cette section est de proposer un formalisme pour représenter les déplacements basés sur les activités. La représentation

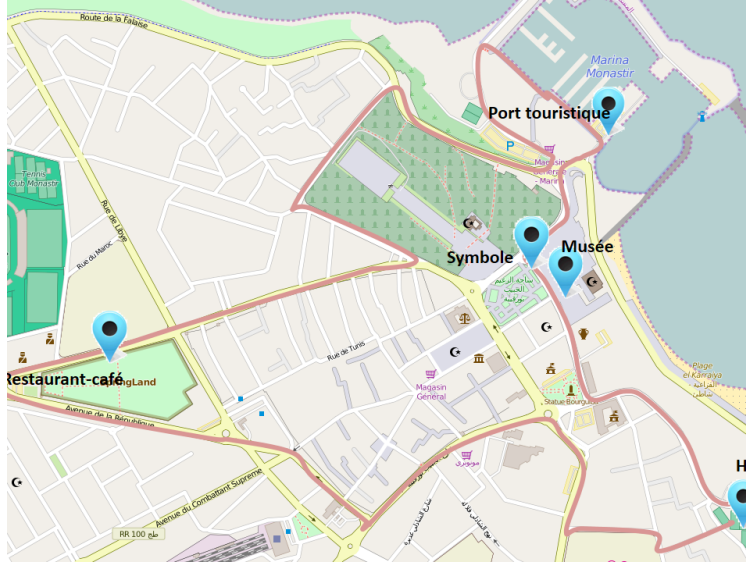


FIGURE 3.14 : Les trajectoires sémantiques dans un cadre de tourisme dans la ville de Monastir.

formelle du modèle d'activités a été proposée dans plusieurs travaux [Recker W. W. \[1986\]](#); [Recker et al. \[1986\]](#). La définition de l'activité nécessite de représenter le système de points OD ainsi que les trajectoires parcourues entre les points. Une activité est modélisée comme un ensemble de point d'intérêt $act = \{poi_1, poi_2, \dots, poi_n\}$ fournissant des services particuliers où n est le nombre des POIs visités. La description d'une activité repose sur des étapes dont les transitions représentent des déplacements. L'ensemble des trajectoires qui connectent les POIs visités est défini comme $Traj = \{tr_1, tr_2, \dots, tr_{n-1}\}$ tel que $\forall tr_i \in Traj, tr_i = (poi_i, poi_{i+1})$ est la trajectoire entre OD tel que $O = poi_i$ et $D = poi_{i+1}$. Une trajectoire est composée d'un ensemble d'arcs tel que chaque arc est exploré par une seule modalité dans le cadre d'un déplacement donné. La multi-modalité d'une trajectoire est définie comme suit :

$$\forall tr_i \in Traj, tr_i = [a_j^{m_j}]_{j=1}^k \quad (3.1)$$

Où a_i définit un segment, m_i est la modalité utilisée et k est le nombre de segments parcourus pour assurer la trajectoire tr_i . Chaque segment a_i possède une longueur d_i . Les trajectoires réalisées dans le cadre d'une activité demandent un intervalle de temps qui varie en fonction du profil de l'utilisateur. La durée de parcours d'une trajectoire est définie comme suit :

$$\forall tr_i \in Traj, \Delta tr_i = \sum_{j=1}^k duration(a_j) \quad (3.2)$$

La vitesse de déplacement est un facteur important pour le calcul de la durée de parcours d'un arc dans le réseau de transport. Les paramètres intervenant dans la définition de la vitesse sont liés principalement au profil de l'utilisateur (la capacité de mobilité et la modalité utilisée) ainsi que les propriétés de réseau de transport (vitesse limite, pénalités routières etc.). $\Delta a_j = \frac{d_j}{vites_{mj}}$ et $vites_{mj}$ la vitesse d'un profil donné

utilisant le mode transport m_j . Un itinéraire d'activité représente la projection des déplacements dans les réseaux de transport tel que :

$$itin = N_s, a_s^{m_s}, [poi_i(T_{POI_i}), tr_i]^n, N_e \quad (3.3)$$

Une activité est caractérisée par un point de départ N_s et un point d'arrivée N_e séparés par un ensemble de POIs pouvant offrir un service particulier. Chaque POI présente dans la planification de l'activité est caractérisé par un intervalle de temps qui désigne le temps d'arrivée et de départ de ce POI par l'utilisateur. L'intervalle de temps T_{POI} varie principalement selon deux critères : le profil de(s) individu(s) et le type de service offert par le POI. En conséquence, la durée de la réalisation d'une activité est la somme des durées passées pour la visite de POI et la réalisation des trajectoires entre l'instant de départ du point O à l'instant d'arrivée au point D.

$$\Delta_{itin} = duration(Itin) = \sum_{j=1}^n T_{POI_j} + \sum_{j=1}^n \Delta tr_j \quad (3.4)$$

La figure 3.15 illustre un exemple d'une activité représentée sur deux dimensions : l'espace et le temps inspirée du chemin spatio-temporel proposé dans le Time Geography Hagerstrand [1976](chapitre 2).

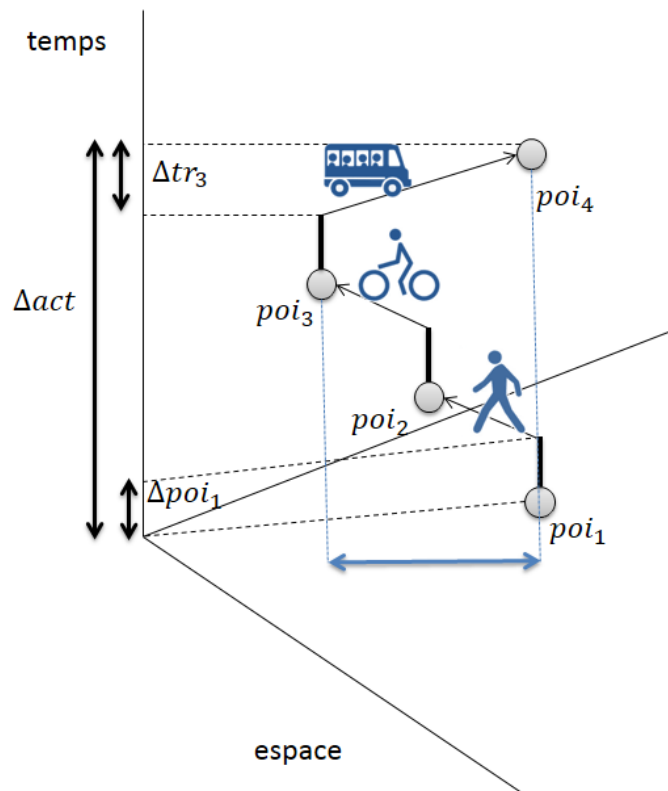


FIGURE 3.15 : La réalisation d'une activité dans l'Espace-Temps.

iii Un modèle d'activités à base de graphes

Notre modèle est basé sur la théorie de graphes pour représenter le système de transport ainsi que les flux de déplacement. Le modèle proposé pour la représentation de la mobilité multimodale est basé sur les super-réseaux. Ces réseaux supportent l'interdépendance entre des sous-réseaux différents à travers des liens d'interdépendance. Cependant, le modèle prend uniquement en compte la combinaison des modes de transport sans considérer les services et les points d'intérêt. Nous présentons dans cette section une extension du modèle de transport multimodal permettant de supporter la planification d'activités urbaines.

— **Les modèles des activités à base de réseaux** Les super-réseaux ont été exploités dans plusieurs travaux de la littérature pour modéliser les activités basées sur le transport multimodal. [Li et al. \[2010\]](#) ont proposé un modèle d'activité basé sur le transport multimodal et la planification du calendrier de l'activité. Les interactions des individus avec les contraintes temporelles associées au transfert des modes de transport ont été gérées dans ce modèle puisqu'il intègre explicitement les paramètres de planification de l'activité et les déplacements multimodaux. [Ouyang et al. \[2011\]](#) proposent un modèle à base d'activités qui gère les problématiques de calendrier des activités à l'aide de graphes spatio-temporels étendus. [Ramadurai and Ukkusuri \[2010\]](#) ont proposé un modèle basé sur les super-réseaux qui intègre les points d'activité, le temps de la réalisation et la durée. Le choix des activités intégré dans le modèle est assuré par un ensemble de liens qui relient les POIs et qui offrent la possibilité de combiner les activités. Cependant, les auteurs n'ont pas pris en compte le choix du mode de transport ainsi que les points de transferts qui assurent le changement de mode de transport et l'accès aux POI. Le modèle à base de réseaux d'activités proposé par [Fu and Lam \[2014\]](#) repose sur les super-réseaux. Le modèle conçu profite de la richesse topologique des super-réseaux puisqu'il modélise simultanément la planification des activités quotidiennes dans l'espace et le temps mais également les choix des modes de transport et les itinéraires. [Liao et al. \[2014\]](#) ont proposé un modèle d'activités basé sur une nouvelle conception des super-réseaux. Les super-réseaux multi-états sont des réseaux conçus pour étendre les super-réseaux classiques dans le but de supporter les activités urbaines [Arentze and Timmermans \[2004\]](#). Il est clair que l'étude de la mobilité urbaine nécessite de prendre en compte les points d'intérêt dans l'espace en plus du système de transport. Les super-réseaux ont été adaptés à ce besoin afin de mettre en évidence les demandes des individus et de représenter la mobilité qui permet d'accéder aux services. Les super-réseaux multi-états intègrent les éléments fonctionnels de l'espace en plus du système de transport. Cette approche permet d'améliorer les analyses associées aux systèmes de transport en les corrélant aux fonctions de la ville et de l'usage individuel.

— **Approche proposée à base des super-réseaux**

L'approche proposée pour la conception de notre modèle est celle des super-réseaux sans intégrer la notion d'état puisque le modèle n'est pas conçu dans le but de suivre en temps réel l'enchaînement de l'activité. Notre choix s'explique par la flexibilité et la fiabilité de ces réseaux pour la combinaison de

POI. Le modèle est caractérisé par une simplicité de représentation par rapport aux modèles existants dans la littérature puisqu'il intègre les POIs directement dans le super-réseau. Le modèle supporte tous les modes de transport et la multitude des POI. Les POIs sont connectés par les liens représentant diverses connexions. Trois types de liens se présentent dans le super-réseau d'activité :

- Les liens de déplacement sont les liens qui connectent des nœuds pour accéder au même POI à travers un mode de transport identique (e.g. véhicule, transport public).
- Les liens de transition sont les liens qui connectent des nœuds dans le but d'accéder au même POI par des modes de transport différents.
- Les liens de transaction connectent le même nœud pour accéder à un POI différent. Ce sont des liens qui permettent aux super-réseaux de supporter la combinaison de POI.

Pour passer d'un modèle de combinaison de transport public à un modèle d'activité combinant plusieurs POI, nous devons intégrer les lieux de déroulement d'activité dans le modèle. Tous les POIs doivent être représentés dans les super-réseaux afin de permettre la possibilité de choisir entre les POIs disponibles dans l'espace. Le transfert entre les différents POIs est assuré par les liens de transaction. Le graphe de l'activité doit incorporer les instances des réseaux de mobilité multimodale entre chaque paire de points OD. Le point Destination D devient à son tour un point d'Origine après l'utilisation du service offert en ce point. La figure 3.16 montre un exemple de réseaux d'accessibilité à une activité par le transport multimodal. Le calendrier de l'activité spécifie la visite de trois points POI_1 , POI_2 et POI_3 . Les déplacements entre (POI_1, POI_2) , (POI_2, POI_3) et (POI_3, POI_1) sont assurés respectivement par n, p et k modes de transport. Soit $G_{act} = (N_{act}, E_{act})$ le graphe d'une activité act

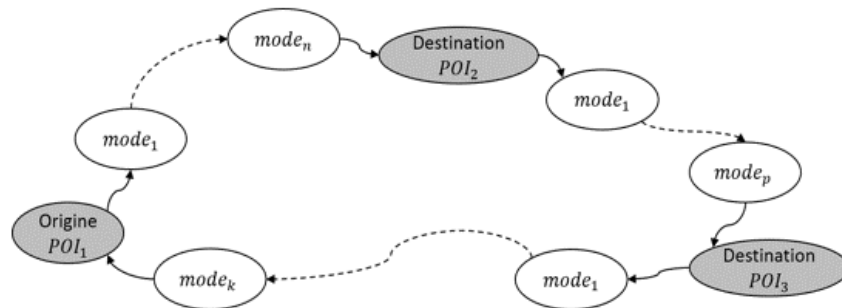


FIGURE 3.16 : L'enchaînement d'une activité à base de transport multimodal.

où N_{act} est l'ensemble de nœuds explorés et E_{act} est l'ensemble des liens permettant l'accessibilité à l'activité. G_{multi} est le graphe qui représente la mobilité multimodale entre deux points OD. Dans la section 3.2, nous avons défini G_{multi} comme un graphe de transport multimodal qui supporte les liens de déplacement (monomodaux), les liens de transition (multimodaux). Nous allons présenter les liens de transaction en combinant le réseau multimodal et en changeant les points OD. Soit $G_{multi}(POI_i \rightarrow POI_j)$ le graphe d'accessibilité entre deux points POI_i et POI_j tel que $O = POI_i$ et

$$D = POI_j.$$

$$G_{act} = \bigsqcup_{i=1}^{|act|} G_{multi}(POI_i \rightarrow POI_{i+1}) \quad (3.5)$$

Chaque lien de réseau G_{act} possède un attribut exprimant le coût de la distance de parcours. Dans la mesure où la durée de visite d'un POI donné affecte la durée totale de l'activité, les nœuds représentant les POIs dans le super-réseau doit intégrer un attribut spécifiant la durée de visite δ_{vis} . La figure 3.17 illustre un exemple d'une activité basée sur la mobilité multimodale. L'activité est programmée ainsi :

$$POI_1 \xrightarrow{(pieds,bus,tramway)} POI_2 \xrightarrow{(pieds,metro)} POI_3 \xrightarrow{(pieds,metro)} POI_1. \quad (3.6)$$

La présence du mode piéton dans chaque trajectoire provient de la structure du réseau de mobilité multimodale G_{multi} qui exige de passer par le réseau piéton pour chaque transfert de mode de transport.

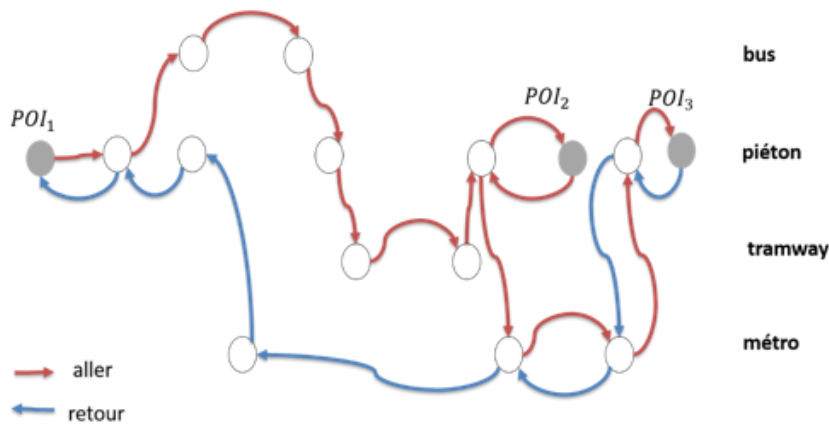


FIGURE 3.17 : Une modélisation multimodale d'une activité urbaine.

3.3.2 Modèle conceptuel à base d'activités

Les activités se déroulent dans un cadre spatio-temporel particulier associé à chaque individu. Ces paramètres influencent notamment les choix de POI ainsi que les itinéraires à parcourir. Un ensemble de contextes sera défini dans cette section afin d'identifier le cadre de déroulement d'une activité.

Tableau 3.2 : Les correspondances entre le modèle de Kofod-Petersen et le modèle d'activité urbaine

| Modèle de Kofod-Petersen | Modèle d'activité urbaine |
|--------------------------|---|
| contexte environnemental | contexte urbain (infrastructure et POI) |
| contexte d'utilisateur | contexte d'utilisateur |
| contexte spatio-temporel | contexte spatio-temporel |
| contexte social | contexte social |

3.3.2.1 Cadre contextuel d'une activité urbaine

Le contexte est défini comme un ensemble d'informations environnant l'activité et permettant de percevoir la situation dans laquelle se trouve l'utilisateur [Dhouieb \[2016\]](#). Nous nous sommes inspirés du modèle de Kofod-Petersen basé sur la théorie des activités définie dans la section 2.4.1 du chapitre 2 [Kofod-Petersen and Cassens \[2006\]](#). Le modèle de Kofod-Petersen intègre l'aspect spatio-temporel de l'activité en se basant sur de la théorie de l'activité. Ce qui explique notre intérêt pour ce modèle dans l'objectif de modéliser des activités urbaines. Le modèle était conçu pour supporter les activités génériques. Nous représentons dans la [tableau 3.2](#) les correspondances entre le modèle de Kofod-Petersen et notre modèle à base d'activités urbaines. Par suite, nous détaillons chaque contexte qui impacte la définition de l'activité ainsi que les déplacements réalisés pour la réaliser.

i Le contexte spatial et urbain

Le déroulement d'une activité exige un support spatial et urbain spécifique qui intègre tous les mouvements entre les POI. Une activité est réalisée dans une zone spatiale particulière avec une structure urbaine à un temps donné. Au fur et à mesure du déroulement de l'activité, l'individu change sa position dans l'espace en générant des itinéraires explorés dans l'objectif d'atteindre des points OD. En effet, le choix de ces itinéraires dépend principalement de l'infrastructure urbaine du système de transport. De plus, le choix des OD dépend aussi de ce que la structure urbaine offre pour les utilisateurs de la ville (e.g., nous ne pouvons pas accéder à un stade de football si l'espace urbain n'offre pas ce type de POI). Pour toutes ses raisons, nous pouvons affirmer que le contexte spatial et urbain de la ville influence l'accessibilité aux activités d'une part sur le choix des OD et d'autre part sur les décisions de mobilité.

ii Le contexte temporel

Une activité urbaine est une liste d'événements réalisés dans le temps. Le cadre temporel influence le déroulement de l'activité selon deux axes :

- **Le temps instantané** de la réalisation de l'activité : Une activité possède un instant de début à partir duquel elle se déclenche. L'accès aux points OD se fait à des instants temporels et peut durer dans le temps. Dépendamment de ces instants, la planification de l'activité par l'utilisateur peut varier. En effet, les POIs de la ville possèdent une disponibilité temporelle limitée ce qui pourra influencer le

choix des OD au moment de la programmation de l'activité. Nous prenons l'exemple d'une activité de shopping à 20h sur la ville de Brest, L'activité est impossible à réaliser puisque les magasins ferment à 19h.

- **La durée de l'activité** est un paramètre primordial pour définir l'activité et qui couvre la visite des POIs ainsi que les déplacements entre les itinéraires).

iii **Le contexte individuel et social** Le contexte qui entoure l'utilisateur est interprété par des paramètres physiques, économiques et civils. Ces paramètres définissent les profils des utilisateurs. Le déroulement d'une l'activité varie selon le profil de l'utilisateur y compris la planification de l'activité ainsi que l'exécution et les itinéraires explorés. Un cadre social entoure l'individu et peut influencer dans la manière de planifier et exécuter l'activité. En effet, les utilisateurs sont en interaction continue entre eux ce qui demande des contraintes supplémentaires au moment de définir l'activité (accompagnement, rencontre etc.).

3.3.2.2 Modèle conceptuel proposé

La section précédente a été dédiée à la représentation de la dynamique de l'activité urbaine dans l'environnement et à montrer que les activités sont influencées par différentes circonstances et situations auxquelles l'individu est exposé. L'enjeu de cette section est de proposer un modèle conceptuel qui prend en compte les composants contextuels influençant le déroulement de l'activité. Les éléments contextuels influencent sur le choix de POI ainsi que le choix des routes (Voir Figure 3.18). Nous avons exposé dans le chapitre 2 plusieurs modèles qui visent à modéliser la ville en prenant en compte les différents facteurs qui ont une influence sur le déroulement de l'activité. Ces modèles ont été représentés par plusieurs formalismes afin de mieux expliciter la sensibilité de l'activité aux plusieurs contextes (Modèles orientés objets, ontologies, etc.). Le manque de généralité et d'exhaustivité de ces modèles nous a motivé à proposer un modèle générique basé sur les concepts offerts par la théorie de l'activité. Nous optons pour le formalisme UML pour définir le modèle contextuel à base des activités. Ce choix est justifié par l'abstraction que le standard UML l'offre ainsi que la modularité des diagrammes qui rend les modèles extensibles. Dans le but de combler la lacune sémantique de l'UML, nous décrivons également les relations sémantiques entre les différents concepts du modèle à l'aide de la Logique de Description DL Baader and Nutt [2003]. DL permet de représenter les objets et les relations entre eux d'une manière plus formelle et structurée et d'enrichir la description du modèle UML par la sémantique basée sur la logique. La modélisation de l'activité demande en premier lieu de représenter l'environnement spatial urbain qui englobe les points d'intérêt et les différents réseaux de transport. Ensuite, nous devons exposer l'usage de la structure en alimentant le modèle par les concepts de déplacement et d'activité. Enfin, nous devons enrichir le modèle par les éléments contextuels intervenant dans la planification et l'exécution de l'activité. Nous présentons un modèle qui met en évidence les différents éléments contextuels rencontrés lors de la réalisation des activités dans la ville. L'enjeu de notre approche

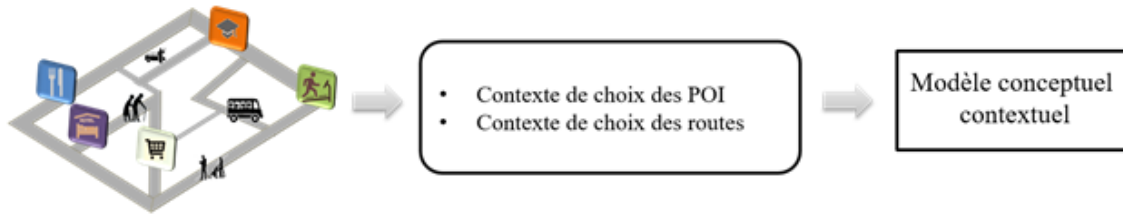


FIGURE 3.18 : Le besoin d'un modèle conceptuel pour représenter les contextes de l'activité.

est de proposer des différentes dimensions participant à la définition d'une activité contextuelle à travers un modèle orienté objet. Le but de ce modèle est de concevoir un système contextuel de génération d'itinéraires. Un système contextuel présente l'information d'une manière à la fois proactive et transparente tout en s'adaptant à la situation de l'utilisateur Weiser [1991]. Le système contextuel de génération d'itinéraires doit être capable de traiter une situation donnée et de répondre par des solutions adaptables à l'utilisateur. Pour cela, le modèle doit supporter des informations contextuelles hétérogènes. La représentation des éléments contextuels dans un modèle conceptuel nécessite l'identification des objets exprimant les contextes ainsi que les différentes relations entre eux. Notre modèle contextuel exposé par la Figure 3.19 vise à représenter le cadre de déroulement d'une activité urbaine dans une ville. Nous avons choisi dans notre modèle de définir les

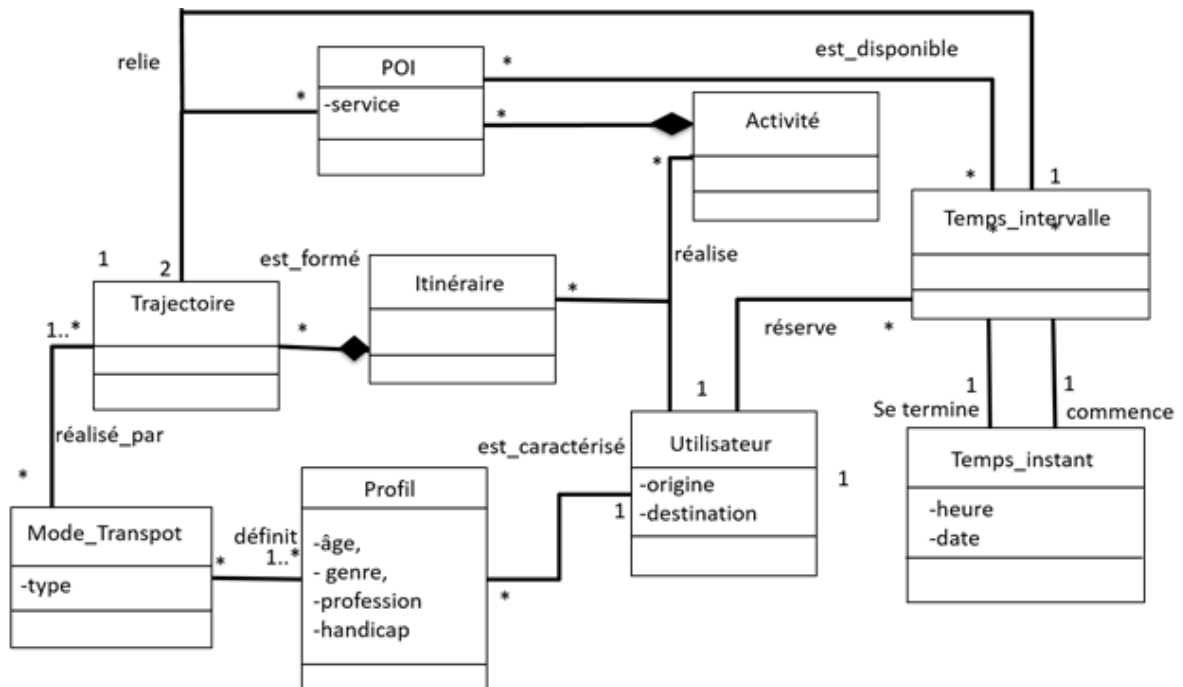


FIGURE 3.19 : Modèle de classe UML des activités urbaines

différents éléments contextuels centrés sur l'utilisateur. L'utilisateur du système ou l'utilisateur vise à réaliser une activité urbaine. La classe « utilisateur » spécifié dans le modèle, expose à travers les différentes relations

avec les classes représentant la situation de l'utilisateur. Un utilisateur réserve un intervalle de temps limité pour la réalisation de l'activité ce qui explique le contexte temporel de l'activité puisque le début et la fin de l'activité doivent s'adapter à chaque utilisateur. La durée de l'activité défini par la classe « Temps-Intervalle » qui débute et se termine par un instant de temps donné \sim Temps_Instant¹ spécifiant l'heure et la date.

$$Time_Intervalle \sqsubseteq \exists^{=1} commence.Temps_Instant \wedge \exists^{=1} se_termine.Temps_Instant$$

Dans un intervalle de temps limité, l'utilisateur planifie la visite d'un ensemble de POIs dans le cadre de son activité. La relation entre les deux classes « POI » et « Activité » est représentée dans le modèle par une association de composition. Le déroulement de l'activité dépend du contexte spatial de l'utilisateur. Un POI est disponible dans un intervalle de temps limité.

$$POI \sqsubseteq \exists^{\geq 0} disponible.Time_Intervalle$$

Un utilisateur possède une localisation qui spécifie le point d'origine de l'activité. La position est extraite à partir du système cartographique de référence. Le profil de l'utilisateur(s) représente le contexte individuel de l'activité. Chaque utilisateur possède un profil qui le caractérise. Un profil peut être défini à partir de plusieurs utilisateurs ce qui montre le contexte social d'une activité. Le profil définit les caractéristiques de l'individu(s) qui se présentent comme des attributs dans la classe Profil : l'âge, le genre, l'état civil, la profession, le revenu et la capacité de mobilité. L'utilisateur possède une situation donnée définie à partir d'un contexte spatio-temporel et un contexte individuel et social.

$$Utilisateur \sqsubseteq \exists^{=1} est_caractris.Profil \wedge \exists^{=1} rserve.Temps_Intervalle \wedge \exists^{=1} est_situ.Point_Position$$

Ces différents éléments interagissent sur le choix des itinéraires à explorer pour l'exécution de l'activité. La classe « Itinéraire » est représentée comme un ensemble de trajectoires.

$$Itinraire \sqsubseteq \exists^{\geq 1} est_form.Trajectoire \wedge \exists^{\geq 0} realis.Utilisateur \wedge \exists^{\geq 0} realis.POI$$

Chaque trajectoire est une combinaison de modes de transport entre deux POIs successifs tel que chaque trajectoire est effectué pendant un intervalle de temps donné.

$$Trajectoire \sqsubseteq \exists^{\geq 1} ralis_par.Mode_Transport \wedge \exists^{=2} relie.POI \wedge \exists^{=1} relie.Time_Intervalle$$

Les POIs sont modélisés selon les services offerts. Nous nous sommes inspirés du modèle proposé par Lorenz et al. [2005]. Ce modèle identifie pour chaque type de service (tourisme, restauration, administration etc.) les différents types de POIs qu'il offre. Le modèle de Lorenz doit s'adapter à la typologie des données urbaines utilisées par la suite pour la validation de l'approche. Deux sources de données de POIs sont exploitées dans le chapitre 5 afin d'appliquer notre approche sur un cas d'étude : OpenStreetMap¹ et Factual². Nous optons

1. <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:amenity>

2. <http://developer.factual.com/working-with-categories/>

à proposer une typologie aux POIs par le croisement des différentes typologies proposées par Lorenz, le standard OpenStreetMap et Factual en prenant en compte uniquement les POIs intervenant dans les activités de loisir. La Figure 3.20 montre une classification des différents types de POIs proposées pour la planification des activités à temps libre.

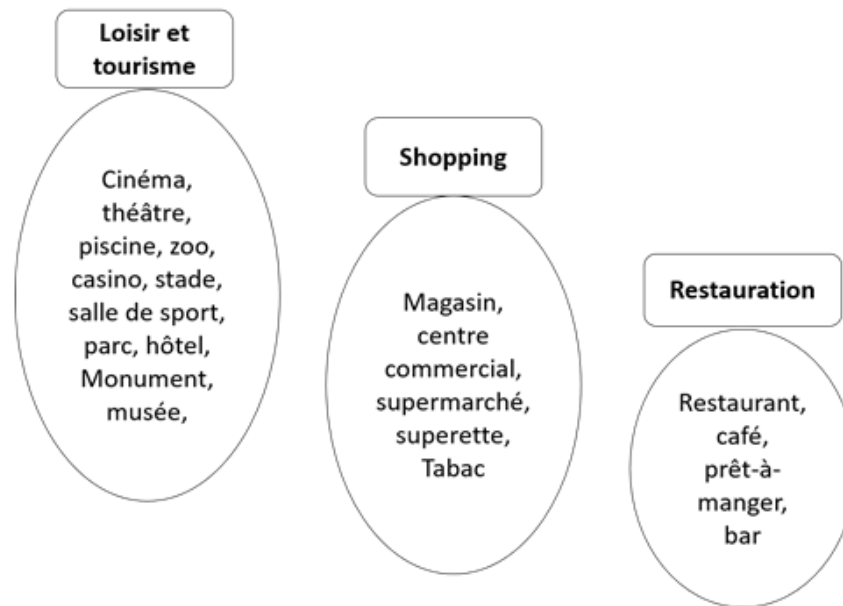


FIGURE 3.20 : La typologie des POI.

3.4 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons proposé une modélisation multidimensionnelle de la ville. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la structure du système de transport présente dans les villes. Ensuite, nous avons proposé une modélisation de la mobilité monomodale et multimodale basée sur les graphes. Le modèle proposé est caractérisé par sa généralité et sa complétude car il intègre les différentes contraintes d'accessibilité spatiale et temporelle confrontant les utilisateurs durant la réalisation des activités. Le modèle à base de déplacements proposé prend en compte les réseaux de transport privés et publics de telle sorte que les changements intermodaux et intramodaux sont possibles à travers les points de transfert. Le modèle a été enrichi par la suite par la sémantique de la mobilité afin de supporter les activités urbaines. Un modèle à base de graphes a été proposé afin d'enrichir le modèle de déplacement multimodal. Dans le but de représenter la notion de contexte des activités urbaines, nous avons spécifié le cadre qui environne la réalisation de l'activité à l'aide d'un modèle contextuel orienté objet basé sur la théorie de l'activité.

Chapitre 4

Génération d'itinéraires multimodaux des activités

Le chapitre 3 s'intéressait à la représentation d'un modèle multimodal de déplacement. Ce modèle a été élaboré dans le but de prendre en compte différents choix de mobilité pour la réalisation d'une activité. Dans ce chapitre, nous allons nous baser sur le super-réseau multimodal afin de générer les itinéraires multimodaux d'une activité donnée. Notre objectif consiste à proposer une approche de génération automatique d'itinéraires multimodaux adaptée à la structure de super-réseau. Dans la deuxième section, nous définissons les problématiques à étudier pour la génération d'itinéraires en se référant aux travaux existant dans la littérature. La troisième section propose une approche de génération d'itinéraires d'activité qui supporte la combinaison de différents modes de transport. Le réseau d'activité généré doit en particulier prendre en considération le contexte de l'utilisateur et ses contraintes spatio-temporelles. L'approche est enrichie dans la quatrième section par un système de gestion de connaissances orienté comportements des individus dans le cadre de la réalisation d'activités urbaines.

4.1 Problématique

La mise en œuvre d'une génération automatisée d'itinéraires est une étape qui doit se construire à partir d'une phase de modélisation de réseaux de transport. Les approches de génération d'itinéraires actuellement proposées dans la littérature ont le plus souvent pour objectifs d'étudier les interactions possibles entre les utilisateurs et le système de transport, de proposer des scénarios possibles de déplacement et de suivre le trafic de déplacement sur les différents réseaux Baaj M. H. [1995]; Bekhor S. [2006]; Bovy P. H. L. [1990]. La complexité de cette problématique provient essentiellement de la nécessité de prendre en compte les caractéristiques censées refléter les besoins des utilisateurs, ainsi que celles de la structure et des modalités de transport. En effet, un enjeu important de la génération d'itinéraires est d'assurer une mise en œuvre optimale de ces parcours en projetant les activités des utilisateurs sur le réseau de transport en fonction de leurs caractéristiques et de leurs besoins Y. and P. [2007]. Dans ce chapitre, nous abordons la problématique de génération d'itinéraires d'un point de vue anticipatif afin de représenter a priori un réseau possible d'activité dans la ville. L'anticipation des déplacements des activités est un domaine de recherche qui a suscité l'attention de plusieurs chercheurs avec différents objectifs :

- étudier les potentialités des réseaux de transport associés aux différents modes de transport (i.e., transfert modal, accessibilité aux POI) Janic [2007],
- prendre en compte les comportements possibles des individus en se basant sur un cadre d'analyse qui s'appuie sur les choix d'activités et de déplacements Damm [1982],
- identifier les alternatives possibles d'usage de la ville d'un point de vue activité et mobilité Jones [2008],
- optimiser les itinéraires générés afin de recommander aux utilisateurs des alternatives optimales pour accomplir leurs activités Ricci [2002].

Tableau 4.1 : Approches de génération d'itinéraires proposées dans la littérature

| Paramètres | Approches Mono-critères | Approches Multicritères |
|--|--|--|
| Nombre de points à visiter | Approches qui considèrent unique déplacement entre une origine et une destination Yang and Koutsopoulos [1996] . | Intégration du concept d'activité à partir des demandes et des besoins des utilisateurs, avec possibilité de prendre en compte plusieurs points entre une origine et une destination Ma and Lebacque [2007] ; Fiorenzo-Catalano [2007] . |
| Nombre de contraintes de génération | Prise en compte d'un unique critère qui est classiquement le temps de déplacement Zhang et al. [1995] ; Dill and Gliebe [2008] . | Génération d'itinéraires en prenant en compte plusieurs critères tels que la sécurité, qualité, budget, etc. Abdelghany [2001] ; Dial [1979] ; Huang and Li [2007] . |
| Nombre de modes de transport | Approches monomodales : pour les véhicules de particuliers Benshoof [1970] , transport public Nuzzolo [2002] , Daamen et al. [2005] , cyclistes Menghini et al. [2010] | Approches multimodales prenant en compte la possibilité d'un transfert modal Hoogendoorn-Lanser S. [2005] Grotenhuis et al. [2007] |

Nous expliquons dans le tableau 4.1 les différentes spécificités qui distinguent les approches proposées dans la littérature. Nous nous basons sur trois paramètres de classification qui sont : (1) le nombre de POIs à visiter, (2) le nombre de contraintes prises en compte pour la génération d'itinéraires et (3) la prise en compte de la multi-modalité de transport. Pour chaque critère, nous classifions les approches en deux groupes : monocritère et multicritère. Dans le chapitre précédent, nous avons modélisé l'itinéraire associé à une activité par un ensemble de liens permettant de visiter, à partir d'un point d'origine, un ensemble de points d'intérêt (POI) proposant un service demandé par l'utilisateur. Un itinéraire peut être évalué par le calcul de son coût comme la somme des temps de parcours de tous les liens et les nœuds explorés. La Figure 4.1 représente le processus de génération d'itinéraires qui prend en entrée une liste de types de POIs à visiter ainsi que les réseaux de transport disponibles dans la ville. Ce processus peut être enrichi par des contraintes provenant de la structure de la ville et des politiques urbaines adoptées (e.g., disponibilité d'un POI ou d'un mode de transport) mais aussi par les préférences individuelles de chaque utilisateur. **Hoogendoorn-Lanser S. [2005]** a classifié les facteurs intervenant dans le choix d'itinéraires en quatre catégories (Figure 4.2) :

- **les conditions logiques** sont les conditions qui permettent d'éviter les déplacements inutiles dans

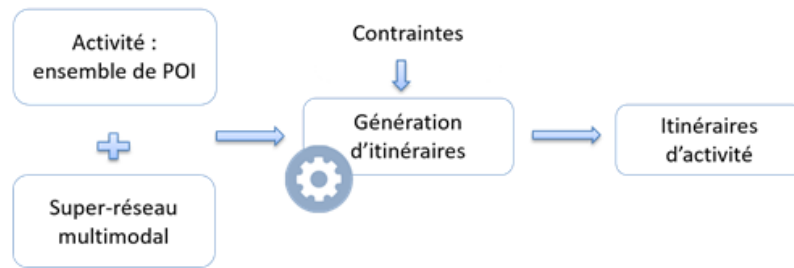


FIGURE 4.1 : Processus de génération d'itinéraires d'une activité

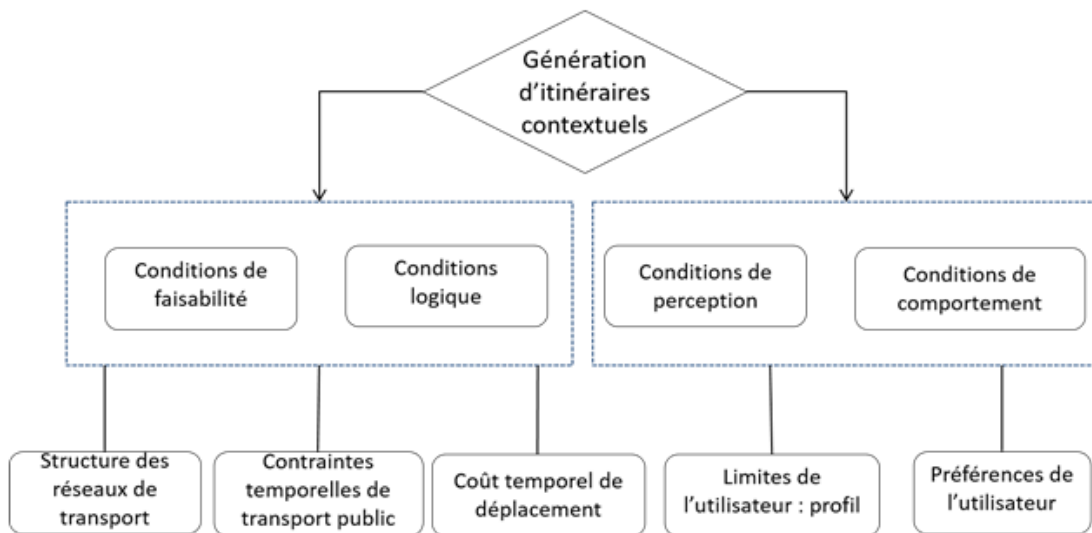


FIGURE 4.2 : Conditions interagissant dans le choix des itinéraires

l'espace comme les boucles, les retours etc. Les conditions logiques imposent des mesures pour écarter des instructions impossibles (e.g., prendre un transport public en dehors d'une station, le départ de train plus tôt etc.). La méthode de génération des itinéraires se charge d'éliminer les itinéraires illogiques.

- **des conditions de faisabilité** sont associées au temps, à l'espace, aux modalités et à la capacité physique des utilisateurs. Ces conditions ont été explicitées par le concept de « Time Geography » par les contraintes biologiques et les contraintes de couplages Hagerstrand [1976] (voir section 2.3.1). Des itinéraires faisables dans le temps valident les contraintes liées à la durée maximale de déplacement ou le temps d'attente pour chaque transfert entre les modes de transport. Dans l'espace, la faisabilité est définie par la disponibilité de l'infrastructure associée aux modes de transport exploités pour le choix des itinéraires (rue, rails, stations etc.). La faisabilité dans l'espace est liée également à la modalité utilisée. Par exemple un piéton possède des limites de déplacement dans l'espace dues à sa capacité physique. Ces limites varient selon les individus (e.g mobilité réduite,

âge, accompagnement etc.).

- **les conditions de comportement** sont des préférences de déplacement de l'utilisateur qui se répercutent sur les choix des modes de transport, du nombre de transferts et des parcours préférentiels (e.g., animation et services offerts, sécurité, etc.).
- **les conditions de perception** proviennent de l'expérience des utilisateurs dans l'espace permettant de bénéficier de connaissances a priori sur certains itinéraires. Un utilisateur donné peut préférer certains itinéraires par rapport à d'autres en s'appuyant sur son expérience passée. Les critères de choix peuvent provenir par exemple de la probabilité de congestion de certaines rues ou de son attractivité au regard de critères architecturaux ou d'offre des services.

La première partie de ce chapitre est consacrée au développement d'une méthode de génération d'itinéraires multimodaux d'activité basée sur un algorithme de recherche dans les graphes. Nous faisons le choix du développement d'un algorithme qui doit prendre en compte les conditions de faisabilité d'une activité et la structure logique du réseau de transport. La deuxième partie s'intéresse à l'enrichissement de la méthode de génération d'itinéraires par l'extraction des connaissances sur la mobilité et la planification des activités à partir des données réelles sur les déplacements des individus. À l'aide des techniques d'extraction des connaissances à partir des données, des informations pertinentes concernant les comportements et les perceptions des utilisateurs sont déduites. Elles sont représentées par une base de connaissances afin de générer des itinéraires contextuels adaptés à l'utilisateur (i.e., profil et contraintes spatio-temporelles).

4.2 Approche proposée de génération d'itinéraires multimodaux

Nous proposons une approche de génération d'itinéraires adaptée à la structure de super-réseaux présenté dans le chapitre précédent. Notre approche doit garantir la faisabilité et la logique des itinéraires sélectionnés pour une activité réalisée dans un cadre spatio-temporel donné. Le but de l'approche est de prendre en compte :

- les points de passage multiples (POI réservés pour l'activité),
- la mobilité multimodale,
- la faisabilité et la logique des itinéraires proposés en prenant en compte le contexte spatio-temporel de l'utilisateur (Origine/Destination, durée d'activité etc.).

4.2.1 Principe du système de génération d'itinéraires

Dans le but de générer des itinéraires qui assurent l'exécution d'une activité donnée, plusieurs paramètres doivent être pris en compte par le système. Le système développé vise à proposer toutes les alternatives possibles d'itinéraires qui assurent la réalisation d'une activité donnée en prenant en compte un programme

d'activité, les modalités de l'utilisateur et la structure des réseaux de transport. Dans le but de garantir la faisabilité et la logique de réalisation d'une activité, le système doit prendre en compte les contraintes spatio-temporelles de l'utilisateur (e.g. distance de marche, nombre de transferts autorisés, durée de l'activité prévue). La Figure 4.3 illustre l'architecture du système de génération d'itinéraires contextuels qui prend comme entrée les profils des utilisateurs, les types de POIs demandés, les modes de transport à utiliser, OD, l'instant de départ et la durée de l'activité ainsi que la structure de la ville. L'enjeu d'un système de génération est de proposer tous les meilleurs itinéraires qui respectent la planification fixée de l'activité.

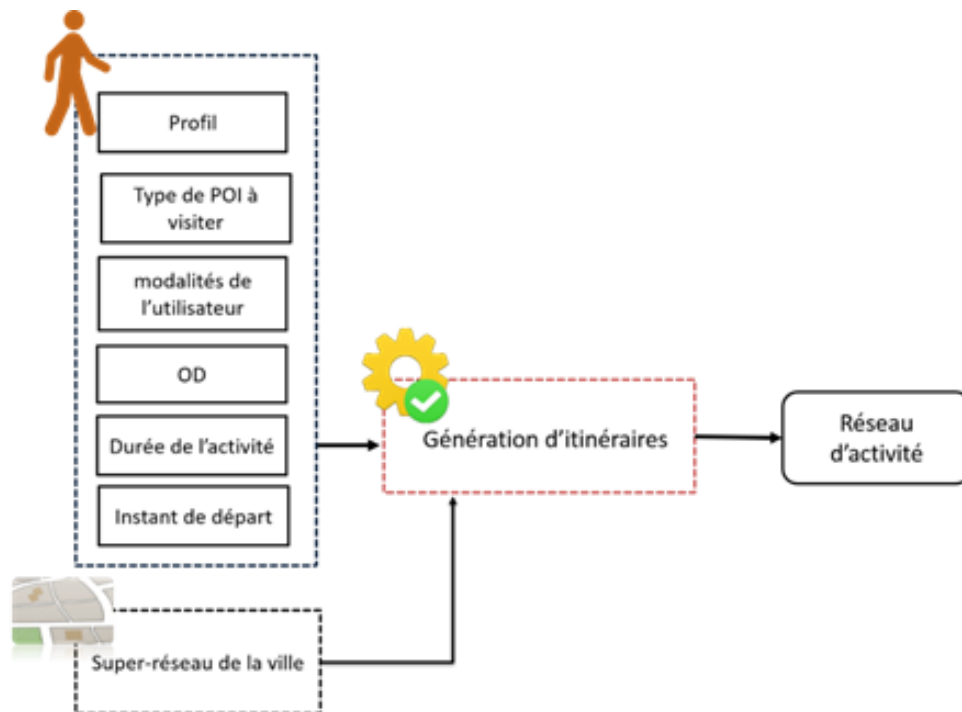


FIGURE 4.3 : Méthode de génération d'itinéraires

i Définition du problème

Deux défis doivent être relevés dans cette partie : (1) le premier est lié à la nécessité de prendre en compte la structure du réseau de transport multimodal (2) le deuxième défi consiste à prendre en compte le contexte spatio-temporel de l'utilisateur(s) afin de générer un réseau reflétant l'usage contextuel de l'espace.

Défi 1 : la topologie du réseau d'activités

Les itinéraires générés doivent relier un ensemble de POIs par un ou plusieurs modes de transport. Plusieurs itinéraires doivent être générés par la méthode dans le but d'identifier toutes les alternatives faisables. Nous présentons dans un premier temps les différents concepts à gérer pour la génération d'itinéraires. Le formalisme de ces concepts a été proposé dans le chapitre 3 :

- **Un réseau d'activité** est un sous-réseau multimodal de la ville. Il représente tous les itinéraires

générés pour la réalisation d'une activité donnée.

- **L'itinéraire** d'une activité est le chemin exploré dans le réseau multimodal de la ville qui relie un point d'origine O à une séquence de POIs pour atteindre une destination D,
- **Une trajectoire** est un chemin dans le réseau multimodal de la ville qui relie deux nœuds du réseau multimodal de la ville, une trajectoire peut notamment relier un POI à son POI successeur dans la séquence de l'itinéraire d'une activité,
- **Un arc** est le lien qui connecte directement deux nœuds du super-réseau.

Un itinéraire est composé d'un ensemble de trajectoires où chaque trajectoire est constituée de plusieurs arcs appartenant au même réseau de transport (i.e., monomodaux) ou à des réseaux différents (i.e., multimodaux). Cette hiérarchie est due à la multitude de POIs dans le cadre de la réalisation de l'activité. La méthode de génération d'itinéraires nécessite la prise en compte de cette hiérarchie en suivant les étapes suivantes :

- **Étape 1** : Recherche les POIs dans l'espace qui correspondent aux types de POIs requis pour l'activité.
- **Étape 2** : Générer la meilleure trajectoire possible connectant deux POIs successifs. Le critère d'optimisation pris en compte dans le contexte du déplacement multimodal est le temps de déplacement calculé avec les longueurs des arcs et les vitesses caractéristiques.
- **Étape 3** : Chercher le POI suivant correspondant au type requis pour l'activité en respectant les contraintes temporelles de l'activité jusqu'au point Destination de l'activité. La multi-modalité de réseau de transport doit être considérée au moment de la recherche de la meilleure trajectoire.
- **Étape 4** : Construire les itinéraires à partir des trajectoires générées pour obtenir le réseau de l'activité.

Les différentes étapes de cette méthode nécessitent l'exploration des réseaux de transport disponibles afin d'atteindre les POI. La sélection des itinéraires prend en compte l'aspect multi-POI de l'activité ainsi que la combinaison de modes de transport. Le transfert modal est géré en fonction des demandes de l'utilisateur ainsi qu'en fonction de la disponibilité des modes de transport. Néanmoins, un transfert de mode ne peut être proposé seulement s'il est possible d'un point de vue du temps d'attente et de la distance de marche pour le réaliser. Les itinéraires générés sont les meilleurs itinéraires qui assurent la visite des POIs correspondant au type de POI requis pour l'activité. Chaque itinéraire est caractérisé par un ensemble de propriétés (durée, distance de marche, temps d'attente, nombre de transfert, etc.).

Défi 2 : Contexte spatio-temporel et individuel de l'activité

Les itinéraires générés doivent s'adapter au contexte de l'utilisateur. Nous prenons en considération les contraintes de faisabilité et de logique dans l'algorithme de choix d'itinéraires.

- Le point O de l'activité est la position géographique de départ de l'utilisateur, le point D est la position finale souhaitée par l'utilisateur.
- L'ensemble de trajectoires générées doit exploiter uniquement les modes de transport possibles pour

l'utilisateur

- L'instant de départ de l'utilisateur est le temps à partir duquel la vérification de la disponibilité d'un POI donné est effectuée dans la mesure où l'arrivée et le départ de l'utilisateur nécessitent d'être pris en compte dans le temps de disponibilité du POI.
- Un itinéraire d'activité doit avoir un coût temporel inférieur ou égal à la durée prévue de l'activité par l'utilisateur.
- Le calcul du temps de parcours doit prendre en compte les caractéristiques de l'espace (i.e. la topologie du réseau, les pénalités routières, etc.), la capacité physique de l'acteur ainsi que la planification des horaires du transport public. Le coût temporel d'une trajectoire vise à évaluer le temps nécessaire pour le déplacement et estimer le temps d'arrivée à un point donné. Nous spécifions certaines contraintes intervenant dans le calcul de la durée d'une trajectoire :
 - le passage par des intersections et des feux de signalisation peuvent impliquer une réduction de vitesse ou l'arrêt pour les véhicules et les piétons,
 - les signaux de limitation de vitesse obligent les utilisateurs de véhicules à rouler à une vitesse inférieure ou égale à la vitesse maximale. La vitesse maximale varie selon la rue considérée,
 - les moyens de transport public doivent s'arrêter dans les différentes stations demandées par les passagers ce qui va impliquer des arrêts éventuels.
- Le temps de transfert d'un mode de transport à un autre est calculé comme la somme de temps d'accès entre le point de sortie du premier mode de transport et le point d'entrée au prochain mode de transport et le temps d'attente dans le cas d'utilisation d'un transport public.

ii Formalisation du problème

Les points OD sont fixés dans l'espace. Le système de génération d'itinéraires récupère à partir de profil de l'utilisateur des informations contextuelles qui permettent de vérifier la faisabilité et la logique des itinéraires générés telles que le profil, le contexte temporel etc. Un utilisateur U est défini par un type :

$$U = [VM, ModeTr, act, OD, \delta itinmax, t_{depart}]$$

tel que VM est la vitesse de marche moyenne estimée par profil d'utilisateur, $ModesTr$ est la list des modes de transport à utiliser, act est la liste de types de POIs requis pour l'activité, $O \setminus D$ sont respectivement les points d'origine et de destination, $\delta itinmax$ est la durée maximale réservée pour l'activité et t_{depart} est l'instant de départ de O . L'activité d'un utilisateur est définie par act tel que $act = \{POI_1, POI_2, \dots, POI_n\}$ où chaque POI offre un type de service demandé par l'activité (e.g., restaurant, musée, café magasin). La génération de tous les meilleurs itinéraires nécessite dans un premier temps de trouver tous les POIs correspondant à une activité act de l'utilisateur. Un itinéraire est une projection possible dans l'espace d'une activité donnée. Nous assumons que le meilleur itinéraire multimodal est celui qui consomme le moins de temps pour achever les différents POIs demandés.

$$\sum Itinéraires = f(U, G_v, act)$$

Où $\Sigma Itinéraires$ est l'ensemble d'itinéraires générés pour la réalisation de l'activité act et adaptés à l'utilisateur U , $f()$ est la fonction de génération d'itinéraires, G_v est le super-réseau d'une ville donnée. Chaque itinéraire généré est considéré comme une instance de l'activité dans l'espace de la ville. Un POI requis dans une activité est projeté sur l'espace par un ensemble de points possédant le même type de service. L'activité $act = \{POI_1, POI_2, \dots, POI_n\}$ peut être exprimée dans l'espace par l'ensemble $Pt_{poi} = \{Pt_1, Pt_2, \dots, Pt_n\}$ tel que Pt_i est l'ensemble de points de l'espace de type POI_i , $1 \leq i \leq n$. Soit $itin_i \in \Sigma Itinéraires$ un itinéraire généré, $\delta itin_i \leq \delta itin_{max}$ tel que $\delta itin_i$ est le temps estimé pour les déplacements et les visites enchaînées de POI. L'ensemble d'itinéraires générés par le système présente les alternatives de choix de POIs et de déplacements possibles pour l'activité. Chaque itinéraire généré doit relier les différents POIs requis. Le réseau d'activité est composé de l'ensemble d'arcs de tous les itinéraires générés pour l'activité.

4.2.2 Méthode de génération d'itinéraires

Deux types de méthodes pour la recherche d'itinéraires sont possibles : (1) les méthodes exactes qui consistent à explorer entièrement le réseau dans le but de trouver l'itinéraire optimal [Lauther \[2004\]](#) et (2) les méthodes heuristiques qui explorent uniquement une partie de réseau en s'appuyant sur des connaissances a priori du problème pour privilégier certaines solutions [Moustakas \[1990\]](#). Les méthodes heuristiques sont plus adaptées pour ce genre de problématique de recherche opérationnelle sur des grandes données. Les méthodes heuristiques offrent en effet plus de rapidité et de performance que celles offertes par les méthodes déterministes en permettant d'identifier en temps polynomial une solution réalisable et rapide [Pohl \[1970\]](#); [Scholl and Becker \[2006\]](#). Nous nous basons sur le principe de l'algorithme A* pour la recherche des meilleures itinéraires. L'algorithme A* est très utilisé dans la recherche combinatoire et l'intelligence artificielle en raison de sa simplicité et de sa flexibilité [Hart et al. \[1968\]](#). A* est un algorithme de recherche appliqué sur des graphes dans le but de trouver la route optimale qui sépare deux nœuds donnés (nœud origine, nœud destination). A* utilise une évaluation heuristique à chaque nœud pour estimer le meilleur chemin qui y passe. Il est considéré comme un algorithme admissible puisqu'il garantit trouver toujours une solution valide et optimale parmi l'ensemble de solutions existantes. L'estimation du coût d'un nœud courant n_i est définie par la fonction $f(n_i) = g(n_i) + h(n_i)$ où $g(n_i)$ est le coût du chemin parcouru partant du nœud origine à n_i et $h(n_i)$ est la fonction heuristique estimant le coût restant pour atteindre le nœud destination à partir de n_i . L'algorithme A* est habituellement appliqué sur les deux points OD d'un déplacement. Dans le cadre d'une activité multi-destinations, la recherche des meilleurs itinéraires consiste à appliquer l'algorithme sur chaque paire de POIs successifs de telle sorte que l'origine du déplacement représente le POI courant et la destination est le POI suivant. L'algorithme A* doit prendre en compte la multi-modalité supportée par le super-réseau (cf. Chapitre 3) en l'exploitant pour rechercher les meilleurs chemins dans les réseaux associés aux modes de transport validés par l'utilisateur. La structure de super-réseau facilite l'intégration des contraintes liées

aux modes de transport en se limitant uniquement à la recherche dans les couches associées aux modes de transport validés par l'utilisateur. L'exploration du réseau peut se faire de deux manières différentes : (1) l'exploration en profondeur qui permet de parcourir chaque chemin en prenant chaque fois le nœud suivant jusqu'au point de destination demandé Tarjan [1972] et (2) l'exploration en largeur qui consiste à parcourir tous les successeurs d'un nœud donné. Afin de prendre en compte tous les itinéraires possibles, nous optons pour un enrichissement de cette méthode par un algorithme d'exploration d'un graphe en profondeur (DFS : Depth First Search) qui consiste à rechercher les points associés aux POIs demandés entre le point O et le point D demandés par l'utilisateur. La recherche du meilleur chemin par l'algorithme A* est appliquée entre chaque paire de POIs successifs dans l'espace. La Figure 4.4 montre un exemple de plusieurs itinéraires générés par l'exploration en profondeur d'un graphe entre O et D. Les itinéraires connectent les points associés à une planification donnée de l'activité $\{O, POI_1, POI_2, POI_3, D\}$. Dans l'espace plusieurs points possibles permettent de réaliser l'activité présentée par l'ensemble $\{Pt_1, Pt_2, Pt_3\}$. Pour chaque combinaison possible de POIs requis par l'activité, un ou plusieurs itinéraires peuvent assurer l'accessibilité à l'aide de transport urbain. La recherche des meilleures trajectoires permet d'obtenir les itinéraires optimaux reliant les POIs dans l'espace. Les itinéraires d'activité générés doivent s'appuyer uniquement sur les réseaux associés aux modes de transport possibles pour l'utilisateur. L'algorithme de génération d'itinéraires est le suivant

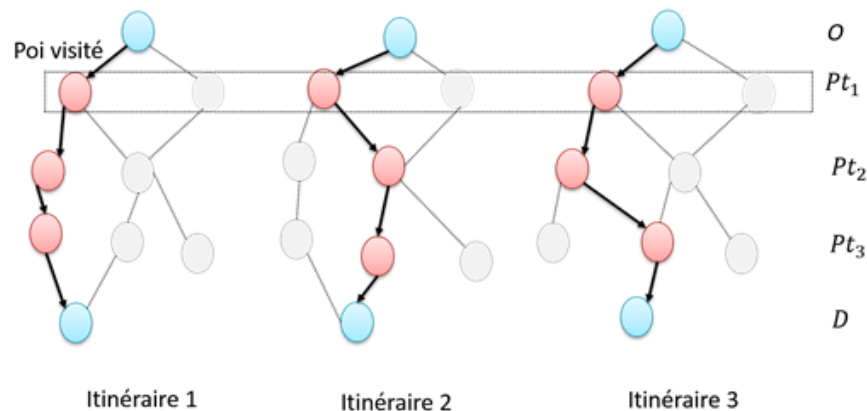


FIGURE 4.4 : Principe de l'algorithme de recherche d'itinéraire

(algorithme 1) :

- Les paramètres sont initialisés (ligne 3 de l'algorithme),
- l'algorithme recherche les points de l'espace qui correspondent aux types de POIs définis dans act (lignes 4 → 7).
- La fonction exploreReseau() est une fonction d'exploration de l'algorithme par profondeur (DFS). Elle prend comme entrées le nœud courant, l'indice du type de POI suivant et le nombre de POIs de l'activité demandée act. Dans le cas où il reste encore des types de POIs non parcourus (ligne 16 → 22), la fonction fait appel à une autre fonction qui a pour but de trouver du meilleur chemin

Algorithm 1 : Génération d'itinéraires d'une activité

```

Data :  $G_{multi}$ , POI, Utilisateur : VM, ModesTr, act, O, D,  $\Delta itin_{max}$ ,  $t_{depart}$ 
Result : Ensemble d'itinéraires optimaux d'activité
1 Fonction rechercheItineraire ( $G_{multi}$ , POI, VM, ModesTr, act, O, D,  $\Delta itin_{max}$ ,  $t_{depart}$ )
2 begin
3   Trajectoire, Itin  $\leftarrow \emptyset$  ; predec  $\leftarrow null$  ; // rechercher les points de l'espace possédant les types
   demandés
4   NombrePOI  $\leftarrow$  Longueuract();
5   while  $i < NombrePOI$  do
6      $A_i \leftarrow$  CherchePOI(act[i], POI);
7   end
8   predec  $\leftarrow O$  ;  $i \leftarrow 0$  ; // explorer en profondeur les POIs à partir du point d'origine 0
9   ExploreReseau(O, i, NombrePOI) ;
10 end
11 Fonction exploreReseau(a,i, NombrePOI, predec) begin
   // Si tous les types de POIs sont explorés
12 if  $i \geq NombrePOI$  then
13   Trajec  $\leftarrow$  meilleurcheminA* ( $a, D, G_{multi}, VM, \Delta itin_{max}, t_{depart}$ ) ;
   // trajectoire entre le dernier POI et le point destination
14   Itineraire  $\leftarrow$  Itineraire  $\cup$  Trajec ;
15   EnregistreItineraire(Itin) ; // itinéraire construit et sauvegardé
16 else
17   foreach  $a \in A_i$  do
18     Trajectoire  $\leftarrow$  meilleurcheminA* (predec, a,  $G_{multi}, VM, \Delta itin_{max}, t_{depart}$ ) ;
19     Itineraire  $\leftarrow$  Itineraire  $\cup$  Trajec ; predec  $\leftarrow a$  ;  $i \leftarrow i + 1$  ;
20     exploreReseau(predec, i, NombrePOI)
21   end
22 end
23 end
24 Fonction meilleurcheminA*(O, D,  $G_{multi}$ , ModesTr, VM,  $\Delta itin_{max}$ ,  $t_{depart}$ ) begin
   Listefermee  $\leftarrow \emptyset$  ; g(O)=0 ; Listeouverte  $\leftarrow \{O\}$  ; courant = Listeouverte.depiler() ;
25 while Listeouverte  $\neq \emptyset$  do
26   if courant  $\neq D$  then
27     foreach  $u \in voisinCourant$  do
28       end
29        $m \leftarrow$  extractMode(courant, u) ;
30       if  $m \in ModesTr$  then
31         if  $u \notin Listefermee$  then
32            $g = g(\text{courant}) + \text{dureeExploration}(\text{courant}, u)$  ;  $t_{acc} = t_{depart} + g$  ; // l'instant d'accessibilité au nœud
           u
33            $h = \frac{\text{distanceEu}(u, D)}{V_m}$  ;  $f = g + h$  ;
34           if transfertmodal=vrais then
35             | nbrtransfert= nbrtransfert+1
36             ;
37           if m=piéton then
38             | distanceMarche=Distance(courant, u) ;
39             | AjoutListeouverte(u) ;
40             nœud = meilleurNoeud(Listeouverte) ;
41             Listefermee  $\leftarrow$  Listefermee  $\cup$  nœud ;
42           else
43             | parcourirListefermee() ; // reconstruire le chemin
44           end
45         end
46       end
47 end

```

meilleurcheminA*()) entre le nœud courant et les points de l'espace possédant le type de POI suivant demandé. Chaque fois qu'une trajectoire est retournée, la fonction l'ajoute à l'itinéraire. L'appel récursif de la fonction exploreReseau() avec le dernier point trouvé et l'indice de POI suivant permet d'explorer en profondeur tous les scénarios de POIs visités. S'il n'y a plus un seul POI à parcourir (lignes 12 → 15), la fonction recherche le meilleur chemin pour connecter le dernier point visité au point de Destination.

- meilleurcheminA*()) est une fonction de recherche du meilleur itinéraire basé sur l'heuristique A* (lignes 24 → 47). Elle prend en entrée les points OD, le réseau multimodal de la ville ainsi que certains paramètres qui contextualisent la recherche comme la vitesse de marche de l'utilisateur, la durée maximum de l'activité et le temps de départ. Le principe de A* consiste à utiliser deux listes pour l'exploration des graphes. La première liste *listeouverte* stocke les nœuds qui ne sont pas encore explorés. Le chemin potentiellement considéré comme optimal est conservé dans une deuxième liste *listefermee*. L'évaluation d'un nœud est basée sur le calcul du coût temporel dans la mesure où la distance n'est pas un critère d'optimisation pour le transport public (e.g., un nœud peut être loin mais plus rapide à atteindre qu'un autre plus proche). Chaque nœud possède trois paramètres qui permettent son évaluation :

- le coût réel g d'un nœud donné est calculé en ajoutant au coût du nœud prédécesseur (le père) le coût de déplacement du nœud père au nœud courant. Le coût réel d'un nœud n est déterminé comme suit :

$$g(n) = g(\text{parent}) + \text{DureeExploration}(\text{parent}, n)$$

où $g(O) = 0$, $g(\text{parent})$ est la durée qui sépare la sortie du nœud d'origine au nœud parent. *dureeExploration()* calcule le temps de parcours du nœud parent au nœud courant.

- le coût heuristique h permet d'estimer la qualité de chaque nœud du graphe en se basant sur certains choix. Le coût estimé entre le nœud étudié et le nœud de destination. La valeur de h est déterminée comme suit :

$$h(n) = \frac{\text{distanceEc}(n, D)}{\text{Vitesse}(\text{mode}_n)}$$

où *DistanceEc()* est la distance euclidienne entre le nœud étudié et le nœud destination D , *Vitesse(mode_n)* est la vitesse moyenne du parcours de réseau pour le mode de transport du nœud.

- f est la somme de g et h

- La fonction **dureeExploration()** calcule la durée de déplacement d'un nœud à un autre. Le réseau de transport est pondéré par la longueur de chaque segment. Selon le mode de transport utilisé, **dureeExploration()** calcule la durée du déplacement. Soit VM la vitesse de marche d'un piéton varie selon le profil de l'utilisateur. Nous allons nous baser sur l'étude faite par Gates TJ. [2006] qui consiste à étudier la vitesse de marche de 1947 personnes de profils différents. V_{vehic} est la vitesse des véhicules publics ou privés qui doit être inférieure ou égale à la vitesse maximale fixée

pour une rue. Les utilisateurs de réseau routier (piéton, véhicule privé, bus etc.) sont confrontés à des pénalités routières durant leurs déplacements. Nous désignons δ_{pieton} comme la pénalité temporelle pour un piéton lors du passage d'une intersection. Soit $\delta_{vehicule}$ la pénalité temporelle des véhicules pour le passage de chaque intersection.. Pour le transport public ferroviaire, soient V_{tram} , V_{metro} et V_{train} les vitesses respectives du tramway, métro et train dans la ville. Soit δ_{arret} la pénalité temporelle qui représente le temps d'arrêt dans une station de transport public. Soit $\delta_{attente}$ le temps d'attente pour accéder à un mode de transport donné. Cette pénalité dépend du temps d'arrivée de l'utilisateur à la station ainsi que les horaires affichés pour la ligne de transport. La durée entre deux nœuds x,y est calculée ainsi :

$$DureeExp(x,y) = \begin{cases} \delta_{pieton} + \frac{longueur(y)}{VM} & \text{si } x,y \in N_{pieton} \\ \frac{longueur(y)}{V_{vehic}} + \delta_{vehicule} & \text{si } x,y \in N_{vehi} \\ \frac{longueur(y)}{V_{vehic}} + \delta_{vehicule} + \delta_{arret} & \text{si } x,y \in N_{bus} \\ \frac{longueur(y)}{V_{ferr}} + \delta_{arret} & \text{si } x,y \in N_{ferr} \\ \frac{distanceAcces(x,y)}{VM} + \delta_{vehicule} & \text{si } x \in N_{vehi}, y \in N_{pieton} \\ \frac{distanceAcces(x,y)}{VM} + \delta_{attente} & \text{si } x \in N_{pub}, y \in N_{pieton} \\ \frac{distanceAcces(x,y)}{VM} + T_y & \text{si } x = poi, y \in N_{pieton} \end{cases}$$

où $longueur(x)$ est la longueur du segment y , $distanceAcce(x,y)$ est la distance parcourue de la rue y pour accéder au point x et T_y est la durée de visite du POI.

- **AjoutListeouverte()** est la fonction qui assure l'ajout d'un nœud dans la liste listeouverte. Dans un premier temps, la fonction vérifie les conditions de l'utilisateur :
 - la durée de déplacement qui ne doit pas dépasser la durée maximale fixée par l'utilisateur $g < \Delta itin_{max}$,
 - la distance de marche est limitée selon la capacité physique de l'utilisateur. La présence d'un handicap, l'âge ou l'accompagnement des enfants sont des facteurs qui peuvent impliquer une mobilité réduite. Soit $DistanceMarchMax$ la distance de marche maximale d'un utilisateur tel que $distanceMarche < DistanceMarchMax$,
 - Le nombre de transfert modal peut être considéré comme un critère du choix d'itinéraires pour certains utilisateurs,
 - Le temps d'attente pour l'accès à un mode de transport public doit être aussi limité. Une fois que le nœud vérifie les conditions relatives à l'utilisateur, la fonction **AjoutListeouverte()** doit vérifier s'il existe déjà dans la liste. Dans le cas où le nœud est déjà dans la liste avec un coût plus élevé que celui trouvé, une mise à jour du coût est faite sinon le nœud est simplement ajouter à *listeouverte*.

4.3 Enrichissement des activités

La section précédente a présenté un algorithme de génération d'itinéraires qui prend en compte la planification de l'activité et la structure multimodale du réseau de transport. Un autre objectif important de notre approche consiste à rendre les itinéraires générés sensibles au contexte de l'utilisateur au moment du déroulement de l'activité. La capitalisation des informations sur les comportements des individus dans l'espace doit pouvoir enrichir la méthode de génération par extraction de connaissances dans l'objectif de générer les itinéraires les plus adaptés au profil de l'utilisateur. L'Extraction de Connaissances à partir de Données (ECD) est un processus complexe qui nécessite plusieurs étapes de traitement et d'analyse. Ce processus vise à transformer des données volumineuses en connaissances exploitables afin d'enrichir un domaine d'étude donné Klogsen [1996]. L'ECD consiste à chercher des patterns à partir des données massives qui vont être structurées par des techniques de représentation de connaissances. Les patterns sont des modèles qui spécifient les comportements individuels ou collectifs. Fayyad [1996] ont détaillé les différentes étapes dispensables pour l'ECD qui sont sommairement présentées comme suit :

1. La collecte et le nettoyage des données permettent de découvrir les données volumineuses collectées. Selon les objectifs de l'analyse, il faut garder uniquement les attributs pertinents pour le problème et éliminer les données considérées comme du bruit.
2. La fouille de données est l'étape la plus importante dans l'ECD dans laquelle la correspondance entre les objectifs et les techniques de fouille est réalisée. Le choix de la méthode de fouille de données conduit par la suite à la détermination de l'algorithme le plus adapté à la problématique. L'exécution de l'algorithme permet d'obtenir des connaissances qui demandent une évaluation avant d'être intégrés au système.
3. La représentation et l'intégration des connaissances sont effectuées une fois que les informations extraites par les méthodes de fouille de données sont considérées comme pertinentes. La capitalisation et la représentation des connaissances sont réalisées à l'aide d'un système de gestion de connaissances : un système à base de règles, des réseaux sémantiques, des graphes conceptuels, etc.

4.3.1 Collecte de données

L'enquête nationale de transport et déplacement (ENTD) est une enquête conduite par le ministère chargé des transports et l'Insee¹. Elle permet de répondre à certaines questions sur les déplacements et les ménages des résidents en France. Nous nous sommes appuyés sur la dernière enquête réalisée en 2008 pour l'extraction de connaissances. L'enquête ENTD a pour objectif d'observer les déplacements des individus

1. <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sources-methodes/enquete-nomenclature/1543/139/enquete-nationale-transports-deplacements-entd-2008.html>

utilisant différents moyens de transport. Chaque déplacement est décrit en détail : le motif, la longueur, la durée, le mode de transport utilisé et la période de l'année et le moment de la journée. De plus, l'ENTD offre une description détaillée sur chaque individu interrogé : âge, profession, capacité de mobilité etc. L'intérêt de cette enquête provient de la diversité des profils des personnes enquêtées et de la large couverture spatiale (plusieurs villes dans différentes régions de France).

4.3.2 Fouille de données et extraction de connaissances

Nous exposons dans un premier temps les différentes techniques de fouille de données. Ensuite, nous proposons une approche d'extraction de connaissances gravite autour les activités et les déplacements des individus à partir des données ENTD.

4.3.2.1 Les techniques de fouille de données

Dans le but d'associer les objectifs fixés pour l'analyse des données ENTD avec des méthodes et des algorithmes de fouille de données, nous exposons les techniques les plus utilisées par la communauté scientifique dans ce domaine. La fouille de données « Data Mining » consiste à appliquer des méthodes d'analyse des données à la recherche des informations pertinentes qui peuvent caractériser une grande quantité de données [Berry \[1997\]](#). Cette étape nécessite le plus souvent un contrôle humain pour fixer les objectifs et vérifier les résultats obtenus. Nous citons dans la suite les méthodes les plus utilisées en fouille de données :

- **L'algorithme de règles d'association** est une technique très utilisée pour l'exploration non-supervisée des données et qui consiste à étudier la fréquence implicite de certaines informations dans une base de données. Les règles d'association visent à chercher un motif fréquent dans les données qui se présente par l'apparition d'un groupe d'éléments. Cette technique permet d'obtenir un ensemble de règles de la forme $X \rightarrow Y$ tel que X est l'antécédent et Y est la conséquence. Plusieurs algorithmes d'extraction de règles ont été proposés dans la littérature tels que A priori [Agrawal \[1994\]](#), FP-growth [Han \[2000\]](#) et TreeProjection [Agrawal \[2001\]](#).
- **La recherche de motifs séquentiels** est une extension de l'algorithme de règles d'association qui intègre la contrainte temporelle. Le principe de la recherche de motifs séquentiels est le même que celui de l'algorithme de règles d'associations mais cette fois en prenant en compte l'ordre d'apparition des éléments dans une base de données. Les individus sont souvent des événements ou des actions sauvegardés suivant un ordre dans la base. Trois principaux algorithmes qui visent à chercher les motifs séquentiels dans les données peuvent être cités : SPADE [Zaki \[2001\]](#) et PrefixSpan [Han et al. \[2001\]](#).
- **La classification et la prédiction** étudient la corrélation entre les variables. Si les variables sont qualitatives, ce processus s'appelle classification sinon si les variables sont de type continu, cette

analyse est appelée prédiction. Le classement de données est un problème supervisé dans la mesure où les classes sont déjà prédéfinies et modélisées. De nombreuses techniques de classement et de prédiction existent telle que l'arbre de décision Kohavi [2002], k-plus proches voisins Altman [1992].

- **Le groupement (Clustering)**, contrairement au classement, est un problème non supervisé qui consiste à étudier le taux de similarité entre les individus sans prendre en compte la corrélation entre les variables. Le groupement ne nécessite pas de définir à l'avance les groupes. Le nombre de groupes doit être défini avant l'étape d'étude de similarité et d'attribution des individus à des groupes Berkhin [2006].

4.3.2.2 Fouille de données ENT D

L'extraction de connaissances à partir des données d'enquêtes des déplacements a pour objectif d'enrichir l'instanciation d'activité pour la génération d'itinéraires par des informations liées aux comportements des individus dans la ville. Le réseau d'activités généré a priori doit s'adapter le plus possible aux éléments contextuels qui caractérisent l'utilisateur. Les données ENT D sont stockées dans une large base de données qui contient les informations spatio-temporelles des déplacements effectués par des individus à profils divers. Le but de cette analyse est d'extraire les informations temporelles et fonctionnelles qui varient selon le profil de l'utilisateur. Certaines informations concernent la planification de l'activité alors que d'autres concernent plus l'exécution et les choix des routes et des modalités. Des techniques différentes peuvent être utilisées pour la fouille de données ENT D en deux catégories : l'extraction d'informations à partir de l'analyse de déplacements et l'extraction des séquences d'activités.

i **Extraction des informations sur les déplacements**

Chaque déplacement spécifié dans les données ENT D est détaillé par plusieurs informations sur les motifs, les modalités utilisées et le profil associé à l'utilisateur. À partir de ces informations, notre premier objectif est d'analyser séparément chaque déplacement. L'analyse des déplacements dans les données ENT D consiste à chercher la similarité entre les attributs. Plusieurs objectifs ont été fixés pour l'enrichissement de la génération d'itinéraires :

- L'analyse temporelle des activités est l'un des objectifs de la fouille de données. Le but de cette analyse est de détecter si un POI est fréquemment exploré dans un intervalle de temps spécifié ou non. Cette information favorise la planification de l'activité selon la fréquentation temporelle de chaque POI. Cette analyse est effectuée par l'analyse de similarité des attributs associés aux temps d'arrivée et de départ d'un POI et le type de POI.
- La durée de la visite d'un POI donné peut varier selon le profil de l'utilisateur. Pour chaque activité, les participants de l'enquête spécifient la durée qu'ils l'ont passé dans un POI donné. Cette problématique consiste à classer les déplacements selon le type de POIs visité et les différents paramètres

caractérisant le profil.

- L'algorithme de génération d'itinéraires calcule la distance de marche pour chaque itinéraire sélectionné qui ne doit pas dépasser une distance maximale. La distance de marche principale est associée principalement à la capacité physique de l'utilisateur. L'analyse de chaque déplacement est effectuée de manière à étudier la similarité des attributs qui font référence à la durée de la visite d'un POI, l'âge et la mobilité réduite.
- La disponibilité de données concernant les horaires du transport public est relative à plusieurs facteurs dans la ville. De plus, les horaires disponibles restent toujours approximatifs et peuvent varier pour de nombreuses raisons. Le temps d'attente pour l'accès au transport public est spécifié par les personnes enquêtées. La durée du temps d'attente peut varier selon le mode de transport public, le jour de la semaine et l'heure de déplacement.

L'extraction des informations associées aux différents objectifs consiste à étudier la similarité entre les différents déplacements ce qui nécessite l'application d'une méthode d'apprentissage non-supervisée. L'algorithme *k_moyennes* '*k_means*' est l'un des algorithmes de regroupement les plus utilisés dédié à partitionner les données en k clusters Lloyd [1982]. Le partitionnement des données consiste à regrouper les données en des clusters possédant des caractéristiques communes. Chaque groupe présente un ensemble d'éléments possédant des valeurs d'attributs proches. Le choix de cet algorithme pour la fouille de données de déplacements pour notre approche est justifié par sa complexité réduite. L'algorithme *k_means* permet le regroupement de N points de données $D = \{pt_1, pt_2, \dots, pt_N\}$ en K clusters en minimisant la distance entre chaque point et le centre de chaque cluster $c_i \in C$. La fonction de minimisation Φ est définie comme suit :

$$\phi = \sum_{pt \in D} \min_{c \in C} \|pt - c\|$$

Parmi les différentes distances métriques dans un espace de données, nous choisissons la distance euclidienne pour sa simplicité et sa fréquente application sur les attributs qualitatifs. La distance euclidienne favorise les voisins dont tous les attributs sont assez proches Xing [2003]. Dans la suite de ce chapitre, nous étudions la similarité des attributs caractérisant un déplacement, ce qui nous amène à sélectionner uniquement les attributs en question. Afin d'étudier, par exemple, la durée de la visite d'un POI selon un profil d'utilisateur, nous sélectionnons uniquement les attributs concernés tels que le type de POI, la durée et le profil de l'utilisateur. Les différentes étapes de classification des données sont présentées comme suit :

- a) Pour chaque objectif d'analyse, sélectionner les attributs concernés de chaque point de données
- b) Le choix du nombre des clusters k peut être fixé après plusieurs tests
- c) Appliquer l'algorithme *k_means* sur les points de données :
 - i. Entrée : k, D
 - ii. Choix des centres de cluster C_1, C_2, \dots, C_k

- iii. Pour chaque $pt \in D$, calculer la distance euclidienne entre le point et les centres $c \in C$. Le point est classifié au cluster qui a le centre le plus proche de lui.
- iv. Répéter b et c jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de points non classifiés.

ii Extraction de séquences de POI

Un autre objectif de l'analyse des données ENTD consiste à extraire les séquences de visite de POI. L'idée de cette phase est d'extraire les informations à propos la planification de l'activité. L'extraction de motifs séquentiels est une des questions traitée par la fouille de données consistant à identifier des patterns séquentiels pertinents dans les données. Han [2000] ont proposé une méthode efficace et évolutive pour la recherche de motifs séquentiels appelée *FP-growth*. La bonne performance de FP-growth a été soulignée par une étude comparative entre les différentes méthodes d'extraction de motifs séquentiels Gyrodi [2004]. L'algorithme FP-growth s'appuie sur une structure de données basée sur les arbres nommée Frequent Pattern tree (FP-tree). FP-tree offre une structure de données fortement condensée qui permet d'optimiser l'analyse de données. FP-tree est une structure d'arbre qui sert à compresser les éléments fréquemment présents dans les données. Les branches de l'arbre généré contiennent toutes les associations possibles des éléments. FP-tree est composé d'un nœud racine "null" associé à un ensemble de nœuds. Chaque nœud est caractérisé par le nom de l'élément et son nombre d'occurrences dans les données. Les branches exposent l'ordre d'apparition de chaque élément. L'algorithme FP-growth prend comme entrée le FP-tree pour rechercher les éléments fréquents dans l'arbre. L'analyse se limite uniquement sur la structure de FP-tree où les éléments sont triés ce qui explique une recherche rapide des règles d'association. Nous appliquons cet algorithme sur les données ENTD afin de trouver des patterns de POIs fréquents durant l'activité. En effet, les données représentent le POI précédent et le suivant pour chaque déplacement. Les données doivent être traitées pour chercher des patterns de POIs visités par un utilisateur pendant une activité en explorant le POI précédent et suivant de tous les déplacements effectués durant une activité donnée. FP-tree représente l'arbre de visite de POIs de tous les utilisateurs. En prenant l'exemple les activités suivantes $\{\{\text{Restaurant, café, cinéma}\}; \{\text{Restaurant, café, magasin}\}; \{\text{magasin, café}\}; \{\text{parc, restaurant}\}\}$, le FP-tree associé à ces activités est illustré dans la Figure 4.5. Chaque nœud est représenté par un POI et son nombre d'occurrence dans les données. Les branches de l'arbre d'occurrence représentent l'ordre de visite de POIs pour les activités. Les nœuds correspondent aux types de POIs visités avec le nombre d'occurrence. Des liens entre le même type de POIs sont créés afin d'identifier la fréquence totale d'un POI. Le FP-growth prend en considération l'arbre avec l'occurrence de chaque élément pour chercher des motifs fréquents. En prenant le même exemple que précédemment, la recherche de motifs fréquents contenant le POI de type café nécessite le parcours de FP-tree qui donne deux chemins : (Restaurant :2, café :2, cinéma :1) et (Magasin :1, café :1) tel que chaque élément est représenté par le type de POI et un entier spécifiant le nombre d'occurrence. Pour un support minimum de 50%, le nombre d'occurrences minimum est 2 pour notre exemple de 4 déplacements. Seul l'élément Restaurant possède une fréquence supérieure ou égale à l'occurrence minimum. En conséquence, le motif

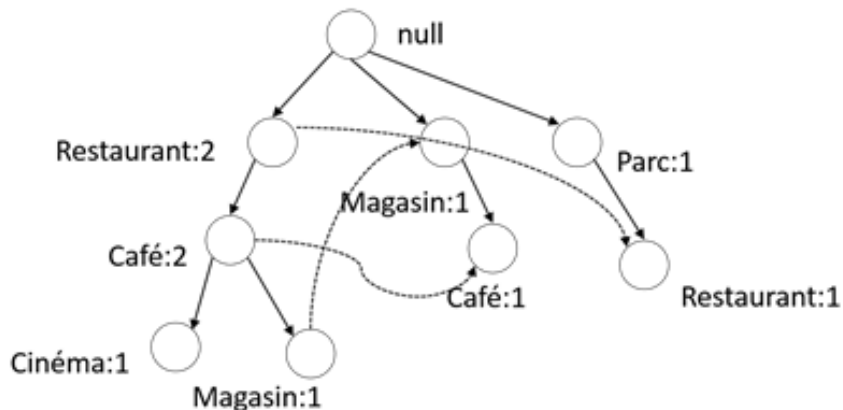


FIGURE 4.5 : Exemple d'un FP-tree sur les POI

fréquent contenant le POI café est (Restaurant, Restaurant Café).

4.3.3 Représentation des connaissances

Les connaissances acquises par l'analyse des données ENTD demandent une représentation par un système de gestion de connaissances. Les systèmes à base de règles ont été conçus dans les années 60 pour le diagnostic médical Van Dusen [1960]. Ils sont toujours utilisés par les industries et les chercheurs pour résoudre les problématiques à complexité réduite. Nous optons dans notre approche pour l'intégration des connaissances autour des déplacements et des activités humaines dans un système à base de règles. Ce choix est fondé sur la simplicité de l'implémentation de ces systèmes ainsi que sur leur robustesse dans le cas de représentation des connaissances déterministes. En effet, ce système doit être capable de représenter les connaissances sous forme des règles interprétées par un moteur d'inférence (Voir Figure 4.6). Les modules du système de gestion de connaissances sont :

- La base de connaissances qui contient les connaissances concernant les informations extraites par la fouille de données ENTD.
- Le moteur d'inférence qui applique une stratégie de résolution qui consiste à chercher des résultats dans la base de connaissances associés aux éléments contextuels de l'utilisateur et de créer de nouvelles règles.

i Base de connaissances

Les informations extraites sur les déplacements et la planification des activités réalisées par des utilisateurs de différents profils nécessitent une représentation formelle qui va faciliter par la suite l'implémentation du système développé. Les informations extraites par la fouille de données ENTD concernent les habitudes et les comportements fréquents des individus dans l'espace et le temps. Chaque information peut être exprimée par une règle sous forme « Si ..condition... Alors ...conclusion.. » La prémiss

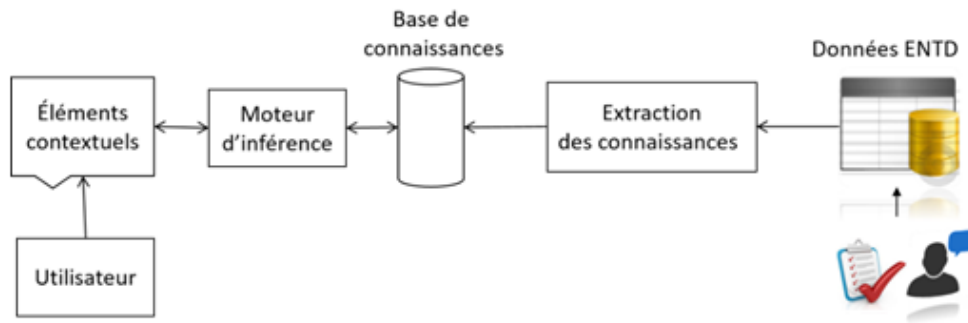


FIGURE 4.6 : Architecture de système de gestion de connaissances

est la partie condition responsable du déclenchement de la règle. La partie, qui suit « Alors », est appelée conclusion. Elle correspond à une action donnée. En prenant l'exemple d'une information extraite à propos de la durée de visite d'un POI par un profil qui dévoile que les individus ayant un âge entre 20 ans et 40 ans restent entre 50 mn et 60 mn dans un restaurant. Cette information est représentée par une règle Si $\text{âge} > 20$ et $\text{âge} < 40$ Alors durée visite café est entre 50mn et 1h. Plusieurs types de représentations des connaissances sont cités dans la littérature tels que la représentation logique Sowa [2000], la représentation procédurale² Stadler [1989] et la représentation sémantique (e.g. graphe conceptuel) Chein [2008]. Le choix de la représentation s'appuie sur le type des connaissances acquises. Nous choisissons une représentation logique pour ce type des connaissances puisque c'est la représentation la plus proche de la façon naturelle et la plus adaptable à la structure des règles. La logique des prédicats du premier ordre Mendelson [1964] permet de décrire les règles par des clauses spécifiant des prédicats. L'objectif principal de ce formalisme est de faciliter l'implémentation des règles étant donné les outils de programmations existants qui traduisent la logique des prédicats du premier ordre Gelfond [2002]. La base de connaissances contient toutes les règles associées aux informations extraites à partir de regroupement et de recherche de motifs séquentiels dans les données ENTD.

ii Raisonnement par moteur d'inférence

Le moteur d'inférence est le module qui assure le raisonnement dans un système de gestion de connaissances. En effet, le moteur d'inférence relie les paramètres introduits par l'utilisateur à la base de règles. Il est basé sur un algorithme de raisonnements déductifs qui permet de décider le déclenchement des actions dans la base de règles à partir des paramètres définissant la situation de l'utilisateur. Deux types de fonctionnement d'un moteur d'inférence sont possibles : en chaînage arrière et en chaînage avant Landers [1992]. Le raisonnement en chaînage arrière consiste à chercher hiérarchiquement les règles générant des conclusions qui correspondent aux buts fixés. Le chaînage avant est le raisonnement appuyé sur les données puisqu'il s'agit de trouver les prémisses des règles qui correspondent aux paramètres entrés par l'utilisateur. Le moteur d'inférence dans le système de gestion de connaissances que nous proposons doit

2. La représentation procédurale permet de représenter les connaissances par un ensemble d'instructions

trouver à partir des paramètres contextuels de l'utilisateur des règles liées à cette situation. Il doit donc fonctionner en chaînage avant pour la recherche des données. Les éléments contextuels de l'utilisateur sont des faits associés au profil, à l'activité et aux différentes modalités. Le moteur d'inférence permet de déduire les règles possibles par l'exploration des prémisses dans la base de connaissances. La conclusion est une valeur d'un attribut donné tel que la durée de visite de POI, les pénalités routières ou la distance de marche.

4.4 Conclusion

Ce chapitre propose une approche de génération d'itinéraires contextuels multimodaux. La mobilité multimodale et les multi étapes de l'activité sont pris en compte par l'algorithme de génération d'itinéraires basé sur l'algorithme heuristique A*. L'algorithme est appliqué sur la structure de super-réseau multimodal afin de considérer le transfert intermodal de transport. La topologie de super-réseau basée sur des approches duales et primaires permet de garantir l'accessibilité aux POIs de l'espace. Les itinéraires générés représentent des alternatives possibles d'une activité étant donné que chaque alternative représente le meilleur itinéraire reliant une combinaison probable de types de POIs demandés par l'utilisateur. Certains paramètres d'entrée de l'algorithme de génération sont contextuels et dépendent du profil et du cadre spatio-temporel de l'utilisateur. Pour cela un système de gestion de connaissances a été présenté dans le but d'enrichir la définition de l'activité et les paramètres contextuels des utilisateurs. L'extraction de connaissances a été effectuée à partir des données de l'enquête ENTND en employant un système à base de règles. La méthode proposée pour la génération d'itinéraires thématiques et contextuels est générique et applicable sur les réseaux multimodaux des villes.

Chapitre 5

Implémentation et Expérimentation

Le processus de génération d'itinéraires doit prendre en compte la structure multimodale de transport et les POIs disponibles comme spécifié dans le chapitre 3 pour la représentation et la réalisation des activités dans l'espace. Afin de dériver les itinéraires les plus réels, nous avons procédé à un enrichissement du modèle par un système de gestion de connaissances concernant l'usage et le déplacement dans l'espace présenté dans la section 4.3. Nous introduisons dans ce chapitre un outil expérimental conçu dans le cadre de nos travaux comme support de l'approche globale proposée pour la génération contextuelle d'itinéraires d'activités. Cet outil est dédié aux experts œuvrant dans les domaines de l'urbanisme et du transport en leur permettant d'étudier la configuration spatiale de la ville dans le cadre d'une activité. Les réseaux ainsi générés devront être adaptés à un profil donné spécifiant les caractéristiques et les préférences (âge, mobilité réduite etc.) de l'utilisateur qui permet à la suite d'analyser l'espace de différents points de vue. Quatre villes françaises (Paris, Lille, Lyon et Nantes) ont été choisies comme des cas d'étude pour appliquer l'approche de génération de différents réseaux d'activités contextuels. Ce choix est motivé par le développement économique et urbain de ces villes tout en assurant une diversité liée à la taille et le volume de la population. Notre méthode est validée par une comparaison des réseaux générés avec des données géolocalisées contenant les itinéraires d'activité extraits à partir des réseaux sociaux. Une analyse spatiale est appliquée sur les réseaux d'activités de différentes villes dans le but d'étudier l'aspect fonctionnel de l'espace urbain. Des opérateurs d'analyse structurelle sont par la suite proposés afin d'effectuer une comparaison entre les réseaux générés pour les villes étudiées. Nous commençons le chapitre par une section qui présente les différents modules sur lesquels repose l'architecture du système de génération d'itinéraires. Dans la section 5.2, nous procédons à des expérimentations sur les villes d'étude enrichies par les résultats obtenus via l'analyse des données ENTD. La section 5.3 est consacrée à la représentation des résultats de l'analyse spatiale des différents réseaux thématiques de la ville.

5.1 Outil de génération d'itinéraires des activités

Un outil de génération d'itinéraires des activités est mis en place pour étudier l'usage contextuel de l'espace. Une architecture globale est présentée dans cette section pour montrer les différents modules. Trois principaux modules sont intégrés dans le système de génération d'itinéraires : (1) un module de construction de réseaux de transport, (2) un module d'extraction et de représentation de connaissances et (3) un module de génération d'itinéraires. La Figure 5.1 illustre les différents modules.

5.1.1 Module de construction de réseaux

Ce module est une implémentation de la méthode exposée dans le chapitre 3 et qui consiste à représenter le transport multimodal. Le modèle à base de graphe représenté nécessite des données urbaines réelles acquises

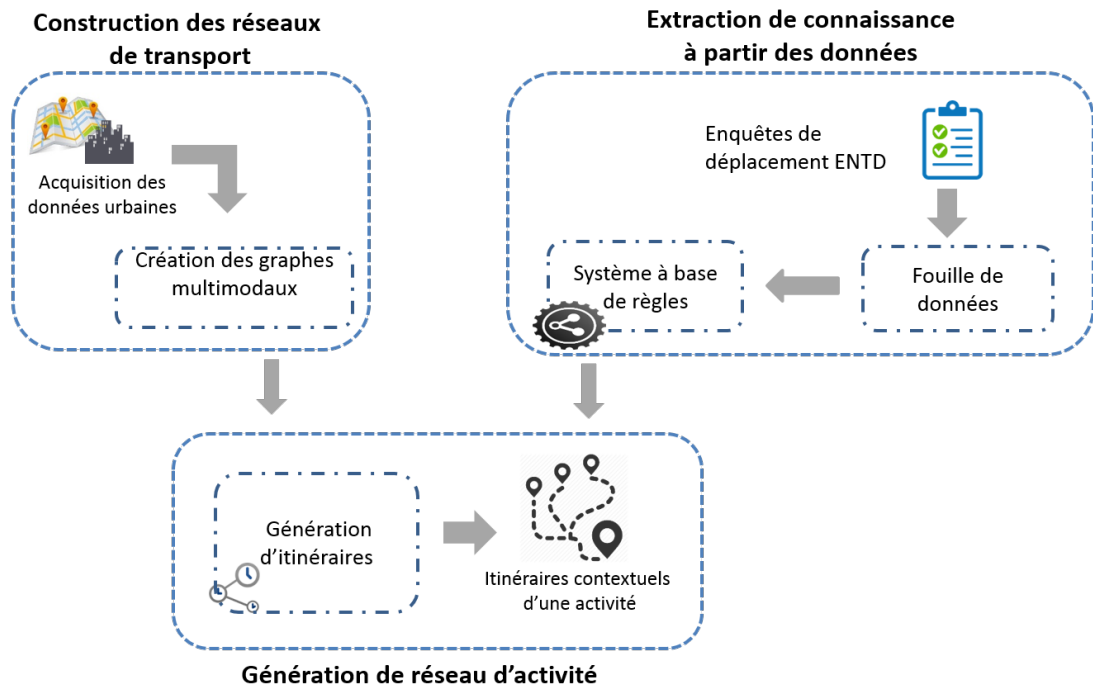


FIGURE 5.1 : Les modules de système de génération d'itinéraires

à partir des plate-formes dédiées. Deux étapes sont nécessaires pour la mise en œuvre de ce module. La première étape vise à acquérir des données de transport urbain et des POI. À partir de ces données, le module construit le graphe multimodal de la ville en se basant sur le formalisme de super-réseau proposé.

i Acquisition des données urbaines

Afin d'obtenir les données urbaines des villes, nous avons opté pour l'utilisation de données participatives. OpenStreetMap (OSM) [Coast et al. \[2007\]](#) est un projet de collecte participatif de données urbaines. Les données OSM offrent une base de données comprenant la structure urbaine, les POIs disponibles et les différents réseaux de transport. Les données sont mises à disposition gratuitement et librement au format XML sous la licence 'Open Data Commons Open Database License'. L'évaluation des données OSM est une question étudiée dans plusieurs travaux. Elle est basée principalement sur une comparaison entre les données OpenStreetMap et d'autres données disponibles à travers d'autres sources d'information officielles comme l'IGN en France [Haklay \[2010\]](#). Le format XML des données OSM exige une spécification stricte de l'information de telle sorte que l'inconsistance dans les données soit facilement détectable [Abadie \[2009\]](#). Les données OSM sont mises en disposition sur le web ¹ sous le format des fichiers .osm qui sont catégorisés selon la zone géographique. L'amélioration de la qualité des données OSM est garantie par l'équilibre entre la contribution libre et la rigueur de spécification [Girres and Touya \[2010\]](#). Cependant, certaines informations dynamiques risquent de ne pas être rapidement

1. <https://www.geofabrik.de/data/download.html>

mises à jour dans les données OpenStreetMap telle que les POIs disponibles dans la ville. D'autres sources de données plus synchronisées peuvent compléter les données OSM par des informations supplémentaires sur les POI. En effet, des plateformes spécialisées dans la proposition et la comparaison des POIs de la ville offrent la possibilité d'enrichir les données OSM par des informations liées aux POIs telles que le service offert, le prix, les avis etc. Parmi ces plateformes, nous pouvons utiliser Factual² et Google Places³ qui permettent, à partir d'API⁴ libres, de récupérer les POIs d'une zone limitée dans l'espace. Les données récupérées de chaque API présentent les POIs par des attributs qui les caractérisent comme le nom, la position, le type, les horaires de disponibilité, etc.

- ii **Construction d'un graphe de transport multimodal** Les données OpenStreetMap sont utilisées pour la création des graphes associés aux réseaux de transport des différentes villes étudiées. Plusieurs outils libres existent déjà pour la modélisation des graphes à partir d'une base de données OSM. Le but de cette analyse est d'identifier les différents réseaux monomodaux dans la ville ainsi que les POIs disponibles. La création de chaque réseau de transport nécessite l'extraction des rues « ways » et des nœuds « nodes ». Cette extraction est basée sur les tags définis pour chaque élément de la base OSM. Les rues sont classifiées selon la modalité et la catégorie (nationale, départementale, etc.). Le tableau 5.1 montre les différents tags d'OpenStreetMap associés à l'usage des piétons et des véhicules. Le service offert par chaque point est représenté par le type du point. Les différentes lignes de transport public sont spécifiées dans des « relations » qui indiquent les rues et les arrêts que chaque ligne contient. Nous avons utilisé OSMOSIS⁵ comme outil d'extraction et d'analyse des fichiers OSM.

Tableau 5.1 : Classification de rues selon le type

| Véhicule | Piéton |
|---|--|
| motorway, motorway-link, trunk, tunk-link | Footway, Pedestrian, path, cycleway, access-ramp, bridleway, steps |
| Residentiel, unclassified, tertiary, tertiary-link, living-street platform, road, primary-link, primary, secondary, secondary-link, track | |

Nous avons développé un module de construction des graphes à partir des données OSM associées à chaque réseau de transport. Ce module traite les données structurelles pour les mettre sous forme de graphe conforme à l'approche choisie pour chaque mode de transport (primaire ou dual). Il consiste à analyser le fichier pour détecter les nœuds et les arcs associés à chaque réseau et de les représenter par la suite sous forme nœud source, nœud destination. L'annexe A illustre les requêtes exécutées sur les

2. <https://www.factual.com/products/global>

3. <https://developers.google.com/places/>

4. Application Programming Interface : un ensemble normalisé de méthodes et de fonctions permettant d'un logiciel d'offrir des services à d'autres logiciels.

5. <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Osmosis>

données pour la création de différents réseaux de transport.

5.1.2 Module d'extraction et de gestion des connaissances

Le deuxième module implémenté dans l'outil développé est le module d'extraction des connaissances à partir des données ENT-D. En effet, les données de cette enquête sont mises à disposition pour l'analyse des comportements des individus dans l'espace. Les données sont structurées dans des fichiers où chaque déplacement possède des caractéristiques présentées par des variables qualitatives expliquées dans un dictionnaire de l'enquête. Plusieurs objectifs fixés dans la section 4.3.2.2 concernent particulièrement la planification des activités dans le temps. Nous avons utilisé des outils de fouille des données pour l'extraction de connaissances tel que WEKA (Waikato environment for knowledge analysis)⁶.

5.1.3 Module de génération d'itinéraires

Ce module implémente l'algorithme de génération d'itinéraires proposé dans la section 4.2.2. Ce module est en interaction avec les autres modules. Il récupère les paramètres contextuels associés à l'utilisateur venant de système de gestion de règles. Le module se connecte à la base de données pour parcourir le super-réseau et générer par la suite les itinéraires adaptés à l'utilisateur. L'aspect temporel a été intégré par la librairie standard de Java, Joda-Time⁷, qui permet de représenter des concepts temporels (heure, date) et de représenter la chronologie des événements. Une plateforme a été développée pour intégrer les différents modules conçus. L'outil offre la possibilité d'introduire un profil et des préférences par le biais d'un formulaire permettant de régler les différents paramètres associés à un profil tels que l'âge, la capacité physique et l'activité définie par une liste de POI. L'annexe B représente les codes des méthodes principales de l'outil.

Les informations associées à l'utilisateur sont transmises aux différents modules du système. Le diagramme de séquence proposé dans la Figure 5.2 explique le flux informationnel entre les différents modules. Les paramètres de l'utilisateur sont envoyés au module d'inférence qui va chercher les prémisses dans la base des connaissances qui correspondent aux éléments contextuels de l'utilisateur. Une fois les règles construites, les résultats sont retournés avec les paramètres introduits au système de génération d'itinéraires. Le module de génération accède à la base de données où sont stockés le super-réseau et les POIs de la ville afin de générer tous les itinéraires optimaux et contextuels de l'activité étudiée. Les itinéraires d'activité sont ainsi générés.

6. <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>

7. <http://www.joda.org/joda-time/>

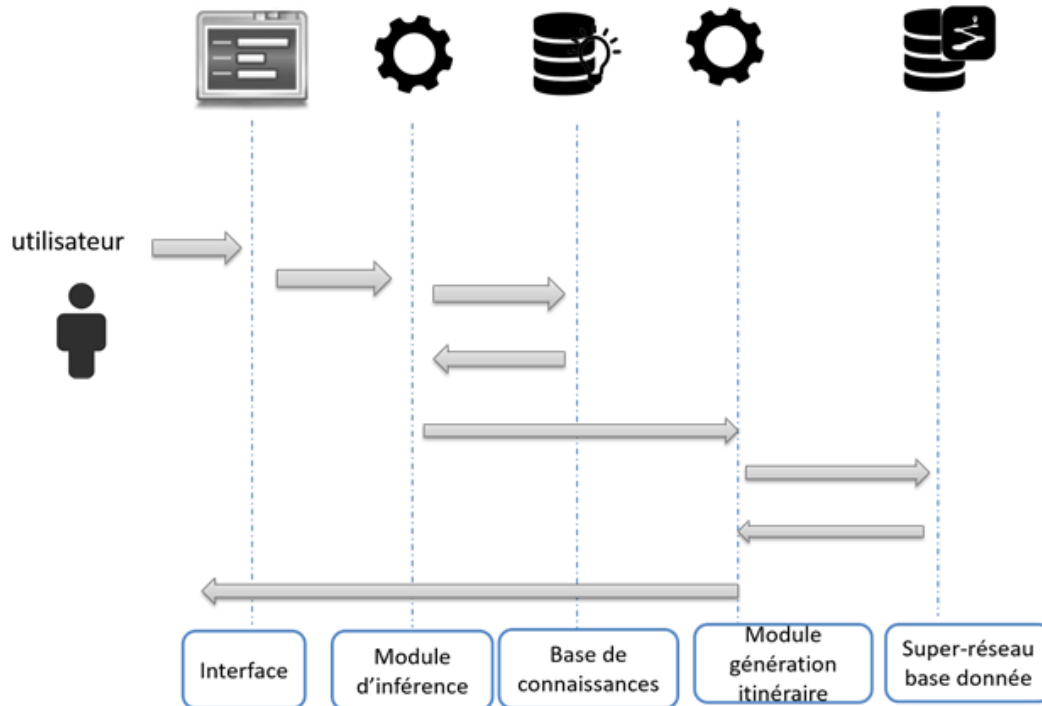


FIGURE 5.2 : Diagramme de séquence pour le système de génération d'itinéraires

5.2 Expérimentation

L'approche proposée dans le cadre de nos travaux demande d'être expérimentée et validée sur des données réelles de différentes villes. Dans un premier temps, nous exposons les résultats d'extraction de connaissances à partir des données ENTD pour la planification des activités. Dans un deuxième temps nous considérons des villes comme des cas d'étude pour appliquer la méthode de génération d'itinéraires.

5.2.1 Définition de l'activité

La planification de l'activité est un processus qui consiste à proposer des POIs correspondant à l'activité de l'utilisateur ainsi que son cadre spatio-temporel. Nous nous basons sur les données ENTD représentées dans la section 4.3.1 pour acquérir des informations sur les comportements des individus. Les différents objectifs de cette analyse ont été spécifiés dans la section 4.3.2.2 assurée par la recherche des patterns fréquents dans les données. Pour chaque objectif, des attributs spécifiques sont exploités pour l'analyse. Le premier objectif de l'analyse des données consiste à étudier le programme d'une activité dans le temps. Ce programme est construit par une suite de visite des POIs durant un temps donné. Les attributs sélectionnés pour cette étude sont le type de POI, le jour et l'heure de visite. L'idée est de vérifier si la visite d'un

POI donné possède des caractéristiques temporelles particulières liées au jour de la semaine ou à l'heure de la journée. Cela est assuré par l'étude de la corrélation entre les attributs sélectionnés par l'algorithme de k-moyennes pour répartir les données en groupes. Dans le but de montrer les résultats obtenus, nous prenons certains types de POIs en étudiant les temps de visite des restaurants et des magasins selon les jours de la semaine. Le regroupement des données montre une fréquence de visite des magasins dans plusieurs moments de la journée particulièrement, le matin pour le dimanche et les après-midi pour les jours restant de la semaine avec une forte activité le samedi comme c'est illustré dans la Figure 5.3. Les restaurants

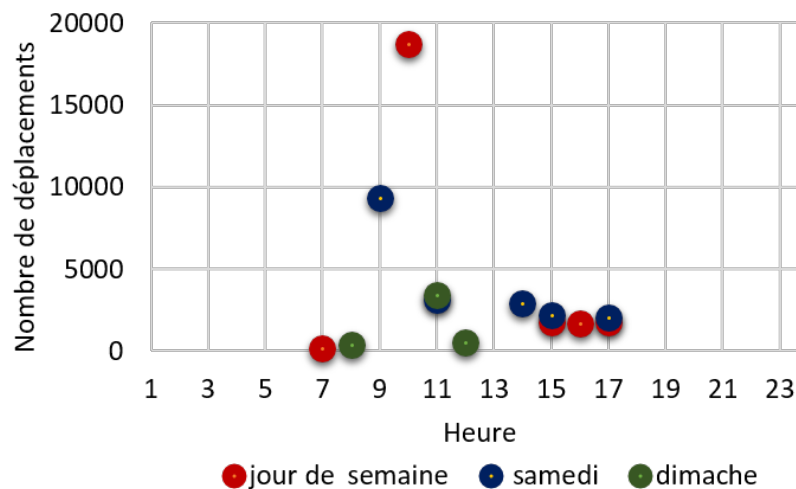


FIGURE 5.3 : Le temps de visite des magasins

sont visités notamment entre 11h et 13h pour le déjeuner et le soir vers 21h pour le dîner (Voir Figure 5.4). Un autre objectif de l'analyse des données ENTD est d'étudier les durées de visite de POI selon le profil de l'utilisateur. Les paramètres intervenant dans l'étude de temps passé par un POI sont l'âge et la capacité physique. Les informations extraites pour les restaurants comme exemple sont présentées dans la Figure 5.5. Pour chaque déplacement représenté dans les données ENTD, le temps de marche est précisé. Ces informations permettent d'extraire des informations sur la capacité de marche des utilisateurs selon leurs profils. Nous prenons en compte principalement les paramètres qui reflètent la capacité physique de l'utilisateur tels que l'âge et la présence d'un handicap pour l'étude de la durée de marche. La Figure 5.6 montre les résultats de regroupement des données pour évaluer la durée de marche par profil. La durée de marche des profils d'âge entre 18 et 60 ans est entre 70 et 80 minutes. Cependant, les utilisateurs avec un âge moins de 18 ans ou plus de 60 ans marchent pour une durée entre 5 et 20 minutes. Grâce à l'analyse des données ENTD, il est également possible d'étudier le temps d'attente dans le cas d'utilisation de transport public. Le temps d'attente peut varier selon le jour de la semaine mais aussi en fonction de l'heure de la journée. La Figure 5.7 montre les différents centres des groupes de données spécifiant les temps d'attente en transport public par rapport à l'heure et le jour de la semaine. Le temps d'attente de transport public dans une

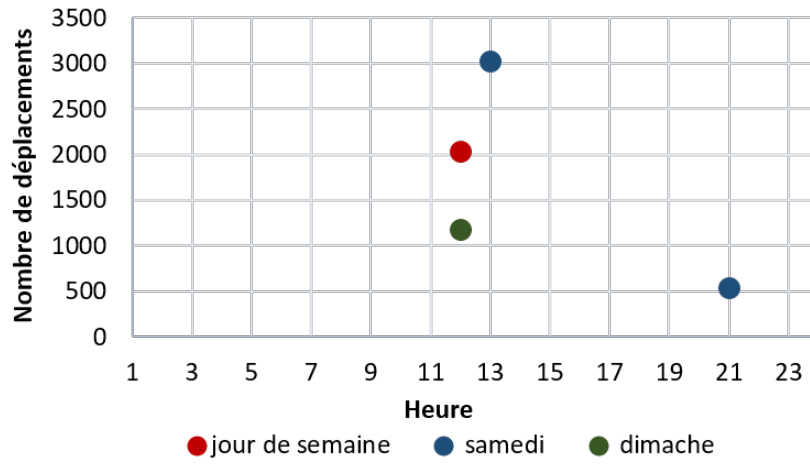


FIGURE 5.4 : Le temps de visite des restaurants

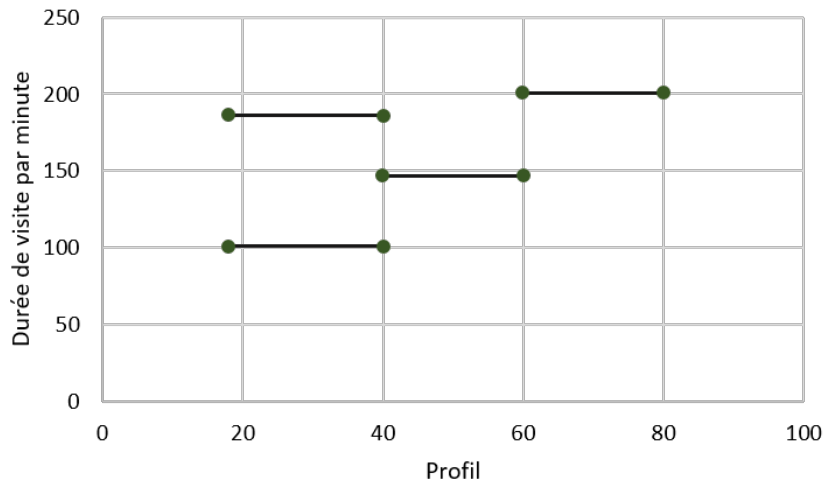


FIGURE 5.5 : Les centres des clusters de temps de visite des restaurants

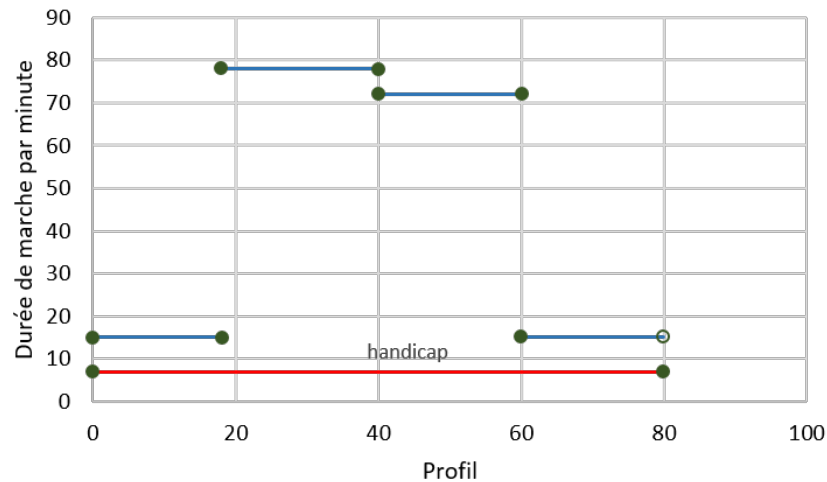


FIGURE 5.6 : Les groupes des données pour la durée de marche par profil

journée de la semaine entre 7h et 20h est entre 4 à 8 minutes. Le temps d'attente pour samedi est le même pour un jour de la semaine avec un intervalle légèrement décalé entre 8h et 22h. Cependant, les résultats obtenus pour dimanche montre une utilisation réduite de transport public avec des temps d'attente plus élevés. Le dernier objectif de l'analyse des données concerne la planification des POI. Pour cela, une analyse des

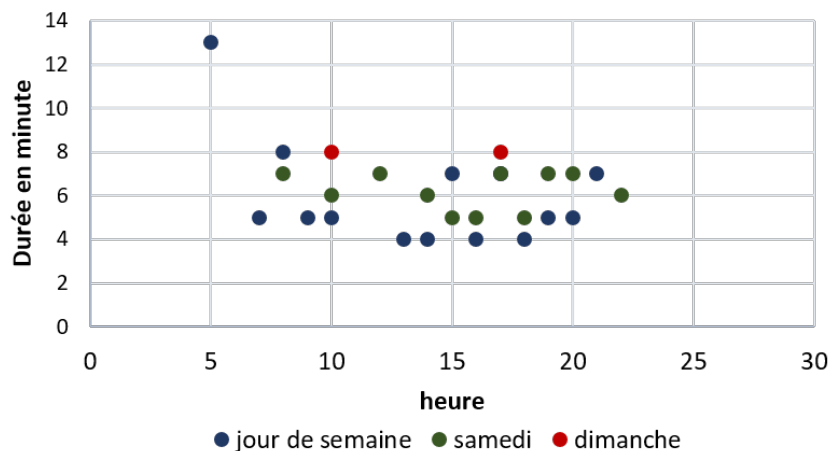


FIGURE 5.7 : Les centres de clusters des données de temps d'attente

patterns de déplacements a été effectuée à l'aide de l'algorithme de FP-growth introduit dans la section 4.3.2.2 et qui consiste à chercher des motifs séquentiels fréquents dans les données. L'application de cet algorithme a comme but de chercher des patterns de POIs fréquents durant la réalisation d'une l'activité dans l'ENTD. En effet, les données de l'enquête indiquent les POIs qui séparent chaque déplacement. Les données doivent être traitées pour chercher des patterns des POIs visités par un utilisateur pendant une activité en explorant

le POI précédent et suivant de tous les déplacements effectués durant une activité donnée. Les résultats de l'analyse appliquée sur les données ENTD sont présentés dans la Figure 5.8. Les différentes connaissances extraites à partir des données ENTD seront utilisées pour enrichir le processus de planification des activités par la proposition de POIs adaptés aux profils des utilisateurs et au cadre spatio-temporel. Ces informations

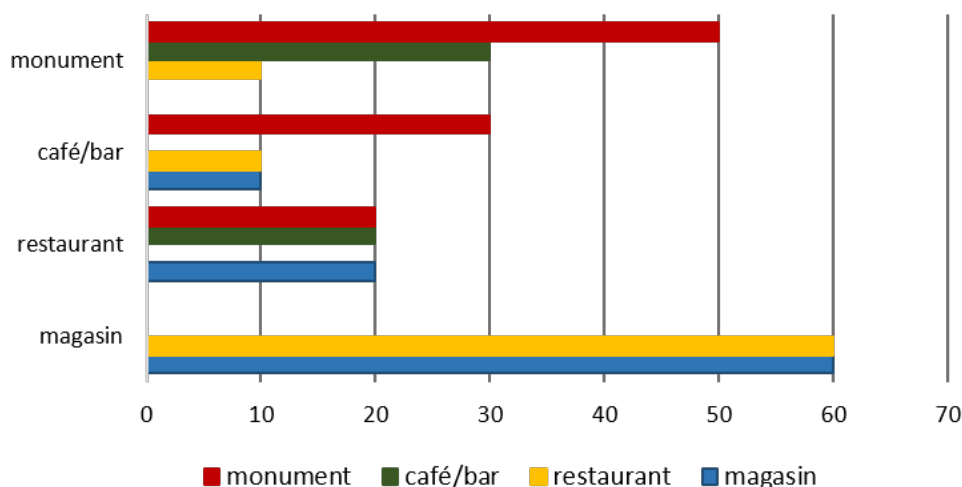


FIGURE 5.8 : Les motifs séquentiels de visites de POI

sont représentées dans un système à base de règles. Plusieurs solutions logicielles sont disponibles pour la gestion de règles. Le système doit être compatible avec les différents modules implémentés en Java. Drools⁸ et Jess⁹ sont deux systèmes de gestion de règles compatibles avec la plateforme Java. Nous avons opté pour l'utilisation de Drools développé sous la licence gratuite Apache contrairement à Jess qui est sous une Licence payante. Drools a été développé par la société américaine Red Hat en 2006. Il permet de gérer les règles dans le but de retourner les informations associées au contexte de l'utilisateur introduit par les faits. Drools est un système facile à utiliser qui peut être intégré à l'IDE Java Eclipse. Une règle exemple sur la disponibilité temporelle de POI est définie sur Drools comme suit :

rule« Temp de disponibilité de POI »

when

poi : POI (type==« restaurant »)

then poi.disponible = «[12,14],[19,23]» **end**

L'annexe C introduit d'autres règles implémentées dans le système.

8. www.drools.org

9. <http://www.jessrules.com/>

5.2.2 Génération d'itinéraires

Nous avons choisi quatre villes pour l'expérimentation de l'approche qui sont Paris, Lyon, Nantes et Lille. Le choix de ces villes est dû principalement à trois raisons : (1) la complexité du système de transport (différents moyens de transports publics) (2) les nombreux POIs (3) et la bonne qualité des données urbaines disponibles qui vont nous aider dans l'expérimentation et la validation. Les quatre villes sont caractérisées par une taille différente, Paris et Lyon sont considérées comme des grandes villes alors que Lille et Nantes sont de taille moyenne. Ce choix a pour objectif d'appliquer la méthode de génération d'itinéraires sur différents types de villes. L'acquisition des données est assurée par deux plateformes : OpenStreetMap pour les données de transport et Factual pour les POI. Ces données sont traitées afin de construire le super-réseau de transport multimodal. Les POIs et le super-réseau sont stockés dans une base de données relationnelle PostgreSQL/Postgis¹⁰. Afin d'étudier l'usage de la ville, nous prenons les activités du tourisme et du shopping pour caractériser la ville avec deux points de vue différents. L'étude des réseaux d'activités est effectuée par profil dans le but de grouper les réseaux générés par plusieurs utilisateurs possédant les mêmes caractéristiques. En effet, plusieurs points O/D sont utilisés pour un profil donné afin d'explorer les itinéraires d'activité possibles dans différents contextes spatiaux ce qui va nous permettre de voir plus largement l'usage de chaque ville. Plusieurs profils peuvent être étudiés. Une liste de POIs pour chaque activité est spécifiée ainsi qu'un cadre temporel donné (nuit, jour). La Figure 5.8 illustre les planifications d'activités extraites à partir des données ENTND. D'après ces résultats, la réalisation d'une activité de shopping est fréquemment réalisée par la visite des magasins ainsi que des points de restauration. La visite des monuments et des musées dans le cadre d'une activité de tourisme est accompagnée par des pauses-café. La planification de chaque activité est spécifiée par des scénarios associés aux activités de shopping et de tourisme extraits à partir des données ENTND. Nous nous limitons pour l'expérimentation au scénario le plus fréquent. Deux types de mobilité sont considérés : la mobilité réduite et la mobilité non réduite. Pour chaque type, deux moyens de transport sont étudiés : le transport public et le transport individuel. Les points Origine/Destination varient selon la modalité de l'utilisateur. Il s'agit de grandes stations de trains pour les utilisateurs de transport public et des grands parkings pour les utilisateurs véhiculés. La durée de chaque activité ne doit pas dépasser la durée de quatre heures estimée suffisante pour couvrir les déplacements et les visites des POIs selon les retours d'expérience des données ENTND.

i La ville de Paris

Paris est caractérisée par une forte population comptant 2 229 621 habitants d'après le dernier recensement de 2013 et par une superficie de 105,40 km² (hors agglomération et couronne périurbaine). Les réseaux d'activité de tourisme générés pour chaque profil dans la ville de Paris sont présentés dans la Figure 5.9. L'activité touristique est représentée par quatre réseaux associés à des profils différents. Les points d'origine sont les grandes stations de train qui sont utilisées fréquemment par les touristes venant des

10. <http://postgis.net/>

autres régions françaises ou de l'étranger à travers des liaisons directes en transport public entre les aéroports situés dans les banlieues et le centre de Paris. Les réseaux générés pour les profils utilisant le transport public montrent une bonne couverture de réseau de la ville ainsi qu'une forte accessibilité aux POIs touristiques. Cette accessibilité est plus forte pour les profils à mobilité non réduite que celle à mobilité réduite puisque la distance de marche entre les stations de métro et les POIs ne dépasse pas les 100 mètres. Cependant, les réseaux d'activité de tourisme pour les piétons visent à représenter les profils des touristes déposant leur véhicule dans certains parkings à proximité des POIs touristiques. La mobilité réduite de certains utilisateurs peut limiter l'accessibilité à certains points d'intérêt. La déconnexion des réseaux piétons est expliquée par la taille de la ville mais aussi par la localisation parfois éloignée des POIs touristiques à des parkings. L'étude de l'activité de shopping est représentée dans la Figure 5.10 par les quatre réseaux associés aux profils définis précédemment. De même, les points OD dépendent de la modalité des utilisateurs de telle sorte que les utilisateurs de transport public commencent l'activité à partir des grandes stations de trains et les piétons à partir des grands parkings à proximité des POIs requis pour l'activité. Les réseaux de transport public montrent une forte couverture de la ville ainsi qu'une connectivité topologique. Une légère différence structurelle entre les réseaux d'un profil à mobilité réduite et le réseau d'un profil non réduite par l'utilisation de transport public permet de déduire une forte accessibilité aux magasins à partir des stations de transport public ce qui ne demande pas un effort physique important. Les zones commerciales prévoient des parkings privés ou publics pour les clients ce qui traduit une forte accessibilité aux magasins à partir des parkings. De plus, des agglomérations commerciales et de restauration sont mises en place dans le but de faciliter l'activité de shopping. Les réseaux générés pour les piétons de différentes mobilités montrent bien cette stratégie puisque à partir d'un point d'origine plusieurs itinéraires et POIs sont possibles à visiter.

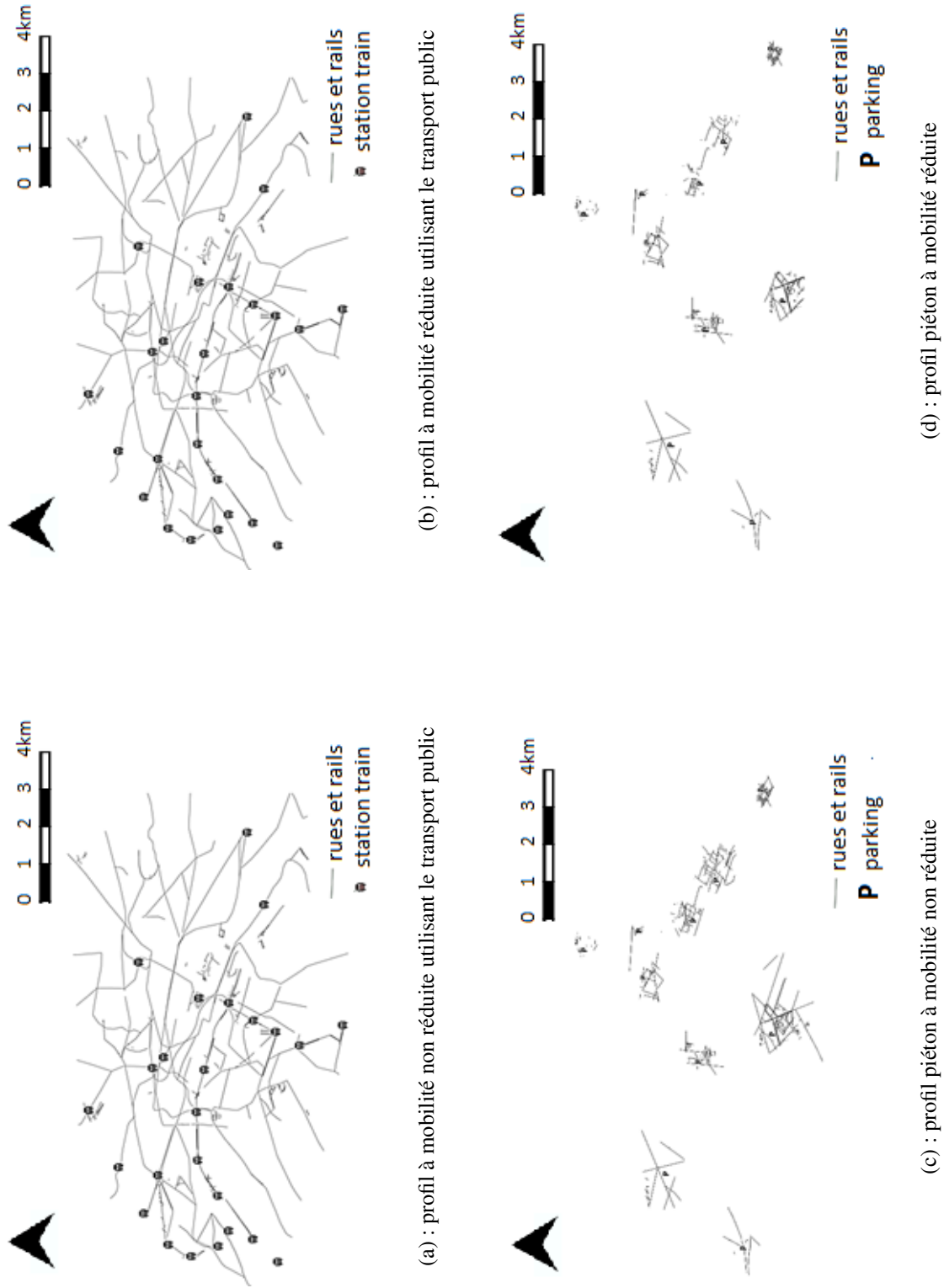
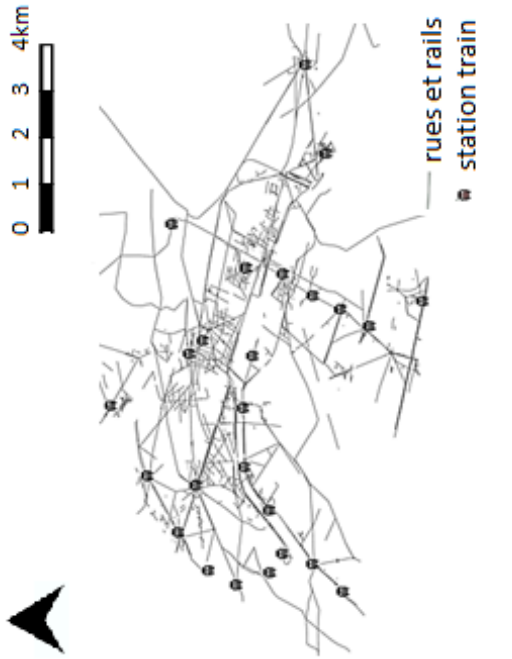


FIGURE 5.9 : Les réseaux d'activité de tourisme de la ville de Paris pour les quatre profils

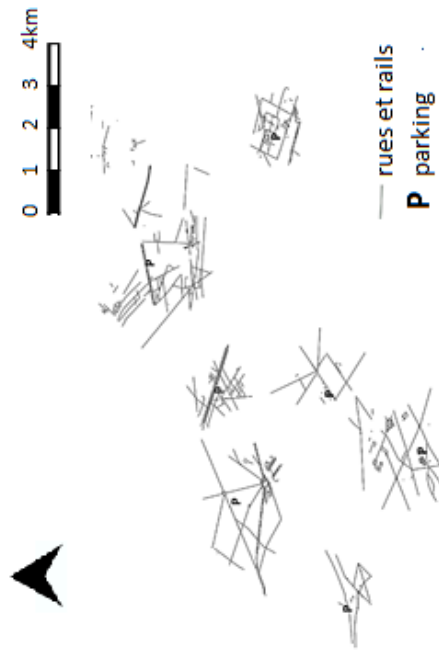
ii La ville de Lyon

Lyon est une ville habitée par 500 715 habitants d'après le recensement de 2013 dans une superficie de 47,87 km². Les réseaux de tourisme générés pour cette ville sont représentés dans la Figure 5.11. Les réseaux associés aux utilisateurs de transport public montrent une très bonne couverture de transport ferroviaire pour l'accès aux différents POIs touristiques dans la ville de Lyon. Le réseau généré pour un utilisateur à mobilité réduite est quasiment le même qu'un utilisateur à mobilité non réduite. L'accès aux POIs touristiques pour les piétons à partir des grands parkings de la ville est représenté dans la Figure 5.11. Les réseaux d'activités générés montrent la disponibilité de nombreux parkings permettant l'accès aux POIs touristiques. Les réseaux sont connectés pour les deux types de mobilité.

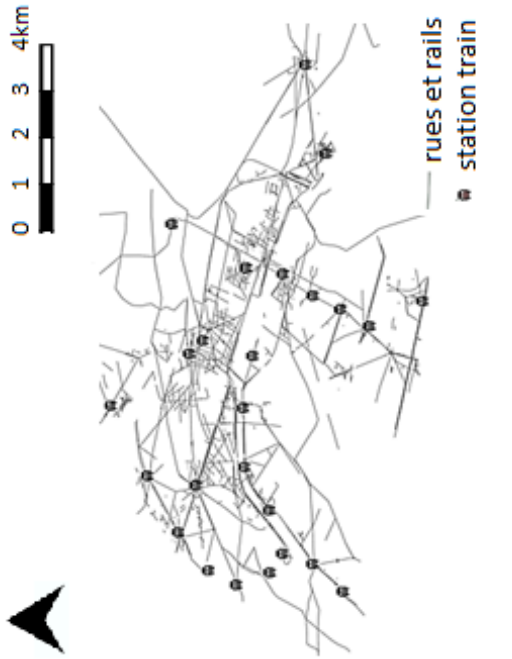
L'étude de l'activité de shopping prenant les grandes stations de métro comme les points OD est représentée dans la Figure 5.12. Nous remarquons la disponibilité des POIs de shopping sur des zones réparties dans la ville. Le réseau de shopping pour les utilisateurs de transport public couvre une grande partie de réseau de transport public avec une distance de marche estimée faible puisque le réseau à mobilité réduite est le même de celui à mobilité non réduite. Cette similarité révèle une très forte accessibilité aux magasins à partir des stations de transport public. Les deux réseaux de shopping générés par les utilisateurs de transport public sont complètement connectés. Pour le profil piéton, le réseau généré à mobilité non réduite et celui pour un profil à mobilité réduite sont légèrement différents. Cette différence peut être expliquée par la nécessité d'une distance de marche légèrement importante pour accéder aux magasins à partir des parkings.



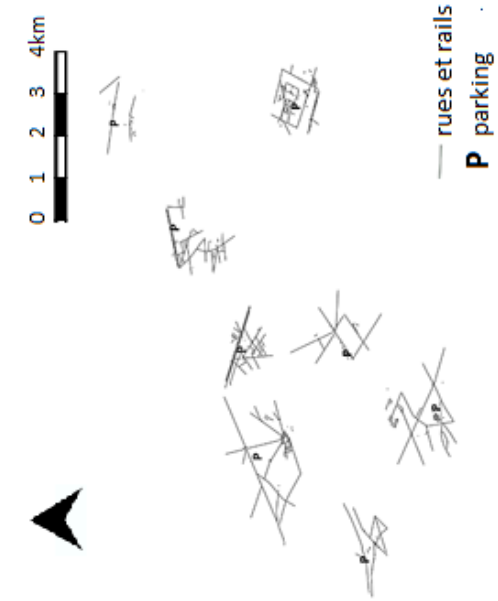
(a) : profil à mobilité non réduite utilisant le transport public



(c) : profil piéton à mobilité non réduite

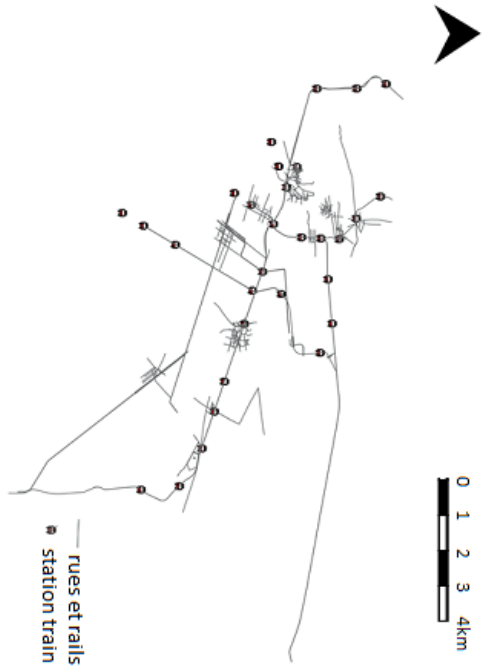


(b) : profil à mobilité réduite utilisant le transport public

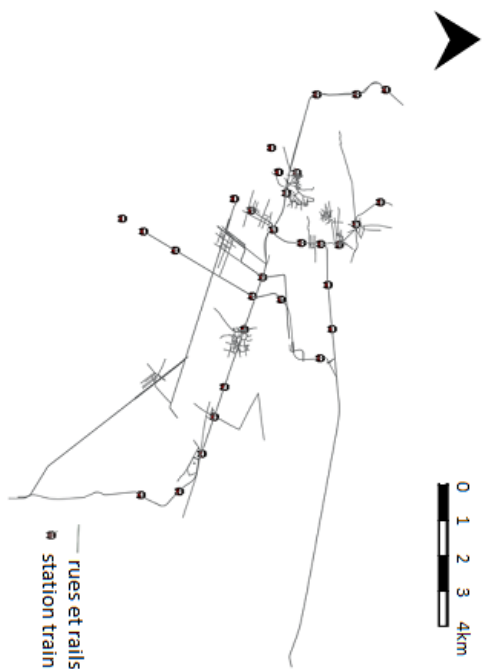


(d) : profil piéton à mobilité réduite

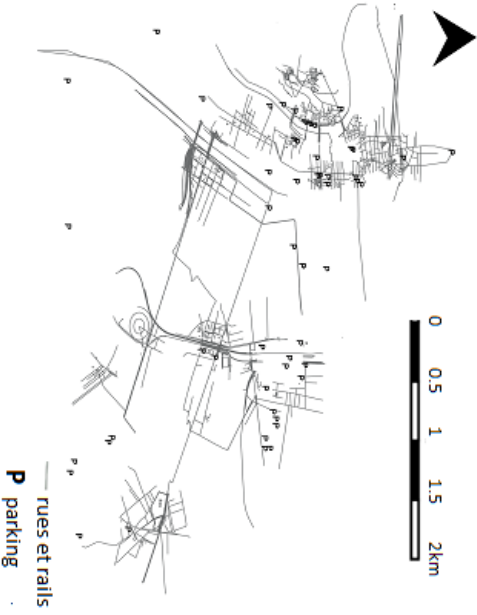
FIGURE 5.10 : Les réseaux d'activité de shopping de la ville de Paris pour les quatre profils



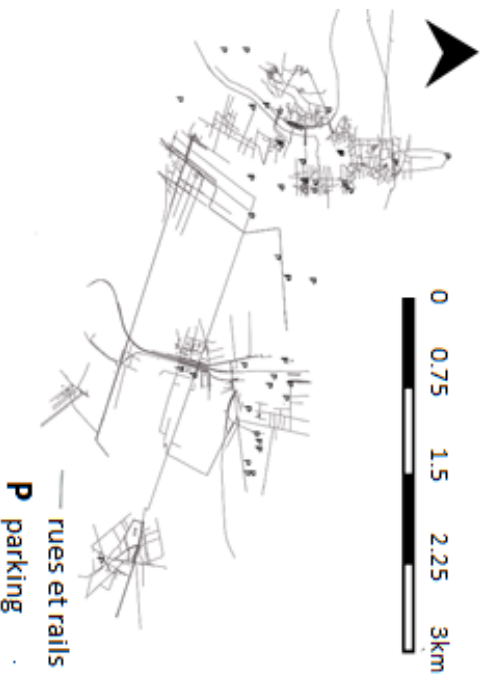
(a) : profil à mobilité non réduite utilisant transport public



(b) : profil à mobilité réduite utilisant transport public

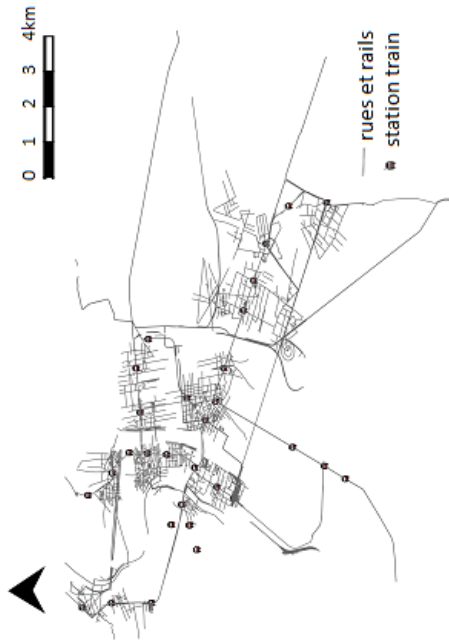


(c) : profil à mobilité non réduite piéton

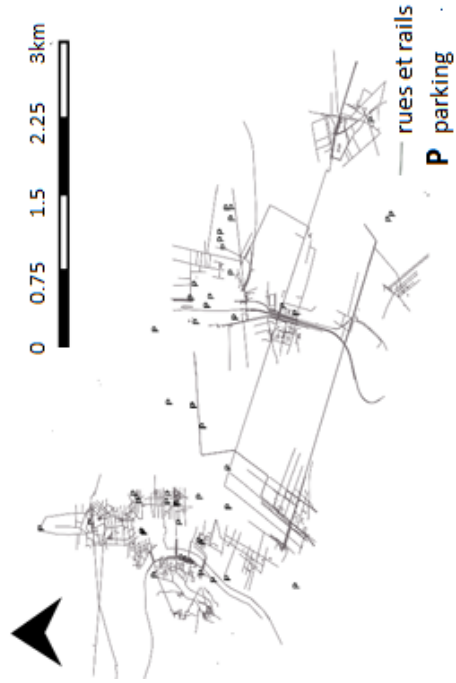


(d) : profil à mobilité réduite piéton

FIGURE 5.11 : Les réseaux d'activité de tourisme de la ville de Lyon pour les quatre profils



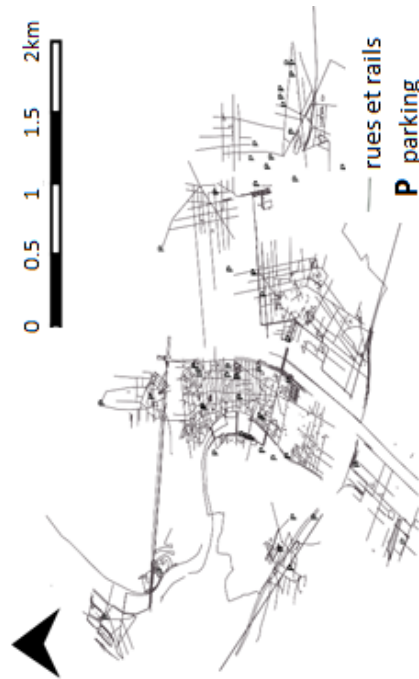
(a) : profil à mobilité non réduite utilisant transport public



(b) : profil à mobilité réduite utilisant transport public



(c) : profil à mobilité non réduite utilisant transport public

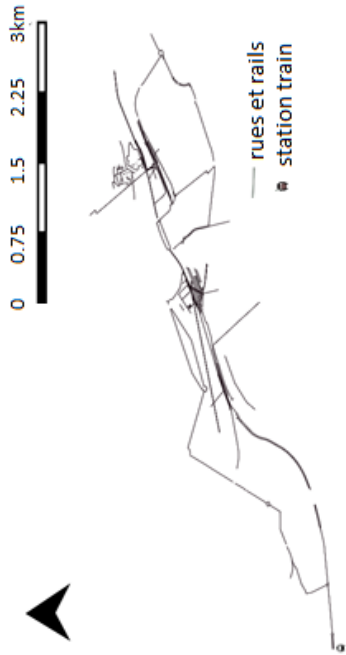


(d) : profil à mobilité réduite piéton

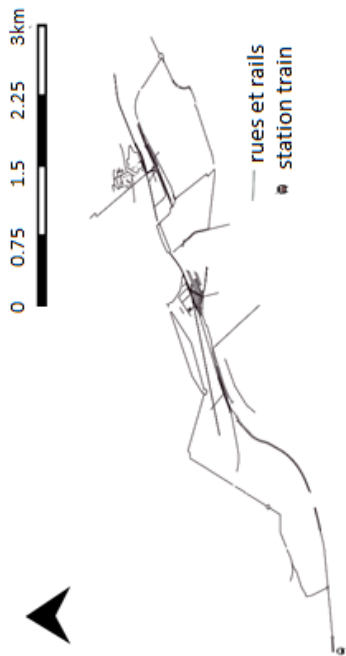
FIGURE 5.12 : Les réseaux d'activité de shopping de la ville de Lyon pour les quatre profils

iii La ville de Nantes

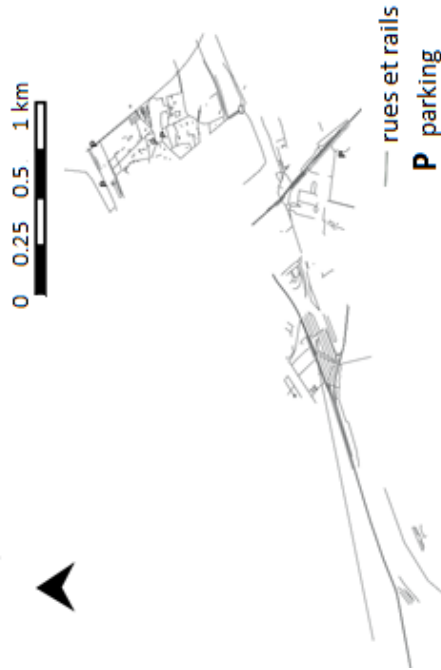
Nantes est une ville possédant une superficie de $65,19 \text{ km}^2$ et compte une population de 292 718 habitants (2013). La Figure 5.13 illustre les différents réseaux générés pour l'activité de tourisme. Les réseaux à mobilité non réduite et à mobilité réduite utilisant de transport public ne couvrent pas une grande partie de la ville en comparant avec Paris et à Lyon. Cette faible couverture est expliquée par l'existence d'une seule station ferroviaire qui est le point d'Origine/Destination pour l'activité. Les réseaux sont basés notamment sur le tramway comme moyen de transport pour accéder aux POIs touristiques. Les piétons accèdent aux POIs touristiques de Nantes à partir des parkings situés à proximité. Le réseau généré pour un profil à mobilité non réduite montre plus de connectivité topologique que celui associé à une mobilité réduite. L'étude de l'activité de shopping pour la ville de Nantes est présentée dans la Figure 5.14 pour les différents profils d'utilisateurs. Les réseaux représentant les itinéraires qui correspondent aux utilisateurs de transport public couvrent une grande partie de la ville. Le réseau d'activité est connecté ce qui révèle une facilité d'accessibilité aux POIs requis pour l'activité de shopping par le transport public. Les réseaux d'activité de shopping pour les piétons montrent une forte déconnexion pour les deux mobilités.



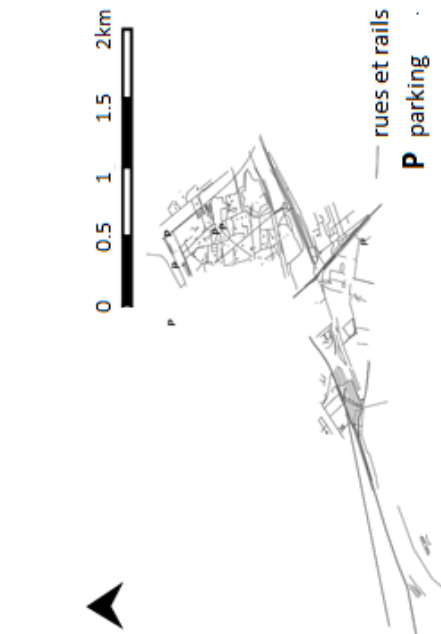
(a) : profil à mobilité non réduite utilisant transport public



(b) : profil à mobilité réduite utilisant transport public



(c) : profil à mobilité non réduite piéton



(d) : profil à mobilité réduite piéton

FIGURE 5.13 : Les réseaux d'activité de tourisme de la ville de Nantes pour les quatre profils

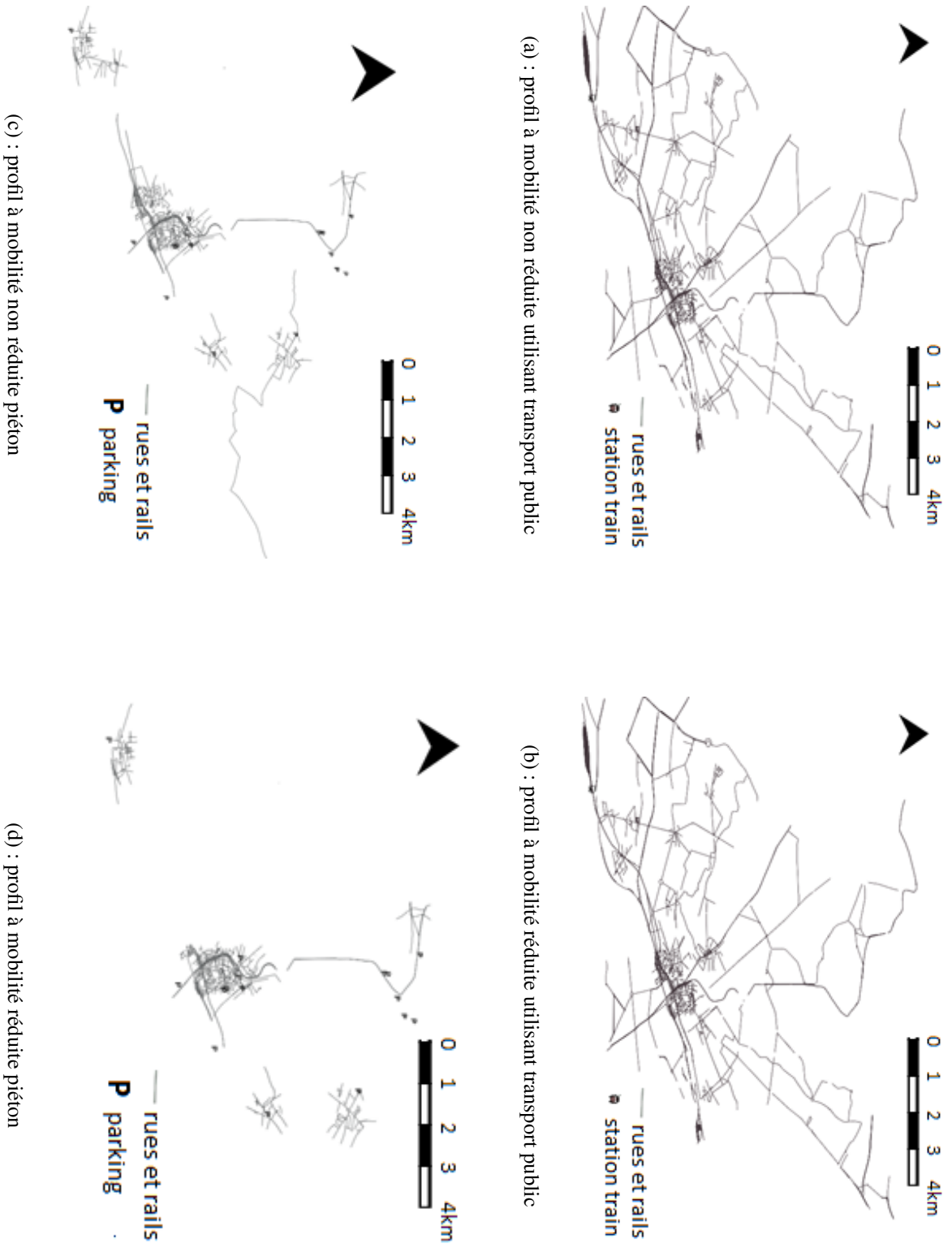
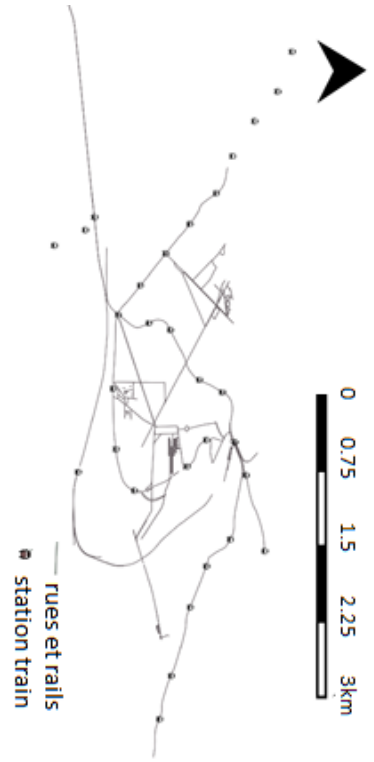


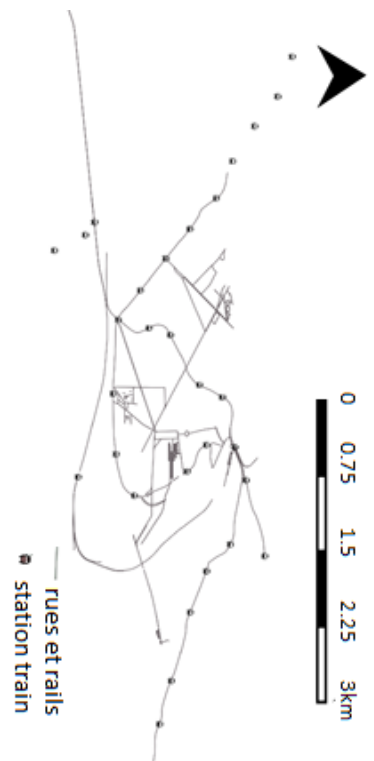
FIGURE 5.14 : Les réseaux d'activité de shopping de la ville de Nantes pour les quatre profils

iv La ville de Lille

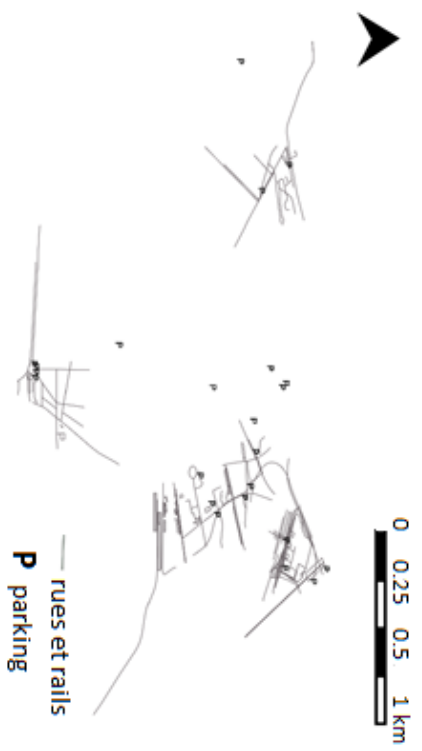
Lille est une ville française d'une superficie de $34,83 \text{ km}^2$ avec une population de 231 491 habitants recensée par INSEE en 2013. La génération d'itinéraires d'activité de tourisme pour les quatre profils est illustrée dans la Figure 5.15. L'utilisation de transport public à partir des stations de transport ferroviaire permet de générer des réseaux qui couvrent une grande partie du réseau multimodal. Les réseaux des piétons pour les profils à mobilité non réduite et à mobilité réduite révèlent une déconnexion expliquée par une distance élevée séparant les POIs touristiques dans la ville de Lille. L'usage de la ville dans le cadre d'une activité de shopping est présenté dans la Figure 5.16. Le transport public utilisé pour cette activité couvre une grande partie du réseau de transport public disponible. Le réseau est connecté révélant une accessibilité élevée aux POIs de l'activité de shopping. Les piétons accèdent à cette activité à partir des parkings à proximité.



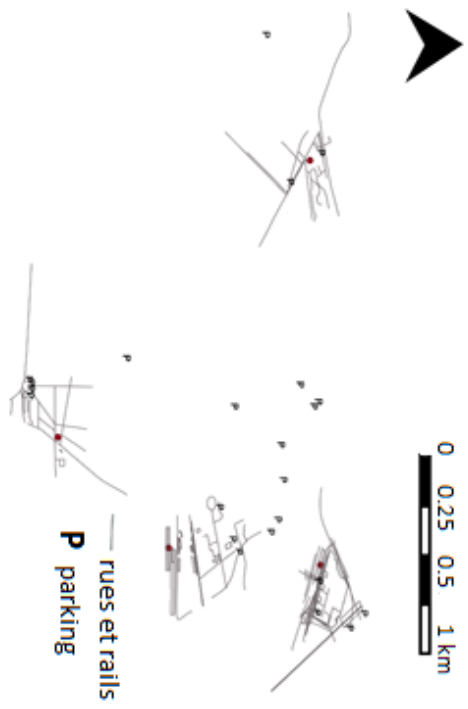
(a) : profil à mobilité non réduite utilisant transport public



(b) : profil à mobilité réduite utilisant transport public

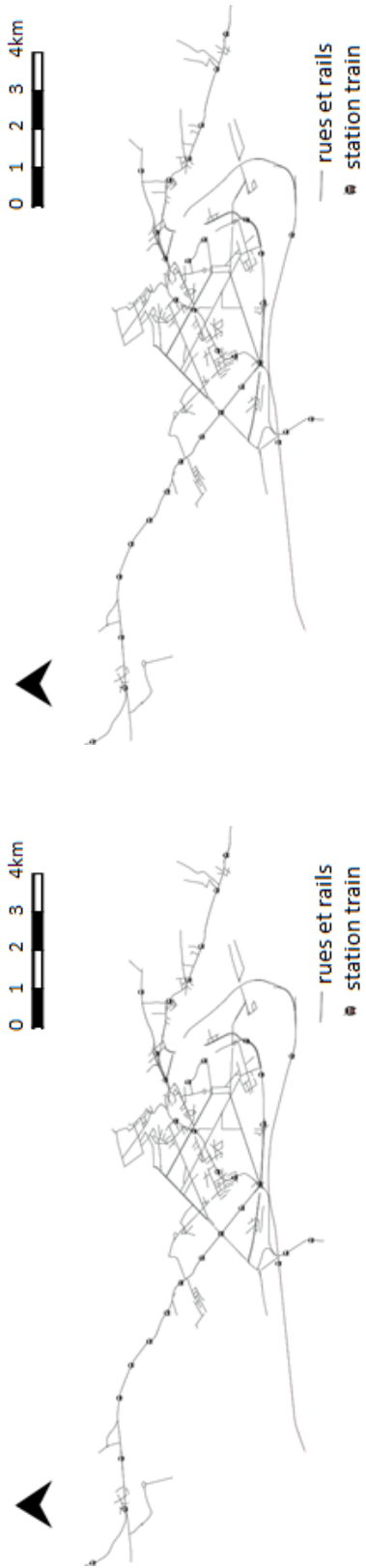


(c) : profil à mobilité non réduite piéton



(d) : profil à mobilité réduite piéton

FIGURE 5.15 : Les réseaux d'activité de tourisme de la ville de Lille pour les quatre profils



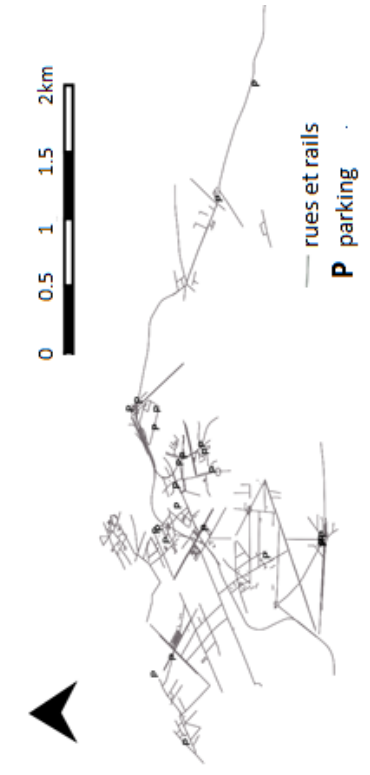
(a) : profil à mobilité non réduite utilisant transport public



(c) : profil à mobilité non réduite piéton



(b) : profil à mobilité réduite utilisant transport public



(d) : profil à mobilité réduite piéton

FIGURE 5.16 : Les réseaux d'activité de shopping de la ville de Lille pour les quatre profils

5.2.3 Validation de la méthode

La validation de notre approche peut se décomposer en deux étapes. Premièrement, la validation du modèle de représentation du réseau de transport multimodal doit être réalisée. La génération d'itinéraires pour deux activités définies a priori, réalisée dans la section précédente, illustre la pertinence du modèle. En effet, l'outil de génération d'itinéraires profite pleinement de la structure de super-réseau pour créer des itinéraires multimodaux. La deuxième validation de la méthode concerne la définition d'activités et la pertinence des itinéraires générés. Cette étape est difficile car elle suppose d'avoir à disposition des données de déplacement pour des activités bien définies acquises lors d'enquêtes de taille importante. Les itinéraires générés par notre méthode pourraient alors être comparés avec les itinéraires "terrain" afin d'évaluer la précision de l'outil développé. Malheureusement, ce genre de données n'existe pas à notre connaissance et le coût de réalisation de ce type d'enquête avec un nombre de participants significatif et ce sur plusieurs villes est rédhibitoire. De plus, nous avons pris pour hypothèse que la planification d'une activité était définie par une séquence de visites de POIs fixe sans prendre en compte l'aspect polymorphe de la réalisation d'une activité donnée. En effet, suivant les individus la réalisation de l'activité touristique, par exemple, peut varier de façon significative tant au niveau du nombre de POIs visités qu'au niveau de la durée de l'activité. Afin de prendre en compte ce polymorphisme il faudrait considérer des approches probabilistes pour se rapprocher d'une démarche de simulation de comportement ce qui n'est pas l'objectif de notre travail car nous nous intéressons aux sous réseaux de transport utilisés pour des activités définies de manière simple plutôt qu'à une simulation réaliste de déplacements dans la ville. Nous nous sommes donc tournés vers une autre solution de validation. La méthode de génération d'itinéraires d'activités vise à présenter le réseau d'activité utilisé dans un cadre spécifique. La validation de cette méthode nécessite une comparaison avec un réseau d'activité obtenu à partir des expériences réelles des individus. Les réseaux sociaux de nos jours occupent de plus en plus de place dans la vie des gens qui partagent leurs idées et leurs activités sur Internet. Twitter¹¹ est parmi les réseaux sociaux le plus populaire. Il a été lancé en juillet 2006 et est rapidement devenu très populaire avec plus de 500 millions d'utilisateurs en 2012 et plus d'un milliard actuellement dont 26 millions en France. Le concept de Twitter permet aux utilisateurs de diffuser de brefs messages de 140 caractères au maximum. Il s'agit d'une plate-forme de microblogging. Environ 500 millions de tweets sont envoyés dans le monde chaque jour, ce qui représente une quantité énorme d'informations. La collection des tweets en temps réel est possible par une API Twitter¹² mise en place gratuitement. Dans la littérature, l'analyse des tweets a été effectuée dans le but de répondre à plusieurs questions. L'évolution de certains désastres a été étudiée à partir de l'analyse des tweets dans le travail de [Dittrich and Lucas \[2014\]](#). L'analyse spatio-temporelle d'émotions des personnes est une autre question de recherche abordée par [Wakamiya et al. \[2015\]](#). L'étude des événements a été effectuée par [Croitoru et al. \[2013\]](#) en se basant sur l'analyse des

11. <http://twitter.com>

12. API Twitter : <https://dev.twitter.com/>

tweets. L'étude des déplacements et des activités urbaines dans l'espace a notamment intéressé plusieurs chercheurs. [Wakamiya et al. \[2012\]](#) ont proposé une approche d'extraction de connaissances à partir de tweets dans l'objectif de créer des cartes socio-cognitives qui représentent les flux de mouvements entre des villes différentes. L'idée est de suivre les déplacements des internautes par le système de localisation de réseaux sociaux et de calculer la fréquence sur des cartes. [Bouillot et al. \[2012\]](#) ont exploité l'aspect temporel de tweets pour la construction des trajectoires des utilisateurs dans le but d'identifier la localisation des individus et de regrouper la fréquence de visite de certains endroits dans le temps. L'approche proposée par [Fuchs et al. \[2013\]](#) est un modèle d'analyse spatio-temporelle de comportements humains. Fuchs a identifié des activités d'étude qui touchent la vie professionnelle et sociale des individus. L'approche consiste à procéder à différentes analyses des comportements humains dans l'espace tel que l'étude de chaque service par rapport à la granularité temporelle (l'heure de la journée et le jour de la semaine) et la distribution spatiale par rapport à chaque utilisateur. Les touristes sont particulièrement actifs sur les réseaux sociaux pendant leurs séjours touristiques. De là vient l'idée de localiser les utilisateurs de Twitter d'une ville et d'étudier leurs activités. Nous choisissons pour cela la ville de Paris pour procéder à la validation compte tenu du nombre de tweets disponibles ainsi que la forte activité touristique de la ville estimée à 30 millions de touristes par an. L'hypothèse prise dans l'analyse de tweets est la suivante : les tweets qui ne sont pas rédigés en français sont estimés comme des tweets publiés par des personnes pratiquant le tourisme. En effet, chaque tweet collecté contient le pseudonyme de l'utilisateur, l'instant de publication, la localisation du message, la langue ainsi que le message. Plus de 350 000 tweets écrits dans une langue étrangère ont été collectés de novembre 2015 à mai 2016 à Paris. La récupération des messages a été réalisée à l'aide de l'API Twitter en langage Python. Les messages concernés sont ceux appartenant au flux public. L'annexe D contient les deux fichiers permettant d'aspirer le flux de tweets localisés en France (par la définition d'une boîte englobante) et leur enregistrement en fichier du type CSV (Comma-separated value). Afin de contenir au mieux le flux important de messages et le risque de déconnexion, un fichier est enregistré lorsqu'il atteint un nombre de lignes limité et l'exécution du programme est testée régulièrement et il est relancé s'il faut. La base de tweets collectés concerne plus de 26 000 utilisateurs parlant 38 langues différentes. Des trajectoires sont construites à partir des tweets concernant le même utilisateur pour la même journée dans le but de suivre ses déplacements. En effet, l'idée est de suivre les déplacements de chaque utilisateur dans le cadre d'une activité de tourisme par la recherche de ses positions acquises par ses tweets pour une journée. Ces points présentent une trajectoire parcourue par un touriste. Les tweets de toutes les trajectoires touristiques sont présentés sur le réseau de tourisme obtenu par notre méthode de génération d'itinéraires d'activité dans la 5.17. 73% des tweets sont localisés sur le réseau d'activité, ce qui montre que notre méthode appliquée sur l'activité de tourisme couvre correctement les lieux fréquentés par les touristes. Le tableau 5.2 montre le pourcentage de tweets en fonction des langues utilisées. L'anglais utilisé par les pays anglophones représente la majorité de tweets partagés par les touristes à Paris. Nous trouvons par ordre de fréquence l'espagnol, l'italien, le russe et le japonais.

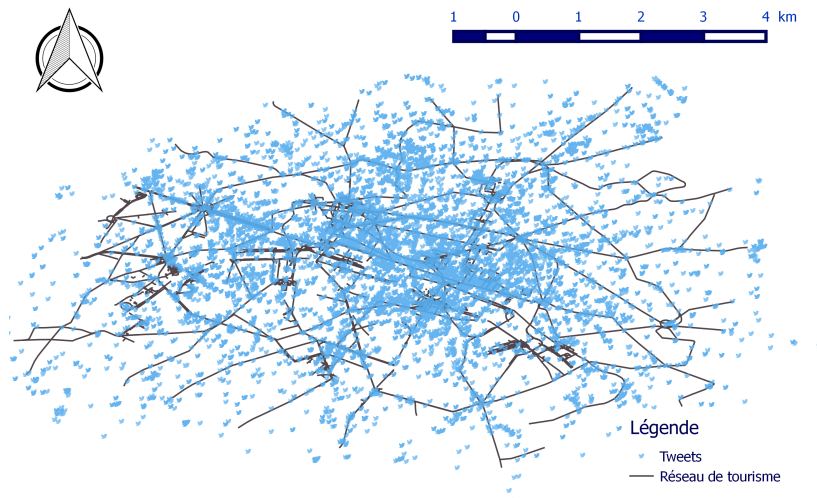


FIGURE 5.17 : Les tweets associés à l'activité de tourisme sur le réseau d'activité généré par le système pour l'activité de tourisme

Tableau 5.2 : Le pourcentage de fréquence de tweets touristiques par langue

| Langue | Pourcentage de nombre de tweets |
|----------|---------------------------------|
| Anglais | 63% |
| Espagnol | 21% |
| Italien | 3% |
| Russe | 1,6% |
| Japonais | 0,6% |

Cette méthode de validation est une première tentative. Elle repose essentiellement sur l'hypothèse que les tweets émis dans une langue autre que le français concernent l'activité de tourisme. Bien entendu, des tweets non français peuvent ne pas être reliés au tourisme, mais nous considérons que leur nombre est minimal. Pour extraire de l'information sur les activités à partir de tweets en langue française une analyse en langage naturel est obligatoire. Le phénomène de téléprésence, message sur un lieu différent du lieu d'écriture du message, rend la tâche particulièrement complexe.

5.3 Analyse spatiale des activités

Nous procédons dans cette section à une analyse spatiale de réseaux d'activité générés pour les quatre villes dans la section 5.2.2. Le but de cette analyse est de présenter l'importance d'étudier l'usage contextuel de la ville toute en menant une comparaison entre les différentes villes étudiées. La comparaison entre différents graphes est effectuée souvent par une étude quantitative des réseaux. [Derrible and Kennedy \[2009\]](#) ont proposé une comparaison entre les réseaux de métro de 19 villes différentes. Ils sont basés sur des indicateurs de couverture de l'espace par les réseaux du métro tels que le nombre de stations et le nombre de transferts intermodaux entre deux points donnés. [Sienkiewicz and Hołyst \[2005b\]](#) ont précédé à une comparaison entre les réseaux de transport public de 22 villes en Pologne en se basant sur des opérateurs de centralité. Ces études comparatives manquent la prise en compte de l'usage contextuel de l'espace urbain. Le réseau d'une activité est celui qui unit les réseaux générés par les différents profils. Pour l'étude de la structure de chaque réseau, qui diffère de l'autre, nous nous basons sur des opérateurs permettant de comparer les caractéristiques de graphe. Dans le cas de notre étude, nous allons réaliser une analyse des réseaux d'activités de différentes villes en se basant en premier temps sur les opérateurs de centralité et ensuite sur l'analyse de couverture structurelle de chaque réseau d'activité par rapport au réseau de transport multimodal. Notre approche d'analyse est appliquée sur des réseaux d'activités. La centralité est un critère important en analyse spatiale. Nous avons détaillé dans la section 2.1.3 de chapitre 2 les différents opérateurs de centralité. Dans le but de représenter l'intérêt des réseaux d'activités générés dans un contexte donné, nous avons procédé à une analyse spatiale classique appliquée sur 16 villes dans de l'annexe E. Nous intéressons particulièrement à deux opérateurs de centralité : (1) la centralité intermédiaire qui consiste à compter le nombre de passages à travers un nœud dans les plus courts chemins qui relient chaque paire de nœuds dans le graphe (2) la connectivité qui est le nombre de nœuds directement connectés à un nœud donné. La prise en compte des activités dans l'analyse spatiale de la ville est introduit par l'application des différents opérateurs de centralité sur les réseaux d'activité. L'analyse de chaque réseau montre une configuration différente pour chaque activité en comparant avec le réseau de transport structurel. L'application de ces différents opérateurs de centralité sur chaque réseau permet d'étudier l'importance de certains nœuds dans la structure de réseau. Les centres de chaque réseau sont les nœuds possédant la valeur de centralité la plus élevée. Ils sont des points caractérisés par une forte connectivité et accessibilité dans le réseau. Le tableau 5.4 montre les différentes valeurs de centralité associées au réseau d'activité de shopping et d'activité de tourisme. Une différence est remarquée entre les réseaux concerne les valeurs de centralité mais aussi les nœuds représentant les centres ce qui montre l'intérêt de la prise en compte de l'activité. Pour l'étude du taux de couverture de réseaux d'activités par rapport au réseau multimodal, nous proposons trois opérateurs. Le premier opérateur *couvnbre* consiste à analyser la couverture de réseau de l'activité par rapport au réseau multimodal de la ville. Le nombre de liens est un indicateur utilisé pour référer à la structure de réseau d'itinéraires plutôt que le nombre de nœuds puisque deux graphes possédant le même nombre de nœuds peuvent avoir un nombre de liens différent.

Couvnbre est défini comme suit :

$$couvnbre = \frac{nbreLien(G_{act})}{nbreLien(G_{multi})} \quad (5.1)$$

Où *nbreLien* : $\text{Grightrightarrow}N$ est la fonction qui retourne le nombre de liens d'un réseau donné. En plus de la quantité associée au nombre de liens, la longueur d'itinéraires d'un réseau peut caractériser la structure de réseau. Le deuxième opérateur défini est le pourcentage de longueur d'itinéraire d'un réseau d'activité par rapport le réseau multimodal *longitin* tel que

$$longitin = \frac{lgin(G_{act})}{lgin(G_{multi})} \quad (5.2)$$

Où *lgin* : $\text{Grightrightarrow}R$ est une fonction visant à calculer la longueur de tous les itinéraires d'un réseau donné. Le tableau 5.4 illustre les valeurs de ces deux opérateurs associés à chaque réseau de la ville.

Tableau 5.3 : Les valeurs de centralité pour les centres de différents réseaux de villes étudiées

| Ville | Réseau | Degré | Centralité intermédiaire |
|--------|------------|-------|--------------------------|
| Paris | multimodal | 186 | 73 559 075 |
| | shopping | 30 | 64 644 |
| | tourisme | 15 | 22 001 |
| Lyon | multimodal | 8 | 103 177 443 |
| | shopping | 8 | 3 318 853 |
| | tourisme | 6 | 1 402 097 |
| Nantes | multimodal | 5 | 4 550 560 |
| | shopping | 5 | 125 867 |
| | tourisme | 5 | 45 952 |
| Lille | multimodal | 5 | 6 050 560 |
| | shopping | 5 | 175 867 |
| | tourisme | 5 | 65 952 |

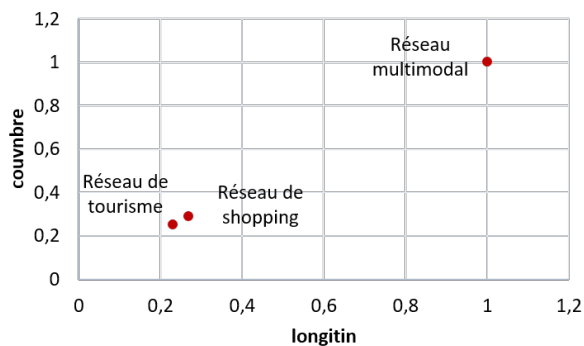
Tableau 5.4 : Les valeurs de couverture de différents réseaux associés aux quatre villes

| Ville | Réseau | Couverture de réseau : couvnbre | Longueur d'itinéraires : longitin |
|--------|------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Paris | multimodal | 100% | 100% |
| | tourisme | 25% | 23% |
| | shopping | 29% | 27% |
| Lyon | multimodal | 100% | 100% |
| | tourisme | 14% | 33% |
| | shopping | 32% | 48% |
| Nantes | multimodal | 100% | 100% |
| | tourisme | 9% | 43% |
| | shopping | 28% | 22% |
| Lille | multimodal | 100% | 100% |
| | tourisme | 23% | 26% |
| | shopping | 32% | 48% |

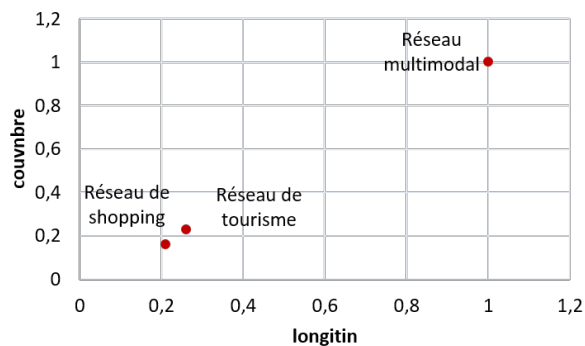
La Figure 5.18 illustre les différentes valeurs associées au *couvnbre* et *longitin* de chaque réseau pour les différentes villes. Dans le but d'évaluer la couverture de chaque opérateur de réseau d'activité par rapport au réseau multimodal, nous introduisons un troisième opérateur de différence qui consiste à calculer la distance entre le point représentant les coordonnées de chaque réseau d'activité (*covlang*, *longitin*) par rapport à celui du réseau multimodal. Soit *Distcouv* la distance euclidienne qui sépare le point de réseau multimodal et chaque point tel que

$$G_{act}(Distcouv) = \sqrt{(G_{multi}(longitin) - G_{multi}(couvnbre))^2 + (G_{act}(longitin) - G_{act}(couvnbre))^2} \quad (5.3)$$

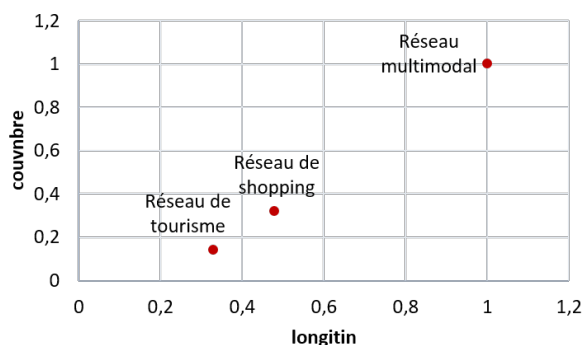
Le réseau d'activité possédant une distance *Distcouv* plus faible est celui qui couvre plus le réseau de la ville. La Figure 5.19 montre les différentes valeurs de la distance de couverture pour les quatre villes. Pour la ville de Paris, la distance de couverture *Distcouv* pour le réseau de tourisme est de 1,35 alors que celle du réseau de shopping est de 1,30. La ville de Nantes est caractérisée par une distance de couverture *Distcouv* égale à 1,07 pour le réseau de tourisme et à 1,06 pour le réseau de shopping. Une couverture quasiment identique pour les réseaux d'activité de shopping et de tourisme est détectée pour les villes de Paris et Nantes. Lyon possède une distance de couverture *Distcouv* de 1,09 pour le réseau de tourisme et de 0,85 pour le réseau de shopping. Ces résultats montrent une couverture plus élevée pour le réseau de shopping que pour celui de l'activité de tourisme. Cependant, la ville de Lille montre une couverture plus élevée pour le réseau de tourisme par une valeur de *Distcouv* de 1,06 pour l'activité de tourisme face à 1,15 pour l'activité de shopping.



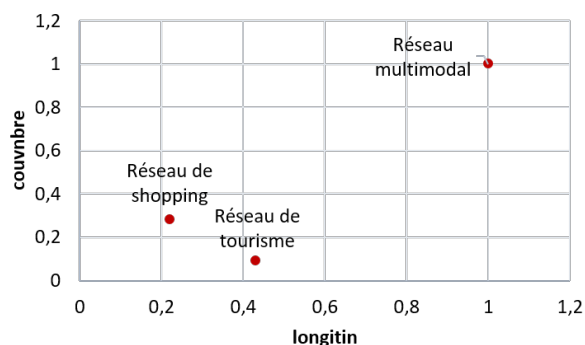
(a) : Paris



(b) : Lille



(c) : Lyon



(d) : Nantes

FIGURE 5.18 : Application des opérateurs de couverture sur les réseaux d'activité des villes étudiées

5.4 Conclusion

Nous avons détaillé dans ce chapitre l'implémentation d'un système de génération d'itinéraires contextuels fondé sur des connaissances extraites à partir des données ENT-D. Les connaissances pertinentes sont associées à la planification de l'activité selon un contexte temporel. D'autres informations extraites permettent d'étudier l'usage de la ville en étudiant la disponibilité temporelle des POI. Un outil a été développé pour la génération d'itinéraires intégrant un système de gestion de connaissances qui permet de représenter les connaissances extraites sur la planification des activités. L'application de la méthode de génération d'itinéraires d'activités sur quatre villes a permis d'obtenir des réseaux thématiques associés à une situation spécifiée. Deux activités ont été planifiées : l'activité de shopping et l'activité de tourisme. L'analyse spatiale effectuée sur les différents réseaux d'activités a été réalisée par la suite afin de caractériser la ville par l'usage contextuel associé à des profils donnés. L'étude de centralité des réseaux d'activités a permis d'identifier

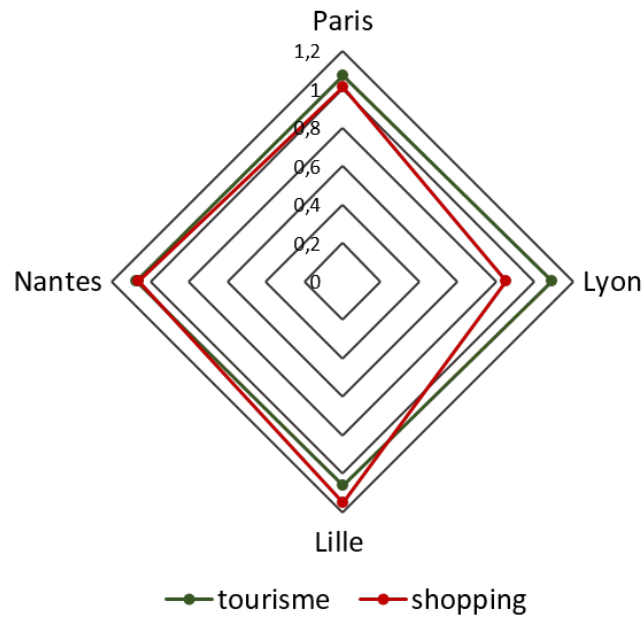


FIGURE 5.19 : Les valeurs de la distance de couverture associées aux différentes villes

les points importants dans chaque réseau. Des nouveaux opérateurs d'analyse de couverture des réseaux d'activités par rapport au réseau multimodal ont été proposés pour étudier l'aspect structurel de chaque. Les valeurs de ces différents opérateurs appliqués sur les villes de Paris, Lyon, Nantes et Lille, ont montré des centres différents pour chaque réseau d'activité ainsi qu' une couverture variante. La méthode a été validée en s'appuyant sur des données de réseaux sociaux publiés dans le cadre d'une activité de tourisme.

Chapitre 6

Conclusion

Les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit s'intéressaient à la représentation de l'usage contextuel de la ville tout en prenant en considération les différentes contraintes liées à la mobilité et à la planification des activités. L'objectif a été conduit par une modélisation multidimensionnelle de la ville ainsi qu'une étude des activités des personnes dans l'espace, dans le but de générer des réseaux thématiques. Le but de ces réseaux est d'étudier la configuration de l'espace dans le cadre des activités contextuelles.

6.1 Bilan

Dans la première partie du manuscrit, nous avons présenté une étude bibliographique sur les problématiques d'analyse spatiale de la ville et la prise en compte de l'usage de la ville dans le cadre de la mobilité urbaine et des activités mobiles dans la ville. Plusieurs limites ont été identifiées dans les approches existantes proposées dans la littérature pour la modélisation de la ville et l'analyse spatiale. Trois catégories ont été distinguées dans les modèles proposés dans la littérature : (1) la modélisation structurelle de l'espace, (2) la modélisation de la mobilité urbaine et (3) la modélisation des activités urbaines. Des manques de généralité et de globalité dans les méthodes d'analyse spatiale appliquées sur chaque catégorie ont été remarqués pour pouvoir répondre à nos objectifs. Suite à l'étude des travaux existants, des questions de recherche ont été déduites pour l'étude de l'usage contextuel de l'espace.

Q1 : Comment modéliser les différents facteurs intervenants dans la définition de la structure et l'usage de la ville ?

Q2 : Comment prendre en compte le contexte de l'utilisation de l'espace sur le modèle de la ville ?

Q3 : Comment identifier des activités mobiles caractéristiques dans la ville selon les profils d'utilisateurs ?

Q4 : Comment procéder à des analyses spatiales de la ville intégrant l'aspect fonctionnel de l'espace et les éléments contextuels de catégories d'utilisateurs ?

La suite du manuscrit a été dédiée à répondre à ces différentes questions. Le chapitre 3 a été consacré à répondre à la première question de recherche. Nous avons proposé pour cela un modèle à base de graphes prenant en compte l'aspect multimodal du transport urbain de la ville ainsi que les points d'intérêt. Le concept super-réseau a été exploité pour représenter la richesse topologique des différents réseaux de mobilité. Le super-réseau permet d'interconnecter les réseaux associés à chaque mode de transport par des liens d'interdépendance. Deux approches ont été exploitées pour la modélisation de réseau de chaque mode de transport : l'approche duale qui consiste à représenter les rues par des nœuds et les intersections par des arcs pour la modélisation de réseau de piétons et l'approche primaire pour la représentation des autres modes de transport (bus, tramway, métro, véhicule) entre les différents modes de transport. L'aspect temporel a été spécifié par des attributs qui caractérisent chaque réseau et les liens entre eux. L'usage de la ville a été étudié par la suite afin de modéliser les activités urbaines et à répondre à la question 2. Nous avons basé sur la théorie d'activité permettant de définir les différents types de contexte qui peuvent entourer la réalisation

d'une activité. L'adaptation de cette théorie dans le contexte des activités urbaines, nous permet de spécifier quatre éléments contextuels : contexte urbain, contexte d'utilisateur, contexte spatio-temporel et contexte social. Ces différents éléments contextuels sont représentés par un modèle conceptuel qui permet de spécifier l'intervention de chaque type de contexte sur la planification et la réalisation de l'activité. Dans le but de prendre en compte le contexte de l'utilisation de la ville représenté par la question 3, le chapitre 4 a été dédié à l'introduction d'une méthode de génération d'itinéraires d'activité fondée sur des algorithmes heuristiques et appliquée sur le super-réseau créé. Des informations sur les comportements des utilisateurs dans l'espace dans le cadre d'activités mobiles en ville ont été extraites à partir des données d'enquête sur les déplacements ENT-D. Les connaissances extraites ont été principalement utiles pour la planification des activités dans le temps. Un système de gestion de règles a été conçu pour représenter les connaissances dans le dessein de proposer des itinéraires d'activités les plus adaptés aux contextes spatio-temporels et aux profils des utilisateurs. La validation et l'expérimentation de l'approche de génération ont été effectuées dans le dernier chapitre dans lequel nous avons répondu à la question 4. Des réseaux thématiques d'activités ont été générés sur quatre villes françaises qui correspondent à l'activité de tourisme et de shopping. Une analyse spatiale a été réalisée par la suite sur chacun des réseaux par l'application de différents opérateurs de syntaxe spatiale. Les résultats ont montré une centralité différente entre les réseaux d'activités, ce qui prouve notre hypothèse sur la nécessité de prendre en compte l'usage contextuel de l'espace pour l'étude de la morphologie de la ville. Des opérateurs de couverture concernant la longueur et le nombre de liens associés à chaque réseau. Certaines villes présentent la même couverture des réseaux des activités telles que Paris et Nantes. Cependant, l'analyse de la couverture des réseaux d'activités des villes de Lille et Lyon montre une différence structurelle dans chaque réseau fonctionnel ce qui montre l'intérêt de générer des réseaux thématiques contextuels pour l'analyse spatiale.

6.2 Perspectives

Dans le cadre de la thèse, nous avons proposé une approche de génération d'itinéraires d'activités qui supportent la multi-modalité de transport. Les itinéraires doivent être adaptés aux désirs et préférences de l'utilisateur. Un modèle contextuel a été présenté pour spécifier les paramètres associés à un utilisateur intervenant dans le déroulement de l'activité. Des perspectives sont proposées dans cette section et visent à enrichir et à améliorer l'approche proposée selon différents axes : (1) le modèle conceptuel d'activité, (2) la planification des activités (3) et la méthode de génération d'itinéraires. Concernant l'acquisition des données, l'expérimentation de la méthode de génération a été effectuée sur des données urbaines spécifiant les réseaux de transport public et les POIs à l'aide de deux plateformes OpenStreetMap et Factual. Nous pouvons enrichir les données par d'autres informations telles que les prix, les horaires et les « feedbacks » des utilisateurs sur les POI. La collecte de ces données peut être assurée par des plateformes de partage et de

recommandation de services telles que Tripadvisor et Pages jaunes. Les tableaux horaires de transport public peuvent aussi être intégrés dans le système de génération d'itinéraires afin de prévoir d'une manière plus exacte le temps de parcours et le temps d'attente par l'utilisation d'un mode de transport public. Une de nos perspectives consiste à collecter les tables d'horaires par l'utilisation des API libres comme, par exemple, l'API de la RATP pour la ville de Paris. Le modèle conceptuel d'activités proposé dans la section 3.4.2 du chapitre 3 représente plusieurs aspects contextuels tels que : la dimension spatio-temporelle, le contexte environnemental et urbain et le profil. Ce modèle peut être enrichi par d'autres paramètres intervenants dans la planification et l'exécution de l'activité. La définition du profil a été volontairement simplifiée mais elle pourrait être plus complexe afin de mieux refléter la réalité des comportements individuels. La représentation des tables d'horaires dans le modèle pour les modes de transport public permettrait d'avoir une meilleure estimation du temps d'attente et de la durée de l'activité. La planification de l'activité a été assurée à l'aide d'un système de gestion de règles représentant des connaissances extraites à partir des données d'enquête ENTD. D'autres sources de données peuvent être exploitées pour extraire des informations sur les comportements des individus dans le cadre des activités urbaines. Les données de réseaux sociaux peuvent être exploitées pour extraire des informations liées aux préférences et aux activités des individus. Les données de Twitter exploitées pour la validation de l'approche peuvent également être analysées pour acquérir des connaissances sur les activités par l'analyse spatio-temporelle et textuelle des tweets. D'autres réseaux sociaux offrent gratuitement un service de collecte de données et peuvent être exploités pour ce processus d'enrichissement de la base des connaissances. Nous pouvons citer Flickr, une plate-forme de partage de photos géolocalisées ou Facebook, un des réseaux sociaux les plus célèbres. Les expérimentations effectuées dans le chapitre 5 ont été basées sur une planification fréquente extraite à partir de plusieurs types de données. Cette planification reste relative à un ensemble d'utilisateurs pouvant être enrichie par un modèle probabiliste. Ce modèle aura comme but de définir plusieurs scénarios possibles en affectant chacun à une probabilité donnée. L'analyse spatiale proposée dans le chapitre 5 des réseaux d'activités a été basée sur deux caractéristiques (1) la centralité et (2) la couverture. Cette analyse peut être étendue en se fondant sur d'autres caractéristiques de l'espace telles que la géométrie de la zone d'activité. Le temps est un paramètre important pour l'étude des activités qui peut être intégré dans les opérateurs spatiaux pour contextualiser l'étude de la configuration spatiale.

Bibliographie

- Abadie, N. (2009). Formal specifications to automatically identify heterogeneities. In *12th AGILE Int. Conf. on Geographic Information Science, Pre-Conference Workshop on Challenges in Spatial Data Harmonisation*, volume 2.
- Abdelghany, K. F. S. (2001). Stochastic dynamic traffic assignment for intermodal transportation networks with consistent information supply strategies. Technical report.
- Abrahamsson, T. (1998). Estimation of origin-destination matrices using traffic counts—a literature survey. *IIASA Interim Report*.
- Agarwal, R. C., A. C. C. P. V. V. V. (2001). A tree projection algorithm for generation of frequent item sets. *Journal of parallel and Distributed Computing*, 61(3) :350–371.
- Agrawal, R., S. R. (1994). Fast algorithms for mining association rules. In *Proc 20th int conf very large data bases VLDB*, 1215 :487–499.
- Agryzkov, T., Oliver, J. L., Tortosa, L., and Vicent, J. F. (2014). Analyzing the commercial activities of a street network by ranking their nodes : a case study in murcia, spain. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(3) :479–495.
- Allen, J. F. and Hayes, P. J. (1989). Moments and points in an interval-based temporal logic. *Computational Intelligence*, 5(3) :225–238.
- Altman, N. S. (1992). An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression. *The American Statistician*, 46(3) :175–185.
- Alvares, L. O., Bogorny, V., Kuijpers, B., de Macedo, J. A. F., Moelans, B., and Vaisman, A. (2007). A model for enriching trajectories with semantic geographical information. In *Proceedings of the 15th annual ACM international symposium on Advances in geographic information systems*, page 22. ACM.
- Andrienko, N., Andrienko, G., Pelekis, N., and Spaccapietra, S. (2008). Basic concepts of movement data. *Chapter Mobility, Data Mining and Privacy, Geographic Knowledge Discovery*.

- Arentze, T. and Timmermans, H. (2004). Multistate supernetwork approach to modelling multi-activity, multimodal trip chains. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(7) :631–651.
- Aronoff, S. (1989). Geographic information systems : a management perspective. *Geocarto International*, 4.
- Axhausen K. W., G. T. (1992). Activity based approaches to travel analysis : conceptual frameworks, models, and research problems. *Transport Reviews.*, 12(4) :323–341.
- Baader, F. and Nutt, W. (2003). Basic description logics. In *Description logic handbook*, pages 43–95.
- Baaj M. H., M. H. S. (1995). Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies.*, 3 :31–50.
- Badariotti, D., Banos, A., and Moreno, D. (2007). Conception d'un automate cellulaire non stationnaire à base de graphe pour modéliser la structure spatiale urbaine : le modèle remus. *Cybergeo : European Journal of Geography*.
- Balmer, M., Nagel, K., and Raney, B. (2004). Large-scale multi-agent simulations for transportation applications. In *Intelligent Transportation Systems. Taylor & Francis Group.*, 8(4) :205–221.
- Batty, M. (2013). *The new science of cities*. Mit Press.
- Batty, M. and Xie, Y .and Sun, Z. (1999). Modeling urban dynamics through gis-based cellular automata. *Computers, environment and urban systems*, 23(3) :205–233.
- Bavelas, A. (1950). Communication patterns in task-oriented groups. *Journal of the acoustical society of America*.
- Bekhor S., Ben-Akiva M. E., R. M. S. (2006). Evaluation of choice set generation algorithms for route choice models. *Annals of Operations Research.*, 144 :235–247.
- Benshoof, J. (1970). Characteristics of drivers' route selection behaviour. *Traffic Engineering & Control*.
- Berkhin, P. (2006). A survey of clustering data mining techniques. In *Grouping multidimensional data. Springer Berlin Heidelberg.*, pages 25–71.
- Berry, M. J., L. G. (1997). Data mining techniques : for marketing, sales, and customer support. *John Wiley Sons, Inc.*.
- Bettini, C., Dyreson, C. E., Evans, W. S., Snodgrass, R. T., and Wang, X. S. (1998). A glossary of time granularity concepts. In *In Temporal databases : Research and practice. Springer Berlin Heidelberg.*, pages 406–413.

- Beyhan, B. (2011). Developing space syntax tools for free and open source software for gis. In *In Geoinformatics, 2011 19th International Conference on IEEE.*, pages 1–6.
- Bhat, C. R. and Koppelman, F. S. (1993). A conceptual framework of individual activity program generation. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 27(6) :433–446.
- Bianconi, G. and Dorogovtsev, S. N. (2014). Multiple percolation transitions in a configuration model of a network of networks. *Physical Review E*, 89(6).
- Bielli, M., Boulmakoul, A., and Mouncif, H. (2006). Object modeling and path computation for multimodal travel systems. *European Journal of Operational Research*, 175(3) :1705–1730.
- Bouillot, F., Hai, P. N., Béchet, N., Bringay, S., Ienco, D., Matwin, S., Poncelet, P., Roche, M., and Teisseire, M. (2012). How to extract relevant knowledge from tweets? In *International Workshop on Information Search, Integration, and Personalization*, pages 111–120. Springer.
- Bovy P. H. L., S. E. (1990). Route choice : Wayfinding in transport. networks. *Studies in Operational Regional Science.*, 9.
- Bowman, J. L. and Ben-Akiva, M. E. (2001). Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 35(1) :1–28.
- Buldyrev, S. V., Parshani, R., Paul, G., Stanley, H. E., and Havlin, S. (2010). Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. *Nature*, 464(7291) :1025–1028.
- Caenen, Y., COUREL, J., PAULO, C., and Schmitt, D. (2011). Les franciliens utilisent autant les transports en commun que la voiture pour se rendre au travail. *Ile-de-France à la page-Population*, (353) :6.
- Campos, V. B. G., Ramos, R. A. R., and de Miranda e Silva Correia, D. (2009). Multi-criteria analysis procedure for sustainable mobility evaluation in urban areas. *Journal of Advanced Transportation*, 43(4) :371–390.
- Cardillo, A., Scellato, S., Latora, V., and Porta, S. (2006). Structural properties of planar graphs of urban street patterns. *Physical Review E.*, 73(6).
- Carlier, K., Fiorenzo-Catalano, S., Lindveld, C., and Bovy, P. (2003). A supernetwork approach towards multimodal travel modeling. In *Proceedings of the 82nd annual meeting of the transportation research board, Washington, DC*. Citeseer.
- Cascetta, E. (2013). *Transportation systems engineering : theory and methods*, volume 49. Springer Science & Business Media.

- Chapin, F. S. (1974). Human activity patterns in the city : Things people do in time and in space. *New York : Wiley*.
- Chardonnel, S. and Thévenin, T. (2012). Les apports de la time geography dans les représentations spatio-temporelles. *science*, 24 :7–24.
- Chateauneuf, A. (1987). Continuous representation of a preference relation on a connected topological space. *Journal of Mathematical Economics*, 16(2) :139–146.
- Chein, M., M. M. L. (2008). Graph-based knowledge representation : computational foundations of conceptual graphs. *Springer Science & Business Media*.
- Chen, J., Shaw, S.-L., Yu, H., Lu, F., Chai, Y., and Jia, Q. (2011). Exploratory data analysis of activity diary data : a space–time gis approach. *Journal of Transport Geography*, 19(3) :394–404.
- Chen S., Tan J., C. C. and C., R. (2011). Multi-scale and multi-modal gis-t data model. *Journal of Transport Geography*.
- Chiaradia, A., Moreau, E., and Rafor, N. (2005). Configurational exploration of public transport movement networks : a case study, the london underground. *In 5th International Space Syntax Symposium*, pages 541–552.
- Chrisman, N. R., Cowen, D. J., Fisher, P. F., Goodchild, M. F., and Mark, D. M. (1989). Geographic information systems. *Geography in America*, pages 353–375.
- Christaller, W. (1933). Central places in southern germany (translated by baskin c. (1966)). *Prentice-Hall : Englewood Cliffs, NJ*.
- Clementini, E. and Di Felice, P. (2001). A spatial model for complex objects with a broad boundary supporting queries on uncertain data. *Data & Knowledge Engineering*, 37(3) :285–305.
- Clementini, E., Sharma, J., and Egenhofer, M. J. (1994). Modelling topological spatial relations : Strategies for query processing. *Computers & graphics*, ., 18(6) :815–822.
- Coast, S. et al. (2007). Openstreetmap. *In Workshop on Volunteered Geographic Information*.
- Croitoru, A., Crooks, A., Radzikowski, J., and Stefanidis, A. (2013). Geosocial gauge : a system prototype for knowledge discovery from social media. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(12) :2483–2508.
- Crucitti, P., Latora, V., and Porta, S. (2006). Centrality in networks of urban streets. *Chaos : an interdisciplinary journal of nonlinear science*, 16(1).

- Daamen, W., Bovy, P. H., Hoogendoorn, S. P., and Van de Reijt, A. (2005). Passenger route choice concerning level changes in railway stations. In *Transportation Research Board Annual Meeting*, volume 1930, pages 12–20.
- Dalvi, M. Q. and Martin, K. (1976). The measurement of accessibility : some preliminary results. *Transportation*, 5(1) :17–42.
- Damm, D. (1980). *Interdependencies in activity behavior*. Number 750 in 1. Transportation Research Board.
- Damm, D. (1982). Parameters of activity behavior for use in travel analysis. *Transportation Research Part A : General*, 16(2) :135–148.
- Dekker, T., Hess, S., Arentze, T., and Chorus, C. (2014). Incorporating needs-satisfaction in a discrete choice model of leisure activities. *Journal of Transport Geography*, 38 :66–74.
- Del Mondo, G. (2011). *Un modèle de graphe spatio-temporel pour représenter l'évolution d'entités géographiques*. PhD thesis, Doctoral dissertation, Université de Bretagne occidentale-Brest.
- Derrible, S. and Kennedy, C. (2009). Network analysis of world subway systems using updated graph theory. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2112) :17–25.
- Dhouieb, M. A. (2016). *Structuration multi-échelle de la connaissance in-extenso d'entreprise*. PhD thesis, Université de Nantes Angers Le Mans.
- Dhuieb, M. A., Laroche, F., Belkadi, F., and Bernard, A. (2015). Activity theory based context model : application for enterprise intelligent assistant systems. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3) :834–839.
- Dial, R. B. (1979). A model and algorithm for multicriteria route-mode choice. *Transportation Research Part B : Methodological*, 13(4) :311–316.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1) :269–271.
- Dill, J. and Gliebe, J. (2008). Understanding and measuring bicycling behavior : A focus on travel time and route choice.
- Dilo, A. (2006). Representation of and reasoning with vagueness in spatial information : A system for handling vague objects. *Enschede : ITC*.
- Dimitrakopoulos, G. and Demestichas, P. (2010). Intelligent transportation systems. *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, 5(1) :77–84.
- Dittrich, A. and Lucas, C. (2014). Is this twitter event a disaster ?

- Doherty, S. T. and Miller, E. J. (2000). A computerized household activity scheduling survey. *Transportation*, 27(1) :75–97.
- Domingo, M., Thibaud, R., and Claramunt, C. (2013). A graph-based model for the representation of land spaces. In *In Proceedings of the 21st ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems ACM.*, pages 516–519.
- Du Mouza, C. and Rigaux, P. (2005). Mobility patterns. *GeoInformatica*, 9(4) :297–319.
- Duncan, M. and Mummery, K. (2005). Psychosocial and environmental factors associated with physical activity among city dwellers in regional queensland. *Preventive medicine*, 40(4) :363–372.
- Dupuy, G. (1991). L'urbanisme des réseaux, théories et méthodes. *Edition Armand colin*.
- Dyreson, C., Snodgrass, R., and Freiman, M. (1995). Efficiently supporting temporal granularities in a dbms. *Technical Report*.
- Dyreson, C. E., Evans, W. S., Lin, H., and Snodgrass, R. T. (2000). Efficiently supporting temporal granularities. *Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on*, 12(4) :568–587.
- Easterfield, J., Newell, G., and Theriault, D. (1991). Modeling spatial and temporal information. In *In European Conference on GIS (EGIS) Brussels.*, pages 294–304.
- Edwards, D. and Griffin, T. (2013). Understanding tourists'spatial behaviour : Gps tracking as an aid to sustainable destination management. *Journal of Sustainable Tourism*, 21(4) :580–595.
- Egenhofer, M. J. (1989). A formal definition of binary topological relationships. In *Foundations of data organization and algorithms Springer Berlin Heidelberg.*, pages 457–472.
- Egenhofer, M. J. (1993). Definitions of line-line relations for geographic databases. *IEEE Data Eng. Bull.*, 16(3) :40–45.
- Egenhofer, M. J. and Mark, D. M. (1995). Modelling conceptual neighbourhoods of topological line-region relations. *International journal of geographical information systems*, 9(5) :555–565.
- ElBanhawy, E. Y., Dalton, R., and Nassar, K. (2013). Integrating space-syntax and discrete-event simulation for e-mobility analysis. In *American Society of Civil Engineers*, volume 1, pages 934–945.
- Engeström, Y. (2001). Expansive learning at work : Toward an activity theoretical reconceptualization. *Journal of education and work*, 14(1) :133–156.
- Faust, N. L., ANDERSON, W. H., and Star, J. L. (1991). Geographic information systems and remote sensing future computing environment. In *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, volume 57, pages 655–668.

- Fayyad, U., P.-S. G. S. P. (1996). From data mining to knowledge discovery in databases. *AI magazine*, 17(3).
- Fernández, E., De Cea, J., Florian, M., and Cabrera, E. (1994). Network equilibrium models with combined modes. *Transportation Science*, 28(3) :182–192.
- Fiorenzo-Catalano, M. S. (2007). *Choice set generation in multi-modal transportation networks*. TU Delft, Delft University of Technology.
- Flores, D. L. and Lozano, A. (2014). Advances in the construction of a time dependent multimodal hypergraph with real time information. *Recent advances in Theory, Methods and Practice of Operations Research*, pages 160–167.
- Florian, M., Wu, J. H., and He, S. (2002). A multi-class multi-mode variable demand network equilibrium model with hierarchical logit structures. In *Transportation and network analysis : Current trends*, pages 119–133. Springer.
- Forsyth, A., Schmitz, K. H., Oakes, M., Zimmerman, J., and Koeppe, J. (2006). Standards for environmental measurement using gis : toward a protocol for protocols. *Journal of Physical Activity & Health*, 3 :S241.
- Fotheringham, S. and Rogerson, P. (2013). *Spatial analysis and gis*. CRC Press.
- Frank, A. U. (2000). Geographic information science : new methods and technology. . *Journal of Geographical Systems*, 2(1) :99–105.
- Frankhauser, P. (2005). La morphologie des tissus urbains et périurbains à travers une lecture fractale. *Revue Géographique de l'Est*, 45 :3–4.
- Freeman, L. C. (1977). A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, pages 35–41.
- Frihida, A., Marceau, D. J., and Thériault, M. (2004). Development of a temporal extension to query travel behavior time paths using an object-oriented gis. *GeoInformatica*, 8(3) :211–235.
- Fu, X. and Lam, W. H. (2014). A network equilibrium approach for modelling activity-travel pattern scheduling problems in multi-modal transit networks with uncertainty. *Transportation*, 41(1) :37–55.
- Fuchs, G., Andrienko, G., Andrienko, N., and Jankowski, P. (2013). Extracting personal behavioral patterns from geo-referenced tweets.
- Gao, M., Zhu, T., Wan, X., and Wang, Q. (2013). Analysis of travel time patterns in urban using taxi gps data. In *Green Computing and Communications (GreenCom), 2013 IEEE and Internet of Things (iThings/CPSCoM), IEEE International Conference on and IEEE Cyber, Physical and Social Computing*, pages 512–517. IEEE.

- Gates TJ., Noyce DA., B. A. V. E. N. (2006). Recommended walking speeds for pedestrian clearance timing based on pedestrian characteristics. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, pages 38–47.
- Gelfond, M., L. N. (2002). Logic programming and knowledge representation the a-prolog perspective. *Artificial Intelligence*,, 138(1) :3–38.
- Geurs, K. T. and Van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies : review and research directions. *Journal of Transport geography*, 12(2) :127–140.
- Girres, J.-F. and Touya, G. (2010). Quality assessment of the french openstreetmap dataset. *Transactions in GIS*, 14(4) :435–459.
- Gómez-Pérez, A. and Benjamins, R. (1999). Overview of knowledge sharing and reuse components : Ontologies and problem-solving methods. In *Proceedings of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'99) Workshop KRR5 : Ontologies and Problem-Solving Methods : Lesson Learned and Future Trends*. IJCAI and the Scandinavian AI Societies. CEUR Workshop Proceedings.
- Gospodini, A. (2001). Urban design, urban space morphology, urban tourism : an emerging new paradigm concerning their relationship. *European Planning Studies*, 9(7) :925–934.
- Grotenhuis, J.-W., Wiegmans, B. W., and Rietveld, P. (2007). The desired quality of integrated multimodal travel information in public transport : Customer needs for time and effort savings. *Transport Policy*, 14(1) :27–38.
- Gruber, T. R. et al. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge acquisition*, 5(2) :199–220.
- Gu, T., Wang, X. H., Pung, H. K., and Zhang, D. Q. (2004). An ontology-based context model in intelligent environments. In *Proceedings of communication networks and distributed systems modeling and simulation conference*, volume 2004, pages 270–275. San Diego, CA, USA.
- Gyorodi, C., G. R. H. S. (2004). A comparative study of association rules mining algorithms. In *SACI 2004, 1st Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence*, pages 213–222.
- Haddon, L. (2004). *Information and communication technologies in everyday life : A concise introduction and research guide*. Berg Oxford.
- Hagerstrand, T. (1976). Geography and the study of interaction between nature and society. *geoforum*, 7 :329–334.
- Haggett, P. (1965). Locational analysis in human geography,. In *London : Edward Arnold*.

- Haklay, M. (2010). How good is volunteered geographical information ? a comparative study of openstreetmap and ordnance survey datasets. *Environment and planning B : Planning and design*, 37(4) :682–703.
- Hamilton, A., Wang, H., Tanyer, A. M., Arayici, Y., Zhang, X., and Song, Y. (2005). Urban information model for city planning. *Journal of Information Technology in Construction (ITCon)*, 10 :55–67.
- Han, J., Pei, J., Mortazavi-Asl, B., Pinto, H., Chen, Q., Dayal, U., and Hsu, M. (2001). Prefixspan : Mining sequential patterns efficiently by prefix-projected pattern growth. In *proceedings of the 17th international conference on data engineering*, pages 215–224.
- Han, J., P. J. Y. Y. (2000). Mining frequent patterns without candidate generation. In *ACM Sigmod Record ACM.*, 29(2) :1–12.
- Hannerz, U. (1983). Explorer la ville. In *Éléments d'anthropologie urbaine, Paris, Minuit.*
- Hanson, J. (1998). Decoding homes and houses. *Cambridge University Press, Cambridge.*
- Harris, C. and Ullman, E. (1945). The nature of cities. *Annals of the American Academy of Political and Social Science*, 242 :7–17.
- Hart, P. E., Nilsson, N. J., and Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2) :100–107.
- Hayes-Roth, B. and Hayes-Roth, F. (1979). A cognitive model of planning. *Cognitive science*, 3(4) :275–310.
- Hillier, B. (1996). Space is the machine : a configurational theory of architecture,. *Cambridge University Press, Cambridge.*
- Hillier, B. (1999). The hidden geometry of deformed grids : or, why space syntax works, when it looks as though it shouldn't,. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 26 :169–191.
- Hillier, B. and Hanson, J. (1984). The social logic of space. *Cambridge university press.*
- Hoogendoorn-Lanser S., van Nes R., B. P. (2005). Path size modeling in multimodal route choice analysis. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board (1921)*, pages 27–34.
- Hoyt, H. (1939). The structure and growth of residential neighborhoods in american cities. *Federal Highway Administration.*
- Hu, M.-B., Jiang, R., Wu, Y.-H., Wang, W.-X., and Wu, Q.-S. (2008). Urban traffic from the perspective of dual graph. *The European Physical Journal B*, 63(1) :127–133.
- Huang, H.-J. and Li, Z.-C. (2007). A multiclass, multicriteria logit-based traffic equilibrium assignment model under atis. *European Journal of Operational Research*, 176(3) :1464–1477.

- Ingram, D. R. (1971). The concept of accessibility : a search for an operational form. *Regional studies*, 5(2) :101–107.
- Janic, M. (2007). Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 12(1) :33–44.
- Janin, E. (2009). La ville sous l'œil du géographe. *Cahier Philosophie*, pages 87–105.
- Jensen, C. S., Clifford, J., Elmasri, R., Gadia, S. K., Hayes, P. J., and Jajodia, S. (1994). A consensus glossary of temporal database concepts. In *SIGMOD Record*, volume 23, pages 52–64.
- Jiang, B. (1999). Simped : simulating pedestrian flows in a virtual urban environment. *Journal of geographic information and decision analysis*, 3(1) :21–30.
- Jiang, B. (2007). A topological pattern of urban street networks : universality and peculiarity. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 384(2) :647–655.
- Jiang, B. and Claramunt, C. (2004a). A structural approach to the model generalization of an urban street network. *GeoInformatica*, 8(2) :157–171.
- Jiang, B. and Claramunt, C. (2004b). Topological analysis of urban street networks. *Environment and Planning B*, 31(1) :151–162.
- Jiang, B., Claramunt, C., and Klarqvist, B. (2000). Integration of space syntax into gis for modelling urban spaces. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2(3) :161–171.
- Joerin, F., Thériault, M., Villeneuve, P., and BEGIN, F. (2001). Une procédure multicritère pour évaluer l'accessibilité aux lieux d'activité. *Revue internationale de géomatique*, 11(1) :69–104.
- Jones, Q. (2008). System and method for synchronous recommendations of social interaction spaces to individuals. *U.S. Patent Application*, 256(12) :84.
- Jun, C., Kwon, J. H., Choi, Y., and Lee, I. (2007). An alternative measure of public transport accessibility based on space syntax. In *Advances in Hybrid Information Technology Springer Berlin Heidelberg*, (281–291).
- Kang, H. and Scott, D. M. (2008). An integrated spatio-temporal gis toolkit for exploring intra-household interactions. *Transportation*, 35(2) :253–268.
- Kitazawa, K. and Batty, M. (2004). Pedestrian behaviour modelling. *An Application to Retail Movements using a Genetic Algorithm. Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London*.
- Klosgen, W., Z. J. (1996). Knowledge discovery in databases terminology. *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, pages 573–592.

- Knox, P. and Pinch, S. (2014). *Urban social geography : an introduction*. Routledge.
- Kofod-Petersen, A. and Cassens, J. (2006). Using activity theory to model context awareness. In *Modeling and Retrieval of Context*, pages 1–17. Springer.
- Kohavi, R., Q. J. R. (2002). Data mining tasks and methods : Classification : decision-tree discovery. In *Handbook of data mining and knowledge discovery Oxford University Press, Inc.*, pages 267–276.
- Kozulin, A. (1986). The concept of activity in soviet psychology : Vygotsky, his disciples and critics. *American psychologist*, 41(3) :264.
- Kuutti, K. (1996). Activity theory as a potential framework for human-computer interaction research. *Context and consciousness : Activity theory and human-computer interaction*, pages 17–44.
- Kwan, M.-P. (1999). Gender, the home-work link, and space-time patterns of nonemployment activities. *Economic geography*, 75(4) :370–394.
- Kwan, M.-P. (2000). Gender differences in space-time constraints. *Area*, 32(2) :145–156.
- Landers, T. (1992). System for automatically and transparently mapping rules and objects from a stable storage database management system within a forward chaining or backward chaining inference cycle. *U.S. Patent*, 136(5) :523.
- Lauther, U. (2004). An extremely fast, exact algorithm for finding shortest paths in static networks with geographical background. *Geoinformation und Mobilitvon der Forschung zur praktischen Anwendung*, 22 :219–230.
- Law, S., Chiaradia, A., and Schwander, C. (2012). Towards a multimodal space syntax analysis : A case study of the london street and underground network. In *Published in Proceedings of the 8th International Space Syntax Symposium, Santiago de Chile, Chile*, pages 3–6.
- Letesson, Q. (2009). Du phénotype au génotype : analyse de la syntaxe spatiale en architecture minoenne (mmiiib-mrib). *Presses univ. de Louvain.*, 2.
- Leung, I. X., Chan, S.-Y., Hui, P., and Lio, P. (2011). Intra-city urban network and traffic flow analysis from gps mobility trace. *arXiv preprint arXiv*.
- Li, Y., Xiao, L., Ye, Y., Xu, W., and Law, A. (2016). Understanding tourist space at a historic site through space syntax analysis : The case of gulangyu, china. *Tourism Management*, 52 :30–43.
- Li, Z. C., Lam, W., Wong, S., Zhu, D. L., and Huang, H. J. (2007). Modeling park-and-ride services in a multimodal transport network with elastic demand. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board 1994*, pages 101–109.

- Li, Z.-C., Lam, W. H., Wong, S., and Sumalee, A. (2010). An activity-based approach for scheduling multimodal transit services. *Transportation*, 37(5) :751–774.
- Liao, F., Arentze, T., and Timmermans, H. (2012). Supernetwork approach for modeling traveler response to park-and-ride. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (23) :10–17.
- Liao, F., Arentze, T., and Timmermans, H. (2014). Multi-state supernetworks : recent progress and prospects. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 1(1) :13–27.
- Ligtenberg, A., Wachowicz, M., Bregt, A. K., Beulens, A., and Kettenis, D. L. (2004). A design and application of a multi-agent system for simulation of multi-actor spatial planning. *Journal of Environmental Management*, 72(1) :43–55.
- Lipperman-Kreda, S., Morrison, C., Grube, J. W., and Gaidus, A. (2015). Youth activity spaces and daily exposure to tobacco outlets. *Health & place*, 34 :30–33.
- Lloyd, S. P. (1982). Least squares quantization in pcm. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 28(2) :129–137.
- Lorenz, B., Ohlbach, H. J., and Yang, L. (2005). Ontology of transportation networks. *Physical review*.
- Lozano, A. and Storchi, G. (2002). Shortest viable hyperpath in multimodal networks. *Transportation Research Part B : Methodological*, 36(10) :853–874.
- Luo, W. and Wang, F. (2003). Measures of spatial accessibility to health care in a gis environment : synthesis and a case study in the chicago region. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 30(6) :865–884.
- Lynch, K. (1960). *The image of the city*, volume 11. MIT press.
- Ma, T.-y. and Lebacque, J.-p. (2007). A multi-agent approach to dynamic traffic assignment based on activity.
- Macharis, C., De Witte, A., and Ampe, J. (2009). The multi-actor, multi-criteria analysis methodology (mamca) for the evaluation of transport projects : Theory and practice. *Journal of Advanced transportation*, 43(2) :183–202.
- Mackanness, W. A. and Beard, K. M. (1993). Use of graph theory to support map generalization. *Cartography and Geographic Information Systems*, 20(4) :210–221.
- Manheim, M. L. (1979). Fundamentals of transportation systems analysis. *Volume 1 : Basic concepts*.
- Marilleau, N. (2005). An agent based meta-model for urban mobility modeling. In , *Proceedings of the First International Conference on Distributed Frameworks for Multimedia Applications*.

- McNally, M. and Rindt, C. (2008). The activity-based approach. handbook of transportation modeling.
- Mendelson, E. (1964). Introduction to mathematical logic van nostrand-reinhold. *New York*.
- Meng, M., Shao, C., Wong, Y. D., and Zhang, J. (2014). A multiclass, multimodal dynamic traffic assignment model with departure time. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.
- Menghini, G., Carrasco, N., Schüssler, N., and Axhausen, K. W. (2010). Route choice of cyclists in zurich. *Transportation research part A : policy and practice*, 44(9) :754–765.
- Mérenne, E. and Bouvry, S. (1995). *Géographie des transports*. Nathan.
- Miller, H. J. (1991). Modelling accessibility using space-time prism concepts within geographical information systems. *International Journal of Geographical Information System*, 5(3) :287–301.
- Miller, H. J. (2005). A measurement theory for time geography. *Geographical analysis*, 37(1) :17–45.
- Mitchell, R. and Rapkin, C. (1954). Urban traffic : A function of land use, new york. *Columbia University Press*.
- Moens, M. and Steedman, M. (1988). Temporal ontology and temporal reference. *Computational linguistics*, 14(2) :15–28.
- Morrison, J. L. (1978). Towards a functional definition of the science of cartography with emphasis on map reading. *The American Cartographer*, 5(2) :97–110.
- Moustakas, C. (1990). Heuristic research : Design, methodology, and applications. *Sage Publications*.
- Neutens T., S. T. and F., W. (2011). The prism of everyday life : towards a new research agenda for time geography. *Transport Reviews*, 31(1) :25–47.
- Nguyen, Q. T. (2015). *Plate-forme de simulation pour l'aide à la décision : application à la régulation des systèmes de transport urbain*. PhD thesis, Université de La Rochelle.
- Nguyen, Q. T., Bouju, A., and Estraillier, P. (2012). Multi-agent architecture with space-time components for the simulation of urban transportation systems. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54 :365–374.
- Nguyen, S. and Pallottino, S. (1989). Hyperpaths and shortest hyperpaths. In *Combinatorial Optimization*, pages 258–271. Springer.
- Nuzzolo, A. (2002). Transit path choice and assignment model approaches. *Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning*, pages 93–124.

- Ouyang, L., Lam, W., Li, Z., and Huang, D. (2011). Network user equilibrium model for scheduling daily activity travel patterns in congested networks. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2254) :131–139.
- Pan, F. (2005). Temporal aggregates for web services on the semantic web. In *ICWS*, pages 831–832.
- Papadias, D., Sellis, T., Theodoridis, Y., and Egenhofer, M. J. (1995). *Topological relations in the world of minimum bounding rectangles : a study with R-trees*, volume 24. ACM.
- Papadimitriou, C. H. and Steiglitz, K. (1982). *Combinatorial optimization : algorithms and complexity*. Courier Corporation.
- Parent, C., Spaccapietra, S., Renso, C., Andrienko, G., Andrienko, N., Bogorny, V., Damiani, M. L., Gkoulalas-Divanis, A., Macedo, J., Pelekis, N., et al. (2013). Semantic trajectories modeling and analysis. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 45(4) :42.
- Park, R., Burgess, E., and D.M., R. (1925). *The city*. Chicago : University of Chicago Press.
- Penn, A., Hillier, B., Banister, D., and Xu, J. (1998). Configurational modelling of urban movement networks. *Environment and Planning B-Planning & Design*, 25(1) :59–84.
- Pietilä, M., Neuvonen, M., Borodulin, K., Korpela, K., Sievänen, T., and Tyrväinen, L. (2015). Relationships between exposure to urban green spaces, physical activity and self-rated health. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 10 :44–54.
- Pohl, I. (1970). Heuristic search viewed as path finding in a graph. *Artificial Intelligence*, 1(3-4) :193–204.
- Porta, S., Crucitti, P., and Latora, V. (2006). The network analysis of urban streets : a primal approach. *ENVIRONMENT AND PLANNING B PLANNING AND DESIGN*, 33(5) :705.
- Porta, S., Latora, V., Wang, F., Rueda, S., Strano, E., Scellato, S., Cardillo, A., Belli, E., Cardenas, F., Cormenzana, B., et al. (2012). Street centrality and the location of economic activities in barcelona. *Urban Studies*, 49(7) :1471–1488.
- Prévil, C., Thériault, M., and Rouffignat, J. (2003). Analyse multicritère et sig pour faciliter la concertation en aménagement du territoire : vers une amélioration du processus décisionnel. *Cahiers de géographie du Québec*, 47(130) :35–61.
- Pullar, D. and Egenhofer, M. (1988). Toward formal definitions of topological relations among spatial objects. In *In Proceedings of the Third International Symposium on Spatial Data Handling Columbus : International Geographical Union.*, volume 225, page 42.

- Ramadurai, G. and Ukkusuri, S. (2010). Dynamic user equilibrium model for combined activity-travel choices using activity-travel supernetwork representation. *Networks and Spatial Economics*, 10(2) :273–292.
- Randell, D., Cui, Z., and Cohn, A. G. (1992). A spatial logic based on regions and connection. *KR*, 92 :165–176.
- Rao, D. V. T., Bhardwaj, A., and Roa, C. V. S. (2003). Intelligent transportation system (its) : A technology solution for 21st century public transport system management. *CSI BIG*.
- Ratti, C. (2004). Urban texture and space syntax : some inconsistencies. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 31(4) :487–499.
- Raza, A. (2001). Object-oriented temporal gis for urban applications. Master's thesis, Rapport de thèse de doctorat, University of Twente and ITC.
- Recker, W. W., McNally, M. G., and Root, G. (1986). A model of complex travel behavior : Part i theoretical development. *Transportation Research Part A : General*, 20(4) :307–318.
- Recker W. W., McNally M. G., . R. G. S. (1986). A model of complex travel behavior : Part i theoretical development. *Transportation Research Part A : General*, 20(4) :307–318.
- Reichman, S. (1976). Travel adjustments and life styles : a behavioral approach. *Behavioral travel-demand models*, pages 143–152.
- Remy, J. and Voye, L. (1992). La ville : vers une nouvelle définition ? *Editions L'Harmattan*.
- Ricci, F. (2002). Travel recommender systems. *IEEE Intelligent Systems*, 17(6) :55–57.
- Saad, S. (2010). Conception et optimisation distribuée d'un système d'information des services d'aide à la mobilité urbaine basé sur une ontologie flexible dans le domaine de transport. Master's thesis, Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lille.
- Saade, M. (1982). Structuration de processus et simulation : application aux transports urbains. Master's thesis, Doctoral dissertation.
- Santos, J. and Staab, S. (2003). Engineering a complex ontology with time. *In IJCAI*, pages 1406–1407.
- Scholl, A. and Becker, C. (2006). State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3) :666–693.
- Schreiber, F. A. (1994). Is time a real time ? an overview of time ontology in informatics. In *In In Real Time Computing SpringerVerlag*, pages 283–307.

- Sen, P., Dasgupta, S., Chatterjee, A., Sreeram, P. A., Mukherjee, G., and Manna, S. S. (2003). Small-world properties of the indian railway network. *Physical Review E*, 67(3) :036–106.
- Sharma, J. (1996). Integrated spatial reasoning in geographic information systems : combining topology and direction. Master's thesis, Thèse de doctorat, Université technique de Vienne.
- Shaw, S.-L. and Yu, H. (2009). A gis-based time-geographic approach of studying individual activities and interactions in a hybrid physical-virtual space. *Journal of Transport Geography*, 17(2) :141–149.
- Shaw S. L., Y. H. (2009). A gis based time geographic approach of studying individual activities and interactions in a hybrid physical virtual space. *Journal of Transport Geography*.
- Sheffi, Y. (1985). Urban transportation networks : Equilibrium analysis with mathematical programming methods.
- Shen, Q. (1998). Location characteristics of inner-city neighborhoods and employment accessibility of low-wage workers. *Environment and planning B : Planning and Design*, 25(3) :345–365.
- Sienkiewicz, J. and Hołyst, J. A. (2005a). Statistical analysis of 22 public transport networks in poland. *Physical Review E*, 72(4) :046127.
- Sienkiewicz, J. and Hołyst, J. A. (2005b). Statistical analysis of 22 public transport networks in poland. *Physical Review E*, 72(4) :046127.
- Sondgrass, R. and Ahn, I. (1985). A taxonomy of time in databases. In *In Proceedings of the 1985 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*.
- Sowa, J. F. (2000). Knowledge representation : logical, philosophical, and computational foundations. *Pacific Grove, CA, Brooks/Cole*, 594.
- Spaccapietra, S., Parent, C., Damiani, M. L., de Macedo, J. A., Porto, F., and Vangenot, C. (2008). A conceptual view on trajectories. *Data & knowledge engineering*, 65(1) :126–146.
- Stadler, M. A. (1989). On learning complex procedural knowledge. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 15(6) :10–61.
- Taniguchi, E., Yamada, T., and Tamagawa, D. (1999). Probabilistic vehicle routing and scheduling on variable travel times with dynamic traffic simulation. In *INTERNATIONAL CONFERENCE ON CITY LOGISTICS, IST, 1999, CAIRNS, QUEENSLAND, AUSTRALIA*.
- Tarjan, R. (1972). Depth-first search and linear graph algorithms. *SIAM journal on computing*, 1(2) :146–160.
- Teklenburg, J., Timmermans, H., and Van Wagenberg, A. (1993). Space syntax : Standardised integration measures and some simulations. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 20(3) :347–357.

- Tonguz, O. K., Viriyasitavat, W., and Bai, F. (2009). Modeling urban traffic : a cellular automata approach. *Communications Magazine, IEEE*, 47(5) :142–150.
- Van Dusen, F. L. (1960). Impartial medical expert system. *The Judicial Point of View*.
- Van Nes, A. (2005). Spatial conditions for a typology of shopping areas. In *Proceedings of the 3rd International Space Syntax Symposium, Atlanta*.
- Van Nes, A. and Stolk, E. (2012). Degrees of sustainable location of railway stations : Integrating space syntax and node place value model on railway stations in the province of north holland's strategic plan for 2010-2040. In *Proceedings of the 8th International Space Syntax Symposium*. PUC.
- Van Nes, R. (2002). *Design of multimodal transport networks : A hierarchical approach*. TU Delft, Delft University of Technology.
- Van Wee, B., Hagoort, M., and Annema, J. A. (2001). Accessibility measures with competition. *Journal of transport geography*, 9(3) :199–208.
- Vaultier, E. (2010). Vers une mobilité généralisée en haute normandie en 2050,. *disponible sur <http://www.cesdefrance.fr/pdf/10326.pdf>*.
- Vickerman, R. W. (1974). Accessibility, attraction, and potential : a review of some concepts and their use in determining mobility. *Environment and Planning A*, 6(6) :675–691.
- Vygotsky, L. S. (1967). Play and its role in the mental development of the child. *Soviet psychology*, 5(3) :6–18.
- Wakamiya, S., Belouaer, L., Brosset, D., Lee, R., Kawai, Y., Sumiya, K., and Claramunt, C. (2015). Measuring crowd mood in city space through twitter. In *International Symposium on Web and Wireless Geographical Information Systems*, pages 37–49. Springer.
- Wakamiya, S., Lee, R., and Sumiya, K. (2012). Looking into socio-cognitive relations between urban areas based on crowd movements monitoring with twitter. *Information and Media Technologies*, 7(4) :1571–1576.
- Weiser, M. (1991). The computer for the 21st century. *Scientific american*, 265(3) :94–104.
- Whiteley, W. (1989). A matroid on hypergraphs, with applications in scene analysis and geometry. *Discrete & Computational Geometry*, 4(1) :75–95.
- Wolfram, S. (1983). Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of modern physics*, 55(3) :601.
- Worboys, M. F. (1990). Reasoning about gis using temporal and dynamic logics. In *In Temporal GIS Workshop*. University of Maine.

- Xing, E. P., N. A. Y. J. M. I. R. S. (2003). Distance metric learning with application to clustering with side-information. *Advances in neural information processing systems*, 15 :505–5012.
- Y., M. T. and P., L. J. (2007). A multi-agent approach to dynamic traffic assignment based on activity. *National Institute for Transport and Safety Research*.
- Yang, Q. and Koutsopoulos, H. N. (1996). A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 4(3) :113–129.
- Yao, S., Loo, B. P., and Lam, W. W. (2015). Measures of activity-based pedestrian exposure to the risk of vehicle-pedestrian collisions : Space-time path vs. potential path tree methods. *Accident Analysis & Prevention*, 75 :320–332.
- Zaki, M. J. (2001). Spade : An efficient algorithm for mining frequent sequences. *Machine learning*, 42(1-2) :31–60.
- Zgaya, H. (2007). Conception et optimisation distribuée d'un système d'information d'aide à la mobilité urbaine : Une approche multi-agent pour la recherche et la composition des services liés au transport. Master's thesis, PhD thesis, Ecole centrale de Lille.
- Zgaya, H., Hammadi, S., and Ghedira, K. (2005). Evolutionary method to optimize workplan mobile agent for the transport network application. In *2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, volume 2, pages 1174–1179. IEEE.
- Zhang, J., Ma, Z., and Yang, C. (1995). A column generation method for inverse shortest path problems. *Zeitschrift für Operations Research*, 41(3) :347–358.
- Zhang, W., Yang, J., Ma, L., and Huang, C. (2015). Factors affecting the use of urban green spaces for physical activities : Views of young urban residents in beijing. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(4) :851–857.

Annexes

Annexe A

Construction de super-réseau

Les données OSM sont stockées dans une base de données relationnelle Postgres/Postgis. Le premier traitement effectué sur ces données consiste à créer des réseaux mono-modaux associés à chaque mode de transport. Nous procédons par la suite à la construction de super-réseau par la création des liens d'interdépendance entre les différents réseaux mono-modaux.

A.1 Réseaux mono-modaux

La création des intersections des rues utilisées pour la création de réseaux piétonniers et le réseau de transport routier motorisé.

```
create table IntersectionsRues as
select rue1."nomrue" as nom1,rue2."nomrue",rue1."idrue" as gid1, rue2."idrue",
rue1."the_geomRue" as geom1 , rue2."the_geomRoad" as geom2,
ST_Intersection(rue1."the_geomRue", rue2."the_geomRoad")
from rueville rue1,rueville rue2
where ST_Intersects (rue1."the_geomRue", rue2."the_geomRoad"))
```

- La localisation de chaque intersection sur la rue pour pouvoir créer des connexions entre les intersections successives.

```

create table intersectionposition as
select intersectiongeom,nomrue,typerue,
ST_Line_Locate_Point("intersectionpoint".ruegeom," intersectionpoint ".pointgeom) as
position from intersectionpoint
select *,rank() over (partition by idrue order by geompoint,position) from intersection
where ST_intersects(lignegeom, pointgeom);

```

- Les intersections ordonnées sont par la suite explorées par un curseur écrit en Plpgsql. Le curseur est un mécanisme de mise en mémoire en tampon permettant de parcourir les lignes d'enregistrements du résultat renvoyé par une requête. Il consiste dans notre cas à créer des liens entre deux intersections qui se positionnent successivement dans la même rue.

```

CREATE FUNCTION curseurgraph() RETURNS void AS
Declare
curs cursor for select * from intersectionordonnées ;
ordreprev integer ;
ordre integer ;
intersectiongeom geometry(point) ;
intersectionprev geometry(point) ;
ruegeom geometry(linestring) ;
ruegeomprev geometry(linestring) ;
orientation integer ;
ligne intersectionordre
BEGIN
open curs ;
fetch curs into ligne ;
ordreprev :=ligne.ordreintersection ;
intersectionprev :=ligne.intersectiongeom ;
ruegeomprev :=ligne.ruegeom ;
loop
fetch next from curs into ligne ;
ordre :=ligne. ordreintersection ;
intersectiongeom := ligne.intersectiongeom ;
ruegeom := ligne.ruegeom ;
orientation :=ligne.oneway ;
if (ordre !=1 and ST_equals(ruegeom, ruegeomprev)) then
insert into segments(source,target,ligne,orientation,vitesse) values (intersectiongeom,

```

```

intersectionprev,ruegeom,orientation,vitesse) ;
end if ;
ruegeomprev := ruegeom ;
ordreprev :=ordre ;
intersectionprev := intersectiongeom
EXIT WHEN NOT FOUND ;
end LOOP ;
END ;
LANGUAGE plpgsql ;

```

A.2 Création de super-réseau

La création de super-réseau consiste à connecter les différents sous-réseaux créés dans la section précédente.

- L'interconnexion entre les différents réseaux est assuré par la projection de tous les points de transfert modal sur le réseau piétonnier.
- L'accessibilité aux POIs est assurée par la rues la plus proche. Chaque POI est projeté sur la rue la plus proche (distance minimale).

```

select pois.*, ReseauPieton.*, ST_Distance(pois.geom, ReseauPieton.geom) from ReseauPieton, pois
order by pois.gid,ST_Distance(pois.the_geom, ReseauPieton.geom)

```

- Le segment d'une rue connectant un point de transfert et un réseau piétonnier est effectué par cette fonction :

```

CREATE OR REPLACE FUNCTION ExtraireLigneEntreDeuxPoints(geom geometry,
point1 geometry, point2 geometry)
RETURNS geometry AS
DECLARE
d1 double precision ;
d2 double precision ;
projet1 geometry ;
projet2 geometry ;
segment geometry(linestring) ;
BEGIN
projet1 := ST_ClosestPoint(geom,point1) ;

```

```
        projet2 := ST_ClosestPoint(geom,point2) ;
d1 :=ST_LineLocatePoint(geom, projet1) ;
d2 :=ST_LineLocatePoint(geom, projet2) ;
IF d1 < d2 THEN
        RETURN ST_LineSubstring(geom, d1, d2
ELSE
        RETURN ST_LineSubstring(geom, d2, d1) ;
END IF ;
END ;
$BODY$
LANGUAGE PLPGSQL ;
```

Annexe B

Code de génération d'itinéraire

L'algorithme proposé dans le chapitre 4 a été implémenté en Java. Le code de la méthode ExploreReseau() et le code de la méthode meilleurcheminAstar() sont représentés par la suite :

```
void ExploreReseau(Integer o, Integer dist, int position, float dureeactivite) {
Trajectoire trajet ;
float dureechemin ;
float dureevisitePOI ;
if (position >= taillList) {
trajet = road.meilleurcheminAstar(o,dist) ;
if (trajet !=null)
{dureechemin=trajet.getcout() ;
dureeactivite=dureeactivite+dureechemin ;
nbretrajec++ ;
}
if (dureeactivite<=dureeActivmax)
{
ITineraire itin = new ITineraire(itineraire) ;
try {
for (int v=0 ;v<itin.getItin().size() ;v++)
{ Integer nd=itin.getItin().get(v) ;
String requete_creation = "insert into reseauactivite"+version+
values("+g+", "+nbretrajec+", "+nd+")" ;
state.executeUpdate(requete_creation) ;
```

```
}
}
catch (Exception e) {
e.printStackTrace();}
g++;
reseauacti.add(itin);
}
}
else if (position<taillList)
{
ResultSet result;
String typepoi=activite.get(position);
if (typepoi.equals("magasin"))
{
for(int d=0 ;d<tabpoimagasin.size() ;d++)
{
Node p=(Node)tabpoimagasin.get(d);
dureevisitePOI=p.getdureeVisite();
int poi=p.getId();
traject = meilleurcheminAstar(o,poi);
if (traject !=null)
{nbretrajec++;
dureechemin=traject.getcout();
ExploreReseau(poi,dist,position+1,dureeactivite+dureechemin+dureevisitePOI);
}
}
else{System.out.print("passerel introuvable");}
}}
else if (typepoi.equals("restaurant"))
{
for(int d=0 ;d<tabpoirestaurant.size() ;d++)
{
Node p=(Node)tabpoirestaurant.get(d);
dureevisitePOI=p.getdureeVisite();
int poi=p.getId();
traject = meilleurcheminAstar(o,poi);
if (traject !=null)
```



```

{ nbretrajec++ ;
dureechemin=traject.getcout() ;
ExploreReseau(poi,dist,position+1,dureeactivite+dureechemin+dureevisitePOI) ;
}
else{System.out.print("passerel introuvable") ;}
}
}}
end{verbatim}
Trajectoire meilleurcheminAstar(Integer origin, Integer destination)
{
double coutg = 0 ;
double couth ;
double coutf=0 ;
Trajectoire traj=null ;
DateTime tarrv=temdepart ;
ArrayList<String> Listefermee=new ArrayList<String>() ;
ArrayList<MembreLO> Listeouvert=new ArrayList<MembreLO>() ;
MembreLO courantmem=new MembreLO(origin.getId(),coutf,null) ;
Listeouvert.add(courantmem) ;
String courant=courantmem.getNode() ;
Listeouvert.remove(courantmem) ;
boolean arriv=false ;
double dureeexpl=0 ;
Listefermee.add(courant) ;
while (arriv==false)
{
if (courant.equals(destination.getOSM_id())==false)
{ System.out.println("le noeud courant est"+courant) ;
ArrayList<String> voisincourant=new ArrayList<String>() ;
dureevisitePOI=30 ;
MembreLO minnode=null ;
for(int y=0 ;y<mes_rues.size() ;y++)
{
Rue r=(Rue)mes_rues.get(y) ;
String idRue = r.getSource() ;
Boolean xx = idRue.equals(courant) ;

```

```
if (mes_rues.get(y).getSource().equals(courant)==true)
{
String voisi=r.getTarget() ;
voisincourant.add(voisi) ;
if (Listefermee.contains(voisi)==false)
{ String modesuivant=r.getMode() ;
long longueur=r.getCoutTarget() ;
if (modesuivant.equals("piéton")==true)
{
System.out.println(" le longueur "+longueur) ;
dureeexpl=pinalpieton+longueur/VitesseMache ;
distancemarche=distancemarche+longueur ;
if (r.getLienAcc()==true)
{
nbretransfert++ ;
}
}
if (modesuivant.equals("vehicule")==true)
{
dureeexpl=pinalvehicul+longueur/Vitessevehicule ;
}
if (modesuivant.equals("métro")==true)
{
dureeexpl=pinalarret+longueur/Vitessemetro+tempsattente ;
}
coutg=coutg+dureeexpl ;
int g = (int) Math.round(coutg) ;
tarrv=tarrv.plusMinutes(g) ;
double longitucor=Math.abs(r.getLongitudeTarget()-destination.getLongitude()) ;
double altitucor=Math.abs(r.getAltitudeTarget()-destination.getAltitude()) ;
couth=Math.sqrt(longitucor*longitucor+altitucor*altitucor) ;
coutf=coutg+couth ;
MembreLO pormembre= new MembreLO(voisi,coutf,courant) ;
if ( nbretransfert <= nbrmaxtransfert && distancemarche <= distanchemarchemax &&
!Listeouvert.contains(pormembre) )
{
```

```
System.out.println("noeud validé");
System.out.println("voisin "+voisi);
Listeouvert.add(pormembre);
if (minnode !=null && (pormembre.getcoutf()> minnode.getcoutf()))
{
minnode=pormembre;}
else if (minnode==null) { minnode=pormembre;}
}
}}
if (voisincourant.isEmpty()==true || minnode==null) {
boolean cont=false;
for(int t=0;t<Listeouvert.size();t++)
{ if (Listeouvert.get(t).getParent().equals(courantmem.getParent())==true)
{ courant=Listeouvert.get(t).getNode();
}}}
else {courantmem=minnode;
courant=courantmem.getNode();
Listefermee.add(courant);
dureeact=coutg+dureevisitePOI;
Listeouvert.remove(courantmem);
}}
else {
arriv=true;
traj=new Trajectoire(origine, destination , Listefermee);
r++;
Itineraire itin=new Itineraire(g,traj);
} }
return traj;
}
```

Annexe C

Règles de planification d'activité

La génération d'itinéraires a été effectuée à l'aide d'un système de règles permettant de planifier l'activité selon le cadre spatio-temporel et le profil de l'utilisateur. L'implémentation de ce système a été assurée par la plate-forme Drools. Les règles représentent les connaissances extraites à partir des données ENT.D. Nous représentons par la suite certaines règles :

- Les premières règles représentent les horaires de disponibilité des magasins et des restaurants :

```
xtbfrule« Temps de disponibilité de POI » when poi : POI (type==« restaurant ») then poi.disponible = «[12,14],[19,23]» end  
rule« Temps de disponibilité de POI » when poi : POI (type==« magasin ») and jour : Temps (jour==« Dimanche ») then poi.disponible = «[8,12]» end  
rule« Temps de disponibilité de POI » when poi : POI (type==« magasin ») and jour : Temps (jour==« Samedi ») then poi.disponible = «[9,18]» end
```

- La durée de visite d'un restaurant est définie par la règle suivante :

```
rule« Durée de disponibilité de POI » when poi : POI (type==« restaurant ») and age : Profil (age>=60) then poi.duree = «200» end  
rule« Durée de disponibilité de POI » when poi : POI (type==« restaurant ») and age : Profil (age >40, age<60) then poi.duree = «150» end
```

- La distance de marche a été étudiée dans le cadre de l'analyse des données ENT.D.

```
rule« Durée marche » when age : Profil (age >18 || age<40) then activite.dureeMarche = «75» end  
rule« Durée marche » when age : Profil (age >=60 ) then activite.dureeMarche = «15» end
```

Annexe D

L'acquisition des tweets

L'API Twitter a été utilisée en python pour collecter les tweets en temps réel. Nous avons fixé la France comme zone géographique de collecte.

```
from tweepy import StreamListener
import json, time, sys, unicodedata
class SListener(StreamListener) :
    def __init__(self, api = None, fprefix = 'twitter') :
        self.api = api or API()
        self.counter = 0
        self.fprefix = fprefix
        self.output = open('DATA/'+fprefix + '. '
                           + time.strftime('%Y%m%d-%H%M%S') + '.data', 'w')
        self.delout = open('delete.txt', 'a')
    def on_data(self, data) :
        if 'in_reply_to_status' in data :
            self.on_status(data)
        elif 'delete' in data :
            delete = json.loads(data)['delete']['status']
            if self.on_delete(delete['id'], delete['user_id']) is False :
                return False
        elif 'limit' in data :
            if self.on_limit(json.loads(data)['limit']['track']) is False :
                return False
```

```

        elif 'warning' in data :
            warning = json.loads(data)['warnings']
            print warning['message']
            return false

    def on_status(self, status) :
if json.loads(status)['coordinates'] :
if json.loads(status)['coordinates'] != "null" :
    texte = json.loads(status)['text']
        phrase= json.loads(status)['user']['screen_name']+" ;"+json.loads(status)
['created_at']+" ;"+texte+" ;"+json.loads(status)['user']['lang']+" ;"
        phrase+=str(json.loads(status)['coordinates']['coordinates'][0])+" ;"
"+str(json.loads(status)['coordinates']['coordinates'][1])
        self.counter += 1
self.output.write(phrase.encode('utf-8')+"\n")
        self.counter += 1
        if self.counter >= 20000 :
            self.output.close()
            self.output = open('DATA/'+self.fprefix + '.' +
                time.strftime('%Y%m%d-%H%M%S') + '.data', 'w')
            self.counter = 0
        return

    def on_delete(self, status_id, user_id) :
        self.delout.write( str(status_id) + "\n")
        return

    def on_limit(self, track) :
        sys.stderr.write(track + "\n")
        return

    def on_error(self, status_code) :
        sys.stderr.write('Error : ' + str(status\_code) + "\n")
        return False

    def on_timeout(self) :
        sys.stderr.write("Timeout, sleeping for 60 seconds...\n")
        time.sleep(60)
        return

from slistener import SListener

```

```
import time, tweepy, sys
consumer_key= *****
consumer_secret= *****
access_token= *****
access_token_secret= *****
auth = tweepy.OAuthHandler(consumer_key, consumer_secret)
auth.set_access_token(access_token, access_token_secret)
api = tweepy.API(auth)
def main() :
    locations = [-6.08,42.18,8.38,51.17]
    listen = SListener(api, 'twitter')
    stream = tweepy.Stream(auth, listen)
    print "Streaming started ..."
    try :
        stream.filter(locations=locations)
    except :
        print "error !"
        stream.disconnect()
if __name__ == '__main__' :
    main()
```

Annexe E

Résultats d'analyse spatiale classique

Dans le but d'évaluer l'approche proposée de la thèse, nous procédons à une analyse spatiale classique basée sur la syntaxe spatiale. Les opérateurs de syntaxe spatiale sont classiquement appliqués sur les réseaux structurels de la ville. Les résultats de cette analyse mettent en évidence les caractéristiques structurelles de réseau routier sans prendre en compte l'usage de l'espace. Une étude expérimentale est réalisée sur 16 villes de tailles différentes. Les données urbaines sont acquises à partir de la base de données OpenStreetMap.

Le réseau routier est conçu par une approche primaire classique qui consiste à représenter les intersections par les nœuds et les segments de rues par les arcs. Les réseaux sont analysés par l'application de trois opérateurs de centralité : la centralité d'intermédiaire, la centralité de proximité et le degré. Les valeurs de différents opérateurs associées aux villes étudiées sont illustrées dans la Figure ci-dessous. Une grande différence est remarquée entre les villes pour ce qui concerne la centralité d'intermédiaire. Cependant, les valeurs de centralité de proximité sont faibles avec une légère différence entre les villes. Par ailleurs, nous notons une corrélation entre les valeurs de centralité d'intermédiaire et le degré. Les villes caractérisées par des valeurs élevées sont Bastia, Toulouse, Boulogne-Billancourt, Rouen et Bayonne. Ces villes sont différentes de plusieurs points de vue (côtère/territoriale, taille, etc.). Les villes qui possèdent des valeurs faibles sont Aix-en-Provence, Brive-la-Gaillard, Montpellier et Strasbourg. Ces villes sont également différentes par rapport la taille et la localisation. Les résultats de cette étude appliquée sur les réseaux routiers ne révèlent pas nécessairement des caractéristiques pertinentes de la ville puisque le transport et les services ne sont pas pris en compte.

